

ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

生物多样性

BIODIVERSITY SCIENCE

中国国家公园试点专题



主办

中国科学院生物多样性委员会
中国植物学会
中国科学院植物研究所
中国科学院动物研究所
中国科学院微生物研究所

Biodiversity Committee, CAS
Botanical Society of China
Institute of Botany, CAS
Institute of Zoology, CAS
Institute of Microbiology, CAS

第29卷 第3期
2021年3月

Vol. 29 No. 3
March 2021

<https://www.biodiversity-science.net>

生物多样性

SHENGWU DUOYANGXING

第29卷 第3期 2021年3月

目次

中国国家公园试点专题

- 269 中国国家公园治理体系: 原则、目标与路径
杨锐
- 272 完善国家公园管理体制的建议
欧阳志云, 徐卫华, 臧振华
- 275 国家公园体制试点区生态产品价值实现探索
臧振华, 徐卫华, 欧阳志云
- 278 我国国家公园人类活动特征、管理问题与调整策略
彭奎
- 283 中国国家公园体制试点进展、问题及对策建议
李博炎, 朱彦鹏, 刘伟玮, 李爽, 付梦娣,
任月恒, 蔡譞, 李俊生
- 290 中国自然保护地整合优化关键问题
高吉喜, 刘晓曼, 周大庆, 马克平, 吴琼,
李广宇
- 295 东北虎豹国家公园试点经验
徐卫华, 臧振华, 杜傲, 欧阳志云
- 298 祁连山国家公园体制试点经验
金崑
- 301 三江源国家公园创建“五个一”管理模式
赵新全
- 304 三江源国家公园执法体制改革经验及其可复制性
苏红巧, 王楠, 苏杨
- 307 大熊猫国家公园体制试点的经验与挑战
李晟, 冯杰, 李彬彬, 吕植
- 312 神农架国家公园体制试点特色与建议
谢宗强, 申国珍
- 315 钱江源-百山祖国家公园试点经验与发展方向
申小莉, 李晟, 马克平
- 319 南山国家公园体制试点建设经验
曾晴, 雷光春
- 321 武夷山试点经验及改进建议: 南方集体林区
国家公园保护的困难和改革的出路
何思源, 苏杨
- 325 云南香格里拉普达措国家公园体制试点经验
杨宇明, 叶文, 孙鸿雁
- 328 海南热带雨林国家公园试点经验
龙文兴, 杜彦君, 洪小江, 臧润国, 杨琪,
薛荟

研究报告

动物多样性

- 331 太行山东北部哺乳动物区系及多样性
卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟,
鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥
- 340 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护?
黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞

- 351 盐地碱蓬盐沼与相邻泥质滩涂湿地迁徙期鸕鹚类的群落组成及行为差异

张菁, 白煜, 黄子强, 张正旺, 李东来

- 361 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉

微生物多样性

- 373 复合污染尾矿废水中真菌群落多样性及其驱动机制

刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明

生态系统多样性

- 385 黄海生态区保护空缺分析

曲方圆, 李淑芸, 赵林林, 杨松颖, 万铭扬, 蔡吕彤, 张朝晖

综述

- 394 中国纳入一级保护的极小种群野生植物濒危机制

姚志, 郭军, 金晨钟, 刘勇波

论坛

- 409 路径依赖下的物种形成机制

李敏岚, 王超, 王瑞武

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 29 No. 3 March 2021

CONTENTS

Special Feature: National Park Pilots of China

- 269 **National park governance system of China: Principles, vision and approaches**

Rui Yang

- 272 **Suggestions on improving the management system of national parks**

Zhiyun Ouyang, Weihua Xu and Zhenhua Zang

- 275 **Exploration on the value realization of ecological products in China's national park system pilots**

Zhenhua Zang, Weihua Xu and Zhiyun Ouyang

- 278 **Basic characteristics, management problems and adjusted strategies of human activities for China's national parks**

Kui Peng

- 283 **Pilot areas for national park system in China: Progress, problems and recommendations**

Boyan Li, Yanpeng Zhu, Weiwei Liu, Shuang Li, Mengdi Fu, Yueheng Ren, Xuan Cai and Junsheng Li

- 290 **Some opinions on the integration and optimization of natural protected areas in China**

Jixi Gao, Xiaoman Liu, Daqing Zhou, Keping Ma, Qiong Wu and Guangyu Li

- 295 **The experiences of Northeast China Tiger and Leopard National Park pilot**

Weihua Xu, Zhenhua Zang, Ao Du and Zhiyun Ouyang

- 298 **On the experiences of Qilian Mountain National Park system pilot**

Kun Jin

- 301 **The five integrative management strategies of Sanjiangyuan National Park**

Xinquan Zhao

- 304 **The experience and its reference study of law enforcement system of Sanjiangyuan National Park pilot**

Hongqiao Su, Nan Wang and Yang Su

- 307 **The Giant Panda National Park: Experiences and lessons learned from the pilot**

Sheng Li, Jie Feng, Binbin V. Li and Zhi Lü

- 312 **Distinguishing feature and suggestions of Shennongjia National Park system pilot**

Zongqiang Xie and Guozhen Shen

- 315 **Experiences of and suggestions for the development of the Qianjiangyuan-Baishanzu National Park pilot**

Xiaoli Shen, Sheng Li and Keping Ma

- 319 **The practice of Nanshan National Park system pilot**

Qing Zeng and Guangchun Lei

- 321 **Experience and improvement recommendations of Wuyishan National Park pilot: Difficulty and solutions in the reform of national park located in the collective forest area in South China**

Siyuan He and Yang Su

- 325 **Experience in the Pudacuo National Park system pilot in Shangri-La, Yunnan**

Yuming Yang, Wen Ye and Hongyan Sun

- 328 **The experiences of Hainan Tropical Rainforest National Park pilot**

Wenxing Long, Yanjun Du, Xiaojiang Hong, Runguo Zang, Qi Yang and Hui Xue

Original Papers

Animal Diversity

- 331 **Mammal fauna and biodiversity in the northeastern Taihang Mountains**

Xiangli Bu, Jing Wang, Jiayi Wu, Taifu Sun, Rongwei Xiang, Qingbin Lu, Yinghong Hao, Shaopeng Cui, Yan Sheng and Xiuxiang Meng

340 **How to best preserve the irreplaceable habitats of threatened birds in Beijing?**

Yue Huang, Yiyun Gu, Wenrui Yang and Cheng Wen

351 **Community composition and behavioral differences of migrating shorebirds between two habitats within a *Suaeda salsa* saltmarsh–mudflat wetland mosaics**

Jing Zhang, Yu Bai, Ziqiang Huang, Zhengwang Zhang and Donglai Li

361 **Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer**

Yang Zhao, Chengyi Niu, Xuejian Li, Haibo Liu, Guang Sun, Zunlan Luo and Yahui Zhao

Microbial Diversity

373 **Driving forces and the diversity of fungal communities in complex contaminated tailings drainage**

Jinxian Liu, Baofeng Chai and Zhengming Luo

Ecosystem Diversity

385 **Conservation gap analysis for the Yellow Sea Ecoregion**

Fangyuan Qu, Shuyun Li, Linlin Zhao, Chungwing Yeung, Mingyang Wan, Lyutong Cai and Zhaohui Zhang

Review

394 **Endangered mechanisms for the first-class protected Wild Plants with Extremely Small Populations in China**

Zhi Yao, Jun Guo, Chenzhong Jin and Yongbo Liu

Forum

409 **Path-dependent speciation in the process of evolution**

Minlan Li, Chao Wang and Ruiwu Wang

Cover Illustration: Since December 2015, China has set up ten national park pilots, such as Sanjiangyuan National Park pilot, Shennongjia National Park pilot, and Wuyishan National Park pilot. In this issue, 17 papers were published to summarize the experiences and strategies for the pilot construction. The picture shows *Polygonum sibiricum* and *Grus nigricollis* in Donggecuona Lake in the Sanjiangyuan National Park. (Photographed by Youchong Li)



•论坛• 中国国家公园试点专题

中国国家公园治理体系：原则、目标与路径

杨锐^{ID*}

清华大学国家公园研究院；清华大学建筑学院景观学系，北京 100084

杨锐 (2021) 中国国家公园治理体系：原则、目标与路径. 生物多样性, 29, 269–271. doi: 10.17520/biods.2021022.

Yang R (2021) National park governance system of China: Principles, vision and approaches. Biodiversity Science, 29, 269–271. doi: 10.17520/biods.2021022.

National park governance system of China: Principles, vision and approaches

Rui Yang^{ID*}

Institute for National Parks, Tsinghua University; Department of Landscape Architecture, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084

对于中国国家公园来讲，2020年是承前启后的一年。经过4年多的努力，三江源、祁连山、大熊猫、东北虎豹、海南热带雨林等10个国家公园体制试点告一段落，首个(批)国家公园预期将很快正式设立。正式设立后的国家公园如何治理？治理体系如何建构？治理目标如何设定？人、地、财、权、法等关键问题如何处理？如何走出一条具有中国国情特征、文化特征和制度特征的中国国家公园治理之路？如何实现中国国家公园治理体系和治理能力的现代化？本文抛砖引玉，就建立完善中国国家公园治理体系的原则、目标和路径，提出“以我为主，开放吸收；保护第一，人与天谐；全民共享，真善美生；中央事权，上下协动；财政专户，多元补充；一园一策，园警执法；地权包容，统规统管；社区共治，人融自然”的64字方针建议。作为一家之言，敬请批评指正。

1 治理体系构建原则

建议中国国家公园治理体系以“以我为主，开放吸收”为构建原则。

中华文明是世界上仅有的持续数千年未曾中断的文明。从秦朝就开始了中央政府设置国家保护地泰山的历史，当时设置的目的是“封天禅地”，

不是现代意义上的自然保护，但保护成效的确是卓著的。泰山于1987年成为我国首个世界自然和文化双遗产。“五岳”更是中国古代国土尺度保护地体系建设的典范，影响到日本和韩国。这种文化背景在世界上是罕有的，甚至可以说是绝无仅有的。中国国家公园治理所依托的制度框架——中国特色社会主义制度在世界上也是独一无二的。中国国家公园体制建设所处的时代背景“生态文明”叠加各种高新科技，也与大多数国家在工业文明时期建设国家公园的时代背景迥异。中国的国情条件——人口多，尤其是国家公园边界内人口的密集程度，以及土地权属的复杂程度也是世所罕见的。因此，我们必须坚持“以我为主”，根据自己的时代背景、制度优势、文化特征和国情条件，针对中国特有的问题和矛盾，创造性地构建中国国家公园治理体系，走出一条中国特色的国家公园治理之路。不能照猫画虎、照抄照搬国际经验。

“以我为主”并不意味着“封闭自守”，而是需要以“开放吸收”作为补充。中华文明是开放度、兼容度很高的文明，历史上来自印度的佛教、西方传教士带来的科学以及中国共产党带来的马克思主义经过本土化、中国化都成功融入中华文明。1978年开始的“改革开放”，更是深刻地改变了中国的历史

收稿日期: 2021-01-25; 接受日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51978365)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yru@tsinghua.edu.cn

进程,影响了现代中国和中国人的许多方面。因此在国家公园中国化的过程中,我们依然要秉持“开放吸收”的原则,充分学习世界国家公园运动一百多年的发展历史,认真了解世界其他国家国家公园治理经验、教训,应用生态学等多学科知识,掌握自然保护领域国际先进理念和适用性技术,与2020后生物多样性保护框架、气候变化国际目标接轨,建构中国特色的国家公园治理体系。在此过程中,也为世界国家公园运动抒写辉煌的中国篇章,贡献中国国家公园治理的独特智慧。

2 治理目标

建议中国国家公园治理目标为“保护第一,人与天谐;全民共享,真善美生”。

“生态保护第一、国家代表性、全民公益性”是建立中国国家公园体制的三大理念。“生态保护第一”与以美国为代表的西方国家国家公园治理目标有所区别。美国国家公园治理的首要目标有两个:自然保护和提供全民游憩机会。两个目标并列是受制于美国的政治制度和黄石国家公园建立时的历史条件。中国国家公园“生态保护第一”的理念是中国政府在“生态文明”历史时期,面对低效的自然保护局面、破碎化保护地空间分布以及“九龙治水”管理体制,力挽狂澜所做出的正确决策。既能够补偿中国长期在生态保护方面的历史欠账,更从根本上扭转了自然保护的被动局面。矫枉必须过正,在相当长的历史时期,我们必须坚持“保护第一”,直到自然保护理念深入人心,自然保护制度改革到位,自然保护态势不可逆转。但需要注意的是,“保护第一”并不是“保护唯一”。国家公园作为以百或者万平方公里为尺度的自然保护地,生态保护只可能是首要目标,而不是唯一目标。建议中国国家公园治理在“保护第一”前提下追求“人与天谐”。后者源自《管子》的“人与天调,然后天地之美生”,“谐”与“调”相比人工干预更少。也就是说,中国的国家公园应该在确保国家公园完整性和原真性保护的前提下,实事求是地直面中国的国情条件,发扬中国传统的整体性思维优势,进一步探索自然保护与社区生计有机融合的可能性。

“全民共享,真善美生”是中国国家公园治理的社会伦理和文化精神目标。“全民共享”意味着中国的国家公园是每个人的国家公园,属于全民、服务

于全民。公益性是其基本要求。每一个国民既是国家公园的受益者,也应为国家公园承担义务、做出贡献。“真善美生”是国家公园价值全面、充分、多层次、高水平的展现。国家公园是真、善、美的载体,是科学研究的基地、自然教育的天堂,志愿服务的热土、欣赏壮美自然的精神乐园。“原真性”“良善性”“壮美度”是国家公园的基本特征。其中,“壮美”又是各个国家、各个历史时期、各个方面对国家公园的普遍认识和期待。因此“壮美度”应该与生态原真性、完整性一起成为中国国家公园设立的必要条件,三者缺一不可。需要强调的是“壮美”是大美,不是“小美”;是“自然美”,不是“人工美”。

3 治理路径

中国国家公园治理体系的关键要素包括权(行政)、钱(财政)、法(法律)、地(土地)、人(社区)等5个方面。建议分别采用“中央事权,上下协调”“财政专户,多元补充”“一园一策,园警执法”“地权包容,统规统管”“社区共治,人融自然”的方针,改革优化行政体制,建立完善财政制度,强化实化立法执法,创新落实土地和社区管理模式,最终实现中国国家公园治理体系和治理能力现代化。

中央事权,上下协调:国家公园是国家的象征,是中华民族共同的自然遗产,中央政府理应在国家公园治理中承担首要责任。《建立国家公园体制总体方案》中清晰指出“国家公园内全民所有自然资源资产所有权由中央政府和省级政府分级行使,……。条件成熟时,逐步过渡到国家公园内全民所有自然资源资产所有权由中央政府直接行使”。毫无疑问,在这一点上需要坚定不移。现实问题是:第一,南部、东部甚至中部拟建国家公园内有超过50%甚至可能90%的集体林地,如何在集体所有的条件下实现“全民共享、世代传承”?第二,所有权、使用权和管理权之间是否可以分离?考虑到中国的制度优势,结合三江源、钱江源等试点经验,笔者建议中国国家公园治理在明确中央政府全民所有自然资源资产所有权的前提下,深入调研国家公园内各种权利权益关系及其影响,以实现“生态保护第一、国家代表性、全民公益性”为根本目标,进一步创新中央政府首要责任、各级政府上下协调、社会组织多方参与的中国国家公园高效治理体制。高效治理的前提是不断实化、强化中央政府国家公

园主管部门,让国家公园管理局从“括号”中走出来,成为名副其实的、强有力的国家公园和自然保护区治理枢纽,对上充分保障中央各项部署的贯彻落实,对下归口负责、管理监督国家公园和自然保护区的各项事宜,左右协调与其他部委的联系。

财政专户,多元补充:为落实中央政府国家公园治理的首要责任,以及中央政府委托省级人民政府治理的重要责任,有必要在中央和省两个层面设立国家公园财政专户,将不同渠道的国家公园政府资金统筹调配,既能为国家公园的有效治理提供财政保障,又能协调发挥政府资金的最大效益,减少浪费。需要强调的是,国家公园的财政投入应该以日常管理、保护监测和能力建设为主要方向,严控工程建设项目,避免不当基础设施投资可能造成的生态环境破坏。国家公园作为全民公益事业,应该鼓励公众、社会组织和企业的资金支持。建议中央、省和个体国家公园3个层面分别设立国家公园基金,严格监管,信息透明,广泛吸收各方捐赠。同时不断创新绿色投融资机制、完善特许经营制度,作为国家公园治理财政资金的多元补充。


一园一策,园警执法:法治建设是实现国家公园建设目标、协调各种复杂矛盾和利益关系、规范国家公园相关行为、保障国家公园治理体系和治理能力现代化的最为有力的工具。考虑到各个区域条件大不相同,每个国家公园也都需要解决很多个性化历史遗留问题,因此建议国家公园立法过程中应充分考虑这种差异性,在《国家公园法》的框架内,为每个个体国家公园制定管理条例或实施细则。没有强有力的执法队伍,法律只会成为缺少牙齿的老虎。因此执法队伍的建设与立法同等重要。我国的森林公安是最有条件转隶成为国家公园执法队伍的,很可惜现在的情况有些背道而驰。园警(国家公园警察, rangers)制度是国际上普遍的国家公园执法制度,很多园警具有生物学等专业背景,并配置枪支,英姿飒爽,既保证了法律的有效执行,威慑犯罪,也成为国家公园内一道亮丽的风景。建议在森林公安制度基础上,借鉴国外经验,建设中国国家公园警察制度。

地权包容,统规统管:国际上大多数国家公园

的土地属于中央政府或联邦政府所有。但我国国家公园地权情况复杂多样。从目前的10个试点来看,不同区域的国家公园土地所有权差异很大。从北到南、从西到东总体呈现国有土地逐渐减少,集体土地不断提升的特征。因此中国国家公园建设不可能排除集体土地尤其是集体林地,否则我国南部和东部将很难有机会建立国家公园,这将对生物多样性保护造成很大损失。建议综合采用适用性政策,例如赎买、保护地役权、保护协议等,将确有保护价值的集体所有土地纳入国家公园范围。但是前提有两个:统一规划,统一管理;允许与国家公园保护目标相兼容的土地利用形式存在。

社区共治,人融自然:对于中国国家公园来讲,社区治理不成功,国家公园治理就谈不上成功;而社区治理方面的任何成功经验,都可能成为具有世界意义的中国贡献。在试点评估验收中,笔者欣喜地看到,以三江源为代表的若干国家公园体制试点在社区治理方面设计了很多创新性制度,取得了意想不到的成就。例如生态管护“一户一岗”,帮助牧民从生态保护中受益脱贫。园内牧民因国家公园激发出强烈的自豪感,园外牧民迫切希望将所在社区纳入国家公园边界。国家公园对社区的这种吸引力、社区居民对国家公园的热爱和支持程度远远超出笔者的预期。一些保护组织在社区共管方面也做出了很多努力,取得了良好的成效。因此中国的国家公园治理有条件、有可能实现“社区共治,人融自然”的目标。“人融自然”是指在“保护第一”前提下,国家公园并不排斥环境容量范围内的社区居民,也不需要国家公园内的居民实行大规模的、强制性搬迁;而是需要在法律、制度和技术等方面,创造出国家公园内(或者国家公园内的部分区域)人与自然和谐共存的局面。国家公园内,人们尊重自然、热爱自然、守护自然;国家公园的完整性和原真性得以保存,并以其良好的生态系统服务回馈人类。

ORCID

杨锐  <https://orcid.org/0000-0001-6212-8753>

(责任编辑:徐卫华 责任编辑:周玉荣)



•论坛• 中国国家公园试点专题

完善国家公园管理体制的建议

欧阳志云^{ID*}, 徐卫华^{ID}, 臧振华^{ID}

中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

欧阳志云, 徐卫华, 臧振华 (2021) 完善国家公园管理体制的建议. 生物多样性, 29, 272–274. doi: 10.17520/biods.2021083.

Ouyang ZY, Xu WH, Zang ZH (2021) Suggestions on improving the management system of national parks. Biodiversity Science, 29, 272–274. doi: 10.17520/biods.2021083.

Suggestions on improving the management system of national parks

Zhiyun Ouyang^{ID*}, Weihua Xu^{ID}, Zhenhua Zang^{ID}

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

建立国家公园体制是习近平生态文明思想的重大理论和实践创新, 对于推进自然资源的科学保护和合理利用、促进人与自然和谐共生、推进美丽中国建设具有极其重要的意义。自2015年12月起, 我国陆续启动了三江源、神农架、武夷山等10个国家公园体制试点(唐芳林等, 2019; 臧振华等, 2020)。国家公园体制试点承担着破解我国自然保护地发展过程中存在的多头管理、权责不明、保护与发展矛盾突出等问题的重要使命。目前试点建设取得阶段性进展, 统一分级的管理体制初步建立, 保护力度持续加强, 社会参与有序扩大, 产生了较好的生态效益和社会效益, 但在管理体制机制、资金保障等方面存在一些较为突出的问题, 亟待进一步完善(黄宝荣等, 2018; 臧振华等, 2020)。

1 国家公园体制试点的主要举措与成效

(1)统一分级的管理体制初步建立。10个试点公园都建立了国家公园协调工作领导小组统筹推进公园建设, 编制了建设规划并得到批复, 开展了自然资源所有权划定和确权登记。10个试点区共整合各类原有自然保护地约150个, 基本实现了统一行使国家公园管理职责。

(2)资金投入有所加大。财政部将国家公园支出

纳入了林业草原生态保护恢复资金, 国家发展和改革委员会在“文化旅游提升工程”专项下为国家公园体制试点建设安排了中央预算内投资。国家公园试点区所在的省级和地方政府结合各试点的实施方案和本省情况, 持续增加国家公园建设和运行资金。试点以来, 10个试点区的中央财政投入累计达到60亿元。

(3)保护力度持续加强, 初显成效。10个试点区范围内的受保护面积在原有保护地基础上有大幅度增加。全方位、立体式的监测巡护体系初步建立, 管理信息化、智能化能力有较大提升, 违法破坏行为得到有效遏制(王天明等, 2020)。大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、东北虎(*Panthera tigris altaica*)、雪豹(*P. uncia*)、海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)等重点保护物种栖息地得到有效保护, 种群数量稳定或有所增加, 水源涵养等生态系统服务功能维持稳定或有所提升(Liu et al, 2020; Yang et al, 2020)。

(4)科技支撑得到加强。各试点区建立或共建国家公园科研机构20余个, 合作高校和科研院所单位达数十家, 科研成果已经开始应用于保护管理工作, 为国家公园的建设提供了有力支撑。同时, 宣传教育、社会志愿服务规模有序扩大, 国家公园理念深

收稿日期: 2021-03-08; 接受日期: 2021-03-10

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

入人心, 生态文明思想广为传播。

(5) 社会参与有序扩大, 民生得到改善。国家公园体制试点得到了各级政府和社会各界的高度重视。各试点区将国家公园建设与精准扶贫相结合, 充分考虑地区实际, 采用设置公益岗位、提高生态补偿标准、优化公共服务、扶持教育与就业等方式, 提高了国家公园及周边居民的收入。

2 面临的突出问题

国家公园体制试点是一种全新探索, 任务重、困难大, 尽管取得积极进展, 但在管理体制机制、资金保障等方面存在一些较为突出的问题, 亟待改进(黄宝荣等, 2018; 臧振华等, 2020)。

(1) 统筹协调机制不完善。一是区域协调机制尚未建立, 跨省的三个国家公园尽管建立了协调机制, 但仅限于各国家公园管理局与省级管理局层面的协调。由于协调机构的层级不够, 难以解决“一园多制”、工矿企业退出、生态搬迁等问题。二是省部之间协调机制不完善, 目前尽管国家林业和草原局国家公园管理办公室与10个试点区都建立了联络机制, 但仅有海南热带雨林试点区建立了省和国家局层面的协调机制, 其余9个试点区的协调机制处于各国家公园管理局与国家公园管理办公室层面。

(2) 资金保障机制不完善。首先, 资金投入机制未建立, 国家公园资金投入缺乏依据, 事权划分不明确, 中央和省级政府不清楚各自应承担的资金投入比例。其次, 国家公园资金来源分散。目前国家公园的建设资金来源于多个渠道, 包括国家发展和改革委员会中央预算内的文旅提升工程投资, 财政部的一般性转移支付和林业草原生态保护恢复资金, 以及省市地方配套资金等, 缺少国家公园建设的专项资金, 申报体系不成熟。第三, 财政资金投入不足。国家公园是我国自然生态系统中最重要、自然景观最独特、自然遗产最精华、生物多样性最富集的部分, 属于最严格的保护地类型。目前, 中央的支出力度与应承担的全民公益性资源保护责任不匹配。地方政府在实施严格保护的同时, 短期内没有形成新的绿色经济增长点, 财政收入受到一定影响, 难以承担工矿企业退出、生态搬迁等需要的大额资金。最后, 企业投资和社会捐赠等无法对财政进行有效补充。目前国家公园内自然资源利用方面的政策制度还不完善, 允许企业等社会力量以

何种方式参与国家公园经营等问题还没有达成共识, 国家公园管理机构、地方政府、企业等各方都存在各自的顾虑(黄宝荣等, 2018; 张海霞, 2018)。此外, 虽然公众捐赠比试点以前出现了突破, 但还未形成规模。

(3) 保护与发展矛盾依然突出。各国家公园试点区普遍位于经济相对落后地区。长期以来, 试点区内的居民生计与产业发展主要依赖于当地自然资源, 如何协调严格保护与可持续发展之间的关系, 是建立国家公园体制面临的巨大挑战(闫颜等, 2021)。目前, 试点区内约有常住人口40万人, 核心保护区内超过2万人没有退出, 三江源等试点区的核心保护区内还有较大规模放牧和游牧人口, 祁连山、大熊猫等试点区内存在较多工矿企业难以退出。仍有相当部分的群众认为划入国家公园后生产生活受到的限制与补偿力度之间并不匹配。此外, 试点区绿色产业还没有形成规模, 国家公园品牌价值没有充分体现, 生态产品价值实现机制还处于探索阶段。

3 建议

在国家公园体制试点已取得的经验和面临的突出问题基础上, 根据国家公园定位, 应统筹生态保护和经济社会发展、国家公园建设和保护地体系完善, 合力解决重点难点问题, 把国家公园建设提升至新的水平。

(1) 完善协调管理机制。建议按照国家机构改革职能划分, 调整完善国家公园体制建设领导小组, 建立健全统筹推进国家公园体制改革的领导体制和工作机制。建议由国务院主管领导担任国家公园体制建设领导小组组长, 在国家公园管理局设立领导小组办公室, 具体负责协调推进日常工作。健全各省和国家局、跨省之间的协调管理机制, 明确跨省国家公园的管理条例、三定方案等审批流程, 推动跨省联动和整体保护。明确国家公园管理机构、监督部门、各级地方政府之间的权责边界, 提高管理效率。

(2) 完善资金保障体系。建议加快研究国家公园的事权划分, 建立与事权相匹配的财政体制, 中央和省级人民政府根据事权划分承担各自建设与运行资金。建议定期开展国家公园管理有效性评估, 建立管理成效与资金投入挂钩的激励机制。各试点

区推广特许经营管理模式、加强宣传教育,吸引社会投资和社会捐赠。


(3)加强思想认识建设。建议加强生态文明思想和国家公园体制建设的学习、宣传、教育,形成人与自然和谐共生的理念,增强广大干部群众对保护自然重要性的意识,提升“给子孙后代留下珍贵的自然遗产”的责任感和使命感。制定合理有序的工矿企业、人口退出方案,东北虎豹、大熊猫等短期内难以退出的试点区设置过渡期,加强监管,通过以时间换空间来解决相关问题。

(4)建立生态产品价值实现机制。建议完善国家公园生态产品价值核算方法体系和生态补偿机制,合理确定生态补偿的范围、对象、标准、方式、绩效考核办法等,完善地区和流域之间的横向生态补偿机制。制定国家公园产业准入清单,挖掘国家公园品牌价值,探索生态产品价值实现路径,将生态优势、资源优势转化为经济优势,为实现“绿水青山”向“金山银山”的转化提供示范。

致谢:感谢国家林业和草原局国家公园管理办公室和各个国家公园体制试点区提供支持,本文部分资料来源于各试点区的评估验收报告,向报告编写人员致谢。

ORCID

欧阳志云  <https://orcid.org/0000-0003-0927-0499>

徐卫华  <https://orcid.org/0000-0001-7622-7365>

臧振华  <https://orcid.org/0000-0002-6643-9468>

参考文献

Huang BR, Wang Y, Su LY, Zhang CL, Cheng DW, Sun J, He SY (2018) Pilot programs for National Park system in China: Progress, problems and recommendations. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33, 768–775. (in Chinese with English abstract) [黄宝荣, 王毅, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 孙晶, 何思源 (2018) 我国国家公园体制试点的进

展、问题与对策建议. *中国科学院院刊*, 33, 76–85.]

Liu H, Ma HD, Cheyne SM, Turvey ST (2020) Recovery hopes for the world's rarest primate. *Science*, 368, 1074.

Tang FL, Yan Y, Liu WG (2019) Construction progress of National Park system in China. *Biodiversity Science*, 27, 123–127. (in Chinese with English abstract) [唐芳林, 闫颜, 刘文国 (2019) 我国国家公园体制建设进展. *生物多样性*, 27, 123–127.]

Wang TM, Feng LM, Yang HT, Bao L, Wang HF, Ge JP (2020) An introduction to Long-term Tiger-Leopard Observation Network based on camera traps in Northeast China. *Biodiversity Science*, 28, 1059–1066. (in Chinese with English abstract) [王天明, 冯利民, 杨海涛, 鲍蕾, 王红芳, 葛剑平 (2020) 东北虎豹生物多样性红外相机监测平台概述. *生物多样性*, 28, 1059–1066.]

Yan Y, Tang FL, Tian YC, Jin K (2021) On implementation path of the strictest conservation policies in National Park management. *Biodiversity Science*, 29, 123–128. (in Chinese with English abstract) [闫颜, 唐芳林, 田勇臣, 金崑 (2021) 国家公园最严格保护的实现路径. *生物多样性*, 29, 123–128.]

Yang B, Qin SY, Xu WS, Busch J, Yang XY, Gu XD, Yang ZS, Wang B, Dai Q, Xu Y (2020) Gap analysis of giant panda conservation as an example for planning China's National Park system. *Current Biology*, 30, 1287–1291.

Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's National Park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]

Zhang HX (2018) Research on Concession Mechanisms for Commercial Services in China's National Parks. China Environment Publishing Group, Beijing. (in Chinese) [张海霞 (2018) 中国国家公园特许经营机制研究. 中国环境出版集团, 北京.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 中国国家公园试点专题

国家公园体制试点区生态产品价值实现探索

臧振华^{ID}, 徐卫华^{ID*}, 欧阳志云^{ID}

中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

臧振华, 徐卫华, 欧阳志云 (2021) 国家公园体制试点区生态产品价值实现探索. 生物多样性, 29, 275–277. doi: 10.17520/biods.2021084.

Zang ZH, Xu WH, Ouyang ZY (2021) Exploration on the value realization of ecological products in China's national park system pilots. Biodiversity Science, 29, 275–277. doi: 10.17520/biods.2021084.

Exploration on the value realization of ecological products in China's national park system pilots

Zhenhua Zang^{ID}, Weihua Xu^{ID*}, Zhiyun Ouyang^{ID}

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

自然对人类生存和良好的生活质量至关重要。自然生态系统不仅为人类提供食品、药材、能源等物质产品, 还提供水源涵养、气候调节、水土保持、防风固沙等调节服务产品, 以及休闲旅游、美学体验等文化服务产品(Ouyang et al, 2020)。但由于清洁的空气、干净的水等生态产品大多属于公共产品, 具有外部性, 难以分清具体的权利人和受益者, 因此难以仅依靠市场机制实现资源优化配置。生态产品价值实现就是通过多种政策工具干预使生态产品的价值得以真实反映, 通过已有或新建交易机制进行交易, 解决外部性问题(高晓龙等, 2020)。建立生态产品价值实现机制, 对于践行“绿水青山就是金山银山”理念、推进生态文明建设具有重大意义。

国家公园是我国自然生态系统中最重要、自然景观最独特、自然遗产最精华、生物多样性最富集的部分, 拥有我国最宝贵的自然资源, 国民认同度高, 开展生态产品价值实现机制探索具有得天独厚的优势。截至目前, 我国共建立了东北虎豹、祁连山、大熊猫等10个国家公园试点区(臧振华等, 2020), 各试点区都组建了统一的国家公园管理机构, 在实施严格保护的同时, 也积极探索生态产品价值实现路径, 开展“绿水青山”向“金山银山”转化的实践。

1 推进纵向生态补偿

国家公园全面实施天然林保护、退耕还林、森林生态效益补偿等国家重点生态工程, 财政投资稳步增加。试点以来, 中央层面专门安排国家公园支出近60亿元, 试点区普遍扩大国家公园内的生态补偿范围、提高补偿标准, 凸显国家公园的重要生态价值。武夷山试点区对生态公益林按照每亩比区外多3元的标准进行补偿, 对天然乔木商品林按每年每亩20元的标准给予停伐补助, 并且从2020年开始连续3年每年每亩增加2元; 南山试点区实施公益林扩面工程, 将符合条件的商品林纳入公益林和天保林管理范畴, 通过租赁实施经营权流转, 提高集体公益林和集体天保林补偿标准, 分别由每亩每年15.5元和13.5元提高到30元, 截至2020年8月, 已兑付流转补偿提标3,058户22.84万亩。

2 开展横向生态补偿

国家公园多处于大江大河源头, 或者是重要的生态安全屏障, 部分试点省开展跨区域的横向生态补偿试点, 体现了“谁受益、谁补偿”的公平发展原则, 激励地方政府保护生态环境。海南省编制并执

收稿日期: 2021-03-08; 接受日期: 2021-03-10

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xuweihua@rcees.ac.cn

行《海南省流域上下游横向生态补偿实施方案(试行)》，以热带雨林国家公园涉及的五指山市、昌江县、琼中县、保亭县、白沙县为试点，签署流域上下游横向生态保护补偿协议，初步建立流域上下游横向生态保护补偿机制。根据2019年流域上下游横向生态保护补偿试点的断面水质季度考核和年度考核结果，五指山市、琼中县、保亭县和白沙县4个上游市县共获得2,304万元省级奖补资金。甘肃省2020年印发《关于加快推进祁连山地区黑河石羊河流域上下游横向生态保护补偿试点的通知》，祁连山国家公园涉及的肃南县等为实施黑河流域上下游横向生态保护补偿工作的责任主体。除签署协议规定的补偿方式和标准外，为激励流域所在县区开展试点，甘肃省财政厅和生态环境厅对符合考核相关要求的县区予以奖励，每个县3年累计奖励可达1,000万元。

3 设立公益岗位

国家公园增设公益岗位妥善安置当地居民和森工企业职工，既提高了自然资源保护效率，又促进当地居民增收，维护了社会稳定。三江源试点区整合草地管护员、护林员、湿地管护员及扶贫专项资金，建立生态管护公益岗位机制，将管护标准从原来的每5万亩设置1名管护员提高到每3万亩设置1名管护员，每名管护员月工资从1,500元提高到1,800元，按照“一户一岗”落实生态管护员岗位17,211个。大熊猫试点区各级管理机构共设置公益岗位13,278个，其中生态管护岗位10,777个、社会服务岗位2,501个，原住民参与数量11,990人，占比达到90.3%，生态管护公益岗位工资支出达7.38亿元，每人年均获得工资性收入18,555元。

4 非国有自然资源统一管理

集体林地占比高的国家公园试点区采取赎买、租赁、签订保护协议等方式，通过合理补偿，既保障林农利益，又推动了国家公园管理局对非国有自然资源的统一管理，缓解了社区发展与生态保护之间的矛盾(秦天宝, 2019)。钱江源-百山祖试点区的集体土地占比超过80%，为实现对自然资源资产的集中统一管理，两园区创新推进了地役权改革。在不改变森林、林木、林地权属的基础上，先由农户或村民小组自行委托村民委员会管理，再由村民代

表大会集体表决形成决议，将管理权统一授予钱江源国家公园管理局，明确约定权利义务，通过一定的经济生态补偿限制权属所有者的行为(王宇飞等, 2019)。集体林地地役权生态补偿标准为每亩每年48.2元，纳入省财政预算，随省公益林生态补偿金的生长同步增长。通过实施地役权改革，试点区内集体土地几乎全部实现统一管理，居民年均增收400元以上。百山祖园区在推进地役权改革的同时，创新林地地役权补偿收益权质押贷款机制，集体林地的权利人可以将地役权补偿收益作为质押担保向农商银行贷款，贷款额度最高可达年度林地地役权补偿收益的20倍，期限最长为5年。2020年8月，首批符合条件的10名村民代表分别获得了20–30万元不等的贷款授信金额，授信金额共计250万元。

5 发展生态旅游

国家公园采取特许经营方式发展生态旅游，用极小面积的非资源消耗型发展换取了大面积的保护。普达措国家公园管理机构通过签订生态补偿协议，对集体土地实行统一管理。国家公园管理机构将景区运营特许给国有独资企业普达措旅业分公司，旅游公司利用资源为游客提供游憩体验获得收益，每年从收益中拿出1,690余万元资金对3,696名社区居民实施直接经济补偿。此外，国家公园管理机构将经营摊位特许给当地居民开展土特产售卖等经营服务活动，当地居民还可通过资源入股形式获得分红，通过参与巡护、环卫、交通、解说、项目建设等服务获得劳动报酬。武夷山试点区创新景观资源有偿利用机制，国家公园管理局与主景区7万余亩集体山林所有者协商，按照景区门票收入及商定的基数向林地所有者支付报酬。试点以来平均每年支付319万元，既解决生态游憩发展瓶颈，又保障村民利益，实现生态成果与旅游收益共享。

6 打造优质品牌




国家公园依托生态环境优势，打造优质品牌，吸引对生态产品敏感的消费者和企业，获得溢价收益。东北虎豹试点区大力发展绿色循环经济，推动产业转型，东宁市鼓励发展黑木耳、山野菜种植等原生态林产品产业，利用龙头企业吸纳原有森工企业职工及贫困户，先后创建“绥阳耳”“双椴子”等多个著名商标，生态优势转化成了经济优势。大熊猫

试点区四川片区与世界自然基金会(WWF)合作,由WWF发布“大熊猫友好型认证标准”,符合相关要求的农产品将获得认证。产自平武县的中草药南五味子(*Schisandra sphenanthera*)成为全球首个通过该标准认证的产品,已销往美国,带动当地居民增收。此外,在大熊猫国家公园内和入口社区开展“蚂蚁森林”公益保护地试点,借助支付宝移动互联网平台,推出“关坝”和“福寿”2个公益保护地,引导社会公众在手机支付宝中认领保护地,获得的社会资金用于支持生态保护与绿色发展。武夷山试点区出台农药化肥使用管理规定,严厉打击毁林种茶等破坏行为,鼓励和引导茶企、茶农按标准建设生态茶园,指导开展地理标志申报和绿色认证,通过市场营销,武夷岩茶和正山小种等已形成良好的品牌效应,产生了可观的经济价值。武夷山试点区周边的“朱熹故里”五夫镇,利用“双世遗”品牌,创新“文化生态银行”模式,将闲散的山、水、林、田、民居等资源整合成资产包向市场招商,成功推出了一系列生态文旅项目,实现村集体和企业双赢。

总体而言,国家公园体制试点牢固树立人与自然和谐共生的思想意识,积极探索生态产品价值实现路径,为建立生态产品价值实现机制积累了有益经验。但是,目前国家公园的生态产品价值实现的资金来源中,政府付费占绝对主体,公众付费、公益组织付费的案例较少、占比很低。国家公园内的自然资源有偿使用制度还不完善,特许经营还不规范,生态产品的市场和交易体系还不健全,企业参与程度低,公民自然保护教育还处于初级阶段,影响了生态产品价值实现。未来,国家层面应继续完善国家公园等自然保护地的政策制度体系,为企业等社会资本参与国家公园内及其周边产业的发展指明方向。国家公园管理机构和相关地方政府需进一步健全协调机制,吸引多方资金和技术支持,完善生态产品价值核算体系,优化市场配置,加强监管与引导,将宝贵的自然资源转化为市场竞争力,促进生态产品价值实现(高晓龙等,2019)。只有充分调动国家公园所在的地方政府、社区居民、企业等多方积极性,确保利益相关方在保护生态环境、提供生态产品的同时不吃亏、有收益,在破坏生态环境、消费生态产品的同时要赔偿、需付费,才能真正可持续地实现国家公园的生态产品价值。

致谢: 感谢国家公园管理局办公室和各国家公园体制试点区提供支持; 本文部分资料来源于各试点区的评估验收报告, 向报告编写人员致谢。

ORCID

臧振华  <https://orcid.org/0000-0002-6643-9468>
徐卫华  <https://orcid.org/0000-0001-7622-7365>
欧阳志云  <https://orcid.org/0000-0003-0927-0499>

参考文献

- Gao XL, Cheng HQ, Zheng H, Ouyang ZY (2019) Research on the policy instruments for the value realization of ecological products. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 8746–8754. (in Chinese with English abstract) [高晓龙, 程会强, 郑华, 欧阳志云 (2019) 生态产品价值实现的政策工具探究. *生态学报*, 39, 8746–8754.]
- Gao XL, Lin YQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Research progress on the value realization of ecological products. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 24–33. (in Chinese with English abstract) [高晓龙, 林亦晴, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 生态产品价值实现研究进展. *生态学报*, 40, 24–33.]
- Ouyang ZY, Song CS, Zheng H, Polasky S, Xiao Y, Bateman JJ, Liu JG, Ruckelshaus M, Shi FQ, Xiao Y, Xu WH, Zou ZY, Daily GC (2020) Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 117, 14593–14601.
- Qin TB (2019) The realization of state-owned land as dominating land in National Park: A perspective of easement. *Modern Law Science*, 41(3), 55–68. (in Chinese with English abstract) [秦天宝 (2019) 论国家公园国有土地占主体地位的实现路径——以地役权为核心的考察. *现代法学*, 41(3), 55–68.]
- Wang YF, Su HQ, Zhao XR, Su Y, Luo M (2019) Conservation easement-inspired adaptive management methods for natural protected areas: A case study on Qianjiangyuan National Park pilot. *Biodiversity Science*, 27, 88–96. (in Chinese with English abstract) [王宇飞, 苏红巧, 赵鑫蕊, 苏杨, 罗敏 (2019) 基于保护地役权的自然保护地适应性管理方法探讨: 以钱江源国家公园体制试点区为例. *生物多样性*, 27, 88–96.]
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's National Park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点区的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 中国国家公园试点专题

我国国家公园人类活动特征、管理问题与调整策略

彭奎*

永续全球环境研究所, 北京 100086

彭奎 (2021) 我国国家公园人类活动特征、管理问题与调整策略. 生物多样性, 29, 278–282. doi: 10.17520/biods.2021065.

Peng K (2021) Basic characteristics, management problems and adjusted strategies of human activities for China's national parks. Biodiversity Science, 29, 278–282. doi: 10.17520/biods.2021065.

Basic characteristics, management problems and adjusted strategies of human activities for China's national parks

Kui Peng*

Global Environmental Institute, Beijing 100086

在现代自然保护与经济开发的历史关系中, 人类活动总是处于关键角色和矛盾焦点。早期将人隔离在自然系统之外的堡垒保护 (fortress conservation) 逐步被更加包容的保护所替代, 尤其是纳入地方社区在生物多样性保护中的角色和作用 (Berkes, 2007; Garnett et al, 2018; Rai et al, 2021)。管理保护地人类活动并实现可持续发展, 成为全球自然保护共同面临的巨大挑战。我国国家公园的首要功能是重要自然生态系统的原真性、完整性保护, 但同时强调要兼具科研、教育、游憩等综合功能, 这必然涉及到监测保护、科研教育、游憩体验和社区发展等多样化的人类活动。把握我国国家公园人类活动特征, 平衡人类活动的范围、方式和强度, 是实现国家公园“全民共享、世代传承”的重大任务。本文从试点国家公园人类活动主要特征出发, 探讨我国试点国家公园重要人类活动的管理和存在问题, 并提出相应调整策略, 以为国家公园的制度设计及建设实践提供参考。

1 我国试点国家公园人类活动基本特征

在长期农牧生产生活和快速经济发展的双重作用下, 我国国家公园内的人类活动十分复杂。根据人类活动的主体, 笔者将其简化为三大类型: 社区活动、管理活动和外部访客活动。概括而言, 我

国国家公园人类活动有以下几个鲜明共性:

(1) 社区人口密度较高且总量大, 人类活动分散。我国国家公园保护范围大, 永久性居民较多。除了青藏高原的两个试点区人口密度较低之外, 其余8个国家公园人口密度较大(指国家公园涉及社区的户籍人口数, 不包括非常住人口数), 尤其是东部, 均远超加拿大和澳大利亚的平均人口密度。大量分散的社区人为活动使国家公园的保护及管理面临巨大压力。再加上国家公园区域较为偏远, 经济相对落后, 因而社区的经济发展又必须成为国家公园建设的主要目标之一。

(2) 生产生活空间与保护空间交错重叠, 人类活动对自然资源的依赖程度高。我国国家公园试点均以自然保护地为基础, 同当地居民的村落、农田、牧场以及集体山林等生产和生活空间有大量交错重叠(徐网谷等, 2016), 人类活动的自然资源依赖程度强, 多数产业以传统的小农种植或畜牧业为主且会长期存在。三江源和祁连山传统草原畜牧业、武夷山的茶叶种植、东北虎豹的林副业、钱江源的果园茶园等, 部分深入分散在核心区内; 一些国家公园的传统旅游产业也利用园区内的核心景观, 这与国外国家公园的建设基础有很大差异(高燕等, 2017)。

(3) 基层生态保护和监管执法活动主要依靠地

收稿日期: 2021-02-25; 接受日期: 2021-03-10

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: kuipeng@geichina.org

方行政系统和原住民开展。基层管理和巡护体系很大程度上依赖地方政府职能部门; 基层巡护执法人员来自公园及其毗邻区原住民, 而不是建立一个独立或垂直的管理和巡护员(ranger)体系, 这充分考虑了我国的国情, 但执法体系需要更多地处理并协调与地方的关系(臧振华等, 2020)。如武夷山基层管理站站长由所在地乡(镇)长兼任; 三江源国家公园生态管护公益岗位“一户一岗”全覆盖, 并组建了乡镇管护站、村级管护队和管护小分队; 多数试点将专业岗位与转产脱贫挂钩, 承担了双重任务。

(4) 访客活动以普通观光旅游为主, 自然体验和环境教育刚刚起步。各试点均是依托自然保护区、森林公园、地质公园、风景名胜区等整合而成, 有的原本就是著名的观光旅游胜地, 如普达措、神农架、武夷山等, 以接待普通观光旅游为目的曾进行过较大规模的设施建设, 与国家公园以自然保护、自然体验和教育为主要目的的公益性服务不完全一致。仅有三江源等少数试点在小范围内开展自然体验探索; 国内试点的国家公园环境教育也仅是针对学校学生的宣传式教育。

2 我国国家公园人类活动管理及主要问题

结合我国国家公园的人类活动特点, 各试点开展了一些针对性的管理改革和实践, 但仍面临一些关键问题和挑战。

(1) 科学规划并制定地方政策来规范行为, 但制度设计的统一性不足。各试点通过国家公园总体规划、专项规划、管理条例和其他专项管理办法来规范管理社区居民、访客和运营等特殊人为活动。但由于缺少中央层面对各方面制度设计的统一要求和指导细则, 各地对自然体验、社区安排等管理的设计宽严尺度各异, 更多强调地方的特殊性, 甚至同一试点不同片区会出台不同的管理办法, 如国家公园各不相同的设施标准; 改革出现“国家公园地方化”倾向, 有的已偏离了国家公园全民共享的宗旨。个别地方沿用景区传统经营模式, 将旅游和体验服务项目整体打包给相关企业长期经营, 与公益目标的特许经营本质产生了一定偏离。

(2) 用管控分区划分人类活动范围和类型, 规划粗放, 操作难度大。试点实行差别化的分区管控, 将自然保护区“三区法”统一调整为保护区和一

般控制区的“两区法”, 有利于保持自然系统的完整性。但两区法沿用了简单的大块分区思路, 核心区占比大且连片, 未能充分考虑我国国家公园人类活动历史和功能需要。这一方面使所有的核心保护区内都仍然存在交通道路、景点、牧场和农田等, “禁止人为活动”仍无法真正落地; 另一方面使核心区重要景观资源成为严格保护的對象, 如黄河源的两湖与牛头碑、普达措的碧塔海、祁连山的岗什卡雪峰等, 试点不得不暂停或禁止在这些区域开展任何活动, 使国家公园包括自然体验和环境教育的“全民共享”失去了重要载体。

(3) 采用移民方式降低人类活动强度, 但弱化了本土传统知识和文化的作用。各试点通过生态移民减少以至消除核心区人口, 以达到降低人为活动的要求。我国国家公园内自然与农牧生产形成了许多相对平衡的耦合系统, 某些区域禁止人为活动不但难以实现更好的保护, 反而会对一些生态系统和物种产生负面影响。比如高原传统游牧有利于保持草原生态系统的健康(Li, 2017), 秦岭传统的稻田耕作使朱鹮(*Nipponia nippon*)等珍稀鸟类获得稳定食物(Berkes, 2007), 一些传统知识和文化与自然相融(如藏区圣境文化), 往往是其丰富的生物多样性得以保存至今的原因(彭奎, 2020a)。试图消除这些人为活动而制造“无人区”, 可能会同时弱化和消除社区生态智慧、价值观和能力, 并打破由此产生的人与自然系统平衡态, 使保护事倍功半。

(4) 严格控制外部访客, 国民体验和服务形式化。各地均重点实施严格生态保护, 而为全社会提供科研、教育、体验、游憩等“公共服务”涉及较少。地方囿于公共服务利益牵扯多、改革难度大、风险高而严控访客, 将建设访客中心、科普馆等硬件设施作为任务和成果, 而支撑全民体验活动所必需的线路营地系统、课程体系、标识和解说系统、服务人才、访客管理监测评估等软环境建设十分缺乏。许多重要景点均处于关闭或半关闭状态, 地方经济也受到较大影响, 一定程度上动摇了国家公园在国民心目中的认同感。

(5) 强化政府主导管理, 社区及社会资源未能得到较好动员。国家公园是全民公益事业, 在坚持由国家确立并主导管理前提下, 需要全社会参与共建才能取得成功。但各试点强化了政府的主导地位,

管理仍依赖单一行政力量,社区、企业、民间机构和公众等社会力量很少参与管理运行活动。作为重要利益相关者的社区多扮演被动服务角色,而未在制度上明确社区参与管理、协商、决策和监督的权责利(何思源, 2020); 没有建立具中国国家公园统一形象品牌的志愿者服务及配套体系,使公众缺少服务国家公园的热情; 缺少民间机构和企业参与国家公园保护管理的保障激励机制,难以调动多渠道、市场化的专业力量和强大的资源动员能力。

3 改进国家公园人类活动管理策略的建议

3.1 强化国家公园人类活动管理的一致性

国家公园的首要目标是要建成统一规范高效的中国特色国家公园体制,无论是中央直接管理,还是委托管理,都要求全国的国家公园在体制、规范、标准、资金和评估等基本规则上保持一致,使国家公园建设坚持“国家所有”(国有而非地方财产)、“全民共享”(国民公共利益而非地方牟利)和“国家主导”(国家确立并主导管理)的正确方向。因此,首先需要在有关社区活动、访客活动和运营活动等人类活动管理方面,强化全国一致的精神理念、指导原则、主体框架、核心内容和基础标准等,使人类活动不会损害我国国家公园生态保护第一的目标; 其次,总结试点和国际经验教训,在游憩体验、自然教育、特许经营、社会参与、志愿者服务、标识和品牌系统等方面,国家公园管理局出台统一的制度建设指南,作为试点国家公园完善制度和国家公园设立的基本要求,从而避免国家公园“地方化”和“逐利化”,体现国家利益,彰显国家形象,取得国民高度认同。

3.2 科学调整并细化国家公园管控分区

首先,调整国家公园管控分区,为人类活动划定合理的边界。对国家公园“两区”范围进行更科学细致的研究,以保证生态系统及生态过程完整性为前提,建议将被划入核心区的、不会影响保护目标的、且会长期存在的已有交通道路、自然村落、基础设施以及能为公众提供良好环境教育和自然体验的非敏感性景观资源调整为一般控制区。使环境教育和生态体验线路与核心保护区有机镶嵌而非截然分离,促进公众能够亲近并了解国家公园壮美的自然与文化,也使社区传统智慧继续发挥作

用,同时满足原住民和访客的福祉。

其次,对人类活动实施精细化管理,对“两区”实施更科学的功能分区,规范人类活动类型及强度,并分别制定严格的监测监管措施。在核心保护区,可以分为严格保育区(禁止除保护所需的监测巡护之外的所有人为活动)、生态保育修复区(可以开展批准的以自然修复为主的生态修复及科学研究活动)、传统协同保育区(允许保留有利于促进生态保护的传统生产生活方式及生态文化活动)等功能区; 在一般控制区,可以分为传统生产生活区(在环境容量之下的传统的生态友好型生产生活区)、人工生态修复区(需要工程措施进行生态修复和廊道建设的区域)、大众游憩体验区(普通公众体验自然的环境教育场所和开展相关生态旅游等活动的区域)、特殊生态体验区(提供更深度和小众的徒步、科考探险、文化和自然游学等的线路产品,满足多层次需求,严格控制人数)。

基于管控分区和功能分区,结合现代科技实施差别化精细化管理,是符合我国国情的国家公园管理的必然要求。

3.3 明确原住民社区继续存在的形式和权利

社区能否成为国家公园建设的主要参与者并获得可持续发展,是我国国家公园改革能否成功的核心标志之一(彭奎, 2020b)。建议: (1)建立健全国家公园内及周边原住民社区存续的相关制度,明确在国家公园核心区和一般控制区以及各功能区中各原住民社区的功能定位、规模、位置、边界,以此规范和引导社区的人口发展、基础建设和生产生活边界; (2)认可原住民传统智慧对生态保护的地位和作用,通过科学评估和共同协商,用制度和规范确立原住民可以继续生产生活活动的区域、形式、规模、强度和风格,使社区存续和发展有据可依; (3)在特许经营、公益岗位、特色产业、生态补偿等方面,设定有利于社区获益的政策,保障社区成为国家公园建设的直接受益者; (4)充分尊重原住民参与国家公园保护的主体权利,明确社区在国家公园建设运营中组织、决策、管理、服务、监督等各个环节的参与权利和方式,与社区建立固定协商机制和共同决策机制,并用法律形式予以确立。

3.4 开放授权社会参与生态保护和专业服务

一方面,要充分激发全社会共建国家公园热情

和动能。(1)在生态保护和自然教育方面,参考国际上成功的保护地役权方式(魏钰等,2019),结合中国土地产权实际情况,建议在国家公园部分区域(如集体林地)试点设置保护权(conservation concession),使其成为与土地所有权、承包权和经营权之外的土地分置权利之一,并通过社区共管、协议保护、委托保护等方式,将保护权开放授权给具有保护意愿和能力的社区、公益组织、企业等社会主体开展保护和自然教育活动(廖凌云等,2017;彭奎,2020a);(2)通过捐赠减税、绿色债券、公园基金等机制调动激发社会的资金、技术和人才贡献于国家公园保护和自然教育等公共服务,促进保护手段的多样化和有效性。

另一方面,要加快构建统一的国家公园特许经营体系。特许经营作为国家公园最主要的商业服务形式,受到各方高度关注(陈朋和张朝枝,2019;赵智聪等,2020)。特许经营设立标准各异、经营类型和范围笼统模糊、招标审查不透明、评估监管机制不健全是目前各试点国家公园的普遍问题。为了保证特许经营服务国家公园保护的总体目标,避免公园价值受到损害,建议由国家公园管理局制定统一特许经营管理法规和细则,并统一(授权)发放和管理特许经营合同,对特许经营项目类型、范围、年限、利益分配、社区参与以及合同监督管理相关内容做出详细规定,使其既承担为访客提供必要而适当的公共食宿、基础设施和服务的主要任务,又承担起服务全民获得高品质自然体验、认知和教育的独特使命,还是地方获取收益的重要渠道。避免国家公园特许经营沦为商业垄断经营或成为特殊群体牟利的工具。

3.5 发展创新的生态服务经济体系

国家公园作为我国最重要的自然保护地,是我国生态文明和美丽中国建设的前沿阵地,应该成为解决保护与发展之间矛盾的先行示范区。建议在国家公园及其周边发展围绕生态系统服务的新型“经济特区”,即探索自然保护地生态产品价值的形成、转化和实现的路径,发展以保障人类生态安全为目标、维护和提升生态系统服务功能产出价值的生态服务型经济体系(葛剑平和孙晓鹏,2012;仇焕广等,2020)。其核心是将生态系统服务功能价值融入到社会的主流价值体系中,用人类普遍遵循的

价值规律来引导和影响全社会的保护与发展活动,使国家公园管理运行及当地经济发展能获得持续的、新的经济支持和保障(彭奎,2020b)。发展国家公园生态服务经济,以政府为主体将生态补偿机制变成生态服务型经济的政策激励机制;构建以社区、社会企业、社会组织和科研机构组成的生态服务型经济支持系统;促进生态服务型经济体系与主流的市场经济体系链接起来,使其融入整个社会的经济体系之中,实现保护的主流化。

致谢:本研究得到中国绿色碳汇基金会、祁连山国家公园青海省管理局和青海省林业和草原局科学技术与对外合作处等机构支持,张冀强博士、金嘉满女士、王毅研究员、马克平研究员、王思光先生和张莉女士等给予了指导帮助,在此一并致谢。

参考文献

- Berkes F (2007) Community-based conservation in a globalized world. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 15188–15193.
- Chen P, Zhang CZ (2019) National park concession: International comparison and enlightenment. *Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences)*, 18(1), 80–87. (in Chinese with English abstract) [陈朋,张朝枝(2019)国家公园的特许经营:国际比较与借鉴.北京林业大学学报(社会科学版),18(1),80–87.]
- Gao Y, Deng Y, Zhang H, Wang JY, Liang B (2017) Community conflicts of the National Park overseas: Performance, tracing origins and enlightenment. *Tourism Tribune*, 32(1), 111–122. (in Chinese with English abstract) [高燕,邓毅,张浩,王建英,梁滨(2017)境外国家公园社区管理冲突:表现、溯源及启示.旅游学刊,32(1),111–122.]
- Garnett ST, Burgess ND, Fa JE, Fernández-Llamazares Á, Molnár Z, Robinson CJ, Watson JEM, Zander KK, Austin B, Brondizio ES, Collier NF, Duncan T, Ellis E, Geyle H, Jackson MV, Jonas H, Malmer P, McGowan B, Sivongxay A, Leiper I (2018) A spatial overview of the global importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*, 1, 369–374.
- Ge JP, Sun XP (2012) The theory and practice of economy in eco-service type. *Journal of Xinjiang Normal University (Edition of Philosophy and Social Sciences)*, 33(4), 7–15, 118. (in Chinese with English abstract) [葛剑平,孙晓鹏(2012)生态服务型经济的理论与实践.新疆师范大学学报(哲学社会科学版),33(4),7–15,118.]
- He SY, Wei Y, Su Y, Min QW (2020) Guaranteeing fair and

- sustainable benefit sharing for communities in the National Park: A study from perception of meanings of social-ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 2450–2462. (in Chinese with English abstract) [何思源, 魏钰, 苏杨, 闵庆文 (2020) 保障国家公园体制试点区社区居民利益分享的公平与可持续性——基于社会-生态系统意义认知的研究. *生态学报*, 40, 2450–2462.]
- Li L, Fassnacht FE, Storch I, Bürgi M (2017) Land-use regime shift triggered the recent degradation of alpine pastures in Nyanpo Yutse of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Landscape Ecology*, 32, 2187–2203.
- Liao LY, Zhao ZC, Yang R (2017) Model analysis of community participation in protection of China's protected areas based on a comparative study of six cases. *Chinese Landscape Architecture*, 33(8), 30–33. (in Chinese with English abstract) [廖凌云, 赵智聪, 杨锐 (2017) 基于 6 个案例比较研究的中国自然保护区社区参与保护模式解析. *中国园林*, 33(8), 30–33.]
- Peng K (2020a) Community conservation concession agreement: From Sanjiangyuan experience to global vision. *Sanjiangyuan Ecology*, 24(2), 32–35. (in Chinese) [彭奎 (2020a) 社区协议保护: 从三江源实践到全球视野. *三江源生态*, 24(2), 32–35.]
- Peng K (2020b) From conservation agreement to ecosystem service based economy: Approaching method of ecological value realization. *China Environment*, 76(7), 26–31 (in Chinese with English abstract) [彭奎 (2020b) 从协议保护到生态服务型经济: 自然生态价值实现的路径探索. *中华环境*, 76(7), 26–31.]
- Qiu HG, Zhang YT, Peng K (2020) The development of ecological service-oriented economy: Theory, model and practice. *Reform*, (8), 18–29. (in Chinese with English abstract) [仇焕广, 张祎彤, 彭奎 (2020) 生态服务型经济发展: 理论、模式与实践. *改革*, (8), 18–29.]
- Rai ND, Devy MS, Ganesh T, Ganesan R, Setty SR, Hiremath AJ, Khaling S, Rajan PD (2021) Beyond fortress conservation: The long-term integration of natural and social science research for an inclusive conservation practice in India. *Biological Conservation*, 254, 108888.
- Wei Y, He SY, Lei GC, Su Y (2019) Establishing conservation easement system to promote unified management of China's national parks: US-based experience. *Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences)*, 18(1), 70–79. (in Chinese with English abstract) [魏钰, 何思源, 雷光春, 苏杨 (2019) 保护地役权对中国国家公园统一管理的启示——基于美国经验. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 18(1), 70–79.]
- Xu WG, Gao J, Xia X, Zhou DQ, Li ZL, Jiang MK (2016) Distribution of community residents in nature reserves and its impacts on the reserves in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 32, 19–23. (in Chinese with English abstract) [徐网谷, 高军, 夏欣, 周大庆, 李中林, 蒋明康 (2016) 中国自然保护区社区居民分布现状及其影响. *生态与农村环境学报*, 32, 19–23.]
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's national park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]
- Zhao ZC, Wang P, Xu C (2020) Concession management of the US National Park system and its enlightenment. *Environmental Protection*, 48(8), 70–75. (in Chinese) [赵智聪, 王沛, 许婵 (2020) 美国国家公园系统特许经营管理及其启示. *环境保护*, 48(8), 70–75.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 中国国家公园试点专题

中国国家公园体制试点进展、问题及对策建议

李博炎^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2*}, 刘伟玮^{1,2}, 李爽^{1,2}, 付梦娣^{1,2}, 任月恒^{1,2}, 蔡譞^{1,2}, 李俊生^{1,2}

1. 中国环境科学研究院生态科学研究所, 北京 100012; 2. 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

摘要: 建立国家公园体制是我国生态文明建设的重要内容, 是实现自然生态保护领域治理体系和治理能力现代化的重要举措。2015年我国启动了国家公园体制试点工作, 旨在为建立国家公园体制改革提供实践经验。为评估5年多来试点改革成效, 基于对10个国家公园体制试点开展的深入调研, 发现: 国家公园体制试点工作稳妥有序推进, 在国家公园顶层制度设计、建立管理体制机制、法规制度建设、生态环境治理、夯实保护管理基础等方面取得实质性进展, 积累了一批可复制、可推广的经验。但还存在一些问题, 如法律、制度、标准相对欠缺, 管理体制改革不到位, 资金保障机制仍不成熟, 生态环境监管制度缺失, 保护与发展矛盾依然明显等。为此, 本文从推进法治体系建设、深化管理体制改革、构建多元化资金保障机制、健全生态环境监管机制、促进国家公园共建共治共享等五个方面提出了对策建议, 以期于2021年正式设立一批国家公园、初步建立国家公园体制提供参考和依据。

关键词: 国家公园; 体制试点; 体制改革; 评估; 对策建议

李博炎, 朱彦鹏, 刘伟玮, 李爽, 付梦娣, 任月恒, 蔡譞, 李俊生 (2021) 中国国家公园体制试点进展、问题及对策建议. 生物多样性, 29, 283–289. doi: 10.17520/biods.2020258.

Li BY, Zhu YP, Liu WW, Li S, Fu MD, Ren YH, Cai X, Li JS (2021) Pilot areas for national park system in China: Progress, problems and recommendations. Biodiversity Science, 29, 283–289. doi: 10.17520/biods.2020258.

Pilot areas for national park system in China: Progress, problems and recommendations

Boyan Li^{1,2}, Yanpeng Zhu^{1,2*}, Weiwei Liu^{1,2}, Shuang Li^{1,2}, Mengdi Fu^{1,2}, Yueheng Ren^{1,2}, Xuan Cai^{1,2}, Junsheng Li^{1,2}

1 Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 National Environment Protection Library of Regional Ecosystem Structure and Services Evaluation, Beijing 100012

ABSTRACT

Background: The establishment of national park system (NPS) is an important content of ecological civilization of China, and is an important measure to realize modernization of governance system and governance capacity in the field of natural and ecological protection. Aiming to obtain practical experience for reform of the NPS, central government of China launched pilot construction of the NPS in 2015.

Progress: For assessing efficiency of pilot reforms in the past five years, we carried out in-depth investigation and research in 10 national parks (NPs). The result showed that: pilot reform of the NPS was reliably and orderly promoted and accumulated a batch of replicable and propagable experience, especially on top design of the NPS, establishment of management mechanism, law and regulations construction, ecological environment protection, strengthening foundation of protection management. However, there was also relative lack of laws, regulations and standards. Management system reform of the NPS did not reach the designated position. It was also lack of monitoring system of ecological environment. Financial support was still not mature, contradictions between natural protection and society development were still obvious.

Perspective: This paper provides relational countermeasure and suggestion for law system construction, deepening the reform of management system, improving the ecological environment supervision mechanism, building diversified funds safeguard mechanism, and promoting to build, to manage and to share the NPs. This paper also provides reference and basis to formally build a batch of NPs, and to preliminary establish the NPS in 2021.

收稿日期: 2020-06-29; 接受日期: 2021-03-09

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhuy@caes.org.cn

Key words: national park; pilot areas; institutional reform; evaluation; recommendations

自2015年开始,我国共设立了东北虎豹、祁连山、大熊猫、三江源、海南热带雨林、武夷山、神农架、普达措、钱江源、南山等10处国家公园体制试点区(以下简称“试点”)。根据已印发的各试点总体规划,10个试点共涉及12个省份的157处自然保护地,总面积约22万平方公里,约占陆域国土面积的2.3%。2021年我国将正式设立一批国家公园,初步建立国家公园体制。为此,本文实地调研了10个试点区试点改革及保护管理工作推进情况,以问卷形式对各试点社区居民进行访谈调查(李爽等,2021),同时本文对各试点建立以来至2020年通过公开渠道刊发的新闻、规划、公报等资料进行梳理,总结了试点工作取得的主要进展及有益经验,分析了面临的突出问题,并有针对性地提出对策建议,以期为推动实现国家公园体制改革目标任务,加快国家公园体制建设进程提供依据。

1 国家公园体制试点的主要进展及经验

1.1 国家层面完成了国家公园制度顶层设计,明确了建立国家公园体制改革方向和目标

2013年,党的十八届三中全会首次提出“建立国家公园体制”,引起了社会各界的广泛关注。2017年9月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《建立国家公园体制总体方案》,明确了建立国家公园体制的总体要求、目标任务和制度措施。2019年6月,中共中央办公厅、国务院办公厅再次印发了《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》,提出建立分类科学、布局合理、保护有力、管理有效的以国家公园为主体、自然保护区为基础、各类自然公园为补充的中国特色自然保护地体系。党的十九大报告提出“建立以国家公园为主体的自然保护地体系”。党的十九届五中全会再次要求“坚持山水林田湖草系统治理,构建以国家公园为主体的自然保护地体系”。一系列国家顶层设计文件的制定,明确了建立国家公园体制改革在我国生态文明体制改革中的重要地位,也标志着我国国家公园体制建设进入全面深化改革的新阶段,成为未来我国自然保护地体系建设的基础。

1.2 初步确立了统一、分级的管理体制,自然保护地“九龙治水”问题得到改善

2018年初,党和国家机构改革方案有关文件明确了国家公园等自然保护地管理与监管体制,组建了国家林业和草原局并加挂国家公园管理局牌子,统一负责管理国家公园等各类自然保护地;组建生态环境部负责组织制定各类自然保护地生态环境监管制度并监督执法。此次改革确定了国家公园统一管理部门和监管部门,基本实现“监管分离”,改变了以往自然保护地多部门、分要素管理的现象,为建立国家公园体制奠定了很好的基础。在试点层面,10个试点整合了原有各类自然保护地的管理职能,均组建了统一的国家公园管理机构,实行统一管理(详见Box1)。试点的全民所有自然资源资产所有权由中央政府和省级政府分级行使,形成中央垂直管理、中央和省级政府共管、委托省级政府管理3种管理模式。

1.3 相继启动了法规制度建设,编制总体规划,推动国家公园制度化管理

各试点在缺少上位法支撑的情况下,积极探索和制定“一园一规”。青海、福建、湖北及海南各省分别颁布了《三江源国家公园条例(试行)》《武夷山国家公园条例(试行)》《神农架国家公园保护条例》《海南热带雨林国家公园条例(试行)》,湖南省邵阳市颁布了《南山国家公园管理办法》,钱江源国家公园管理局、开化县政府共同制订了《钱江源国家公园管理办法(试行)》并颁布试行;东北虎豹、祁连山等试点草拟了国家公园管理办法,正在启动立法计划;普达措试点在2013年发布的《云南省迪庆藏族自治州香格里拉普达措国家公园保护管理条例》的基础上,按照《建立国家公园体制总体方案》要求,正在修订《香格里拉普达措国家公园保护管理条例》;大熊猫试点已启动了管理办法的编制工作。各试点条例确定了国家公园的管理体制、规划建设、资源保护、利用管理、社会参与等主要内容,为国家公园管理工作提供法治保障。各试点还建立了相关管理制度和标准,规范国家公园的运行管理。如三江源试点印发了生态管护公益岗位、科研

Box 1 中国国家公园体制试点批复情况和管理模式

- **东北虎豹国家公园体制试点:** 于2017年1月正式获得批复, 依托国家林业和草原局驻长春森林资源监督专员办事处组建了东北虎豹国家公园管理局, 由中央委托国家林业和草原局垂直管理。
- **祁连山国家公园体制试点:** 于2017年9月正式获得批复, 依托国家林业和草原局驻西安森林资源监督专员办事处组建祁连山国家公园管理局, 在甘肃省林业和草原局、青海省林业和草原局分别加挂省级管理局牌子, 由中央和省级政府共同管理。
- **大熊猫国家公园体制试点:** 于2017年1月正式获得批复, 依托国家林业和草原局驻成都森林资源监督专员办事处组建大熊猫国家公园管理局, 在四川省林业和草原局、甘肃省林业和草原局、陕西省林业局分别加挂省级管理局牌子, 由中央和省级政府共同管理。
- **三江源国家公园体制试点:** 于2016年3月正式获得批复, 组建了三江源国家公园管理局, 作为青海省政府派出机构。
- **海南热带雨林国家公园体制试点:** 于2019年7月正式获得批复, 在海南省林业局加挂海南热带雨林国家公园管理局牌子, 由海南省政府垂直管理。
- **武夷山国家公园体制试点:** 于2016年6月正式获得批复, 组建了武夷山国家公园管理局, 由福建省政府垂直管理。
- **神农架国家公园体制试点:** 于2016年5月正式获得批复, 组建了神农架国家公园管理局, 由湖北省政府垂直管理, 委托神农架林区政府代管。
- **普达措国家公园体制试点:** 于2016年10月正式获得批复, 组建了普达措国家公园管理局, 由云南省政府垂直管理, 委托迪庆州政府代管。
- **钱江源国家公园体制试点:** 于2016年6月正式获得批复, 组建钱江源国家公园管理局, 由浙江省政府垂直管理。
- **南山国家公园体制试点:** 于2016年7月正式获得批复, 组建了南山国家公园管理局, 由湖南省政府垂直管理, 委托邵阳市政府代管。

科普、访客管理等13个管理办法, 与《三江源国家公园条例(试行)》构成“1+N”政策制度体系; 云南省制定了国家公园基本条件、建设规范、资源调查与评价技术规程、管理评估规范、总体规划技术规程、标志系统设置指南, 以及国家公园巡护技术规程等多项技术标准, 印发了申报指南、管理评估指南等管理政策, 对国家公园管理及相关制度的制定具有一定的借鉴意义(唐芳林等, 2019)。在规划制定方面, 10个试点总体规划均已获批, 其中三江源、神农架试点因管控分区设置不符合《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》两个分区的要求, 目前正在修编。各试点的总体规划均制定了目标指标表, 确定了生态环境保护与修复、自然资源管理、科研与监测、环境教育与生态旅游、社区发展等方面的总体目标和分阶段目标, 根据主要保护对象和重要自然生态系统等核心资源的种类、保护价值、分布范围等划定了功能分区, 并规划了生态系统保护修复、管理体制构建、教育游憩、社区发展等专项内容。

1.4 坚持“生态保护第一”的管理理念, 加大生态环境整治力度

各试点开展了一系列生态环境保育、修复和整治工作, 突出了国家公园的严格保护。如三江源试

点取缔关闭砂石料场113家, 开展了黑土滩治理, 植被覆盖度增加到80%以上; 祁连山试点出台了《甘肃祁连山国家级自然保护区矿业权分类退出办法》, 按照“共性问题统一尺度、个性问题一矿一策”的思路, 分类实施、有序退出, 同时规定了退出范围、方式、时限、适用条件、程序及补偿标准。祁连山试点共开展了80宗矿业权的退出, 并采取井口封堵、采坑回填、植被恢复等方式, 恢复矿区生态环境; 武夷山试点印发了《严厉打击违法违规开垦茶山行为的通告》, 从严禁违法违规开垦茶山, 严禁挖掘机上山开垦林地, 严禁对违法违规开垦茶山“黑名单”上的企业和个人进行扶持, 规范老茶山改造等方面进行茶山整治, 共清退2008年12月以来违法违规茶山7,300亩, 拔除茶苗30多亩, 完成生态修复6,500亩, 拆除违规建设39处; 神农架试点拆除制砖制砂设备21套、搅混设备2套、洗沙设备4套, 并对破坏的山体进行恢复治理。

1.5 稳步推进各项保护管理工作, 为保护国家公园生态环境夯实基础

各试点在自然资源和生态系统监测方面开展了许多工作。如钱江源试点建成森林动态样地监测平台、生物多样性与生态系统功能实验平台、网格化生物多样性综合监测平台、林冠生物多样性监测

平台等四大平台；三江源、东北虎豹试点均建立了“天空地一体化”监测体系，监测范围涵盖了重要自然生态系统及野生动植物分布范围和活动密集区域，处于国内领先水平。在统一确权登记方面，各试点基本完成了自然资源资产确权登记，明确界定了各类自然资源资产的产权主体和边界。在集体土地用途管制方面，武夷山、钱江源、南山等集体土地占主体的试点探索创新了方式方法，将集体林地纳入统一空间用途管制范围。如钱江源试点以48.2元/亩·年的生态补偿标准，完成27.5万亩集体林统一管理，并制定了原住民生产生活方式的正负面清单。在社区共建共管方面，三江源试点结合精准扶贫，按照“户均一岗”原则，设置了17,211个生态管护公益岗位，实现人均年增收2.16万元，使社区居民享受生态保护带来的红利。

2 面临的突出问题

已建立的10个试点社会生态特征各有不同。如三江源、普达措、祁连山、大熊猫等西部地区试点处于青藏高原及周边地区，社会特征为多民族聚集，生产生活方式相对单一，且对自然资源依赖程度较高，经济发展水平相对落后。该类试点的改革难点在于推动产业结构转型，利用国家公园品牌效应发展绿色经济，拓宽社区居民增收渠道，实现保护与发展共赢。钱江源、武夷山、南山等中东部地区试点范围内集体土地权属占比较大，分别为80.7%、66.6%、64.54%。该类试点的改革难点在于创新国家公园土地权利多元化流转方式，对集体土地进行有效用途管制，实现国家公园自然资源统一管理。此外，东北虎豹、大熊猫、祁连山作为跨省的试点，改革难点在于统筹协调各方关系，明确事权责任，打通管理“堵点”，构建高效的协同管理机制。特别是东北虎豹试点，作为唯一一个由中央直管的国家公园，保护管理职责由中央直接行使，其建设模式应具有较强的代表性，能够为其他管理模式向中央集中管理过渡提供改革范式。神农架、海南热带雨林等试点具有优质的自然资源禀赋，该类试点的改革难点在于建立特许经营机制，改革地方政府对旅游经济的过度依赖，并建立一定的利益分配机制，平衡各方利益。

目前来看，虽然各类试点针对上述改革重点和

难点，开展了一些工作，并取得了一定的成效，但仍存在一些问题，具体表现在以下几个方面。

2.1 国家公园顶层法律、制度、标准欠缺，对国家公园建设的保障不足

我国国家公园相关法律法规的制定总体上还较为滞后，很多方面的考虑尚未达成一致意见。目前国家公园试点区域管理工作仍依据《自然保护区条例》等现行法规，难以适应新的管理要求，特别是新划入的廊道等区域，由于性质未明确，缺少法律保障，保护措施难落实。已颁布的多个国家公园地方法规，层级和效力较低，且缺少上位法的指导，管理要求、理念和内容差异性较大，难以为国家公园建设管理、自然生态系统保护和生态环境监管提供法律保障。

2.2 管理体制距“统一、规范、高效”的要求仍存在一定的差距

中央垂直管理的试点任务重、情况复杂，体制改革难度较大。跨省试点区在工作的统筹协调方面还需进一步加强，如个别试点管理机构依托原有保护地或地方政府设立多个管理分局，隶属关系复杂，整合难度大，机构运转效率不高。各片区分头推进规划、考核、管护、监测等工作，管理条块分割。同时，国家公园管理机构与辖区地方政府的的关系尚未厘清，职责出现交叉，存在改革不彻底的情况，部分地方政府在国家公园保护和管理中没有发挥应有作用，如部分试点的经营权仍由地方政府设立的地方国有或国有控股的旅游开发公司掌握，没有收归国家公园管理机构统一实行特许经营管理。

2.3 国家公园多元化资金机制还不成熟，资金存在较大缺口

《自然资源领域中央与地方财政事权和支出责任划分改革方案》提出根据建立国家公园体制试点进展情况，将国家公园建设与管理的具体事务分类确定为中央财政事权与地方财政事权，中央与地方分别承担相应的支出责任。《建立国家公园体制总体方案》也提出建立财政投入为主的多元化资金保障机制。但试点在资金方面的改革推进较缓慢，国家层面尚未设立国家公园专项资金，原有自然保护地的资金渠道仍占主导地位。目前，试点所涉及的自然保护地来自财政的拨款渠道主要有两个：本级财政拨款和中央财政专项转移支付(陈君帜，

2020)。其中, 本级财政拨款包括基本支出和项目支出两部分, 已纳入本级财政预算。而中央财政的专项转移支付十分有限, 还没有形成稳定持续的投入机制。此外, 试点的资金来源渠道单一, 国家层面和各试点还没有建立相应的投融资机制, 社会资本参与国家公园保护管理缺乏相关法律和政策保障(黄宝荣等, 2018)。

2.4 国家公园生态环境监管机制尚未正式形成, 监管作用未得到有效发挥

多数试点仍依托原有自然保护地的监测体系, 由各部门根据职责分头开展监测, 存在监测标准不一、数据分散、共享程度不足、缺乏统一管理平台等问题。国家公园管理部门和监管部门对试点的监督检查工作多以集中式、突击式为主, 缺少常态化定期的监督检查机制。在综合执法改革方面, 国家公园管理机构存在缺少行政执法权或执法权分散等问题。如部分试点没有执法权, 仍由地方政府开展行政执法工作, 遇到生态环境破坏行为, 管理机构难以进行及时、有效监管。部分试点探索建立了资源环境综合执法, 在一定程度上解决了执法监管

“碎片化”问题, 但仍存在执法人员少、执法面积大、执法手段落后等突出问题。

2.5 保护与发展矛盾依然明显, 社区协同发展措施仍显不足

根据图1社区问卷调查结果显示, 除三江源试点外, 各试点内社区居民利益诉求以“提高收入”“增加就业机会”“补偿方式多样化”等发展诉求为主。各试点因限制以资源消耗为主的产业, 导致社区经济短期内受到了影响。因此, 社区发展与国家公园管理现阶段的矛盾根源是保护限制了自然资源的开发利用, 进而在一定程度上制约了社区发展(李爽等, 2020)。如部分试点停止了国家公园内采伐、旅游、种植等经营性活动, 导致原从业居民收入减少、生活质量下降, 对建立国家公园存在消极看法。为缓解保护与发展矛盾, 试点制定了一些生态补偿政策, 但效果不理想。如部分试点经营土地等生产资料产生的收益高于生态保护补偿标准。此外, 试点内不符合保护和规划要求的各类设施、工矿企业退出工作整体推进缓慢, 补偿资金有较大缺口, 部分区域退出政策仍不明朗。

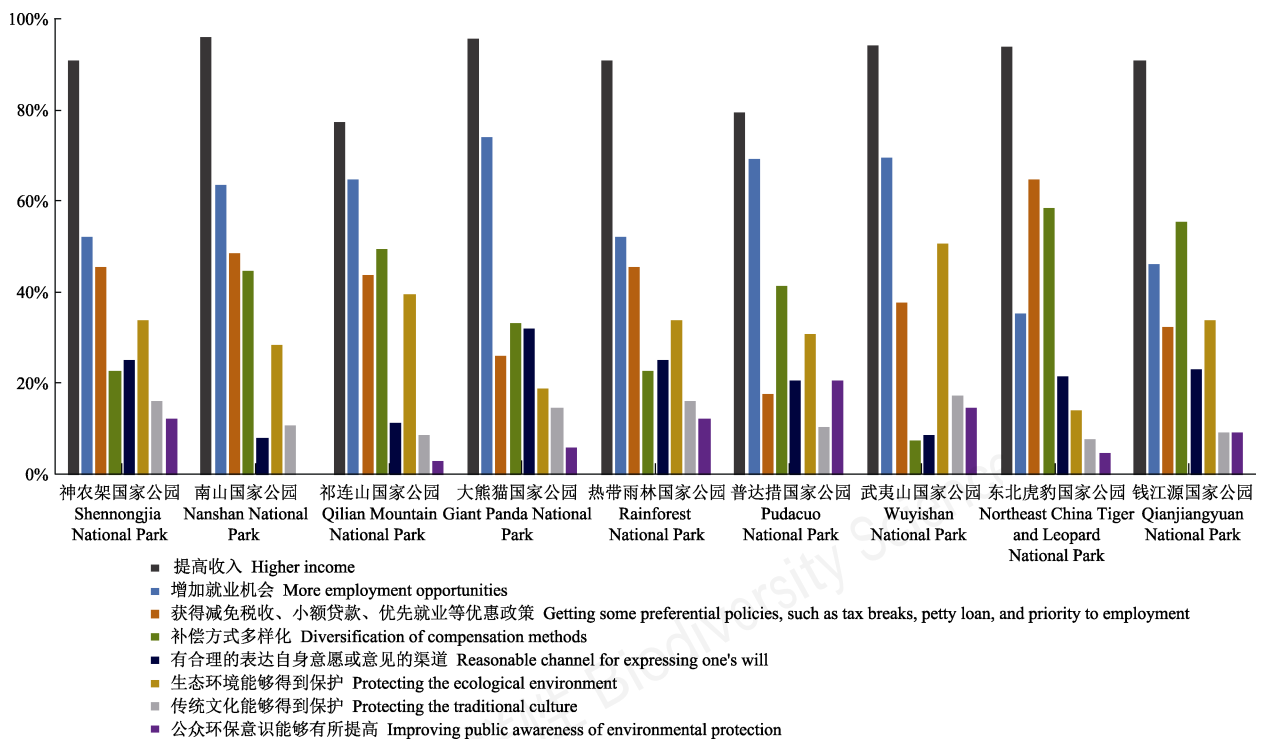


图1 9个国家公园的问卷调查中反映的社区居民对建立国家公园的主要诉求及其所占比重

Fig. 1 The community's main demand for a national park based on questionnaire in nine national parks

3 对策建议

3.1 推进法治体系建设, 提高治理水平和治理能力

依法治理是建立国家公园体制的前提条件。建议根据中央相关要求, 尽快出台《国家公园法》, 确立国家公园自然资源保护、建设管护和生态环境监管的各项制度, 落实各部门关于国家公园设立、建设、管理和监督等事权划分和责任分工, 协同推进国家公园法与自然保护地法之间的关系。坚持开门立法, 充分吸收各方意见和建议, 做好论证, 提高立法质量, 完善草案条文。提升国家公园法或自然保护地法的法律效力位阶, 由行政法规或部门规章上升到法律层面, 做好与现有上位法的衔接(李博炎等, 2017)。健全国家公园法律制度体系, 构建包括法律、条例、实施细则、标准规范等在内的体系完备、操作性强的国家公园法律架构。制订或修订地方性国家公园法规, 结合区域特征和管理需求, 出台更有针对性和操作性的条款。

3.2 打破利益藩篱, 进一步深化管理体制变革

建议进一步落实中央与地方事权划分, 可根据事项性质和涉及地域范围、信息对称、激励相容等原则, 将涉及规划编制、重要资源的修复和保护等事项划归为中央事权, 如资源修复、国家公园总体规划及专项规划编制等; 将涉及区域性的公共产品和服务划归为地方事权, 如保护地的日常巡护、国家公园管理机构基础设施建设等; 将涉及跨区域的公共产品和项目划归为中央与地方共同事权, 如灾害防治、外来物种防治等。对于省级政府代管的国家公园, 管理权限不能再下放。此外, 在国家公园建立过程中势必会触及到地方政府的既得利益, 为使得改革推进过程中受到的阻力最小, 就需要正确处理好国家公园管理机构和辖区地方政府的关系, 处理好短期利益与长远利益的关系。建议由国家公园管理机构统一履行国家公园范围内的各项管理职责, 采用特许经营的方式开展经营性活动, 严格限制准入区域和项目清单。同时参照部分试点改革模式, 将地方政府的领导班子成员同时作为国家公园管理机构的主要负责人员, 以充分调动地方政府在国家公园建设中的积极性。

3.3 加快资金机制改革, 构建多元化资金保障机制

事权决定财政支出。立足于国家公园的公益属

性, 通过合理划定中央和地方事权, 确定中央财政和地方财政的支出责任。首先对于中央直管的国家公园, 其支出全部由中央出资保障。对于中央和省级政府共管及省级政府代管的国家公园, 其支出则应由中央和地方政府根据事权划分, 按照一定比例分摊支出责任。完善财政转移支付制度, 按国家公园规模和保护成效等加大财政转移支付力度。在坚持国家公园生态保护和公益属性前提下, 开展特许经营等限制性经营活动, 拓宽资金渠道。建立国家公园基金会, 统一召集、接收和管理社会及国际捐款, 同时与国家公园管理局建立合作关系, 确定、资助和推进优先项目。开发国家公园绿色金融产品, 发行绿色彩票、绿色债券、绿色信贷, 同时, 可探索将国家公园碳汇交易纳入全国碳排放交易市场, 拓宽国家公园资金渠道。

3.4 实行监管分离, 健全生态环境监管机制

改革保护地管理部门既是运动员又是裁判员的管理模式, 强化国家公园生态环境监督管理职责, 构建“源头严防、过程严管、后果严惩”的全过程国家公园生态环境监管制度体系(刘伟玮等, 2019)。建议严格审批和监督国家公园的设立、调整、整合和退出, 以及各类规划的落实情况等, 从源头实现预防性保护。建立国家公园生态环境监测制度, 建设国家公园“天空地一体化”生态环境监测网络体系, 开展国家公园生态环境监测和人类活动遥感监测, 定期发布国家公园生态环境状况报告。制定国家公园生态环境保护成效评估的实施规程和相关标准, 定期开展国家公园生态环境保护成效评估, 统一发布国家公园生态环境保护成效评估结果。依法授权国家公园管理机构必要的行政执法和处罚职权。条件允许的地区, 可参照部分试点改革经验, 推进国家公园资源环境综合执法改革, 减少多头执法、重复执法, 提高监管执法效能和水平。通过环境公益诉讼、设立生态法庭等方式充分发挥检察院、法院等机构在资源环境领域的司法监督职能, 强化资源环境行政执法和刑事司法协作, 形成高效联动的综合执法模式。

3.5 协调人与自然和谐, 促进共建共治共享

推行参与式社区管理模式, 通过设置生态管护公益岗位、协议保护等方式, 鼓励社区居民参与生态环境保护、社区服务等国家公园公共事务。针对

部分国家公园集体土地占比较大的问题, 可结合农村土地落实集体所有权、稳定农户承包权、放活土地经营权的改革要求, 探索集体土地入股、托管、协作共管等多种途径参与国家公园自然资源保护, 实现国家公园管理机构统一行使用途管制职责。同时, 可借鉴国际经验, 探索通过协议、加盟等方式, 与周边其他自然保护地或相关区域形成统一布局、互为补充的保护网络, 充分发挥国家公园带动周边的核心作用, 将国家公园打造成区域协调发展的“金字招牌”(苏红巧等, 2018)。打造国家公园品牌增值体系, 建立完善绿色发展的产业链、创新链、价值链, 扩大国家公园品牌辐射范围, 以吸纳社会企业和个人加盟国家公园特许经营活动, 使国家公园内外及加盟区实现责任共担、利益共享。

参考文献

- Chen JZ, Tang XP (2020) Research on the establishment of National Parks Protection System in China. *Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences)*, 19(1), 1–11. (in Chinese with English abstract) [陈君帜, 唐小平 (2020) 中国国家公园保护制度体系构建研究. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 19(1), 1–11.]
- Huang BR, Wang Y, Su LY, Zhang CL, Cheng DW, Sun J, He SY (2018) Pilot programs for national park system in China: Progress, problems and recommendations. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(1), 76–85. (in Chinese with English abstract) [黄宝荣, 王毅, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 孙晶, 何思源 (2018) 我国国家公园体制试点的进展、问题与对策建议. *中国科学院院刊*, 33(1), 76–85.]
- Li BY, Li JS, Wei DY, Zhu YP (2017) International experience in legislation of national parks and enlightenments to China. *Environment and Sustainable Development*, 42(5), 20–23. (in Chinese with English abstract) [李博炎, 李俊生, 蔚东英, 朱彦鹏 (2017) 国际经验对我国国家公园立法的启示. *环境与可持续发展*, 42(5), 20–23.]
- Li S, Li BY, Liu WW, Fu MD, Ren YH, Zhu YP (2021) Discussion on the development path of national park community based on the interests of community residents. *Issues of Forestry Economics*, 4, doi: 10.16832/j.cnki.1005-9709.20200116. (in Chinese with English abstract) [李爽, 李博炎, 刘伟玮, 付梦娣, 任月恒, 朱彦鹏 (2021) 国家公园基于社区居民利益诉求的社区发展路径探讨. *林业经济问题*, 4, doi: 10.16832/j.cnki.1005-9709.20200116.]
- Li S, Liu WW, Fu MD, Li BY, Ren YH, Zhu YP (2020) Current problems, challenges and countermeasures of community development in nature reserves. *Environment and Sustainable Development*, 45(3), 130–133. (in Chinese with English abstract) [李爽, 刘伟玮, 付梦娣, 李博炎, 任月恒, 朱彦鹏 (2020) 自然保护区社区发展存在的问题、挑战及对策研究. *环境与可持续发展*, 45(3), 130–133.]
- Liu WW, Quan ZJ, Luo JW, Zhu YP (2019) Ecological supervision function and suggestions on system construction in the new period. *Research of Environmental Sciences*, 32, 1259–1263. (in Chinese with English abstract) [刘伟玮, 全占军, 罗建武, 朱彦鹏 (2019) 新时期生态监管职能解析及制度体系构建建议. *环境科学研究*, 32, 1259–1263.]
- Su HQ, Su Y, Wang YF (2018) A mirror of French national park system reform. *China Policy Review*, (1), 68–71. (in Chinese) [苏红巧, 苏杨, 王宇飞 (2018) 法国国家公园体制改革镜鉴. *中国经济报告*, (1), 68–71.]
- Tang FL, Yan Y, Liu WG (2019) Construction progress of national park system in China. *Biodiversity Science*, 27, 123–127. (in Chinese with English abstract) [唐芳林, 闫颜, 刘文国 (2019) 我国国家公园体制建设进展. *生物多样性*, 27, 123–127.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 时意专)



•论坛• 中国国家公园试点专题

中国自然保护地整合优化关键问题

高吉喜^{1*}, 刘晓曼¹, 周大庆², 马克平³, 吴琼⁴, 李广宇¹

1. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 3. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 4. 世界自然基金会(瑞士)北京代表处, 北京 100037

高吉喜, 刘晓曼, 周大庆, 马克平, 吴琼, 李广宇 (2021) 中国自然保护地整合优化关键问题. 生物多样性, 29, 290–294. doi: 10.17520/biods.2021051.
Gao JX, Liu XM, Zhou DQ, Ma KP, Wu Q, Li GY (2021) Some opinions on the integration and optimization of natural protected areas in China. Biodiversity Science, 29, 290–294. doi: 10.17520/biods.2021051.

Some opinions on the integration and optimization of natural protected areas in China

Jixi Gao^{1*}, Xiaoman Liu¹, Daqing Zhou², Keping Ma³, Qiong Wu⁴, Guangyu Li¹

1 Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042

3 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

4 World Wide Fund for Nature (Switzerland) Beijing Representative Office, Beijing 100037

自然保护地建设是国际公认的保护生物多样性、提供优质生态产品与服务、维系生态系统健康的最重要和最有效途径。自然保护地作为中国自然生态空间最精华和最重要的组成部分, 是建设生态文明的核心载体, 是美丽中国的重要象征, 在维护国家生态安全中具有首要地位(唐小平等, 2019)。从1956年建立第一个自然保护地以来, 中国自然保护地建设取得了巨大成就, 保护体系逐步完善, 建立了由自然保护区、风景名胜区、森林公园、地质公园、湿地公园等组成的数量众多、类型丰富、功能多样的自然保护地体系。截止到2019年底, 中国已有各类自然保护地约1.18万处, 大约覆盖了陆域国土面积的18%, 占海域面积的4.6% (高吉喜等, 2019), 无论从数量上还是面积上均位居世界前列, 为保护生物多样性、自然景观及自然遗迹, 维护国家和区域生态安全等发挥了重要作用。

然而, 中国自然保护地在建设管理过程中也存在一些深层次的问题, 如在建立程序上通常采取部门主导、地方自愿、自下而上的申报方式; 管理上采用地方分割、部门分治的方式。此外还存在各职

能部门之间竞相圈地、权责不清等现象, 以及自然保护地顶层设计不够、整体性差、协同度低等问题, 影响了其完整性和连通性。因此, 中国自然保护地总体上尚未形成整体高效、有机联系、互为补充的自然保护地体系(黄宝荣等, 2018; 唐芳林, 2018), 严重制约了中国自然保护地事业的健康发展, 难以满足保障国家生态安全、维护生物多样性等要求(唐小平和栾晓峰, 2017; 唐芳林等, 2019)。

2019年6月, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》, 提出要建立以国家公园为主体、自然保护区为基础、各类自然公园为补充的自然保护地体系(http://www.gov.cn/zhengce/2019-06/26/content_5403497.htm), 标志着中国自然保护地体系进入全面深化改革的新阶段。2020年3月, 自然资源部、国家林业和草原局印发《关于做好自然保护区范围及功能分区优化调整前期有关工作的函》, 正式启动了自然保护地整合优化工作, 表明中国正在快速推进自然保护地体系重构(<https://www.guoturen.com/guihua-347.html>)。2020年12月, 全国自然保护

收稿日期: 2021-01-04; 接受日期: 2021-03-15

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: gix@nies.org

地整合优化预案评议会在北京召开, 相关部门密切配合, 在一年内摸清了全国自然保护地本底, 建立了数据库, 编制了整合优化预案, 解决了一部分历史遗留问题, 一定程度地优化了自然保护地空间布局, 为后续整合优化方案的制定及自然保护地体系的真正落地奠定了坚实基础。

作为生态文明制度改革的具体实现方式和前沿阵地, 自然保护地整合优化是构建以国家公园为主体的自然保护地体系的重要举措和关键路径, 是一项科学性、系统性、复杂性、创新性的工作。如何科学开展整合优化、切实促进自然保护地可持续发展是目前自然保护地改革中最紧迫的问题, 关系着中国新型自然保护地体系建立后的整体效能和保护成效。为此, 本文针对当前整合优化中存在的几个关键问题提出了应对思路和举措, 以期自然保护地整合优化提供参考。

1 准确把握自然保护地定位

自然保护地是由各级政府依法划定或确认, 对重要的自然生态系统、自然遗迹、自然景观及其所承载的自然资源、生态功能和文化价值实施长期保护的陆域或海域(http://www.gov.cn/zhengce/2019-06/26/content_5403497.htm)。自然保护地包括国家公园、自然保护区和自然公园三类, 其中国家公园的定位是保护具有国家代表性的自然生态系统; 自然保护区的定位是保护典型的自然生态系统、珍稀濒危野生动植物的天然集中分布区、有特殊意义的自然遗迹区域; 自然公园的定位是保护重要的自然生态系统、自然遗迹和自然景观, 且强调可持续利用。生态保护红线的定位是承担水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护、海岸生态稳定等重要生态功能(http://www.gov.cn/zhengce/2017-02/07/content_5166291.htm), 其侧重点在生态功能和生物多样性优先区保护(中华人民共和国环境保护部, 2011)。国家公园、自然保护区、自然公园和生态保护红线各有侧重、相互弥补, 形成了中国完整的生态空间保护体系。

因此, 无论是新建自然保护地, 还是整合优化已有自然保护地, 都只有准确、清晰地把握保护地的定位才能解决长期以来不同类型自然保护地交叉重叠、管理目标不明确的问题, 并与其他类型自

然保护体系如重点生态功能区、生态保护红线等相区别。为此, 在整合优化过程中, 需严格遵照自然保护地的定位, 明确保护对象, 做到科学、准确地设立自然保护地。

2 科学认识现实矛盾冲突

中国的开发历史悠久, 人地交织, 自然保护地内普遍存在人类活动, 如社区居民点、耕地、能源开发、矿产开采、旅游活动、道路建设等。2015年的遥感监测发现, 中国国家级自然保护区内人类活动的分布非常普遍, 总面积约2.85万km², 总数量156,061处(刘晓曼等, 2020)。造成人类活动频繁的原因是多方面的, 其中最重要的两个是: (1)我国人多地少, 除了高原和荒漠等不适宜人类居住的地区之外, 其他区域人口众多, 分布广泛; (2)我国自然保护地建设和管理过程中存在很多体制机制等深层次的原因, 在划定保护区时未科学规划保护范围, 管理不到位导致社会经济活动不断侵入保护地。

同时我们需要认识到, 自然保护地内存在人类活动并不代表就是对自然保护地的破坏, 有些人类活动反而是有利于自然保护地发展的。自然保护地内的人类活动大致可分成三类: 第一类是有明显负面影响的活动, 如大面积的城镇建设区、矿产资源开发等; 第二类是与管理密切相关的人类活动, 如放牧、林下产业等, 如果管理得好, 有利于生态保护, 如管理得不好, 则会破坏生态; 第三类是有利于自然保护地保护的人类活动, 主要是部分野生动物如朱鹮(*Nipponia nippon*)、黑颈鹤(*Grus nigricollis*)等, 需要与人类活动共存共生。

所以, 人类活动并不等同于人类干扰, 只有那些对主要保护对象带来干扰和威胁、对生态环境造成一定破坏的人类活动才能称之为人类干扰, 才会造成人地矛盾冲突。自然保护地整合优化是为了更好地进行生态保护, 建立人与自然和谐共生的新模式。因此, 在此次整合优化中, 既要秉持严格保护的原则, 也要以开放的视野、包容的思维、先进的理念和分门别类的思路认识和处理人类活动, 科学甄别哪些是对自然保护地干扰较大的人类活动, 哪些是能与自然和谐共生的人类活动, 并根据不同保护对象、不同保护地类型和不同功能区分别制定调整规则, 以维护自然保护地的完整性。

3 少开“天窗”，保持生态系统完整性

保护生态系统完整性和原真性是构建以国家公园为主体的自然保护地体系的基本目标，这个完整性主要是指地域上的连续性、价值上的整体性、功能上的完整性、人与自然的和谐性(李金路等, 2020)。自然保护地在地域空间上应该是完整的、连续的地域实体，而不是分散的若干斑块；生态系统的完整性既包括自然生态系统和生态过程的完整性，也包括人文生态系统的完整性。因此，在自然保护地整合优化过程中，不能为了减少矛盾冲突、规避监管压力而广开“天窗”，这会人为造成自然保护地在空间上的破碎化，进而影响保护成效，实际上是避监管、免追责的不负责任的态度。因此，整合优化中要全程贯彻整体保护的思维，牢固树立“山水林田湖草是一个生命共同体”的理念、严格遵循生态系统及重要栖息地完整性的保护原则，按照资源价值连续性的要求来开展。

生态保护与人类活动的关系是此次整合优化无法回避的问题。整合优化的目的是更有效地保护和管理好自然保护地并发挥其作用，不能仅仅为了管理的便利就把人类活动一股脑划出去，而要从根本上解决人地矛盾冲突。我国是一个拥有五千多年开发历史的古国，如果过分追求单纯的原始区域，现实中很难做到。事实上，纵观各国自然保护地的发展历程，其重要特征就是人与自然的和谐共生，生态效益和社会效益的协同发展。自然保护地是涉及自然与人、社会、经济多方交织的复合体，一味地开“天窗”不是上策。对于占地面积大、空间上连片、生态影响突出，以及位于边界的人类活动，在不影响主体功能的情况下应该调出，而对于自然保护地内部零散分布的耕地、商品林、村民建设用地等，则要从系统思维、整体视角出发，以优化规则、强化管理的方式允许其存在。一方面，引导其规范活动范围和强度，做好防控，最大限度减少对主要保护对象的干扰和破坏；另一方面，要加大生态补偿力度，促进社会公平，实现生态保护与经济利益的统一。

总之，要做好科学评估后再酌情调整自然保护地人类活动，确定开“天窗”的范围和大小，不能简单地一刀切，否则会造成自然保护地在空间上的破碎化，甚至因为调出后无法被监管导致对自然保护

地的损害。事实上，开“天窗”表面上甩掉了包袱，实际上并不能从根本上解决存在的矛盾。所以，正确的做法应是在保证自然保护地完整性的前提下，科学论证调出的合理性，将重点由“如何调”转向“如何管”，通过优化管控规则，利用先进的管理理念和有效的监管方式，来减少人类活动对自然资源和保护对象的破坏，实现人与自然的永久和谐。

4 妥善处理历史遗留问题

我国早期采取抢救式保护的策略，新建了一大批自然保护地，对保护中国自然资源和生物多样性发挥了重要作用。但早期很多自然保护地的边界划定技术水平有限，加上经济社会不断发展，导致很多村庄甚至城镇建成区被划入自然保护地，带来大量的历史遗留问题。根据《关于做好自然保护区范围及功能分区优化调整前期有关工作的函》，仅国家级自然保护区内就有城市建成区29个，建制乡镇建成区531个，人口约400万，耕地146万ha (<https://www.guoturen.com/guihua-347.html>)。大量的人类活动成为此次自然保护地调整中最普遍、最难解决的难题。

如前所述，自然保护地不是封闭、隔离的孤岛，其与长期生活在此的老百姓的生产生活息息相关、密不可分，但是现有部分人类活动与自然保护地的理念相违背。为此，应统筹保护与居民生活生产发展的关系，科学客观地解决好历史遗留问题。一方面，要注重自然保护地的生态完整性，最大程度地保护好保护地内的自然资源和物种资源；另一方面，全民公益性是自然保护地的理念之一，要兼顾保护地内居民的利益，保证人民群众利益的最大化。基于此，建议在自然保护地整合优化过程中以更宏观和更长远的视野，针对不同类型的历史遗留问题分类进行处置：(1)自然保护地内尤其是核心区的村镇要有条件地逐步退出。(2)确定无法退出的，可以设立过渡期，同时要加强对其生产生活的监管，完善相关规章制度并加强宣传，促进社区居民知法、懂法、守法。(3)建立健全生态补偿制度，对无需搬出又因保护生态环境而影响发展的社区居民，给予一定的经济补偿。(4)建立共建共管机制，将部分社区居民转化为护林员、协管员等，激发社区居民的主人翁意识，自觉参与到保护中，增强归属感和保护自觉性，成为自然保护地的守护者。

5 分步做好顶层设计和整体规划

当前,我国自然保护地存在交叉重叠、多头管理、空间布局不完善、海洋类型自然保护地保护空缺明显等问题,重要原因之一在于中国的自然保护地建设没有经过系统的整体规划。目前,中国正在开展以国家公园为主体的自然保护地体系建设改革,是我国自然保护领域前所未有的契机。但当下,自然保护地整合优化任务重、时间紧,难以同时开展自然保护地顶层设计。为此,建议在整合优化工作结束后,尽快启动国家层面的自然保护地顶层设计:(1)遵循习近平生态文明思想,加强自然保护地顶层设计的内涵研究。(2)开展自然保护地顶层设计的方法学和实现路径研究,包括保护地面积和边界设定的技术方法,建立起系统的设计技术方案。(3)统筹研究不同自然保护地的空间布局,合理规划各级各类自然保护地的数量与规模,从而使保护地从个别、分散的生态系统保护向集中、整体的生态系统群保护转变(唐芳林等,2018),更好地发挥自然保护地在维护国家生态安全中的作用。

虽然开展顶层设计是当务之急,但这不是在短期内能够完成的,需要动员方方面面的力量。因此,在本次整合优化中,不能要求一步到位,而应分步实施。建议在本次整合优化中,重点解决自然保护地交叉重叠、主要矛盾冲突等问题。然后,利用3~5年时间,采取自上而下和自下而上相结合的方式,全面开展顶层设计,明确保护空缺,通过逐步新建扩建自然保护地、构建生态廊道等措施完善自然保护地体系。

6 展望与结语

自然保护地整合优化是构建以国家公园为主体的自然保护地体系的重要组成部分,对中国自然保护地体制改革至关重要。如何整合优化是一项政策与技术紧密结合的复杂工作,在具体实践过程中会碰到各式各样的矛盾冲突和问题,需要既面对现实又继承发展,既开拓创新又慎重前行。在整合优化过程中,需不断探索科学之策,为建立分类科学、布局合理、保护有力、管理有效的自然保护地体系筑牢基石,为美丽中国建设奠定根基。

目前,我国自然保护地整合优化已经取得了重要阶段性成果。今后,建议进一步做好以下三方面

工作:

(1)做好科学调查和评估。基于科学评估,进一步完善预案,切实提高预案质量,使整合优化工作经得起历史检验,对得起党中央、国务院的嘱托。

(2)开展顶层设计。深入研究顶层设计规则,全面开展中国自然保护地顶层设计,编制国家层面的自然保护地发展规划,为建立系统的自然保护地体系奠定基础。

(3)坚持立法先行。做好《自然保护地法》《国家公园法》的制定和《中华人民共和国自然保护区条例》《风景名胜区条例》的修订工作,将加强生态环境监管、落实“保护面积不减少、保护强度不降低、保护性质不改变”、细化管控要求等纳入相关立法,切实为整合优化提供坚实的法律保障。

ORCID

马克平  <https://orcid.org/0000-0001-9112-5340>

参考文献

- Gao JX, Xu MJ, Zou CX (2019) Development achievement of natural conservation in 70 years of new China. *Chinese Journal of Environmental Management*, 11(4), 25–29. (in Chinese with English abstract) [高吉喜, 徐梦佳, 邹长新 (2019) 中国自然保护地70年发展历程与成效. *中国环境管理*, 11(4), 25–29.]
- Huang BR, Ma YH, Huang K, Su LY, Zhang CL, Cheng DW, Wang Y (2018) Strategic approach on promoting reform of China's natural protected areas system with national parks as backbone. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33, 1342–1351. (in Chinese with English abstract) [黄宝荣, 马永欢, 黄凯, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 王毅 (2018) 推动以国家公园为主体的自然保护地体系改革的思考. *中国科学院院刊*, 33, 1342–1351.]
- Li JL, Chen YH, Wu CZ, Zhang TS, Liu Y, Shi LX, Tang XL, Sun YT (2020) Natural reserve system: Chinese approach. *City Planning Review*, 44(2), 50–58. (in Chinese) [李金路, 陈耀华, 吴承照, 张同升, 刘英, 史丽秀, 唐晓岚, 孙铁颀 (2020) 自然保护地体系: 中国方案. *城市规划*, 44(2), 50–58.]
- Liu XM, Fu Z, Wen RH, Jin CP, Wang XF, Wang C, Xiao RL, Hou P (2020) Characteristics of human activities and the spatio-temporal changes of national nature reserves in China. *Geographical Research*, 39, 2391–2402. (in Chinese with English abstract) [刘晓曼, 付卓, 闻瑞红, 靳川平, 王雪峰, 王超, 肖如林, 侯鹏 (2020) 中国国家级自然保护区人类活动及变化特征. *地理研究*, 39, 2391–2402.]
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2011) *China Biological Diversity Protection Action Plan (2011–2030)*. *China Environmental Science*

- Press, Beijing. (in Chinese) [中华人民共和国环境保护部 (2011)中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年). 中国环境科学出版社, 北京.]
- Tang FL (2018) Protection and management of nature park under the national park system. *Forestry Construction*, (4), 1–6. (in Chinese with English abstract) [唐芳林 (2018) 国家公园体制下的自然公园保护管理. 林业建设, (4), 1–6.]
- Tang FL, Wang MJ, Sun HY (2018) Analysis on establishing the protected area system dominated by national park. *Forestry Construction*, (1), 1–5. (in Chinese with English abstract) [唐芳林, 王梦君, 孙鸿雁 (2018) 建立以国家公园为主体的自然保护地体系的探讨. 林业建设, (1), 1–5.]
- Tang FL, Wang MJ, Sun HY (2019) Reform path on management system of natural protected area. *Forestry Construction*, (2), 1–5. (in Chinese with English abstract) [唐芳林, 王梦君, 孙鸿雁 (2019) 自然保护地管理体制的改革路径. 林业建设, (2), 1–5.]
- Tang XP, Jiang YF, Liu ZL, Chen JZ, Liang BK, Lin C (2019) Top-level design of the natural protected area system in China. *Forest Resources Management*, (3), 1–7. (in Chinese with English abstract) [唐小平, 蒋亚芳, 刘增力, 陈君帆, 梁兵宽, 蔺琛 (2019)中国自然保护地体系的顶层设计. 林业资源管理, (3), 1–7.]
- Tang XP, Luan XF (2017) Developing a nature protected area system composed mainly of national parks. *Forest Resources Management*, (6), 1–8. (in Chinese with English abstract) [唐小平, 栾晓峰 (2017) 构建以国家公园为主体的自然保护地体系. 林业资源管理, (6), 1–8.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 周玉荣)



• 论坛 • 中国国家公园试点专题

东北虎豹国家公园试点经验

徐卫华^{ID*}, 臧振华^{ID}, 杜傲, 欧阳志云^{ID}

中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

徐卫华, 臧振华, 杜傲, 欧阳志云 (2021) 东北虎豹国家公园试点经验. 生物多样性, 29, 295–297. doi: 10.17520/biods.2021044.

Xu WH, Zang ZH, Du A, Ouyang ZY (2021) The experiences of Northeast China Tiger and Leopard National Park pilot. Biodiversity Science, 29, 295–297. doi: 10.17520/biods.2021044.

The experiences of Northeast China Tiger and Leopard National Park pilot

Weihua Xu^{ID*}, Zhenhua Zang^{ID}, Ao Du, Zhiyun Ouyang^{ID}

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

东北虎豹国家公园体制试点区位于吉林、黑龙江两省交界的老爷岭南部区域, 跨吉林、黑龙江两省, 与俄罗斯、朝鲜接壤, 试点区面积1.46万km², 其中69.4%位于吉林省, 30.6%位于黑龙江省(梁兵宽等, 2020)。试点区的主要保护对象为温带针阔叶混交林生态系统, 以及野生东北虎(*Panthera tigris altaica*)、东北豹(*P. pardus orientalis*)为旗舰物种的野生动植物及其栖息地。自2017年开展国家公园试点以来, 东北虎豹国家公园在创新中央垂管体制、构建“天空地”一体化监测体系、开展跨境保护、宣传国家公园理念等方面取得积极进展, 为推进国家公园体制建设积累了重要经验。

1 创新中央垂直管理、央地协同的体制机制

目前国家公园体制试点形成了中央垂直管理、中央与地方共同管理、地方管理3种管理模式, 东北虎豹国家公园试点区是目前唯一由国家林业和草原局(国家公园管理局)代表中央政府垂直管理的试点区(臧振华等, 2020)。虎豹公园基本建立了“管理局—管理分局—基层保护站”的三级垂直管理体系, 管理局以下成立10个管理分局, 分局以下设立国家公园保护站。

同时, 虎豹公园还是第一个在国家公园体制试

点基础上同步开展健全国家自然资源资产体制试点的国家公园(张陕宁, 2018)。虎豹公园管理局联合吉林、黑龙江两省各级有关行政主管部门, 通过制定移交清单, 交接档案资料, 明确与当地政府的事权划分。这些权力清单包含林草、自然资源、水利、农业农村、生态环保等部门, 涉及行政许可、行政处罚、行政征收、行政强制、行政确认、行政裁决、行政给付、行政奖励和其他行政权力等9类行政职能1,561项, 以实现对各类国有自然资源资产的统一管理。

这种以东北虎豹国家公园管理局为核心、以中央垂管为主线、以地方各级政府和部门为协同的管理体制机制, 为中央政府直接行使国家公园的全民自然资源资产所有权体制奠定了坚实基础。

2 构建“天空地”一体化监测体系

完善的监测体系是东北虎、东北豹等野生动植物保护、自然资源管理的基础。试点区依托北京师范大学等国内外高水平大学和科研机构, 成立了国家林业和草原局东北虎豹监测与研究, 设立了东北虎豹生物多样性国家野外科学观测研究站, 开通了东北虎豹国家公园自然资源监测和管理系统。该系统设置国家级、省级、区域和基础网络监测点

收稿日期: 2021-01-25; 接受日期: 2021-02-09

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xuweihua@rcees.ac.cn

四级平台,并按照“统一规划、统一标准、统一制式、统一平台、统一管理”的原则,制定了《东北虎豹国家公园自然资源监测体系建设技术指标》,确保监测体系统一、规范、高效运行。

试点区采用全新的“互联网+生态”的信息化、智能化管理模式,通过建设基站、设置视频卡口、布设红外相机等方式,实现了园区范围内近万平方公里的监测覆盖,实时开展野生动物、人为活动、自然资源和生态因子等30多个指标的监测。试点区内的监测体系已获取了大量东北虎、东北豹、梅花鹿(*Cervus nippon*)等野生动物活动影像以及自然资源监测数据,为保护巡护提供了大数据支撑(王天明等,2020)。同时,各分局加强了常规监测,按照标准网格化方法,做到了巡护无死角、无盲区、全覆盖,持续开展“清山清套”等专项打击和监管行动,有效打击了违法行为,保障了野生动物和森林资源安全(陈雅如等,2019)。

虎豹国家公园构建了国际先进的“天空地”一体化自然资源监测和管理系统,为“看得见虎豹、管得住人”的目标实现提供有效保障,为国家公园提高自然资源资产监管能力、推动最严格保护实现路径提供了示范(闫颜等,2021)。

3 完善跨境保护合作机制

虎豹国家公园是目前唯一地处国境边界的试点区,国家公园的主要保护对象东北虎、东北豹也仅分布于中、俄边境狭窄的林区地带。为实现对东北虎、豹的全面保护,虎豹公园管理局与俄罗斯豹地国家公园构建了跨国合作保护平台,完善野生动物保护的跨国合作机制。双方签署了《虎豹保护合作谅解备忘录》,制定了2019–2021年联合行动计划,明确在东北虎豹科学研究、生态监测、环境教育和生态体验等领域开展跨境合作,落实中俄两国元首在莫斯科签署的《关于发展新时代全面战略合作伙伴关系的联合声明》。目前完成了中俄边境200 km的虎豹跨境监测带、虎豹核心区和扩散区的监测安装任务。

我国国境线长、邻国众多,部分边境地区的地理区位和生态价值重要,国家代表性强,随着国家公园体制建设的深入,将来会陆续在这些地区建立多个国家公园。虎豹国家公园跨境保护合作机制的

经验可为将来建设边境国家公园提供积极借鉴。

4 探索国家公园理念传播途径




国家公园是开展自然教育、传播生态文明理念的重要基地。虎豹公园管理局积极探索多种途径加强国家公园科普宣教工作,引导社会广泛参与国家公园建设,传播国家公园理念。首先,依托国内主流媒体、自身官方网站和微信公众号“虎豹新观察”等融媒体,将虎文化元素紧密融入到宣传工作中,通过开展“世界老虎日”“东北虎豹国家公园建设发展论坛”等活动广泛宣传国家公园,为东北虎豹国家公园建设营造了浓厚舆论氛围。其次,组织开展生态旅游体验和自然教育,每年参与体验达80余万人次。再次,建立健全志愿者服务机制,制定志愿者管理办法,完善志愿者招募、注册、培训等制度,吸引社会各界参与国家公园建设。最后,广泛开展交流,与俄罗斯、韩国等国家的自然保护地建立沟通合作机制,与国际野生生物保护学会(WCS)、自然资源保护协会(NRDC)等国际组织紧密合作开展社区培训等活动,推广对保护地友好的生产生活方式,与国内多所高校、科研机构、保护地等紧密合作,扩大了社会影响力。

试点区全方位、立体式宣传活动把生态文明建设、国家公园体制建设、自然资源产权制度的理念传达到了全社会,得到广泛认同与拥护,虎豹公园成为了向世界传播生态文明理念、展示中国生物多样性保护负责任大国形象的重要窗口。

东北虎豹国家公园试点取得了积极的生态成效,监测数据显示东北虎、东北豹的活动范围逐渐扩大、种群数量稳定增长,各类人为活动干扰不断降低。作为目前唯一由中央政府直接管理、且同时开展“两项试点”的国家公园,东北虎豹试点区的体制改革具有重要的引领意义。东北虎豹国家公园的试点实践,为推进自然资源科学保护与合理利用、全面深化国家公园建设提供了重要经验。

致谢:感谢国家公园管理局办公室与东北虎豹国家公园管理局提供支持,本文部分资料来源于《东北虎豹国家公园试点评估报告》和《东北虎豹国家公园试点评估验收报告》,在此向报告编写人员致谢。

ORCID

徐卫华  <https://orcid.org/0000-0001-7622-7365>
 臧振华  <https://orcid.org/0000-0002-6643-9468>
 欧阳志云  <https://orcid.org/0000-0003-0927-0499>

参考文献

- Chen YR, Han JK, Qin LN, Yang HC (2019) The problems and development approach of the Northeast Tiger and Leopard National Park System Pilot. *Environmental Protection*, 47(14), 61–65. (in Chinese) [陈雅如, 韩俊魁, 秦岭南, 杨怀超 (2019) 东北虎豹国家公园体制试点面临的问题与发展路径研究. *环境保护*, 47(14), 61–65.]
- Liang BK, Liu Y, Tang XP, Ban Y, Jiang YF, Kong Y, Li BB, Bai L (2020) Research on the planning of Amur Tiger and Amur Leopard National Park. *Forest Resources Management*, (6), 23–30. (in Chinese with English abstract) [梁兵宽, 刘洋, 唐小平, 班勇, 蒋亚芳, 孔颖, 李兵兵, 白玲 (2020) 东北虎豹国家公园规划研究. *林业资源管理*, (6), 23–30.]
- Wang TM, Feng LM, Yang HT, Bao L, Wang HF, Ge JP (2020) An introduction to Long-term Tiger-Leopard Observation Network based on camera traps in Northeast China. *Biodiversity Science*, 28, 1059–1066. (in Chinese with English abstract) [王天明, 冯利民, 杨海涛, 鲍蕾, 王

红芳, 葛剑平 (2020) 东北虎豹生物多样性红外相机监测平台概述. *生物多样性*, 28, 1059–1066.]

- Yan Y, Tang FL, Tian YC, Jin K (2021) On implementation path of the strictest conservation policies in National Park management. *Biodiversity Science*, 29, 123–128. (in Chinese with English abstract) [闫颜, 唐芳林, 田勇臣, 金崑 (2021) 国家公园最严格保护的实现路径. *生物多样性*, 29, 123–128.]
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's National Park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]
- Zhang SN (2018) Solid stability to promote two pilot projects of Northeast China Tiger and Leopard National Park. *Forestry Construction*, (5), 197–203. (in Chinese) [张陕宁 (2018) 扎实推进东北虎豹国家公园两项试点. *林业建设*, (5), 197–203.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 中国国家公园试点专题

祁连山国家公园体制试点经验

金崑*

中国林业科学研究院自然保护地研究所, 北京 100091

金崑 (2021) 祁连山国家公园体制试点经验. 生物多样性, 29, 298–300. doi: 10.17520/biods.2021046.

Jin K (2021) On the experiences of Qilian Mountain National Park system pilot. Biodiversity Science, 29, 298–300. doi: 10.17520/biods.2021046.

On the experiences of Qilian Mountain National Park system pilot

Kun Jin*

Research Institute of Natural Protected Area, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

祁连山国家公园地跨甘肃、青海两省, 总面积 50,237 km², 其中, 甘肃片区面积占68.5%, 青海片区面积占31.5%。祁连山国家公园所在的祁连山是国家重点生态功能区之一, 承担着维护青藏高原生态平衡, 阻止腾格里、巴丹吉林和库姆塔格三大沙漠南侵, 保障黄河和河西内陆河径流补给的重任。祁连山是我国生物多样性保护优先区之一, 是世界高寒种质资源库, 是野牦牛(*Bos mutus*)、白唇鹿(*Przewalskium albirostris*)、藏野驴(*Equus kiang*)、马麝(*Moschus chrysogaster*)、黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、冬虫夏草(*Cordyceps sinensis*)、雪莲(*Saussurea involucrata*)等珍稀濒危物种的重要栖息地, 特别是世界生物多样性保护的旗舰物种——雪豹(*Panthera uncia*)的重要栖息地。祁连山国家公园的建立, 对于保障祁连山生态系统的原真性和完整性, 保障河西走廊乃至西部地区的生态安全具有重大战略意义。2017年9月1日, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《祁连山国家公园体制试点方案》。祁连山国家公园体制试点开展以来, 通过建立分级统一的管理体制, 创新运行机制, 国家公园建设稳步推进, 生态成效和社会效益渐显。笔者参加了国

家公园体制试点相关工作, 对祁连山国家公园体制试点取得的一些可借鉴和推广的经验进行探讨。

1 管理体制创新

形成了中央与地方共同管理模式。依托国家林业和草原局驻西安森林资源监督专员办事处组建祁连山国家公园管理局, 在甘肃、青海两省林业和草原局加挂省级管理局牌子, 由国家林业和草原局与省政府双重领导, 以省政府为主(臧振华等, 2020)。祁连山国家公园管理局于2018年10月29日在兰州揭牌, 为正厅级行政单位。2018年11月1日, 祁连山国家公园甘肃省管理局在兰州挂牌。2018年11月30日, 祁连山国家公园青海省管理局在西宁挂牌。甘肃省片区建立了省管理局、管理分局、保护站三级垂直管理体系, 组建了祁连山国家公园甘肃省管理局酒泉分局、张掖分局, 酒泉分局下设6个保护站, 张掖分局下设22个保护站。祁连山国家公园青海省管理局下设祁连山国家公园青海省管理局办公室和祁连山国家公园青海服务保障中心, 以及德令哈、天峻、祁连、门源四县市管理分局, 建立9个管护中心和40个管护站点。

收稿日期: 2021-02-04; 接受日期: 2021-03-11

基金项目: 国家林业和草原局国家公园监测管理与能力提升专题研究(JYCL-2020-00041)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jk2002@caf.ac.cn

2 省委书记和省长任双组长推动运行

2017年12月8日，原国家林业局会同甘肃、青海两省建立了祁连山国家公园“三方会商”机制。国家林业和草原局与甘肃、青海两省政府成立了协调工作领导小组，在祁连山国家公园管理局设立办公室。甘肃省委省政府成立由省委书记、省长任双组长的“甘肃省祁连山国家公园体制试点领导小组”，全面负责甘肃省祁连山国家公园体制试点工作，研究解决重大问题。同时省政府成立协调推进组，省政府常务副省长任组长，分管副省长任副组长，办公室设在省林业和草原局。青海省委省政府成立了由省委书记、省长任双组长的祁连山国家公园体制试点工作领导小组，领导小组办公室设在省林业和草原局。确保了体制试点任务责任靠实、推进得力。

3 多种方式健全矿业权退出新机制

甘肃省片区按照“共性问题统一尺度、个性问题一矿一策”的思路，引导矿权分类实施、有效退出，祁连山国家公园甘肃省片区生态环境问题整改涉及的所有矿业权，已采取注销式、扣除式、补偿式共3种方式全部退出，并采取封堵探洞、回填矿坑、拆除建筑物以及种草植树等综合措施恢复生态环境。与祁连山国家公园范围存在重叠的矿业权，根据矿业权的不同情况采取以下方式分类处置：(1)注销退出。主要是针对矿业权人自愿放弃的探矿权和采矿权，由市县政府督促矿业权人向原发证机关申请注销。(2)扣除退出。对矿业权与自然保护地部分重叠的，采取扣减重叠部分避让自然保护地的方式退出。剩余区域必须符合矿业权延续变更条件。(3)补偿退出。对采取注销、扣除方式处置之外的探矿权和采矿权，统筹考虑矿业权历史与现状，酌情以补偿方式退出。市县政府是筹集补偿资金的责任主体。

4 构建生态保护与民生改善协调发展的新模式

为确保国家公园核心保护区农牧民自觉自愿搬得出、稳得住、收入有保障、生活有改善、发展有前景，甘肃省张掖市采取“四个一”的措施引导农

牧民易地搬迁、转产增收。(1)每户确定一名护林员；(2)每户培训一名实用技能人员；(3)每户扶持一项持续增收项目；(4)确保每户享受到一整套惠民政策。青海省片区建立“村两委+社区参与”共建共管共享工作机制。“村两委+社区参与”共建共管共享机制是以国家公园内社区村两委为依托，以社区群众为主体，建立巡护、宣传两支队伍，推动生态保护效益加快转化成社区发展和民生效益，积极探索生态保护与民生改善协调发展的新路径。

5 推动实现生态保护管理新方式

甘肃省片区运用卫星遥感、天空地一体化、对地观测、地面监测等信息技术，在张掖市率先建成“一库八网三平台”生态保护信息监控系统和智慧水务监控系统。青海省片区着力构建九大支撑体系，不断增强国家公园生态保护管理综合能力，包括推动规划体系建设、构建科研监测体系、社会参与体系、保护管理体系、自然教育体系、基础保障体系、信息化管控体系、志愿服务体系 and 教育培训体系。青海省片区建立综合执法机制。建立协调统一、分工明确的国家公园生态监管体系，主要是整合海西州、海北州两州政府以及省直有关部门执法力量，全面组织开展国家公园综合执法和专项督查检查行动，构建综合执法长效机制。青海省祁连县人民法院成立了祁连山生态法庭，有利于试点片区内生态环境资源的司法保护。

6 打造开放共享的科技支撑平台

甘肃省片区搭建学术交流平台和合作发展平台，吸引国内外高校和科研机构为国家公园建设发展提供技术服务。甘肃省片区在全国率先成立祁连山国家公园(甘肃片区)科技创新联盟，整合省内外20余个科研院所、高校、相关企业等部门和领域的科技资源优势，围绕重大科学问题，开展学术研讨交流，谋划科技攻关方向，确定研究课题架构，联合申报科技计划项目。

致谢：感谢国家林业和草原局国家公园管理办公室，中国科学院生态环境研究中心欧阳志云研究员、卫

伟研究员、孔令桥助理研究员，国家林业和草原局经济发展研究中心李冰教授级高级工程师、赵金成教授级高级工程师、陈雅如高级工程师、李想高级工程师，祁连山国家公园管理局，祁连山国家公园甘肃省管理局，祁连山国家公园青海省管理局等提供支持。部分内容参考了《祁连山国家公园体制试点评估验收报告》，在此一并致谢。

参考文献

Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's national park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 时意专)



• 论坛 • 中国国家公园试点专题

三江源国家公园创建“五个一”管理模式

赵新全*

中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008

赵新全 (2021) 三江源国家公园创建“五个一”管理模式. 生物多样性, 29, 301–303. doi: 10.17520/biods.2021023.

Zhao XQ (2021) The five integrative management strategies of Sanjiangyuan National Park. Biodiversity Science, 29, 301–303. doi: 10.17520/biods.2021023.

The five integrative management strategies of Sanjiangyuan National Park

Xinquan Zhao*

Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008

三江源国家公园体制试点区位于青海省南部, 总面积12.31万km², 平均海拔4,712 m, 包括长江源、黄河源、澜沧江源3个分区, 拥有世界上独一无二的高原湿地系统, 是国家重要的生态安全屏障。自2016年开展体制试点以来, 三江源国家公园紧扣目标定位, 勇担国家使命, 坚决肩负“源头责任”, 深入探索“首创模式”, 先后实施了一系列原创性改革, 实现了经济社会发展、消除贫困、保护生物多样性、应对气候变化协同增效, 走出了一条“借鉴国际经验, 符合中国国情, 具有三江源特点”的国家公园体制创新之路, 探索形成了“政治引领、统一管理、源头治理、系统保护、共建共享”的三江源经验(<http://www.qh.gov.cn/zwgk/system/2020/08/19/010364952.shtml>), 形成了一个部门管理、一种类型整合、一套制度治理、一户一岗管护、一体系统监测的“五个一”的三江源模式, 为其他国家公园建设提供了有益借鉴。

1 一个部门管理

按照不新增行政事业编制、“编随职转, 人随事走”的原则, 从省、州、县相关机构现有编制中调整划转编制409名, 建立了由三江源国家公园管理局、园区管委会以及县、乡、村一级管护队组成的完整的国家公园行政管理体系。整合林业、国土、环保、

水利、农牧等部门的生态保护管理职责, 组建三江源国有自然资源资产管理局和管理分局, 积极探索国家公园及其自然资源集中统一管理的有效途径。“一件事由一个部门来管”的新型保护地管理体制已经形成, “九龙治水”的现象得到有效破解。从上到下理顺自然资源所有权和行政管理权的关系, 是根治“九龙治水”顽症、实现集中统一高效的保护管理和执法的前提。

2 一种类型整合

按照“山水林田湖草是一个生命共同体”的理念, 打破园内原有6类15个保护地人为分割、各自为政、条块管理、互不融通的体制弊端, 对公园范围内不同类型的自然保护地进行功能重组、优化组合, 统一管理, 实行整体保护、系统修复, 自然保护地的原真性和完整性得到有效保护。开展自然资源本底调查并建立相关数据库, 发布白皮书。编制自然资源资产负债表以及资源资产管理权力清单、责任清单, 积极探索将自然资源资产形成的收益纳入财政预算的管理办法。遵循生态保护内在规律, 按照山水林田湖草一体化管理保护的原则, 摸清生态系统家底和特点, 系统谋划、统筹推进, 才能从根本上把握主动权。

收稿日期: 2021-01-17; 接受日期: 2021-03-14

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xqzhao@nwipb.cas.cn

3 一套制度治理

颁布实施中国第一部国家公园地方性法规《三江源国家公园条例(试行)》，编制中国第一个国家公园总体规划《三江源国家公园总体规划》，确定将三江源国家公园建成青藏高原生态保护修复示范区，共建共享、人与自然和谐共生的先行区，青藏高原大自然保护展示和生态文化传承区的愿景和主要目标。同时，针对三江源国家公园建设特定领域为对象，制定5个专项规划，有效完善和补充了《总体规划》相关内容，有力提升了国家公园建设治理能力水平。只有用最严格制度保护生态环境，才能保障国家公园建设在既定的轨道行稳致远。

4 一户一岗管护

设立“一户一岗”生态管护公益岗位，园区17,211名牧民持证上岗，每人月工资1,800元，带动户均年收入增加2万多元，促进了减贫和就业，牧民从生态利用者转变为守护者。形成“一人被聘为生态管护员，全家参与生态保护”的新风尚。生态管护公益岗位与精准脱贫相结合。园区牧民草原承包经营权不变，探索以减轻草地放牧活动的各种特许经营活动，引导牧民从事国家公园生态体验、环境教育服务、生态保护工程劳务、生态监测等工作，使他们获得稳定长效收益。实施草畜平衡、营养平衡管理，缩短家畜饲养周期，减轻草地放牧压力，启动有蹄类野生动物与家养动物平衡管理工程，给野生动物更多的生存空间。只有协调牧民群众脱贫致富与国家公园生态保护的关系，促进人的发展与生态环境和谐共生，才能充分调动广大牧民群众的自觉性和积极性。

5 一体系统监测

综合运用国产高新技术，建成“天地一体化”生态环境监测体系。开展三江源地区高精度三维地理信息基准建设，建成国家公园大数据平台，具备“天上看、地上查、网上管”的监测能力，推动“天地一体化”信息运用，开展全域生态监测。深入开展三江源自然资源和野生动物资源本底调查，为科学保护三江源提供数据支撑。提升三江源国家公园科研和技术水平，与中国科学院合作组建三江源国家公

园研究院，强化人才队伍建设，在青海大学开设国家公园相关课程。广泛开展宣传推介，建立多方交流合作机制，与国外多家国家公园签署合作交流协议。建设高水平国家公园必须依靠科技和人才，整合各单位监测数据，形成数据产品，为国家公园管理提供科技支撑。

通过以上举措，体制机制试点阶段取得明显成效。目前国家公园内藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)、藏原羚(*Procapra ticaudata*)、藏野驴(*Equus kiang*)、野牦牛(*Bos mutus*)和白唇鹿(*Przewalskium albirostris*)分别约为6万、6万、3.6万、1万和1万头(只)，种群数量在快速恢复之中。2016年IUCN红色名录中藏羚羊的濒危级别从“濒危”降为“近危”，2017年IUCN红色名录将雪豹(*Panthera uncia*)从“濒危”降为“易危”(蔡振媛等, 2019)。2000年以来植被生产力增加且质量变好，目前趋于稳定。减畜工程产生了积极影响。新技术的应用推动了草地资源持续利用，遏制了退化草地的蔓延趋势，园区整体变绿变好(赵新全等, 2021)。

三江源国家公园体制试点阶段存在管理体制、资金供给、科技人才支撑、补偿政策等方面诸多问题，为此提出以下建议：

(1)全面理顺事权财权，确保工作有效开展。全面理顺中央和地方财权划分责任，按照事权财权相对等原则，理顺资金投入主体和资金来源渠道，根据《三江源国家公园体制试点方案》明确的“园区建设、管理和运行所需资金今后要逐步纳入中央财政支出范围”等相关规定，建议综合考虑公园面积、资源量、自然条件、生态地位等因素建立生态补偿机制和中央财政专项转移支付制度，设立国家公园建设专项资金科目，确保制度性、常态性的经费安排。建议管理类费用列入中央财政预算，并将生态管护经费及后续的物质装备保障、信息系统运行与维护费等所需费用纳入其中，生态保护和建设项目资金定期测算并分年度切块下达国家公园管理局。

(2)强化人才培养体系，加大科研扶持力度。加大专业人才培养力度，建议由中共中央组织部、人力资源和社会保障部、教育部、发展与改革委员会、财政部等部委联合设立国家公园人才支持专项，培养造就学术带头人，提高专业技术水平。加大科研支持力度，实施专项科研计划，重点开展环境变化

与水资源、生物多样性与生物资源利用、生态系统功能与可持续管理、生态环境监测与大数据平台、体制机制与政策咨询、关键领域和关键技术的系统研究,探索资源环境可承载的绿色发展途径。

(3)推进设立补偿基金,确保资金落实到位。整合形成山水林田湖草一体化的综合性补偿机制。研究制定自然资源和生态环境的量化评价方法,建立资源环境价值评价体系,设立由国家和流域各省份共同注资的黄河流域、长江流域水环境补偿基金,建立独立的第三方结算支付平台,对补偿专项基金进行管理。探索实现多元化补偿模式,发行三江源生态公益彩票,鼓励支持草原碳汇试点,让公益性资金投入成为国家公园建设的重要补充。

致谢: 本文资料来源于《三江源国家公园体制试点评估验收报告》和《三江源国家公园体制试点自评报告》。感谢国家公园第三方评估组专家杨锐、彭

蓉、张明祥、陈雅如以及三江源国家公园管理局提供相关资料。

参考文献

- Cai ZY, Qin W, Gao HM, Wu T, Chi XW, Yang JD, Miao ZY, Zhang JJ, Song PF, Lian XM, Su JP, Zhang TZ (2019) Species diversity and fauna of mammals in Sangjinyuan National Park. *Acta Theriologica Sinica*, 39, 410–420. (in Chinese with English abstract) [蔡振媛, 覃雯, 高红梅, 吴彤, 迟翔文, 杨俊东, 苗紫燕, 张婧捷, 宋鹏飞, 连新明, 苏建平, 张同作 (2019) 三江源国家公园兽类物种多样性及区系分析. *兽类学报*, 39, 410–420.]
- Zhao XQ (2021) *Ecosystem Status, Change and Management in Sanjiangyuan National Park*. Science Press, Beijing. (in press) (in Chinese) [赵新全 (2021) 三江源国家公园生态系统现状、变化及管理. 科学出版社, 北京(印刷中).]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 黄祥忠)



•论坛• 中国国家公园试点专题

三江源国家公园执法体制改革经验及其可复制性

苏红巧¹, 王楠^{2*}, 苏杨¹

1. 国务院发展研究中心管理世界杂志社, 北京 100026; 2. 国家林业和草原局退耕还林还草工程管理中心, 北京 100714

苏红巧, 王楠, 苏杨 (2021) 三江源国家公园执法体制改革经验及其可复制性. 生物多样性, 29, 304–306. doi: 10.17520/biods.2021047.

Su HQ, Wang N, Su Y (2021) The experience and its reference study of law enforcement system of Sanjiangyuan National Park pilot. Biodiversity Science, 29, 304–306. doi: 10.17520/biods.2021047.

The experience and its reference study of law enforcement system of Sanjiangyuan National Park pilot

Hongqiao Su¹, Nan Wang^{2*}, Yang Su¹

1 Management World Journal Press, Development Research Center of the State Council, Beijing 100026

2 Project Management Center for Conversion of Farmland to Forests and Grasses, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714

执法是实现依法行政的最终环节, 是国家公园管理机构实现管理目标的重要工具, 统一执法是我国国家公园管理体制改革的“统一”的重要方面。《建立国家公园体制总体方案》(以下简称《总体方案》)明确, 国家公园体制建设需要坚持将“山水林田湖草作为一个生命共同体, 统筹考虑保护与利用”。国家公园管理机构要实现对山水林田湖草这一生命共同体的统一管理, 执法内容会涉及到自然资源、林业和草原、生态环境、农业农村、水利等自然资源管理部门的执法事项。在国家公园范围内, 需要由国家公园管理机构统一履行资源环境综合行政执法权; 对于游客和商户众多的国家公园(如武夷山、神农架等), 管理机构还需要有包括治安管理、市场监管在内的更广泛的执法权。三江源是由原中央全面深化改革领导小组通过试点方案的第一个国家公园体制试点区, 各方面的改革也走在了试点区前列, 尤其是资源环境综合执法改革方面的经验早就纳入了《总体方案》, 且在其后与中央生态环保综合执法体制改革、行业公安体制改革的衔接中摸索出了既符合中央精神又契合地方需求的经验, 形成了具有三江源特点的资源环境综合执法模式, 值得总结。

1 资源环境执法体制改革经验

三江源国家公园建立了统一的资源环境综合执法队伍、行政执法和刑事司法高效联动机制以及与毗邻省份横向联合综合执法机制。

1.1 建立了统一的资源环境综合执法队伍

(1)建立统一的资源环境综合行政执法队伍。三江源国家公园衔接国家公园体制试点机构设置与属地县级政府职能转变和机构改革, 建立了统一的资源环境综合行政执法队伍。三江源国家公园体制改革过程中, 整合设立三江源国家公园管理局和长江源、黄河源和澜沧江源3个园区管委会(长江源区管委会派出治多管理处、曲麻莱管理处、可可西里管理处3个正县级机构), 形成“一园三区”统一管理机构。并整合3个园区涉及4个县的国土资源、林业资源、水政水资源、环境保护等资源环境管理部门, 设立生态环境和自然资源管理局; 相应整合4个县国土、环境、草原、渔政等部门的执法机构, 设立资源环境执法局, 开展县域集中统一高效的资源环境综合执法, 解决了政出多门、标准不一、职能交叉、推诿扯皮、保护合力不强等问题。

同时, 三江源国家公园通过《三江源国家公园

收稿日期: 2021-02-04; 接受日期: 2021-03-08

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: 1173598534@qq.com

条例(试行)》(以下简称《条例》)将这一执法机制制度化。《条例》第十九条规定,“三江源国家公园设立资源环境综合执法机构,履行资源环境综合执法职责,承担县域园区内外林业、国土、环境、草原监理、渔政、水资源、水土保持、河道管理等执法工作”,并在第七章“法律责任”部分明确,违反《条例》规定的行为,由国家公园资源环境综合执法机构进行执法。

(2)建立国家公园警察队伍。为了顺应国家宏观层面“警是警,政是政,企是企”的改革方向,青海省将森林公安转为国家公园警察总队。考虑到三江源国家公园管理的实际需要,创新森林公安的管理模式:三江源国家公园范围内的森林公安队伍建制上划归省公安厅,基本工资由公安系统支出,但是实际工作中,由三江源国家公园管理局对其进行实质性的业务指导(即其工作主要由管理局安排),这既符合宏观的改革方向,又保障了三江源国家公园范围内资源保护所必需的强有力的执法队伍。此外,在森林公安原有职责基础上,将其执法和案件查处权扩大到三江源国家公园和三江源自然保护区范围内自然资源、生态环境、林草、农牧等自然资源刑事司法领域,形成了事实上的“生态公安”。

1.2 建立资源环境行政执法和刑事司法高效联动机制

为加强行政执法和刑事司法的衔接,三江源国家公园管理局与青海省高级人民法院、省人民检察院建立了生态保护司法合作机制,开展环境资源案件审判工作。三江源国家公园森林公安局与青海省人民检察院侦查监督处建立联席会议制度,积极推进服务和保障三江源国家公园建设专项检察工作。在三江源地区设立第一生态法庭,即玉树州人民法院三江源生态法庭,为三江源国家公园生态环境保护提供有力司法保障。另外,成立了三江源国家公园法治研究会并召开第一次会员代表大会,研究会结合三江源地区生态保护、绿色发展、民生改善、社会稳定的实际,有针对性地研讨体制试点中存在的法治理论和实践问题,把研讨成果应用到实际工作中,促进国家公园法治建设再上新台阶。

1.3 建立与毗邻省份横向联合综合执法机制

三江源国家公园管理局与毗邻省份各相邻保护区管理机构合作,对生态探险游、非法穿越保护区等行为进行联合监管,查处生态环境资源类案件,

打击盗采、盗猎等违法犯罪活动。(1)强化自然保护区联盟合作机制,加强区域生态环境保护和地区间生态环境联防联控工作,签订《青新藏(青海、新疆、西藏)五大自然保护区生态环境保护协作备忘录》,制定《青新藏五大自然保护区协作联盟章程》,建立跨省区执法合作机制,着力加强青新藏三省区边界区域的生态环境资源执法力量。(2)玉树白扎、东仲、江西等保护分区森林公安派出所与西藏昌都市公安局鸟东派出所二级检查站形成联席会议制度,并签订《平安边界联防合作协议》,通过建立青藏两省区跨区域警务联防,信息互通、警力资源共享、边界联防互动、执法办案互助,联合打击边界地区破坏生态资源违法犯罪,实现责任共担、队伍共建、防控联动、成果同享,为创建和谐平安边界打下坚实基础。另外,组建了警务机动队,探索建立突发事件重大案件应急机制,在集中优势力量、保障案件侦破、建立应急机制等方面进行优化,提升生态环境执法效能。

2 资源环境执法体制存在的问题及建议

三江源国家公园结合工作实际开展的资源环境综合执法体制改革虽已取得积极进展,但也仍然存在部分问题有待继续深化改革。(1)资源环境综合行政执法方面,长江源可可西里管理处没有行政执法工作机构,森林公安机关管理体制调整前,相关工作由可可西里管理处森林公安局承担,目前面临行政执法“真空”的困境。建议在未来深化改革过程中,可可西里管理处增加行政执法部门和相应的编制。(2)在国家公园警察队伍管理方面,原先在三江源国家公园管理局设立执法监督处(挂三江源国家级自然保护区森林公安局、三江源国家公园森林公安局牌子),有13名森林公安专项编制,但是改革之后划转公安厅,在管理局层面没有执法统筹管理部门;青海省公安厅和三江源国家公园管理局尚未建立长效合作机制,这一改革模式没有制度化。建议由青海省人民政府统筹,推动三江源管理局和青海省公安厅继续探索国家公园警察队伍的管理模式,建立长效合作机制。

3 资源环境执法体制改革经验借鉴

三江源国家公园的资源环境执法体制改革方向对我国国家公园体制改革具有较强的借鉴意义,

但是其中资源环境综合执法队伍的组建模式仍需要根据各地的实际情况进行探索。其他试点区资源环境综合执法队伍的组建, 面临国家宏观层面森林公安改革和生态环境综合执法改革交叉等难题, 需要探索不同的建立方式。如神农架国家公园体制试点是整合原保护地执法队伍, 并拓展生态环境执法内容——通过与神农架林区生态环境局签订委托书, 行使辖区内的生态环境行政执法权; 武夷山国家公园体制试点也是整合原保护地执法队伍, 并配套创新司法机制——建立省级公检法司联合执法办案协作机制, 设立南平市驻国家公园检察官办公室; 钱江源国家公园体制试点是新组建综合行政执法队。

既有经验表明, 资源管理和游客行为是国家公园等自然保护地执法活动涉及到的主要方面, 保护地管理机构与地方政府、其他部门的紧密合作是实现管理目标的重要保障。体制试点阶段, 我国国家

公园重在关注“生态保护第一”, 多个试点区专项执法行动针对的也都是资源环境违法行为。但是, 三江源等盗猎活动相对较多的试点区和武夷山、大熊猫等游客和旅游产业相对发达试点区的经验表明, 对盗猎等刑事犯罪行为的及时处理和因客流量带来的治安问题也不容忽视。三江源国家公园通过创新国家公园警察队伍管理模式解决了这类问题, 存在类似问题的其他国家公园, 需要借鉴这一经验, 探索与公安队伍的长效合作机制。未来在《国家公园法》中需要对国家公园范围内的资源环境综合行政执法、刑事司法和治安管理等执法主体、执法内容和范围、执法机制等予以规定。

致谢: 特别感谢三江源国家公园管理局的赫万成和田俊量在本文撰写过程中给予的支持和帮助。

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 中国国家公园试点专题

大熊猫国家公园体制试点的经验与挑战

李晟^{1*}, 冯杰², 李彬彬³, 吕植^{1,2}

1. 北京大学生命科学学院&生态研究中心, 北京 100871; 2. 山水自然保护中心, 北京 100871; 3. 昆山杜克大学环境研究中心, 江苏昆山 215316

李晟, 冯杰, 李彬彬, 吕植 (2021) 大熊猫国家公园体制试点的经验与挑战 生物多样性, 29, 307–311. doi: 10.17520/biods.2021074.

Li S, Feng J, Li BV, Lü Z (2021) The Giant Panda National Park: Experiences and lessons learned from the pilot. Biodiversity Science, 29, 307–311. doi: 10.17520/biods.2021074.

The Giant Panda National Park: Experiences and lessons learned from the pilot

Sheng Li^{1*}, Jie Feng², Binbin V. Li³, Zhi Lü^{1,2}

1 School of Life Sciences & Institute of Ecology, Peking University, Beijing 100871

2 Shanshui Conservation Center, Beijing 100871

3 Environmental Research Center, Duke Kunshan University, Kunshan, Jiangsu 215316

大熊猫国家公园试点于2016年8月由四川、陕西、甘肃三省人民政府联合上报《大熊猫国家公园体制试点方案》；2016年12月5日，习近平总书记主持召开中央全面深化改革领导小组第三十次会议审议通过《大熊猫国家公园体制试点方案》；2017年1月31日，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《大熊猫国家公园体制试点方案》；2018年10月29日，大熊猫国家公园管理局正式挂牌；2018年11月，大熊猫祁连山国家公园甘肃省管理局、大熊猫国家公园四川省管理局、大熊猫国家公园陕西省管理局相继挂牌；2020年3月17日，大熊猫国家公园管理局印发《大熊猫国家公园管理办法(试行)》；2020年6月，国家林业和草原局(国家公园管理局)印发《大熊猫国家公园总体规划(试行)》。在试点过程中，初步建立起由大熊猫国家公园管理局、省管理局、管理分局、管护站(管护总站)构成的实际管理体系，其中省管理局3个、管理分局14个。

大熊猫国家公园试点区面积27,134 km²，分布在3省12市(州)30县(市、区)，其中四川、陕西、甘肃省内的面积分别为20,177 km² (占总面积的74.36%)、4,386 km² (16.16%)、2,571 km² (9.48%)。

试点区内原有各类自然保护地81个，总面积21,347 km² (扣除交叉重叠部分)，占试点区总面积的78.67% (Huang et al, 2020)。

1 关键经验

大熊猫国家公园试点实施期间，在管理体制创新、决策咨询机制创建、跨区联合、司法协作等方面均进行了深入的摸索与实践，取得了多方面的成效与经验。其中，以下几方面的试点经验尤其突出，具有较好的示范与推广价值。

1.1 充分体现原真性与完整性

在首批10个国家公园体制试点中，大熊猫国家公园试点面积广大，仅次于三江源(123,100 km²)与祁连山(50,237 km²)试点区(臧振华等, 2020)。充足的面积确保了国家公园试点能够充分体现以大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)为代表的山地生态系统的原真性与完整性。根据全国第四次大熊猫调查结果，试点区范围覆盖了野生大熊猫种群数量的87.50% (约1,631只)和大熊猫栖息地面积的70.25% (18,101 km²)，同时覆盖了至少641个脊椎动物物种和3,446个植物物种的栖息地(Huang et al, 2020)。虽

收稿日期: 2021-03-01; 接受日期: 2021-03-11

基金项目: 生态环境部生物多样性调查、观测与评估项目(2019HJ2096001006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shengli@pku.edu.cn

然大熊猫国家公园试点以单一旗舰物种大熊猫命名,但已有研究显示,以大熊猫为目标物种的保护投入可以惠及与之同域分布的其他大量野生动植物物种(Li & Pimm, 2016),同时带来价值可观且多样的生态系统服务(Wei et al, 2018)。

1.2 积极探索社区共建共管,创新管理体制

《大熊猫国家公园体制试点方案》指出,坚持开放合作理念,创新生态保护管理机制,强调全民参与,共建共享,引导当地居民、社会组织、国际社会参与,形成全社会共建共管新模式,完善当地居民参与生态保护的利益分配机制和多元化生态补偿机制,探索可持续的社区发展机制,促进人与自然和谐共生。

在试点过程中,大熊猫国家公园结合已有的工作基础,广泛联合保护NGO、当地社区、公益基金会和企业等多方力量与利益相关者,通过建立保护小区、创建社区保护与巡护队伍、建立社区公益基金支持居民发展生态友好型生计与产业等多种途径,进行了社区共建共管的尝试,成功建立老河沟公益保护地、关坝保护小区等示范模式(Jin, 2018; 王伟和李俊生, 2021),尝试构建“公园管理机构-村级组织-公益组织”三位一体格局(臧振华等, 2020),并在共建共管共享实践的基础上总结经验,形成《大熊猫国家公园社区建设典型案例集》。在分局层面试点建立共管理事会,丰富社会各界参与支持大熊猫国家公园建设发展的方式与途径。在岷山区域试点四川、甘肃两省多县跨行政区域的联合行动,最大的亮点是将区内的9个以社区、社会组织为主体进行管理的自然保护地加入进来,从原来的“对手”变成现在的“战友”,共建共管联合行动,共同保护大熊猫栖息地。在大熊猫国家公园内和入口社区开展“蚂蚁森林”公益保护地试点,上线关坝、福寿两个社区保护地,认领公众3,059万人次,获得社会资金440余万元支持今后10年的生态保护与绿色发展,探索政府购买社区生态保护服务机制,为生态公益岗位设置积累经验。试点期间采取区别于自然保护区建设的理念,用疏通代替围堵,用融合代替部分搬迁,用共建代替死守的方式进行生态保护管理。这些创新的管理体制为充分调动多方社会资源投入国家公园的保护与管理提供了有益的尝试,同时探索了如何在国家公园的社区管理中妥善处理保护与发展的关系,调动当地社区参与公园管理的

积极性,对于其他国家公园体制试点区具有非常重要的借鉴价值(吕植等, 2015; Jin, 2018; 臧振华等, 2020)。

大熊猫国家公园试点与管理绕不开社区参与,更离不开社区参与。社区是大熊猫国家公园的重要组成部分,是大熊猫栖息地实现完整性、连通性的重点和难点。在新的生态保护机制和配套政策下,社区正逐渐成为大熊猫国家公园建设的生力军。

1.3 建立并持续完善系统化、标准化的野生动物监测体系

生物多样性监测是国家公园保护的核心基础之一(米湘成, 2019)。得益于20世纪60年代以来国家与国际社会对大熊猫这一旗舰物种及其栖息地保护的大力投入,国家公园试点启动之前,试点区范围内已建立起以自然保护区为主要类型的众多自然保护地,在秦岭、岷山、邛崃山等片区已经形成相互连片的区域性自然保护区群(Li et al, 2010; Yang et al, 2020)。以这些大熊猫保护地为基础,结合历次全国大熊猫调查,该区域建立了较为系统的针对野生大熊猫种群、栖息地及伴生动物的监测体系(国家林业局, 2006; 四川省林业厅, 2015)。试点区也是我国最早开展大规模野生动物红外相机监测的地区(Li et al, 2010);经过十多年的发展,在国家公园试点实施期间,试点区内已经建立起较为标准化的红外相机监测网络,目前布设有红外相机近1万台(Li et al, 2020; 李晟等, 2020)。以大熊猫保护区公里网格监测规程为核心的监测方案经整理、完善后,以行业地方标准的形式正式发布,即《四川省地方标准:野生动物红外相机监测技术规程》(DB51/T2287-2016)(李晟等, 2020),为国家公园标准化野生动物监测体系的构建奠定了基础。这样的监测体系建设,不仅为区内的生物多样性编目与监测构建了可靠的基础,也在近年来诸多科研成果的产出中起到了关键的作用,同时为保护地的保护成效评估(Shen et al, 2020)、景观廊道规划(Wang et al, 2014)、保护管理决策等提供了科学的支撑。

2 问题与挑战

2.1 管理体制与运行机制仍有待理顺,各级管理机构的责权利需要澄清

大熊猫国家公园试点虽然确立了“管理局、省管理局、管理分局、管护站”的4级管理架构,但在

实际工作中, 还未建立起自上而下、统一领导的运行机制与管理体制, 公园管理局缺乏有效实施管理的各项职权。在试点过程中, 大熊猫国家公园由中央与地方共同管理, 但中央(例如国家林业和草原局、国家公园管理局)与地方(例如省级林业和草原局、国家公园省管理局)之间在权责、财务、人事等方面的管理体制还未完全理顺。各级地方管理机构对各自所需承担的职责和所拥有的权利不甚明了, 国家公园范围内的保护区依旧按照原有管理机制运行, 且普遍认为试点实施期间乃至国家公园正式建立之后, 自身将面临承担责任增大而可用资源有限甚至减少的困境。管理人员普遍感到目前责任与权利不相匹配, 这已经成为各级地方管理机构缺乏积极性、主动性的内在机制性问题。

2.2 跨省共建与管理难度大

大熊猫国家公园范围大、涉及广, 区内原有的众多自然保护地性质、级别构成复杂, 空间重叠与管理交叉程度较高(马童慧等, 2019; Yang et al, 2020); 在此基础上, 区内还有50个国有林场、15个森工企业、3个省属林业局, 需要结合实际情况分类处置。各省片区之间, 在以往的行政体系、人事设置、办事流程、管理方式与风格上均具有较大差异, 其背后既有各种历史原因也有现实客观限制, 目前形成了事实上的三省分治管理格局, 进行跨省共建与管理协调的难度大。尤其是陕西省秦岭片区, 由于在地理位置上相对孤立, 大熊猫栖息地和种群与其他片区相隔离, 此外保护面临的威胁有所区别, 因而难以与四川和甘肃形成联合管理机制。如果各省片区之间长期难以形成统一, 将来有可能出现各片区各行其是、公园管理局难以统领的局面。

2.3 社区发展与保护的矛盾仍是国家公园面临的主要挑战

试点区涉及四川、陕西、甘肃的12个市(州)、30个县(市、区)、152个乡镇, 共12.08万人, 其中常住人口8.51万人, 有藏族、彝族、羌族、回族等19个少数民族, 核心保护区内现有居民5,500人以上(Huang et al, 2020); 区内集体土地面积7,758 km², 占总面积的 28.59%。相较于其他国家公园试点, 大熊猫国家公园试点区社区人数多、贫困程度高、文化多样性强、传统知识丰富、生产生活与自然资源关系紧密。区内及周边居民采集薪柴、散放家畜等人为活动仍是大熊猫栖息地内重要的干扰类型

(Hull et al, 2014; Wang et al, 2015; Li et al, 2017)。作为主要生计来源, 很多生产活动(例如放牧)存在涉及面广、涉及人群贫富差距大、贫困人口缺乏其他替代生计等问题, 保护与发展的冲突问题严重。除国家公园建设外, 该地区不同政策间还存在相互矛盾的问题。例如一些扶贫项目缺乏对生态影响的考量, 其通过小额贷款等方式促进社区畜牧业发展, 有可能加剧人类活动干扰对熊猫栖息地的影响。试点区内及周边生活有大量的居民, 存在多样的人类活动与干扰, 野生动物与当地社区生产生活冲突高发, 土地与林地权属复杂, 矿山和水电等产业退出后的补偿与就业安置困难, 生态产品价值实现方式较为单一, 地区间的区域发展水平差异巨大等, 这些因素都将给国家公园后续的有效管理带来非常大的挑战。国家公园内可持续生计发展需要各级管理部门联合地方政府与社区投入较多的精力与资源, 并针对各地的具体情况, 制定精细化、差异化的管理策略与措施。

2.4 人员编制亟待加强与优化

由于诸多历史原因, 国家公园试点区内原有保护地的人员编制数量存在明显的区域性不均衡。试点区内原有保护地、林场、森工企业等单位的在职职工、临聘职工与离退休人员数量庞大, 这些人员的安置、分流需要公园管理机构与各级政府投入大量资源与精力, 多方通力合作, 共同解决。国家公园从事一线巡护、监测等日常工作的人员中, 普遍存在年龄偏大、教育程度偏低的问题。同时, 大量一线工作人员为临聘制或其他非正式人员(如“天保工程”聘用人员), 在现行的人事招聘、考核与管理体制下, 较难甚至无法获得正式编制, 从而可能影响试点前后人员队伍的持续性、稳定性和工作积极性。现有编制及招聘、考核、薪酬制度需要突破原有体制, 并配套当地政策, 吸引不同类型人才顺利进入国家公园系统, 长期从事一线巡护、科学研究、管理等不同岗位的工作。

2.5 需持续重视栖息地破碎化问题与连通性恢复

由于自然地形与长期以来各类人类活动和基础设施建设的影响, 大熊猫国家公园试点区内栖息地整体上破碎化较为严重。区内大熊猫栖息地和种群被隔离成18个斑块和局域种群, 其中种群数量大于100只的有6个, 主要分布在岷山中部、邛崃山中部和秦岭中部; 种群数量30-100只的有2个; 种





群数量小于30只的有10个。过去数十年间,大熊猫野生种群及其栖息地的保护取得了显著的成效,野生大熊猫的种群数量与栖息地面积在20世纪中后期持续下降的趋势得以扭转,并在近20年来恢复增长,整体受威胁状况得到极大改善(Yang et al, 2017; Swaisgood et al, 2018; Wei et al, 2018)。但与此同时,大熊猫栖息地斑块的破碎化程度却仍在加剧(Xu et al, 2017; Yang et al, 2017)。体制试点实施以来,栖息地破碎化问题及景观廊道的恢复持续得到重视,通过部分区域生态走廊的建设,大熊猫栖息地的破碎化得到了一定程度的修复;再加上近年来重引入项目的顺利实施,为部分大熊猫隔离小种群的复壮与种群间交流创造了有利条件(Yang et al, 2018)。但长远来看,试点区内栖息地的破碎化问题和栖息地斑块之间连通性的恢复,是国家公园今后需长期投入和解决的关键问题。在大熊猫国家公园试点方案中,没有包括大小凉山以及岷山北部的小种群。这些小种群的继续生存,特别是如何与国家公园内的核心种群维持或恢复基因交流,关乎整个大熊猫野生种群的健康,也应是国家公园规划和建设中需要考虑的内容。

大熊猫国家公园取得的经验可供其他国家公园和保护地借鉴,而从宏观的角度来看,我国首批国家公园试点均面临一些共性问题。例如:(1)国家公园立法还未完成,相关法律法规的缺位导致对新划入国家公园范围的(非保护区)区域的管理缺乏法律依据。(2)在试点实施期间,在国家层面上没有增加人员编制,未来是否有这方面的考虑尚不得知。(3)国家公园试点期间及正式建立之后,其长期运行与管理所需的资金来源与规划、使用机制仍未建立,未能体现出试点方案中所提出的以中央财政为主的资金运行机制。如果人与钱这两个基本要素存在较大的不确定性,将会给国家公园对人才的吸引力和长效管理机制带来很大挑战。(4)这些试点区均存在由于历史上人类活动带来的不同程度的生态系统退化与破碎化问题,并面临当前和今后的气候变化等大尺度环境变化和社会经济快速发展所带来的潜在影响。如何对区内生态系统、动植物种群、栖息地的恢复与修复进行长远规划,有效纳入国家公园的长期保护目标与管理计划之中,并与国家或地方的其他生态保护工程及政策相结合,也是今后以国家公园为主体的新的自然保护地体系建设过

程中需要考虑和解决的问题。

致谢: 感谢大熊猫国家公园管理局、各省管理局与区内保护地工作人员提供的大量基础材料与信息。感谢张黎明、古晓东、张晓峰、蒋仕伟参与讨论并提供宝贵建议。

ORCID

李晟  <https://orcid.org/0000-0001-7200-9539>
冯杰  <https://orcid.org/0000-0003-2680-6080>
李彬彬  <https://orcid.org/0000-0001-6188-7512>
吕植  <https://orcid.org/0000-0001-7428-2846>

参考文献

- Huang QY, Fei YX, Yang HB, Gu XD, Songer M (2020) Giant Panda National Park, a step towards streamlining protected areas and cohesive conservation management in China. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00947.
- Hull V, Zhang JD, Zhou SQ, Huang JY, Viña A, Liu W, Tuanmu MN, Li RG, Liu D, Xu WH, Huang Y, Ouyang ZY, Zhang HM, Liu JG (2014) Impact of livestock on giant pandas and their habitat. *Journal for Nature Conservation*, 22, 256–264.
- Jin T (2018) China's Land Trust Reserves. In: *Guidelines for Privately Protected Areas* (ed. Mitchell BA). Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 29. IUCN, Gland, Switzerland.
- Li BV, Pimm SL (2016) China's endemic vertebrates sheltering under the protective umbrella of the giant panda. *Conservation Biology*, 30, 329–339.
- Li BV, Pimm SL, Li S, Zhao LJ, Luo CP (2017) Free-ranging livestock threaten the long-term survival of giant pandas. *Biological Conservation*, 216, 18–25.
- Li S (2020) Development progress and outlook of the wildlife camera-trapping networks in China. *Biodiversity Science*, 28, 1045–1048. (in Chinese) [李晟 (2020) 中国野生动物红外相机监测网络建设进展与展望. *生物多样性*, 28, 1045–1048.]
- Li S, McShea WJ, Wang DJ, Gu XD, Zhang XF, Zhang L, Shen XL (2020) Retreat of large carnivores across the giant panda distribution range. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1327–1331.
- Li S, McShea WJ, Wang DJ, Shen XL, Bu HL, Guan TP, Wang F, Gu XD, Zhang XF, Liao HH (2020) Construction progress of the Camera-trapping Network for the Mountains of Southwest China. *Biodiversity Science*, 28, 1049–1058. (in Chinese with English abstract) [李晟, McShea WJ, 王大军, 申小莉, 卜红亮, 官天培, 王放, 古晓东, 张晓峰, 廖灏泓 (2020) 西南山地红外相机监测网络建设进展. *生物多样性*, 28, 1049–1058.]

- Li S, Wang DJ, Gu XD, McShea WJ (2010) Beyond pandas, the need for a standardized monitoring protocol for large mammals in Chinese nature reserves. *Biodiversity and Conservation*, 19, 3195–3206.
- Lü Z, Gu L, Wen C, Wang H, Zhong J (2015) China Nature Watch 2014: An independent report on China's biodiversity conservation status. *Biodiversity Science*, 23, 570–574. (in Chinese with English abstract) [吕植, 顾垒, 闻丞, 王昊, 钟嘉 (2015) 中国自然观察2014: 一份关于中国生物多样性保护的独立报告. *生物多样性*, 23, 570–574.]
- Ma TH, Lü C, Lei GC (2019) The spatial overlapping analysis for China's natural protected area and countermeasures for the optimization and integration of protected area system. *Biodiversity Science*, 27, 758–771. (in Chinese with English abstract) [马童慧, 吕偲, 雷光春 (2019) 中国自然保护区空间重叠分析与保护地体系优化整合对策. *生物多样性*, 27, 758–771.]
- Mi XC (2019) Biodiversity monitoring and research are basis of national park conservation. *Biodiversity Science*, 27, 1–4. (in Chinese) [米湘成 (2019) 生物多样性监测与研究是国家公园保护的基础. *生物多样性*, 27, 1–4.]
- Shen XL, Li S, McShea WJ, Wang DJ, Yu JP, Shi XG, Dong W, Mi XC, Ma KP (2020) Effectiveness of management zoning designed for flagship species in protecting sympatric species. *Conservation Biology*, 34, 158–167.
- Sichuan Forestry Department (2015) The Pandas of Sichuan: The 4th Survey Report on Giant Panda in Sichuan Province. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [四川省林业厅 (2015) 四川的大熊猫: 四川省第四次大熊猫调查报告. 四川科学技术出版社, 成都.]
- State Forestry Administration (2006) The 3rd National Survey Report on Giant Panda in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [国家林业局 (2006) 全国第三次大熊猫调查报告. 科学出版社, 北京.]
- Swaisgood RR, Wang DJ, Wei FW (2018) Panda downlisted but not out of the woods. *Conservation Letters*, 11, e12355.
- Wang F, McShea WJ, Wang DJ, Li S (2015) Shared resources between giant panda and sympatric wild and domestic mammals. *Biological Conservation*, 186, 319–325.
- Wang F, McShea WJ, Wang DJ, Li S, Zhao Q, Wang H, Lü Z (2014) Evaluating landscape options for corridor restoration between giant panda reserves. *PLoS ONE*, 9, e105086.
- Wang W, Li JS (2021) *In-situ* conservation of biodiversity in China: Advances and prospects. *Biodiversity Science*, 29, 133–149. (in Chinese with English abstract) [王伟, 李俊生 (2021) 中国生物多样性就地保护成效与展望. *生物多样性*, 29, 133–149.]
- Wei FW, Costanza R, Dai Q, Stoeckl N, Gu XD, Farber S, Nie YG, Kubiszewski I, Hu YB, Swaisgood R, Yang XY, Bruford M, Chen YP, Voinov A, Qi DW, Owen M, Yan L, Kenny DC, Zhang ZJ, Hou R, Jiang SW, Liu HB, Zhan XJ, Zhang L, Yang B, Zhao LJ, Zheng XG, Zhou WL, Wen YL, Gao HR, Zhang W (2018) The value of ecosystem services from giant panda reserves. *Current Biology*, 28, 2174–2180.
- Xu WH, Viña A, Kong LQ, Pimm SL, Zhang JJ, Yang W, Xiao Y, Zhang L, Chen XD, Liu JG, Ouyang ZY (2017) Reassessing the conservation status of the giant panda using remote sensing. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 1635–1638.
- Yang B, Qin SY, Xu WS, Busch J, Yang XY, Gu XD, Yang ZS, Wang B, Dai Q, Xu Y (2020) Gap analysis of giant panda conservation as an example for planning China's national park system. *Current Biology*, 30, 1287–1291.
- Yang HB, Viña A, Tang Y, Zhang JD, Wang F, Zhao ZQ, Liu JG (2017) Range-wide evaluation of wildlife habitat change: A demonstration using giant pandas. *Biological Conservation*, 213, 203–209.
- Yang ZS, Gu XD, Nie YG, Huang F, Huang Y, Dai Q, Hu YB, Yang Y, Zhou X, Zhang HM, Yang XY, Wei FW (2018) Reintroduction of the giant panda into the wild: A good start suggests a bright future. *Biological Conservation*, 217, 181–186.
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's national park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 时意专)



•论坛• 中国国家公园试点专题

神农架国家公园体制试点特色与建议

谢宗强^{ID 1,2*}, 申国珍^{ID 1}

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

谢宗强, 申国珍 (2021) 神农架国家公园体制试点特色与建议. 生物多样性, 29, 312–314. doi: 10.17520/biods.2021048.

Xie ZQ, Shen GZ (2021) Distinguishing feature and suggestions of Shennongjia National Park system pilot. Biodiversity Science, 29, 312–314. doi: 10.17520/biods.2021048.

Distinguishing feature and suggestions of Shennongjia National Park system pilot

Zongqiang Xie^{ID 1,2*}, Guozhen Shen^{ID 1}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

神农架完好保留了我国北亚热带山地丰富独特的物种多样性和生态系统类型及其生物生态学过程, 是公认的全球生物多样性保护关键地区, 也是具有地理标志意义的最重要的国家生态安全屏障区之一。神农架自然地域总面积12,837.42 km², 其中, 湖北省有11,050.60 km², 占总面积的86.1%; 重庆市有1,498.23 km², 占11.7%; 陕西省有288.59 km², 占2.2%。海拔1,000 m以下的区域有4,618.91 km², 占总面积的36.0%; 1,000–1,500 m有6,945.75 km², 占54.1%; 2,000–3,000 m有1,271.88 km², 占9.9%; 3,000 m以上仅有0.88 km² (徐文婷等, 2019)。

神农架自然地域内保护地类型多样、各类保护地范围交叉重叠, “九龙治水”式多头管理问题突出。按照《建立国家公园体制总体方案》, 国家批准在该区域内开展国家公园体制试点工作。神农架国家公园试点区总面积1,170 km², 全部在神农架林区行政界内, 占其总面积(3,253 km²)的36.0%, 占神农架自然地域总面积的9.1%。试点区森林覆盖率96%。

1 体制试点特色

1.1 完成四局合一, 探索出交叉重叠自然保护地的整合模式

在对现有的世界自然遗产地、世界地质公园、

国家级自然保护区、省级自然保护区、省级风景名胜区、国家地质公园、国家森林公园、国家湿地公园等8类自然保护地综合评价的基础上, 打破因资源分类造成的条块割裂局面, 梳理出北亚热带自然生态系统和生物多样性典型区域, 合并重组现有各类自然保护地, 优化边界范围和功能分区, 划定常绿落叶阔叶混交林和以其为基带的海拔梯度上植被垂直带谱及生物多样性最富集部分为神农架国家公园。

在此基础上, 设置神农架国家公园管理局, 整合了神农架国家级自然保护区管理局、大九湖湿地公园管理局、神农架国家地质公园管理局、神农架林区林业管理局等4个管理局的职责, 不再保留被归并的自然保护地名称和机构, 解决自然保护地区域交叉、空间重叠、保护管理分割的问题, 确保了神农架国家公园在维护国家生态安全关键区域中的首要地位。

1.2 加强协同推进, 建立神农架国家公园垂直管理体系

神农架国家公园管理局受湖北省政府垂直管理, 暂由神农架林区政府代管。湖北省政府建立了神农架国家公园体制试点领导小组和联席会议工作机制, 先后召开37次会议, 及时解决区域范围、功能分区、管理体制、资金机制等体制试点重大事

收稿日期: 2021-02-04; 接受日期: 2021-03-10

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xie@ibcas.ac.cn

项。神农架国家公园管理局公布实施了《神农架国家公园保护条例》，明确了国家公园管理局和地方政府事权，充分调动林区政府积极性，在国家公园规划、建设、管理、监督、保护和投入等方面发挥作用。

神农架国家公园被划分为4个管理区18个网格管护小区，并建立相应的管理机构，形成“管理局—管理处—网格小区管护中心”的向下垂直管理体系。管理局设立11个内设机构和4个直属单位，承担人员和财务管理、行业管理、科研监测、治安和执法等职责；管理处对域内资源进行分区监测及治安和执法等科学化管理；管护中心对资源进行精细化管理。这种管理体系合理分区，差别化管控，既严格保护又便于基层操作，实现了全过程全方位统一管理。

神农架国家公园实行的垂直管理模式，可确保国家政策和保护措施的落地生根。

1.3 贯彻依法依规治理，筑牢良性循环的监管机制

除了《神农架国家公园保护条例》外，《神农架国家公园特许经营管理办法(试行)》的颁布，规范了神农架国家公园特许经营项目和生态旅游活动。此外，还相继出台了资源监测、资源(天然林)保护、护林防火及纪检监察、社会综合治理、信访举报等方面的7项制度和办法。

神农架国家公园管理局按照《神农架国家公园总体规划》对自然资源实施分区分级、科学化、精细化管理，提升了保护管理效能。同时，制订了保护与生态体验、科研科普、社区发展、信息化、环境影响评价等5个专项规划。

这些举措筑牢了良性循环的监管机制，确保国家公园各项重点工作的有序推进。

1.4 重视科技引领，实行依托科研监测的国家公园保护和建设机制

神农架国家公园重视科研监测，建立神农架国家公园科学研究院和金丝猴研究基地等16处科研监测平台，打造生物多样性立体监测体系，全面掌握自然资源特征。在此基础上，深入研究野生动物生活习性、迁徙规律等，建设上跨式、下涵式、缓坡式3类25处生态廊道。利用高科技手段和现代化设备，加强野外保护站点、巡护路网、森林草原防火等监测，逐步实现规范化、信息化监测巡护。实施《国家公园野外巡护技术规程》和《保护地生物监测技术规范》地方标准，指导日常巡护和监测管

理。2016—2020年，开展野外远程巡护9,780天，巡护里程达35,536.38 km，获得调查表格和监测图片4万多份，实现了试点区资源管护全覆盖、无盲点。

1.5 建立跨省联盟，构建保护地互动融合、协同共管的工作机制

为促进秦巴山地生物多样性保护和自然资源可持续利用，神农架国家公园牵头成立了“鄂西渝东毗邻自然保护地联盟”，将神农架国家公园毗邻自然保护地纳入GEF大神农架项目，成功召开了三届联盟会议，形成了突破行政区划限制的2省(市)“7+2”(7个成员+2个观察员)大保护新格局(成员为湖北的神农架、堵河源、十八里长峡、巴东金丝猴、万朝山和重庆的五里坡、阴条岭等7个保护区，观察员为重庆宝雪山、湖北赛武当等2个保护区)。联盟架起了保护地沟通合作的桥梁，其辐射带动作用凸显，有效维护了神农架自然地域生物多样性和生态系统的连续性和完整性。

1.6 推动多方参与，助力安居乐业，创新全民共享的发展机制

试点区在保护的前提下，划定适当区域，建立了“局—管理处—社区”共建共管体系，开展生态教育、自然体验、生态旅游等活动，构建高品质、多样化的生态产品体系。扶持和规范周边原住民从事环境友好型经营活动，发布特许经营管理办法，指导社区共同参与的特许经营。制定《生态管护员聘用方案》和《生态管护岗位管理规范》，按照生态保护需求设立生态管护岗，优先聘用社区居民承担生态管护和监管工作。采用“农户+基地+合作社”的发展模式，定期召开社区共建共管联席会议，鼓励和扶持社区发展珍稀树种苗木和中草药种植产业。推行参与式社区管理，建立志愿者服务体系，健全自然保护地社会捐赠制度，激励企业、社会组织和个人参与自然保护地生态保护、建设与发展。与保险公司共同建立了野生动物损害及自然灾害的保险机制，最大程度地保障农户和养殖户的收益。出台了一系列生态移民搬迁补贴和保障政策，实行每户每年3,000元的以电代薪补贴，累计节约薪柴7,848 m³，减少破坏林地5.33 km²。这些尝试在加强社区参与保护、引导扶持社区产业发展等方面，形成了具有地方特色的社区共建共管创新机制。

2 问题与建议

2.1 试点区完整性有待提升

神农架自然地域范围充分体现了地质构造的奠基性、山地和水系的完整性、生物和生态的系统性。神农架国家公园确立了神农架在维护国家生态安全关键区域中的首要地位。湖北省发展和改革委员会在2015年召集省编办、国土资源厅等12部门召开首次体制试点联席会议时,曾确定以神农架林区全域作为国家公园体制试点区范围^①。目前,神农架国家公园试点区全部在神农架林区行政界内,占其总面积的36.0%,占神农架自然地域总面积的9.1%,难以完整展示和代表神农架这一相对独立的自然地理单元在生态保护和区域发展方面的关键要素和过程(臧振华等, 2020)。试点区范围应结合神农架这一相对独立的自然地理单元关键要素的特点,整合周边具有重要生态价值的自然保护地,扩充足够的面积以充分展现生物和生态的原真性和典型性,提升神农架国家公园的完整性和国家代表性。

2.2 管理体制有待完善

虽然湖北省明文确定神农架国家公园管理局由湖北省政府垂直管理,但实际仍由神农架林区政府管理,没有脱开原有的神农架林区政府管理模式。这种代管体制在整合林区范围之外的周边相邻保护地时,面临协调和管理困难,难以完成神农架国家公园的历史使命。建议对标《建立国家公园体制总体方案》和《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》的要求,理顺神农架国家公园管理局与神农架林区人民政府的关系,尽快落实管理机构由省级政府部门直管。

2.3 特许经营不够规范

神农架国家公园管理局与神农旅游投资集团公司签订的《神农架国家公园旅游资源特许经营协议》,约定特许经营区域为神农顶、大九湖、官门山、神农坛、天生桥及太和山游憩区,而《国家公园体制试点区试点实施方案大纲》明确禁止“整体转让”“上市”等与国家公园性质相违背的试点内

容。这种偏离上级政策的做法难以达到国家公园“保护为主,全民公益性优先”(苏杨等, 2019)的要求。建议加强国家公园管理部门的主导作用,认真领会国家公园体制试点区有关特许经营的政策和精神,依法依规安排部署特许经营活动,协调和保障当地居民的权益(王毅和黄宝荣, 2019)。建立长效的社区共管和生态补偿机制,解决社区发展和资源保护面临的难题。

致谢: 感谢神农架国家公园管理局提供相关资料!

ORCID

谢宗强  <https://orcid.org/0000-0001-8312-2318>

申国珍  <https://orcid.org/0000-0002-5778-1042>

参考文献

- Su Y, Zhang YJ, Shi JL (2019) Annual Report on National Park Management System in China (2019–2020). Social Sciences Academic Press, Beijing. (in Chinese) [苏杨, 张玉钧, 石金莲 (2019) 中国国家公园体制建设报告 (2019–2020). 社会科学文献出版社, 北京.]
- Wang Y, Huang BR (2019) Institutional reform for building China's national park system: Review and prospects. *Biodiversity Science*, 27, 117–122. (in Chinese with English abstract) [王毅, 黄宝荣 (2019) 中国国家公园体制改革: 回顾与前瞻. *生物多样性*, 27, 117–122.]
- Xu WT, Xie ZQ, Shen GZ, Zhou YB, Zhao CM, Xiong GM, Ge JL (2019) The nature and geography scope of Shennongjia. *Territory & Natural Resources Study*, (3), 42–46. (in Chinese with English abstract) [徐文婷, 谢宗强, 申国珍, 周友兵, 赵常明, 熊高明, 葛结林 (2019) 神农架自然地域范围的界定及其属性. *国土与自然资源研究*, (3), 42–46.]
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's national park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 闫文杰)

① 湖北省人民政府 (2020) 神农架国家公园体制试点评估验收自查报告.



•论坛• 中国国家公园试点专题

钱江源–百山祖国家公园试点经验与发展方向

申小莉^{ID 1*}, 李晟^{ID 2}, 马克平^{ID 1}

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 北京大学生命科学学院, 北京 100871

申小莉, 李晟, 马克平 (2021) 钱江源–百山祖国家公园试点经验与发展方向. 生物多样性, 29, 315–318. doi: 10.17520/biods.2021079.
Shen XL, Li S, Ma KP (2021) Experiences of and suggestions for the development of the Qianjiangyuan-Baishanzu National Park pilot. Biodiversity Science, 29, 315–318. doi: 10.17520/biods.2021079.

Experiences of and suggestions for the development of the Qianjiangyuan-Baishanzu National Park pilot

Xiaoli Shen^{ID 1*}, Sheng Li^{ID 2}, Keping Ma^{ID 1}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

2 School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871

钱江源–百山祖国家公园试点位于浙江省境内, 包括衢州市钱江源和丽水市百山祖两个片区。其中, 钱江源片区试点于2016年启动, 同年6月《钱江源国家公园体制试点区试点实施方案》获国家发展和改革委员会批复。2017年3月, 钱江源国家公园党工委、管委会经浙江省机构编制委员会办公室批复设立, 与开化县委县政府实行“两块牌子、一套班子”的“政区合一”管理模式。2017年10月, 浙江省政府同意发布实施《钱江源国家公园体制试点区总体规划(2016–2025)》。2019年7月, 浙江省委整合钱江源国家公园党工委、管委会, 新设立钱江源国家公园管理局, 由省政府垂直管理, 纳入省一级财政预算单位, 委托省林业局代管。2020年1月, 国家林业和草原局(国家公园管理局)批准“一园两区”的方案, 同意设立丽水市百山祖片区。2020年8月, 《钱江源–百山祖国家公园总体规划(2020–2025)》通过专家评审, 由浙江省政府正式批复实施。

1 关键经验

1.1 探索了东部经济发达地区建立国家公园的途径与模式

受地理气候、人为活动与开发历史等多种因素

影响, 我国华东、华南地区比西部地区经济发达、人口密集、土地利用强度高。在人类活动的长期作用下, 这些地区的原始生态系统受破坏与干扰较为严重, 自然景观破碎, 动物群落结构不完整, 大型食肉和食草动物缺失(Tilson et al, 2004; Cao et al, 2019)。因此, 在我国面积广大的东部经济发达地区, 国家公园如何实现生态系统原真性与完整性保护的目标, 是首批国家公园体制试点需要深入探索和解决的问题。

钱江源–百山祖国家公园试点实施过程中, 积极探索实践, 发展出“一园两区”和“跨区共建”的保护模式。体制试点首先在钱江源片区开展, 以原古田山国家级自然保护区、钱江源国家森林公园、钱江源省级风景名胜区为基础, 规划总面积约252 km²; 后续在浙江省政府的协调下, 新增百山祖片区, 包括原凤阳山–百山祖国家级自然保护区、庆元大鲵国家级水产种质资源保护区、景宁英川香炉山次生阔叶林自然保护小区、庆元班岱后南方铁杉保护小区, 规划总面积505 km²。“一园两区”的模式将试点区的面积扩展至758 km²。同时, 地处浙赣皖三省交界白际山脉的钱江源片区, 在试点过程中积极开展“跨区共建”。与毗邻的江西、安徽所辖3镇7

收稿日期: 2021-03-05; 接受日期: 2021-03-15

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xlshen@ibcas.ac.cn

村,以及安徽休宁岭南省级自然保护区签订合作保护协议,共建联合保护站和巡护队伍,实现省际毗邻镇村合作保护模式全覆盖。钱江源片区所在的浙江省开化县与毗邻的江西德兴、婺源,安徽休宁4地政法系统共同签署《开化宣言》,摸索建立跨区联合保护的司法协作机制。

钱江源-百山祖国家公园试点的以上措施与尝试,为我国东部经济发达地区如何规划和建设国家公园,促进对典型生态系统类型与生态过程的原真性与完整性保护,提供了非常有价值的经验与示范。

1.2 探索出集体林地地役权改革方案

在我国华东、华南地区,集体所有自然资源占比高,与西部地区国有土地占绝对优势的格局形成明显反差(王宇飞等,2019)。在钱江源片区和百山祖片区,集体土地的面积占比分别为80.70%与88.51%。在此背景下,国家公园如何有效实现对区内集体自然资源的统一管理,是体制试点中需要摸索的关键问题。

钱江源片区于2018年率先开展区内的集体林地地役权改革,进行了有效的尝试,取得了良好的效果和示范效应。在国家公园管理局和地方政府的共同指导下,在不改变集体所有的森林、林木、林地权属的前提下,由农户或村民小组自行委托村民委员会管理,再由村民代表大会集体表决形成决议,将集体所有土地的管理权统一授权给钱江源国家公园管理局(王宇飞等,2019;臧振华等,2020)。2018年2月,经浙江省政府批准,钱江源片区的集体林地地役权补偿金纳入省财政预算。2020年6月,管理局正式启动承包地地役权改革试点,在不改变土地权属的条件下,通过设立权利义务和正负面清单,规范个人在承包地上的行为;同时,村民享有承包地地役权补偿。2020年9月,开化县自然资源与规划局为钱江源片区颁发2,753本“林地保护地役权证”,生态补偿费惠及2.6万余人,从法律层面为集体林地保护地役权提供保障。

钱江源-百山祖国家公园钱江源片区的地役权改革实践探索,为我国南方集体林区推进以国家公园为主体的自然保护地体系建设积累了经验,得到了高度关注和广泛认可,成为国家公园试点中集体资源有效管理与保护的典型案例。

1.3 以科研、监测支撑规划和管理

钱江源-百山祖国家公园试点过程中,高度重

视针对区内自然资源与生物多样性的科学研究与科学监测,将研究与监测成果作为国家公园保护的重要基础。公园管理局与中国科学院植物研究所、中国科学院动物研究所、浙江大学、北京大学、中国林业科学研究院、浙江师范大学等科研机构合作,依托钱江源森林生物多样性国家野外科学观测研究站,对区内代表性的中亚热带常绿阔叶林生态系统和黑麂(*Muntiacus crinifrons*)、白颈长尾雉(*Syrnaticus ellioti*)等旗舰物种开展了广泛、深入的研究与监测(Chen et al, 2019;任鹏等,2019;余建平,2019a)。

在试点期间,钱江源片区建立起覆盖全域的野生动物红外相机监测网络,并结合跨区共建辐射到周边毗邻的江西、安徽部分地区(余建平,2019b;申小莉等,2020)。结合卫星遥感、近地面遥感、地面样方、全自动声学监测等新技术(李杰等,2019;赵莹等,2020),建立起全域的、动植物综合的“天空地一体化”监测平台,对区内生物多样性组成与动态变化开展长期、深入的研究与监测。基于监测平台所获取的大量数据与信息,深入开展了生物多样性形成和维持机制(例如Chen et al, 2019)、生物多样性与生态系统功能关系(例如Liu et al, 2018)等方面的研究,并支撑了国家公园的生物多样性编目(例如李通等,2019;钱海源等,2019;余建平,2019b)、空间规划(例如李杰等,2019;余建平,2019a)、保护成效评估(例如申小莉等,2020)、生态系统服务价值评估(孙孝平等,2019)等工作。2019年9月,中国政府通过外交部向联合国可持续发展峰会递交《地球大数据支撑可持续发展目标报告》,钱江源国家公园生物多样性监测成为示范案例之一(https://www.fmprc.gov.cn/mfa_eng/topics_665678/2030kcxzfzyc/P020190924800116340503.pdf)。

钱江源-百山祖国家公园试点过程中,充分体现了科研、监测在国家公园建设、规划、决策与宣传中的重要作用与价值,为推进我国国家公园和保护地的科学化管理与科学监测体系的构建提供了示范。

2 发展方向探讨

2.1 探索实现国家公园原真性、完整性保护的标准,制定长期的保护管理目标与计划

如何设定国家公园的最小面积或适宜面积,在

满足生态系统原真性、完整性保护与管理可操作性之间取得平衡,是当前特别是东部地区的国家公园体制试点中,需要深入研究和探讨解决的重要问题。

原生植被占比低且呈破碎化分布,大型食肉动物和食草动物缺失,人口密度高和人为活动压力大是我国华东、华南地区生态系统共有的特征(Tilson et al, 2004; Cao et al, 2019)。钱江源-百山祖国家公园试点通过“一园两区”和“跨区共建”的模式,对提升生态系统的原真性、完整性保护进行了积极的尝试。其中钱江源片区为探索跨区共建的范围和区域,在更大的区域尺度(开化县全域和江西、安徽毗邻地区)开展了生物多样性本底调查。建议公园管理局从理论研究和实践两个方面进一步深入探索:

(1)通过基于生态学的研究确定实现生态系统完整性、原真性保护的面积需求。现有“一园两区”的保护地范围能够有效维持中亚热带常绿阔叶林生态系统现存的动植物群落的组成和功能。根据钱江源片区大范围调查数据,可以进一步优化国家公园空间布局方案。同时,考虑到该区域现阶段生态系统的特点,动物群落营养级不完整将会影响生态系统长久的稳定性。建议将恢复和重建生物群落结构完整性(例如促进豺 *Cuon alpinus*、水鹿 *Rusa unicolor* 等大型食肉动物和食草动物野生种群的恢复或重建, Li et al, 2020)作为国家公园远期(10-20年)保护管理的目标,通过扩大保护地范围、重引入关键物种、建立廊道和恢复退化生境等多种途径,为大型动物的回归创造适宜栖息地,以此为目标确定国家公园长期建设的面积需求。

(2)在管理实践方面,以理论研究结果为指导,在充分考虑社会和经济发展的前提下,制定国家公园远期的保护管理目标与计划,在未来分步骤分阶段地实施。特别地,在跨行政区界(例如县界、地市界、省界)的情况下,需要积极探索因地制宜的联合保护途径,寻求政策和保护管理机制的保障和支持。尤其是跨省界的协调已经超出了单个国家公园和地方政府的责任与能力,需要中央政府及国家部委层面主持,制定或修订相应的法律法规,出台对应的政策与管理办法,协调做好跨行政区界的共建共管。

2.2 以国家公园建设为契机,促进生态保护主流化,推动建立社会经济绿色发展的新模式

钱江源-百山祖国家公园钱江源片区涉及4个

乡镇21个行政村9,744村民,百山祖片区涉及10个乡镇33个行政村6,240村民。在生态保护优先的前提下,如何实现为区内和周边村民创收,带动乡村的繁荣和地方经济的发展是国家公园建设的重要议题。


为此,钱江源片区开展了国家公园小镇规划、生态产品价值研究;通过地役权补偿、购买服务等方式引导社区村民的生产生活方式向更为环保的方向转变,以加快生态产品价值的实现;打造钱江源国家公园集体商标,提高农林产品和文化旅游产品的溢价能力;开化县委提出“建设社会主义现代化国家公园城市”的目标。建议国家公园管理局和地方人民政府以国家公园的建设为契机,进一步推动生态保护主流化,建立“两山”理念转化路径的样本,探索社会经济绿色发展的新模式。具体建议包括:(1)优化地区生态保护和经济发展的空间布局,为国家公园的长远发展(例如实现重引入大型食肉动物重建生物群落完整性、开展廊道建设加强栖息地连通性、开展生态恢复提升钱塘江上游森林的水土保持能力等长远目标)预留空间。(2)编制生态产品清单,建立生态产品价值核算体系,开展跨界生态补偿示范,并以此建立国家公园资金来源的补充机制;建立国家公园生态产品品牌标准和准入机制,加强品牌建设,探索生态产品价值实现机制;以国家公园为依托,加强面向社区居民和游客的自然教育,提升社会公众对高质量自然环境和生活品质的需求。


总之,钱江源-百山祖国家公园作为我国东部地区的国家公园,其面积受到现存自然资源量和人口分布的限制。尽管现阶段规划能够满足当前生态保护的需求,但相比历史基线或者相对维持生态系统长远可持续发展的需求而言,国家公园仍有扩大保护面积的需求。因此,在保护残存的原生植被及动植物群落的前提下,恢复受破坏的生境,依靠重引入等手段重建生物群落的完整性,提升其生态系统功能应当成为钱江源-百山祖国家公园保护管理工作的长期目标。在此背景下,为国家公园的长远发展预留空间,平衡保护和发展的矛盾,建立社会经济环境齐头并进的可持续发展模式,是国家公园可持续发展的前提条件,也是地方经济可持续发展的重要保障。如何跳出现有物理空间范围的制约,着眼于更大时空尺度的发展,并最终推动地区社会经济转型,是我国现阶段生态文明建设对钱江源-百山祖国家公园试点提出的更高要求。

致谢: 感谢钱江源国家公园管理局提供大量基础材料与信息。感谢汪长林、余建平参与讨论并提供宝贵的意见与建议。

ORCID

申小莉  <https://orcid.org/0000-0003-2749-1121>

李晟  <https://orcid.org/0000-0001-7200-9539>

马克平  <https://orcid.org/0000-0001-9112-5340>

参考文献

- Cao Y, Carver S, Yang R (2019) Mapping wilderness in China: Comparing and integrating Boolean and WLC approaches. *Landscape and Urban Planning*, 192, 103636.
- Chen L, Swenson NG, Ji N, Mi X, Ren H, Guo L, Ma K (2019) Differential soil fungus accumulation and density dependence of trees in a subtropical forest. *Science*, 366, 124–128.
- Li J, Li WY, Fu J, Gao J, Yang L, He WH (2019) Using low-altitude UAV remote sensing to identify national park functional zoning boundary: A case study in Qianjiangyuan National Park pilot. *Biodiversity Science*, 27, 42–50. (in Chinese with English abstract) [李杰, 李巍岳, 付晶, 高峻, 杨蕾, 何苇航 (2019) 基于近低空遥感技术的国家公园功能分区边界识别: 以钱江源国家公园体制试点区为例. *生物多样性*, 27, 42–50.]
- Li S, McShea WJ, Wang DJ, Gu XD, Zhang XF, Zhang L, Shen XL (2020) Retreat of large carnivores across the giant panda distribution range. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1327–1331.
- Li T, Li JN, Wei YL (2019) Species diversity and distribution of wood-decaying fungi in Gutianshan National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 27, 81–87. (in Chinese with English abstract) [李通, 李俊凝, 魏玉莲 (2019) 古田山国家级自然保护区木腐真菌物种多样性及分布. *生物多样性*, 27, 81–87.]
- Liu X, Trogisch S, He J, Niklaus PA, Bruelheide H, Tang Z, Erfmeier A, Scherer-Lorenzen M, Pietsch KA, Yang B, Kühn P, Scholten T, Huang Y, Wang C, Staab M, Leppert KN, Wirth C, Schmid B, Ma K (2018) Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285, 20181240.
- Qian HY, Yu JP, Shen XL, Ding P, Li S (2019) Diversity and composition of birds in the Qianjiangyuan National Park pilot. *Biodiversity Science*, 27, 76–80. (in Chinese with English abstract) [钱海源, 余建平, 申小莉, 丁平, 李晟 (2019) 钱江源国家公园体制试点区鸟类多样性与区系组成. *生物多样性*, 27, 76–80.]
- Ren P, Yu JP, Chen XN, Shen XL, Song X, Zhang TT, Yu YQ, Ding P (2019) Seasonal variation in the distribution of Elliot's pheasant (*Syrnaticus ellioti*) in Gutianshan National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 27, 13–23. (in Chinese with English abstract) [任鹏, 余建平, 陈小南, 申小莉, 宋虢, 张田田, 余永泉, 丁平 (2019) 古田山国家级自然保护区白颈长尾雉的分布格局及其季节变化. *生物多样性*, 27, 13–23.]
- Shen XL, Yu JP, Li S, Xiao HY, Chen XN, Chen SW, Liu MZ, Ma KP (2020) Progress overview of the camera-trapping monitoring platform for the Qianjiangyuan National Park, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 28, 1110–1114. (in Chinese with English abstract) [申小莉, 余建平, 李晟, 肖慧芸, 陈小南, 陈声文, 刘鸣章, 马克平 (2020) 钱江源国家公园红外相机监测平台进展概述. *生物多样性*, 28, 1110–1114.]
- Sun XP, Li S, Yu JP, Fang YJ, Zhang YL, Cao MC (2019) Evaluation of ecosystem service value based on land use scenarios: A case study of Qianjiangyuan National Park pilot. *Biodiversity Science*, 27, 51–63. (in Chinese with English abstract) [孙孝平, 李双, 余建平, 方彦君, 张银龙, 曹铭昌 (2019) 基于土地利用变化情景的生态系统服务价值评估: 以钱江源国家公园体制试点区为例. *生物多样性*, 27, 51–63.]
- Tilson R, Hu DF, Muntifering J, Nyhus PJ (2004) Dramatic decline of wild South China tigers: Field survey of priority tiger reserves. *Oryx*, 38, 40–47.
- Wang YF, Su HQ, Zhao XR, Su Y, Luo M (2019) Conservation easement-inspired adaptive management methods for natural protected areas: A case study on Qianjiangyuan National Park pilot. *Biodiversity Science*, 27, 88–96. (in Chinese with English abstract) [王宇飞, 苏红巧, 赵鑫蕊, 苏杨, 罗敏 (2019) 基于保护地役权的自然保护地适应性管理方法探讨: 以钱江源国家公园体制试点区为例. *生物多样性*, 27, 88–96.]
- Yu JP, Shen YY, Song XY, Chen XN, Li S, Shen XL (2019a) Evaluating the effectiveness of functional zones for black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) protection in Qianjiangyuan National Park pilot site. *Biodiversity Science*, 27, 5–12. (in Chinese with English abstract) [余建平, 申云逸, 宋小友, 陈小南, 李晟, 申小莉 (2019a) 钱江源国家公园体制试点区功能分区对黑鹿保护的有效性评估. *生物多样性*, 27, 5–12.]
- Yu JP, Wang JY, Xiao HY, Chen XN, Chen SW, Li S, Shen XL (2019b) Camera-trapping survey of mammalian and avian biodiversity in Qianjiangyuan National Park, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 27, 1339–1344. (in Chinese with English abstract) [余建平, 王江月, 肖慧芸, 陈小南, 陈声文, 李晟, 申小莉 (2019b) 利用红外相机公里网格调查钱江源国家公园的兽类及鸟类多样性. *生物多样性*, 27, 1339–1344.]
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's national park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 40, 8839–8850.]
- Zhao Y, Shen XL, Li S, Zhang YY, Peng RH, Ma KP (2020) Progress and outlook for soundscape ecology. *Biodiversity Science*, 28, 806–820. (in Chinese with English abstract) [赵莹, 申小莉, 李晟, 张雁云, 彭任华, 马克平 (2020) 声景生态学研究进展和展望. *生物多样性*, 28, 806–820.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 闫文杰)



•论坛• 中国国家公园试点专题

南山国家公园体制试点建设经验

曾晴^{ID}, 雷光春^{ID*}

北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

曾晴, 雷光春 (2021) 南山国家公园体制试点建设经验. 生物多样性, 29, 319–320. doi: 10.17520/biods.2021042.

Zeng Q, Lei GC (2021) The practice of Nanshan National Park system pilot. Biodiversity Science, 29, 319–320. doi: 10.17520/biods.2021042.

The practice of Nanshan National Park system pilot

Qing Zeng^{ID}, Guangchun Lei^{ID*}

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

南山国家公园体制试点位于南岭山脉与雪峰山脉交汇地带, 是我国东部湿润半湿润生态大区南亚热带与中亚热带交汇区, 同时是中国第二级阶梯云贵高原向第三级阶梯江南丘陵的过渡带, 也是我国“两屏三带”生态安全战略中“南方丘陵山地带”的典型代表, 生物多样性极为丰富。植物区系上属于华中、华南、华东、西南四大区系交叉“十字路口”, 境内有南岭地区保存最完整的中亚热带低海拔常绿阔叶林, “东南亚第一近城绿色长廊”两江峡谷, 以及我国中南地区规模最大的中山泥炭藓沼泽湿地。该区域是长江流域沅江水系、资江水系、湘江水系和珠江流域西江水系的源头和重要水源涵养地。因为生态系统代表性、原真性和完整性强, 自然资源价值国家代表性突出, 保护价值和生物学意义巨大, 南山国家公园体制试点于2016年设立, 有效地探索了在我国南方集体林区国家公园的创建之路, 为经济欠发达地区、少数民族地区和革命老区推进以国家公园为主体的自然保护地体系建设, 创造了可复制、可推广的南山经验和南山样板。

1 南方集体林区发展与生态系统保护互助共赢模式

试点区位于湖南省邵阳市城步苗族自治县境内, 总面积63,594 ha, 林地面积56,927.59 ha, 包括

集体林地36,240 ha。为实现生态系统的统一管理, 试点区推进了集体林“三权分置”改革, 致力破解我国南方集体林地占比大、管理难的问题, 包括如下举措: (1)对集体土地实施了公益林区划调整, 将3,936.2 ha的商品林全部一次性增补, 纳入公益林和天保林管理范畴。(2)实施集体林经营权租赁流转, 在不改变集体林地所有权和林地用途的前提下, 按照自愿原则, 采取20元/亩/年的租赁方式, 将经营权统一流转给南山国家公园管理局, 共流转3,058户15,226.7 ha (占集体林地总面积的42%)。 (3)对未实施经营权流转的集体林地(占集体林地总面积的58%), 以签订合作保护协议的方式实行统一管理。此外, 提高集体公益林补偿标准。将实施经营权流转统一管理的集体公益林和集体天保林补偿标准分别由每年的15.5元/亩、13.5元/亩提高至30元/亩, 按国家有关政策规定提高标准, 超过30元/亩的部分仍归集体或个人所有。(4)设置了生态公益岗位, 吸纳贫困户护林员、环卫员等公益岗位人员496人, 均为当地居民。此外, 在实行集体林地统一管理的前提下, 适度允许并引导一般控制区内原居民发展林下经济等生态型替代产业, 构建生态经济体系, 如林蜂养殖、青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)、金银花(*Lonicera japonica*)、天麻(*Gastrodia elata*)和七叶一枝花(*Paris polyphylla*)种植等。试点区所在地城步县

收稿日期: 2021-01-31; 接受日期: 2021-03-13

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: guangchun.lei@foxmail.com

是国务院实施扶贫开发战略的发源地,也是国家扶贫开发工作重点县、商务部定点扶贫县和湖南省11个深度贫困县之一。结合精准扶贫,22个贫困村全部脱贫摘帽,试点区内居民人均可支配收入由2017年的6,310元上升至2019年的9,291元,提升了47.2%,明显超过试点外同类地区居民收入水平。国家公园试点充分发挥了生态效益,改善了民生,探索出了我国南方集体林区社区发展与生态系统保护互助共赢的新模式。

2 创新管理运行机制

试点区内涉及4个原有不同类别的国家级自然保护地,即南山风景名胜区、湖南两江峡谷森林公园、湖南金童山自然保护区、湖南白云湖湿地公园,存在保护地重叠、行政分割、管理破碎化等情况。南山国家公园试点区将原4个自然保护地及其管理机构承担的管理职责,全面整合划入南山国家公园管理局,各保护地原管理机构作为南山管理局下属事业单位予以保留,机构规模维持不变。

试点区首创了国家公园行政权力清单集中授权机制。依据《中华人民共和国行政许可法》《中华人民共和国行政处罚法》《建立国家公园体制总体方案》等规定,将省市县有关行政许可、行政执法、行政处罚等197项行政管理权力授予南山管理局,为南山国家公园管理局依法行政提供了有力支撑。

资金使用机制方面,试点区建立了南山公园一级账户统筹资金使用管理机制,充分发挥了资金集中优势,极大提升了资金整合效益,确保了南山国家公园保护、运行和管理需要。湖南省委、省政府主动承担试点主体责任,积极构建财政投入为主的资金保障机制,并在中央财政投入基础上,多渠道筹措试点资金。同时,社会支持力度也不断加大,已接收社会捐赠420万元,实现试点前零记录的突破。

3 南方低山丘陵生态系统保护路径

试点区位于南方人口相对密集区、生态系统片断化,为推进自然资源的系统性和整体保护,维护生态系统完整性和连通性,试点区系统研究了范围调整,创造条件整合周边属同一生态地理单元的自然保护地,论证并纳入了毗邻的黄桑、舜皇山等相邻国家级自然保护区,囊括了同纬度地区保存最为完好的常绿阔叶林生态系统(何汉杏和何秀春,2003)。

此外,分析了保护空缺,充分吸纳生态红线,通过建立生态廊道将各片区串联,最大化实现生态系统完整性。


试点区内20世纪70年代建设的南山牧场总面积3,836.69 ha,人工牧草地达2,045.95 ha。人工改良草原对促进城步县少数民族地区经济发展和当地群众脱贫致富作出了贡献,但产草量和草地面积在逐年退化,目前尚有奶牛3,000余头。考虑其是连通南山片区与黄桑片区的重要生态廊道及红色文化的重要载体,试点区将逐渐禁止放牧,并对其进行生态修复,促进自然演替。

试点区积极探索了南方景观破碎化山地中具有重要保护价值的原生残余斑块的保育修复,通过扩大面积、建立生态廊道等方式推进生态系统原真性、完整性保护。并加强监测调查,发现维管束植物新种2个(Wang et al, 2019)、脊椎动物新种4个,新记录维管束植物447种、脊椎动物68种。

南山国家公园体制试点区对于南方集体林区生态、社会、经济重大而深远的影响,为探索我国南方低山丘陵生态系统保护的新路径、探索南方少数民族聚居地社区发展与生态系统保护互助共赢的新模式、跨层级多部门协同管理的高效机制提供了丰富的经验。

致谢: 感谢南山国家公园管理局的支持。本文核心数据引自《南山国家公园体制试点自评报告》及《国家公园体制试点评估验收综合报告》。

ORCID

曾晴  <https://orcid.org/0000-0002-7471-4941>

雷光春  <https://orcid.org/0000-0001-9021-5758>

参考文献

- He HX, He XC (2003) A numerical and synthetic study of evergreen and broad-leaved tree species in Shunhuang Mountain of Hunan Province. I. Study of species significant value. *Journal of Central South Forestry University*, 23(2), 16–21. (in Chinese with English abstract) [何汉杏, 何秀春 (2003) 湖南舜皇山常绿阔叶林种类组成数量综合特征. I. 乔木物种重要值. *中南林学院学报*, 23(2), 16–21.]
- Wang L, Deng X, Liu Y, Wu Q, Liu Z (2019) A new species of the genus *Megophrys* (Amphibia: Anura: Megophryidae) from Hunan, China. *Zootaxa*, 4695, 301–330.

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 闫文杰)



•论坛• 中国国家公园试点专题

武夷山试点经验及改进建议：南方集体林区国家公园保护的困难和改革的出路

何思源^{1*}, 苏杨²

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 国务院发展研究中心管理世界杂志社, 北京 100026

何思源, 苏杨 (2021) 武夷山试点经验及改进建议：南方集体林区国家公园保护的困难和改革的出路. 生物多样性, 29, 321–324. doi: 10.17520/biods.2021043.

He SY, Su Y (2021) Experience and improvement recommendations of Wuyishan National Park pilot: Difficulty and solutions in the reform of national park located in the collective forest area in South China. Biodiversity Science, 29, 321–324. doi: 10.17520/biods.2021043.

Experience and improvement recommendations of Wuyishan National Park pilot: Difficulty and solutions in the reform of national park located in the collective forest area in South China

Siyuan He^{1*}, Yang Su²

1 Institute of Geographic Science and Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 Management World Journal Press of the Development Research Centre of the State Council, Beijing 100026

国家公园体制试点在2015年1月国家发展和改革委员会等十三部委印发《建立国家公园体制试点方案》后正式开启,并在中央办公厅、国务院办公厅2017年印发《建立国家公园体制总体方案》(以下简称《总体方案》)指导下形成普遍规范,2020年基本完成(臧振华等,2020)。2020年是国家公园体制试点收官之年,在2021年初总结试点经验,旨在为国家公园体制试点收尾,迎接国家公园正式运行。福建省是4个国家级生态文明试验区之一,森林覆盖率多年全国第一,生态文明指数全国第一(http://49.5.6.212/html/2019-04/24/content_82971.htm)。福建武夷山国家公园是10个体制试点区之一。武夷山为我国东部少见的高生态价值地区(陈雅涵等,2009;丁晖等,2015),但作为国家公园体制试点也是管理难度较大的典型南方集体林区——空间破碎、人口密集、土地权属复杂、产业规模大且绿色化程度不高,多头管理问题显著(苏杨等,2018)。尽管如此,其依托福建省的生态文明体制试验区背

景,不断改革创新,在国家公园体制试点验收中名列前茅。对其经验进行总结,有助于探索符合我国东部特征的自然保护模式;对其不足进行分析,有利于国家公园正式运行后提高管理成效并供其他国家公园借鉴。

1 武夷山国家公园体制试点经验及示范性

在试点层面,自2016年6月国家发展和改革委员会批复《武夷山国家公园体制试点区试点实施方案》(下称《试点方案》)以来,武夷山国家公园的体制改革创新在统一规范管理、明确资源权属、完善法律制度等方面取得了实质性突破,在生态保护、规划管理、社会参与等运行机制上进行提升创新。截至目前,体制试点任务基本完成(Box 1)。

在典型的南方集体林区,面对原有保护地复杂的空间关系、管理关系和历史遗留的产业经营活动,武夷山国家公园为实现“统一、规范、高效”以及“最严格保护”的管理,进行了多方面探索。这些探索形

收稿日期: 2021-02-01; 接受日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(42001194)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: syhe0915@163.com

Box 1 武夷山国家公园体制试点方案要求与完成情况

要求	完成情况
<ul style="list-style-type: none"> ● 有效保护和修复生态: 开展功能区划, 实行差异化管理; 建立监测系统, 开展生态修复; 以生态体验等形式促进生态保护。 	<p>基本完成, 生态体验相关制度、支撑服务区建设等有待完善。空间规划、生态系统价值核算依托国家生态文明试验区建设。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 探索人与自然和谐共生发展模式: 协调居民生产生活与资源保护; 促进原住民参与国家公园保护和管理; 对相关社区采取特许经营优先、政策优惠等措施; 提高国有土地比例和集体土地统一管理程度。 	<p>基本完成, 特许经营制度有欠缺, 集体土地统一管理需改进。国家公园统一确权登记工作依托国家生态文明试验区建设。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 完善和创新生态管理体制: 武夷山国家公园所有权由省政府设立的武夷山国家公园管理局行使; 试点区内全民所有的自然资源资产委托武夷山国家公园管理局负责保护、管理和运营; 试点区内集体所有的自然资源资产由武夷山国家公园管理局进行统一管理。 	<p>基本完成, 重点生态区域内商品林的赎买依托国家生态文明试验区建设。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 建立和保障资金投入机制: 建立以财政投入为主、社会投入为辅的资金保障机制。 	<p>部分完成, 中央专项资金渠道有待理顺, 省专项资金渠道需要加强。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● 深入推进社会参与: 建立健全多元化社会捐赠机制; 建立志愿者机制; 建立社会合作管理机制; 建立科研院所合作保护机制; 建立健全社会监督机制。 	<p>部分完成, 社会捐赠机制、志愿者制度、社会监督机制等有待建立。</p>

成的经验的示范性在于其体制和机制是否可在其他地区进行有条件的复制。可复制性一方面在于其改革创新是否符合《总体方案》要求, 在带动生态文明体制改革方面具有普适性。另一方面, 经验的复制性在于其在解决所面对的典型的人地关系矛盾时形成的创新制度、政策机制或者技术路径等内容, 可否在具有类似问题的地方推广应用。因此, 下文从以上两方面分析武夷山试点经验的复制性, 并将其分为可以普遍推广和定点推广两类, 再结合试点经验进行说明。

1.1 规定动作的管理体制和自选动作的管理机制

(1)按照《总体方案》, 试点区整合组建了由福建省政府垂直管理的武夷山国家公园管理局, 并在试点区涉及的6个主要乡镇(街道)分别设立国家公园管理站, 形成“管理局-管理站”两级管理体系。其中整合保护地并建立统一的管理机构可以进行普遍推广。

(2)面对行政边界障碍, 武夷山国家公园建立了跨省联保机制: 成立闽赣两省联合保护委员会, 形成了统一协调、相互协作的共建机制。其中对自然保护地毗邻地区构建统一协调、相互协作的模式

可以在需要跨行政区开展生态完整性保护的区域进行定点推广。

1.2 有利集体林统一管理的资源管理体制机制

对集体林开展符合保护要求的统一管理是国家公园体制试点中的共性难题, 武夷山国家公园通过资源有偿使用、地役权、商品林赎买等机制的组合进行了探索创新。

(1)完善已有的资源有偿使用机制。对7万余亩集体山林实行“两权分离”管理, 即山林所有权归村民, 使用管理权归国家公园管理机构。有偿使用费以景点门票收入及双方商定的基数, 每年按景点门票收入增长比例递增。其中资源有偿使用机制在集体土地比重大、土地具有多重效益的地区可以进行定点推广。

(2)建立地役权保护管理机制。在林农自愿的前提下, 与建阳区黄坑镇坳头村签订毛竹林地役权管理协议, 国家公园管理局对1.02万亩毛竹林行使统一经营管理权, 按照协商的标准(118元·亩⁻¹·年⁻¹)予以补助。对9,242亩人工商品林签订停伐补助协议, 参照天然林停伐补助的标准进行补助。其中以地役权进行统一管理, 在集体土地比重大、土地具有生

态效益的地区可以进行定点推广。

(3)创新重点区域商品林赎买机制。对重点区域的商品林,在林农自愿的前提下,对禁伐林木的所有权进行赎买,按照国有生态公益林进行保护管理。已完成商品林赎买2,249亩。其中商品林赎买在集体土地比重大、政府资金充裕的地区可以进行定点推广。

1.3 建立特许经营机制、创新社区发展机制

(1)初步建立特许经营制度。出台《武夷山国家公园特许经营管理暂行办法》,由武夷山国家公园管理局行使特许经营权。原武夷山风景名胜区内的竹筏游览、漂流、演出等商业活动初步得到了规范。这里建立特许经营制度、规范经营行为、吸引社区直接和间接参与经营管理是社区发展需求,可以进行普遍推广。

(2)创新社区发展机制、推广茶产业生态化和产业串联。建设生态茶园示范基地,促进茶农、合作社、茶企形成利益共同体开展生产经营,发挥品牌效应;促进农林产业多功能,对接全域旅游布局,引导村民发展旅游服务;促进非资源消耗型产业发展,发展富民竹业。这里创业产业发展,实现产业生态化、多元化,提升生态、文化附加值是产业发展方向,可以进行普遍推广。

1.4 创新执法机制

在中央生态环境综合执法改革和行业公安体制改革的大背景下,设立武夷山国家公园执法支队和省森林公安局武夷山国家公园分局。公布了国家公园管理局行政执法的主体资格,增设了“国家公园监管”执法类别,依法明确武夷山国家公园权责事项123项,出台《武夷山国家公园资源环境管理相对集中行政处罚权工作方案》,实行相对集中行政处罚和联动执法。将县级以上地方政府有关部门行使的有关世界文化和自然遗产保护、森林资源管理、野生动植物保护、森林公园管理等4方面14部法律、法规、规章涉及的81项行政处罚权,集中交由国家公园管理局行使。确定国家公园管理局行政执法主体资格,集中统一的保护管理,在管理局行政级别较低、没有成熟条件开展综合执法的区域可以进行定点推广。同时,确定国家公园行政执法权后,可以继续探索省级公检法司办案协作。

2 武夷山国家公园体制试点的不足

2.1 试点的不足之处与原因

尽管武夷山国家公园体制试点形成了一些经验,但对标《总体方案》,仍有诸多不足。

首先,武夷山国家公园体制试点区针对属于同一个生态系统并在世界遗产划定中一体化的江西武夷山保护区部分,仅形成了跨省联保机制,尚未形成可行的体制对接和转型方案。

其次,试点期间,原有各类保护地管理规则、资金渠道仍然在起主导作用,缺乏中央专项资金,新的资金渠道还不成熟,新的资金机制尚未形成。

第三,在探索集体土地统一管理中,面对高经济价值集体土地,赎买不具有可持续性;当前的地役权对土地收益权的规定比较笼统,尚未发挥平衡原住居民利益与公共利益的作用。因此,集体土地的管理并没有真正统一。

第四,在产业经营活动的处理上,目前的特许经营范围仅限于原风景名胜区内九曲溪竹筏游览、环保观光车、漂流项目,并允许其在协议期限未届满前继续履行原特许经营协议。这有利于解决历史遗留问题,但事实上未能满足《总体方案》要求,没有衔接武夷山品牌基础,因此难以较大范围、较有力度地协调保护与发展的矛盾。

2.2 武夷山国家公园体制建设的改进建议

立足当前体制建设成果与不足,武夷山国家公园需要完善以下两方面工作。

(1)保护上,要加强范围和管理统一。要实现生态系统的完整管理,需要推进与江西武夷山国家级自然保护区的范围统一,进而规范管理,至少在信息共享、规划协调、行动同步三方面取得实质性进展(何思源和苏杨, 2019; 廖凌云等, 2020);需要完善地役权制度,加强对集体土地的统一管理,设计适合商品林、茶山等生产性土地的保护地役权(何思源等, 2020)。

(2)利用上,完善特许经营制度。武夷山的茶叶及延伸的多功能产业(如茶庄民宿旅游)有较好的发展基础,亟待以特许经营的品牌体系方式进行规范、高效的管理(何思源等, 2021)。因此,应该借鉴法国国家公园体制改革经验,争取建成与国家公园产品品牌增值体系衔接的完整的特许经营制度,为社区传统产业经营者直接进入国家公园特许经营

体系或间接为特许经营商提供产品与服务提供便利(苏杨等, 2017)。

致谢: 本研究得到福建省武夷山国家公园管理局协助, 在此对提供资料、协助调研、参与访谈的所有工作人员表示感谢。

ORCID

何思源  <https://orcid.org/0000-0002-5859-1005>

参考文献

- Chen YH, Tang ZY, Fang JY (2009) Distribution of nature reserves and status of biodiversity protection in China. *Biodiversity Science*, 17, 664–674. (in Chinese with English abstract) [陈雅涵, 唐志尧, 方精云 (2009) 中国自然保护区分布现状及合理布局的探讨. 生物多样性, 17, 664–674.]
- Ding H, Fang YM, Yang Q, Chen X, Yuan FY, Xu H, He LH, Yan J, Chen TT, Yu CJ, Xu HG (2015) Community characteristics of a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest plot in the Wuyi Mountains, Fujian Province, southeastern China. *Biodiversity Science*, 23, 479–492. (in Chinese with English abstract) [丁晖, 方炎明, 杨青, 陈晓, 袁发银, 徐辉, 何立恒, 严靖, 陈婷婷, 余朝健, 徐海根 (2015) 武夷山中亚热带常绿阔叶林样地的群落特征. 生物多样性, 23, 479–492.]
- He SY, Su Y (2019) Authenticity, integrity, connectivity and coordination-conceptual analysis and practical significance for the establishment of the national park system. *Environmental Protection*, 47(Z1), 28–34. (in Chinese) [何思源, 苏杨 (2019) 原真性、完整性、连通性、协调性概念在中国国家公园建设中的体现. 环境保护, 47(Z1), 28–34.]
- He SY, Su Y, Wang DW (2020) Realization of multi-faceted spatial control of national park through conservation easement. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*, 22(4), 61–69, 108. (in Chinese with English abstract) [何思源, 苏杨, 王大伟 (2020) 以保护地役权实现国家公园多层次空间统一管控. 河海大学学报 (哲学社会科学版), 22(4), 61–69, 108.]
- He SY, Wei Y, Su Y, Min QW (2021) A grounded theory approach to understanding the mechanism of community participation in national park establishment and management. *Acta Ecologica Sinica*, 41, doi: 10.5846/txb202004020785. (in Chinese with English abstract) [何思源, 魏钰, 苏杨, 闵庆文 (2021) 基于扎根理论的社区参与国家公园建设与管理的机制研究. 生态学报, 41, doi: 10.5846/txb202004020785.]
- Liao LY, Zhao ZC, Yang R (2020) Optimization of Chinese national park community planning framework based on spatio-temporal difference analysis. *Chinese Landscape Architecture*, 36(8), 25–30. (in Chinese with English abstract) [廖凌云, 赵智聪, 杨锐 (2020) 基于时空尺度差异性分析的中国国家公园社区规划框架优化研究. 中国园林, 36(8), 25–30.]
- Su Y, He SY, Wang YF, Wei Y (2018) Policy Research on the Development of China's Pilot National Park. *Social Sciences Academic Press (China)*, Beijing. (in Chinese) [苏杨, 何思源, 王宇飞, 魏钰 (2018) 中国国家公园体制建设研究. 社会科学文献出版社, 北京.]
- Su Y, Hu YX, He SY (2017) The enlightenment of Canada national park system on its establishment in China. *Environmental Protection*, 45(20), 60–64. (in Chinese) [苏杨, 胡艺馨, 何思源 (2017) 加拿大国家公园体制对中国国家公园体制建设的启示. 环境保护, 45(20), 60–64.]
- Zang ZH, Zhang D, Wang N, Du A, Kong LQ, Xu WH, Ouyang ZY (2020) Experiences, achievement, problems and recommendations of the first batch of China's national park system pilots. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8839–8850. (in Chinese with English abstract) [臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云 (2020) 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. 生态学报, 40, 8839–8850.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 黄祥忠)



•论坛• 中国国家公园试点专题

云南香格里拉普达措国家公园体制试点经验

杨宇明¹, 叶文², 孙鸿雁^{3*}

1. 云南省林业和草原科学院, 昆明 650201; 2. 西南林业大学, 昆明 650224; 3. 国家林业和草原局国家公园规划研究中心, 昆明 650031

杨宇明, 叶文, 孙鸿雁 (2021) 云南香格里拉普达措国家公园体制试点经验. 生物多样性, 29, 325–327. doi: 10.17520/biods.2021038.
Yang YM, Ye W, Sun HY (2021) Experience in the Pudacuo National Park system pilot in Shangri-La, Yunnan. Biodiversity Science, 29, 325–327. doi: 10.17520/biods.2021038.

Experience in the Pudacuo National Park system pilot in Shangri-La, Yunnan

Yuming Yang¹, Wen Ye², Hongyan Sun^{3*}

1 Yunnan Academy of Forestry and Grassland, Kunming 650201

2 Southwest Forestry University, Kunming 650224

3 National Forestry and Grassland Administration, National Park Planning and Research Center, Kunming 650031

普达措国家公园位于滇西北“三江并流”世界遗产地, 这里是北半球新特有物种的分化中心, 也是全球34个生物多样性热点地区之一。滇西北的生物多样性与生态环境虽然丰富, 却十分脆弱(吴良镛, 2000)。同时滇西北是典型的少数民族聚居的偏远地区, 在保护力度不断加强的同时, 也限制了当地群众的传统生计与地区的经济发展。本世纪初在云南省人民政府指导下, 迪庆藏族自治州人民政府与西南林业大学生态旅游学院合作, 针对滇西北世界遗产地保护与旅游资源开发利用的矛盾, 对寻求生态保护与发展双赢的模式进行了大胆探索, 并于2006年1月由云南省人民政府倡导在西南林业大学成立了国家公园发展研究所, 开始了滇西北创建国家公园的规划研究。普达措国家公园体制试点区是在云南碧塔海省级自然保护区141 km²的基础上, 将保护区面积扩大到602 km², 把更大范围的森林、湿地、草甸、野生动物栖息地、传统民族村落等纳入保护区域, 完善了《普达措国家公园总体规划》, 合理划定公园区域内的功能分区, 制定产业准入清单, 关停了公园范围内及周边的尾矿库并开展生态修复。试点建设以来启动国家公园本底调查, 完成了

十余项专题科学考察, 全面掌握了普达措国家公园试点区范围内的重要资源本底, 以及解说词、居民点调控等数10项专项规划编制(杨劫, 2020)。实践证明, 普达措国家公园的建立符合滇西北生物多样性保护与社区生计可持续发展的共同需要, 有利于正确处理遗产地保护与地方经济发展的关系, 可促成生态保护、经济发展与社会进步的多赢。因此, 解决各方利益群体需求是普达措国家公园体制试点的核心问题。

滇西北丰富而脆弱的生态环境迫切需要加强保护, 同时又要加快藏区经济社会发展, 特别是1999年滇西北全面实施天然林保护工程后, 过去主要依靠采伐林木为主的地方财政收入比禁伐前下降了60%–90%, 农牧民收入受到严重影响, 不得不进入碧塔海省级自然保护区以开发生态旅游为生计(杨宇明, 2017, 光明日报2017.04.02第05版)。既要有效保护世界遗产地, 又要保障社区群众的生存与地方经济可持续发展, 促使保护工作者必须探索建立有效保护与可持续发展共赢的保护地新模式^①。

2006年, 云南省人民政府根据滇西北的特殊实际, 在寻求实现保护与发展双赢的路径中进行了大

收稿日期: 2021-01-28; 接受日期: 2021-03-15

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: 653490200@qq.com

① 叶文, 杨宇明 (2020) 《普达措国家公园环保督查前后情况报告》(来源: 国家林业和草原局)

胆探索,率先在滇西北建立大陆首个国家公园——香格里拉普达措国家公园;2008年列为国家林业局试点;2015年列为全国10处国家公园体制试点之一。普达措国家公园始终坚持“政府主导、保护优先、管经分离、社区参与”的原则,以规划为引领,协同发展为指导,制定并建立起了生态保护与经营管理的法规体系和高效运转的管理机构,形成了地方政府、保护管理机构、旅游经营企业和社区村民委员会多方利益共享机制,探索出一条在滇西北生物多样性极为丰富、生态极度脆弱、经济发展水平严重滞后的“三江并流”世界自然遗产地,生物多样性得到有效保护与经济社会协同发展的双赢之路,实现了保护实施有力、发展不损坏资源与环境,人与自然和谐发展的目标,成为集保护、科研、生态旅游、村民生计和地方经济为一体的协同保护与发展示范区。

1 加强了对重要保护对象的保护力度

国家公园设立后,牵马载客旅游被取缔,以环保车辆代替马匹的交通方式和沿栈道徒步的游览线路,防止了马匹对高山草甸的践踏和湖水的污染。试点以来所开展的旅游活动被严格限制在栈道内和一些环境承载力较强的区域,旅游活动方式对生态环境的影响显著减少,森林、草甸和湿地得到了有效的保护,碧塔海高原湖泊湿地的生态环境及湖泊水质较试点前得到显著改善。根据迪庆州环境监测站2017–2020年的数据,国家公园试点后碧塔海水水质由三类水质提升到一类。从2006年普达措国家公园建设以来,未发生过森林火灾,湖水水质始终保持在一类水,负氧离子在12,000个/cm³以上,碧塔海高原湖泊特有鱼类中甸叶须鱼(*Ptychobarbus chungtienensis*)和极濒危物种高寒水韭(*Isoetes hypsophila*)以及越冬的保护候鸟黑颈鹤(*Grus nigricollis*)和斑头雁(*Anser indicus*)等珍稀濒危特有物种得到了有效保护,种群数量在不断增长。

2016年以来,利用中央预算内湿地保护和基础设施建设项目资金共计1.1亿元,社会资本数亿元,按试点要求实施了封山育林和植被修复2万余亩,建立完善了保护监测网站(点)、巡护步道、森林防火通道及栈道等管护设施和垃圾、污水收集处理系统,建立了科普宣教中心、自然教育基地和监测站(点)等公益性设施以及环保车和宣传解说牌,曾经

被日均量达2,000余载人马匹穿行践踏的草甸或毁坏的森林,如今已建立了环保车通道,恢复了自然生态原貌,显著提升了国家公园的管护能力与成效(杨劼,2020)。

2 把社区村民的生计纳入试点建设的管理目标

普达措国家公园建设试点最大的成功之处,就是将公园的建设发展目标与社区村民的生计紧密结合起来,把社区可持续发展纳入了试点建设的管理目标。试点坚持“社区参与、惠益共享”的基本原则,制定了社区可持续替代生计发展计划与村民优先就业政策,建立了长期帮扶机制。过去的牵马人经过培训成为了环保车驾驶员;选取社区村民中有中等以上文化程度的女青年开展了专项培训,成为了国家公园的导游;优先录用社区村民成为保安和保洁员。普达措国家公园直接或间接为社区提供就业岗位350个,其中正式合同工95人,占公园正式编制总人数的47.7%;长期临时用工80人,占公园临时用工的53.3%;补偿协议内经营公司投资的经营性项目直接或间接参与的社区村民约155人,真正意义上体现了“社区参与式管理”与“惠益共享”的原则,实现了国家公园与社区的共赢发展的目标。同时,出台了《普达措国家公园旅游反哺社区发展实施方案》,每年从旅游收入中拿出1,500万元资金,专项用于3,696名社区居民的直接经济补偿和教育资助,对未能直接参与管理的农户或居民给予经济补贴^①。

3 发挥以教育促脱贫的重要功能

普达措国家公园建立前的碧塔海省级自然保护区内和周边的社区是云南藏区最贫困的地区之一,粮食都需要国家救济,国家公园试点的直接带动和间接反哺,已经使该地区全面实现脱贫。在当地政府的推动下,经营公司大力投入教育补助,社区村民辍学、就业难等问题得到了有效的解决。通过教育补助受益的社区村民显著提高了知识水平与教育素质,提高了就业能力,公司在用人时与社区形成了相应的利益链,利用教育补助培养出的社区人才,在同等条件下优先录用,增加了就业机会。在以上政策带动下社区村民经济收入得到大幅

^① 叶文,杨宇明(2020)《普达措国家公园环保督查前后情况报告》(来源:国家林业和草原局)

提高，从而改变了不重视教育的传统思想，每个家庭都开始积极培养下一代就读于各种专业院校，且第一次培养出了大学本科毕业生，有效促进了社区与国家公园的和谐稳定与高质量发展。

国家公园试点后有力带动了区内和周边贫困社区的发展，对实施脱贫攻坚、能力建设和科普宣教产生了显著成效，为当地生态环境和生物多样性保护与经济社会和谐发展做出了重要贡献。

4 见证了“绿水青山就是金山银山”

普达措国家公园试点后，园内和周边社区村民的居住、交通、生活、教育条件得到显著改善，实现了滇西北地区原住民在天然林禁伐和国家公园退耕、禁牧后由传统农牧业变为生态管护与生态旅游服务的替代生计转变。国家公园聘请了相关领域的专家开展了能力建设培训，把农牧民变为国家公园的管护者，不仅使国家公园的资源环境和主要保护对象得到了有效保护，而且生态旅游也得到科学规范的发展，2012–2019年实现旅游收入18.9亿元，社区村民户均收入从2万元增加到10万元，实现了国家公园生态保护与社区村民生产、生活的紧密融合与共赢。国家公园保护成效的提高与经济效益的同步增长，使村民意识到保护好普达措国家公园的森林、湖泊、草甸和生物多样性，能够为当地带来巨大的生态、经济和社会效益，村民从过去的被动保护，变为自发的主动保护，践行了“绿水青山就是金山银山”理论在滇西北的实例。

滇西北“三江并流”世界遗产地的生态旅游发展与生态环境质量密不可分，国家公园的自然生态资源保护模式，与旅游业和农林牧业等产业之间具有着相互促进、相互补充的良性互动关系。国家公园是一种发展和保护共赢的保护地模式，可有效缓解

生态旅游开发与生态环境和生物多样性保护的矛盾，通过充分挖掘和高效保护自然生态与文化遗产资源，有利于从整体上促进当地生态资源保护与生态文化旅游的融合发展。因此，在滇西北自然与文化遗产资源禀赋极其丰富多样，而生态环境极度脆弱的地区，通过国家公园的建设，完全可以将生态文化旅游培育成滇西北“三江并流”世界遗产地国民经济的支柱产业，逐步替代矿产、水电和重化工等工业，可以学习新西兰绿色发展的道路：不经历“先污染、后治理；先破坏、后修复”的传统发展模式，走出一条不经过工业化而进入现代化的绿色发展之路。

致谢： 特别感谢云南省林业和草原局宣传中心副主任杨女士，为本文提供了普达措国家公园试点建设验收评估总结和相关数据；云南省林业和草原局保护地处、湿地处和普达措国家公园管理局等单位和个人，对作者的调研给予了大力支持与帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- Wu LY (2000) Study on Sustainable Development Planning of Human Settlement Environment in Northwest Yunnan. Yunnan University Press, Kunming. (in Chinese) [吴良镛 (2000) 滇西北人居环境可持续发展规划研究. 云南大学出版社, 昆明.]
- Yang J (2020) The Pudacuo National Park system is a pilot project to explore a win-win situation between ecology and people's livelihood. China Green Times, July 1, 2020. (in Chinese) [杨劫 (2020) 普达措国家公园体制试点探索生态与民生共赢. 绿色时报, 2020年7月1日第2版.] <https://www.greentimes.com>. (accessed on 2020-07-01)

(责任编辑：徐卫华 责任编辑：时意专)



•论坛• 中国国家公园试点专题

海南热带雨林国家公园试点经验

龙文兴^{1,2*}, 杜彦君^{1,2}, 洪小江³, 臧润国^{4,2}, 杨琪³, 薛荟³

1. 海南大学林学院, 海口 570228; 2. 海南国家公园研究院, 海口 570100; 3. 海南热带雨林国家公园管理局, 海口 570100; 4. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

龙文兴, 杜彦君, 洪小江, 臧润国, 杨琪, 薛荟 (2021) 海南热带雨林国家公园试点经验. 生物多样性, 29, 328–330. doi: 10.17520/biods.2021071.

Long WX, Du YJ, Hong XJ, Zang RG, Yang Q, Xue H (2021) The experiences of Hainan Tropical Rainforest National Park pilot. Biodiversity Science, 29, 328–330. doi: 10.17520/biods.2021071.

The experiences of Hainan Tropical Rainforest National Park pilot

Wenxing Long^{1,2*}, Yanjun Du^{1,2}, Xiaojiang Hong³, Runguo Zang^{4,2}, Qi Yang³, Hui Xue³

1 College of Forestry, Hainan University, Haikou 570228

2 Institute of Hainan National Park, Haikou 570100

3 Administration of Hainan Tropical Rainforest National Park, Haikou 570100

4 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

海南热带雨林国家公园是目前最晚启动的国家公园体制试点, 其诞生和推动一直受到高度重视。2018年4月13日, 习近平总书记在庆祝海南建省办经济特区30周年大会上发表重要讲话强调, “要积极开展国家公园体制试点, 建设热带雨林等国家公园, 构建归属清晰、权责明确、监管有效的自然保护地体系”。海南省委省政府把建设热带雨林国家公园确定为海南全面深化改革开放的12个先导性项目之一和建设国家公园生态文明试验区的三大标志之首。海南热带雨林国家公园体制试点区范围涉及海南省中部9个市县, 包括五指山、鹦哥岭、尖峰岭、霸王岭、吊罗山5个国家级自然保护区、3个省级自然保护区、4个国家森林公园、6个省级森林公园及相关的国有林场, 总面积4,403 km², 约占海南岛陆域面积的1/7。试点区立足保护和修复海南热带雨林生态系统, 充分考虑海南长臂猿 (*Nomascus hainanus*) 等重要物种保护和繁衍的需要。自2018年开展国家公园试点以来, 海南热带雨林国家公园紧紧围绕“理顺管理体制、创新运营机制、健全支撑保障、强化监督管理、构建统一规范

高效的中国特色国家公园体制”试点任务, 把体制机制集成创新摆在首要位置, 创新探索中国特色国家公园管理海南模式。

1 首创扁平化的国家公园管理体制和双重管理的国家公园综合执法管理机制

(1)按照机构改革和《海南热带雨林国家公园总体规划(2019–2025年)》要求, 结合海南实际, 本着减少管理层级、提高管理效率的原则, 试点区构建了具有海南特色的扁平化的海南热带雨林国家公园“管理局–管理分局”二级行政管理体系。一是建立了省级管理机构。在海南省林业局加挂海南热带雨林国家公园管理局牌子, 作为海南热带雨林国家公园管理机构, 增设海南热带雨林国家公园处和森林防火处两个内设机构。同时在自然保护地管理处加挂执法监督处、林业改革发展处加挂特许经营和社会参与管理处牌子, 成立了海南智慧雨林中心并加挂海南热带雨林国家公园宣教科普中心牌子。二是整合成立二级管理机构, 海南热带雨林国家公园管理局下设尖峰岭、霸王岭、吊罗山、黎母山、鹦哥

收稿日期: 2021-03-01; 接受日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(31870508; 31660163)和科技基础专项(2019FY101607)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: oklong@hainanu.edu.cn

岭、五指山和毛瑞等7个分局,作为海南热带雨林国家公园二级管理机构,试点区内原有的林业局、保护区管理局(站)、林场等机构同时撤销。使热带雨林国家公园“范围上一个整体,运行上一套班子,管理上一个标准”,确保机构扁平高效。

(2)开展国家公园范围内的资源环境综合执法。试点区独创国家公园综合执法派驻双重管理机制,明确了国家公园综合执法主体,建立了热带雨林国家公园稳定的综合执法队伍,确保了国家公园范围内综合行政执法不出现空档。海南热带雨林国家公园管理局设置了执法监督处,牵头负责指导、监督、协调国家公园区域内综合行政执法工作;国家公园区域内其余行政执法职责实行属地综合行政执法,由试点区涉及的9个市县综合行政执法局承担,单独设立国家公园执法大队,分别派驻到国家公园各分局,由各市人民政府授权国家公园各分局指挥,统一负责国家公园区域内的综合行政执法。

2 创新生态搬迁集体土地与国有土地置换新模式

海南热带雨林集中分布的区域是海南岛主要江河源头和重要水源涵养区,是黎、苗少数民族传统栖居地。当地群众生产生活主要依赖自然资源的传统利用方式与生态保护和经济发展、民生改善的矛盾突出。试点区探索国家公园核心保护区生态搬迁,健全生态保护补偿制度,结合脱贫攻坚、乡村振兴等工作,促进当地脱贫,走出生态优先、绿色发展的路子(王琪, 2020)。

(1)创新土地权属转化方式。海南热带雨林国家公园生态搬迁过程中,以自然村为单位,实行迁出地与迁入地的土地所有权置换,迁出地原农民集体所有的土地全部转为国家所有,迁入地原国有土地全部确定为农民集体所有。置换双方权属为集体和国有,土地性质为建设用地和非建设用地。

(2)建立集体和国有土地置换评估方式。在实施置换前,由政府组织开展拟置换土地(迁入地和迁出地)的土地现状调查并进行实地踏勘,摸清土地权属、地类、面积以及地上青苗和附着物权属、种类、数量等情况,市县自然资源和规划部门委托有资质的第三方评估机构按照相关估价规程开展土地价值评估,经集体决策合理确定拟置换的土地地块价值。

(3)赋权所有权人权能。市县将拟置换的土

地现状、置换方式、安置方式等内容进行公告公示,充分尊重生态搬迁涉及的农民集体、农民和相关土地权利人的意愿。完整置换迁入地和迁出地权属,办理不动产权登记,赋权政府、迁出地集体、迁入地集体(农垦)三方的权能。迁入地用地原属于集体土地的,政府依法办理土地征收审批手续后进行置换;迁入地用地原属于国有土地的,市县依法收回国有土地后进行置换或者与农垦国有土地使用权人直接协商置换,保障迁入地原所有权利人的权利。

(4)建立土地增减挂钩模式。迁出地建设用地复垦为林地等农用地腾出的建设用地指标,可按照建设用地增减挂钩的原则用于迁入地安置区建设,不再另行办理农用地转用审批手续。有效地解决了搬迁土地处置难题,实现“搬得出、稳得住、能发展、可致富”的生态搬迁目标。

3 建设以核心保护区电子围栏为标志的智慧国家公园

建设智慧国家公园旨在不增加甚至减少管理管护人员的情况下,通过加强信息化基础设施,最大程度减少人为活动(含林业巡护人员)对海南热带雨林国家公园特别是核心区的干扰,实行最严格的生态环境保护(陈曦, 2019)。2019年,试点区开展了电子围栏和野生动物监测试点,通过布设振动光纤、仿生树和电子雷达技术,结合主要交叉路口补点智能卡口和视频监控系统的建设电子围栏,实现人为活动监管和野生动物活动监测。针对雨林边界的不同环境和位置,采取不同的电子围栏监测技术。

试点区通过总结试点项目经验,提出了建设“智慧雨林项目”,纵向打通省局-分局-护林点-巡护员,横向打通林业-省级各部门,实现将林区监测图像画面数据、感应探头数据、气象环境数据、联网野保相机数据以及道路卡口车辆人员信息数据传输到省局并进一步共享到各厅局,将大力提高热带雨林国家公园资源监管水平和生态管理能力。

4 打造国际科研合作平台和海南长臂猿联合攻关新机制

由海南热带雨林国家公园管理局联合中国林业科学研究院、北京林业大学、海南大学、中国热

带农业科学院共同组建海南国家公园研究院，在海南登记为事业单位法人。研究院实行理事会领导下的执行院长负责制；人员管理实行市场化的运作方式，薪酬机制、用人机制、激励机制和市场化接轨。研究院以项目为导向，柔性引进高层次及特需人才，与世界自然保护联盟、世界自然基金会等国际机构开展广泛合作，建立伙伴关系。

海南国家公园研究院将热带雨林旗舰物种海南长臂猿的保护研究作为重要任务。向国家林业和草原局申请获批“国家林草局海南长臂猿保护研究中心”和“海南长臂猿保护国家长期科研基地”；开展海南长臂猿保护研究全球联合攻关，制定并实施科研项目方案，面向全球招募科研项目负责人；多次召开海南长臂猿保护国际研讨会，在国内外相关领域产生了积极影响；组织开展海南长臂猿大调查，全面系统了解海南长臂猿种群和栖息地的基本情况，为制定更加科学、有效的海南长臂猿保护研究方案奠定基础。

5 建立跨部门多层次的监测平台

热带雨林生态系统是地球上生物多样性最丰富的生态系统，具有地球上最丰富的物种数量和生物生产力，有着十分特殊的价值和意义。在国家 and 海南省林业部门的支持下，海南大学、中国林业科学研究院等单位陆续建立了热带雨林生态系统、生物多样性及动植物种群监测平台。依托中国森林生态系统定位研究网络，试点区在五指山、尖峰岭、霸王岭建立了森林生态系统定位观测研究站，为热带雨林生态系统功能评估提供有力支撑；创建了世界上首套大样地 + 公里网格样地 + 卫星样地 + 随机样地相结合的四位一体森林动态监测系统，解决了热带雨林和生物多样性长时间尺度观测难、复

杂生境中生物多样性比较难、不同空间尺度生态过程理解难等难题，为热带天然林生物多样性保育及恢复研究、动态监测、成效评估等提供技术平台。

海南热带雨林国家公园试点区构建了以“省部协同、多级联动”的协同管理机制、“垂直管理、执法派驻”的监管体制、“科研平台、全球智库”的科技支撑体系为主要特色的管理体制和运营机制，这些集成创新的先进经验都具备广泛推广性。其中创新生态搬迁集体土地与国有土地置换新模式、创新设立海南国家公园研究院、建设以核心保护区电子围栏为标志的智慧国家公园等特色和创新点，在2019年12月召开的中国国家公园体制试点工作会议和国家林业和草原局2020年第一季度例行新闻发布会上被国家林业和草原局肯定，特别是创新生态搬迁集体土地与国有土地置换的新模式得到党中央国务院肯定。

ORCID

龙文兴  <https://orcid.org/0000-0002-9195-5878>

杜彦君  <https://orcid.org/0000-0002-7311-0265>

参考文献

- Chen X (2019) Problems and countermeasures in the management mode of Hainan National Park System pilot construction. *Hainan Today*, (1), 63–64. (in Chinese) [陈曦 (2019) 海南国家公园体制试点建设管理模式难点问题与对策. 今日海南, (1), 63–64.]
- Wang Q (2020) Smoothly progressing of the Three-River source and Hainan Tropical Rain Forest National Park System pilot. *Land Greening*, (1), 48–49. (in Chinese) [王琪 (2020) 三江源、海南热带雨林国家公园体制试点有序推进. 国土绿化, (1), 48–49.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 黄祥忠)



•研究报告•

太行山东北部哺乳动物区系及多样性

卜向丽¹, 王静¹, 吴佳忆¹, 孙太福¹, 向荣伟¹, 鲁庆斌², 郝映红³, 崔绍朋⁴,
盛岩¹, 孟秀祥^{1*}

1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 浙江农林大学动物科技学院, 杭州 311300; 3. 山西文峪河国家湿地公园, 山西交城 030500; 4. 山西农业大学林学院, 山西晋中 030801

摘要: 为研究太行山东北部的哺乳动物区系及多样性格局, 2019年7月1日至10月30日间, 作者采用样线调查和红外相机监测、访谈、文献查阅等多种方法, 对该区域的哺乳动物进行调查, 分析了区系构成, 并基于多样性指数比较了太行山片区和燕山片区哺乳动物多样性及动物分布型的差异。结果表明: 太行山东北部区域分布有哺乳动物7目22科68种, 其中啮齿目种类最多(24种), 灵长目最少, 仅猕猴(*Macaca mulatta*) 1种; 区域内分布有2种国家I级(金钱豹*Panthera pardus*、豺*Cuon alpinus*)和10种国家II级重点保护野生动物。太行山片区和燕山片区的哺乳动物区系的平均动物区系相似性(average faunal resemblance)系数为0.844, 相似性较大, 太行山片区的哺乳动物种数(66)高于燕山片区(50), 其科的多样性指数($D_F = 2.994 \pm 0.251, n = 13$)和属的多样性指数($D_G = 2.443 \pm 0.161, n = 13$)也略高于燕山片区($D_F = 2.458 \pm 0.170, D_G = 2.259 \pm 0.149, n = 10$), 但无显著差异($P > 0.05$)。太行山片区哺乳动物G-F指数($D_{G-F} = 0.145 \pm 0.022, n = 13$)显著高于燕山片区($0.078 \pm 0.014, n = 10$) ($P < 0.05$)。研究表明, 太行山片区和燕山片区的哺乳动物的科、属组成相同, 但太行山片区的物种多样性高于燕山片区; 太行山东北部区域分布的哺乳动物以古北界物种为主, 太行山片区和燕山片区均有10类动物分布型的哺乳动物; 因太行山片区的纬度相对较低, 其东洋界物种比例(19.11%)略高于燕山片区(17.64%)。

关键词: 太行山东北部; 哺乳动物; 动物区系; 生物多样性指数

卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥 (2021) 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 29, 331–339. doi: 10.17520/biods.2020081.

Bu XL, Wang J, Wu JY, Sun TF, Xiang RW, Lu QB, Hao YH, Cui SP, Sheng Y, Meng XX (2021) Mammal fauna and biodiversity in the northeastern Taihang Mountains. Biodiversity Science, 29, 331–339. doi: 10.17520/biods.2020081.

Mammal fauna and biodiversity in the northeastern Taihang Mountains

Xiangli Bu¹, Jing Wang¹, Jiayi Wu¹, Taifu Sun¹, Rongwei Xiang¹, Qingbin Lu², Yinghong Hao³, Shaopeng Cui⁴,
Yan Sheng¹, Xiuxiang Meng^{1*}

1 School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872

2 College of Animal Science and Technology, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou 311300

3 Wenyuhe National Wetland Reserve, Jiaocheng, Shanxi 030500

4 College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong City, Shanxi 030801

ABSTRACT

Aims: In order to determine the mammalian fauna and diversity patterns in the northeastern Taihang Mountains, we studied the wild mammalian resources in this area from July 1st to October 30th, 2019.

Methods: We used a combination of line-transect surveys, camera trap and other methods. The number of species and distribution patterns of mammals in the Taihang and Yanshan areas were compared using biodiversity indices.

Results: A total of 68 species of mammals were recorded in the region, belonging to 7 orders and 22 families. The majority of species were Rodentia (24 species), while only one Primate species (*Macaca mulatta*) was found. In this region, two species (*Panthera pardus*, *Cuon alpinus*) were listed as Class I National Key Protected Species in China and 10 species, including *Naemorhedus griseus*, were listed as Class II. The mammalian fauna in Taihang and Yanshan areas was similar with an average faunal resemblance (AFR) of 0.844, but the number of species in Taihang (66) was greater

收稿日期: 2020-03-05; 接受日期: 2020-06-24

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)和国家自然科学基金(31672300)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: meng2014@ruc.edu.cn

than that in Yanshan (50). The diversity of family index ($D_F = 2.994 \pm 0.251, n = 13$) and genus index ($D_G = 2.443 \pm 0.161, n = 13$) of Taihang were slightly higher than those in Yanshan ($D_F = 2.458 \pm 0.170, D_G = 2.259 \pm 0.149, n = 10$), but the differences were not statistically significant ($P > 0.05$). Taihang's D_{G-F} index ($0.145 \pm 0.022, n = 13$) was significantly higher than that of Yanshan ($0.078 \pm 0.014, n = 10$) ($P < 0.05$). Our results indicated that species composition in the two areas was similar in family and genus diversity. Whilst, the species diversity of Taihang was higher than that of Yanshan, and dominated by mammals from the Palaearctic region. Although there were 10 types of distributions in Taihang and Yanshan, the former's proportion of species from the Oriental region (19.11%) was slightly higher than that in Yanshan (17.64%) due to the relatively lower latitude.

Conclusion: There are environmental stress on the distribution and biodiversity of wild mammals in the northeastern Taihang Mountains. It is suggested that the specific survey should be carried out in this area to determine the stressors and the mechanism of influence, on this basis, the reasonable strategies can be determined and the efficiency of conservation can be improved.

Key words: northeastern Taihang Mountains; mammal; fauna; biodiversity index

哺乳动物分布广泛、生境多样,在生态系统中的营养级水平相对较高,对环境变化敏感,是生物多样性保护与评价的关键指示类群,可很好地表征区域的生物多样性水平及动物区系特征(陈卫等, 2004; 肖治术等, 2017)。我国有哺乳动物693种,特有种146种(蒋志刚等, 2017),国家I级重点保护野生动物99种,II级重点保护野生动物86种(http://www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20210205122418860831352/file/20210205151950336764982.pdf)。因生境丧失和质量下降及人类干扰等原因,许多哺乳动物物种处于受胁状态(蒋志刚等, 2016; 臧春鑫等, 2016)。

太行山优先区是我国35个生物多样性保护优先区域之一(中华人民共和国环境保护部, 2011),其东北部区域地处首都经济圈,是京津冀区域的水源涵养区及重要生态屏障。长期以来,对该区域的哺乳动物研究多集中于分类学(陈卫和高武, 1991; 李东明等, 2003; 战永佳等, 2005; 覃雪波等, 2008; 李吉利等, 2013)、动物区划(孙立汉, 1987, 2002)、类群特征与生态习性(贾延库等, 1999)和古动物学(Tong, 2006)等方面,对哺乳动物多样性方面的研究相对较少,且多侧重于物种分类、鉴定及局部区域的分布调查等。如张洁(1984)、贾延库等(1999)和陈卫等(2004)的研究表明北京周边区域分布有约40–50种哺乳动物,其中啮齿类动物物种较多、分布较广、生境多样;高士平等(2012)和杨守庄等(2019)报道,河北省哺乳动物多样性较丰富的地区主要集中在太行山区,小五台山区域的鸟兽资源以古北界物种占优势。

综上,相对于我国其他区域,环京津冀的太行

山东北部区域的哺乳动物多样性研究开展较少,已有的研究多限于局域的短时调查,缺乏基于多样性指数的评价。本研究综合采用样线调查、红外相机监测及铯日法、网捕法等调查方法对太行山东北部区域开展哺乳动物多样性调查和评估,其结果可为该区域的生物多样性保育及管理提供重要参考。

1 研究方法

1.1 研究区域

太行山东北部(38°37'–40°57' N, 113°50'–117°47' E)区域属内蒙古高原和黄土高原向华北平原过渡地带,最高峰为海拔2,882 m的小五台山。该区域平均海拔1,200 m,年均降水量507 mm,雨季集中于7–8月,年均气温11.3℃,昼夜温差大,四季分明,属暖温带半湿润大陆性季风气候,是潮河、白河和滦河的发源地。本区域可分为燕山和太行山2个片区,植被均以温带落叶阔叶林为主,燕山片区主要为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林、山杨(*Populus davidiana*)和白桦(*Betula platyphylla*)天然次生林,优势种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦、山杨等;太行山片区以蒙古栎、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、槲栎(*Q. aliena*)、白桦、棘皮桦(*Betula dahurica*)、红桦(*B. albosinensis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杨等为优势种,低山丘陵主要有荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)等灌丛分布(丛明旸等, 2017)。

1.2 数据采集

研究于太行山片区(北京市:昌平区、房山区;河北省:怀来县、涿鹿县、宣化县、蔚县、涞水县、

涞源县、易县、唐县、阜平县、灵寿县、平山县)和燕山片区(北京市:平谷区、密云区、顺义区、怀柔区、昌平区;河北省:遵化市、兴隆县、赤城县、怀来县;天津市:蓟州区)进行(图1)。

基于顶层设计及全国统一划分的 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 调查网格,覆盖在太行山东北部的为335个。本文考虑区域内的行政区划、地形地貌、土地利用情况、植被类型、海拔和生态系统类型的代表性和覆盖性,选择74个生物多样性富集区域为调查网格,网格抽样强度达22.02%。据《县域陆生哺乳动物多样性调查与评估技术规范》(http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201801/t20180108_429275.htm),基于ArcGIS平台确定样线起点、中点和尾点,共布设152条调查样线(图1),每条样线长3–6 km,单宽100–150 m,相邻样线间距离大于1 km。对山地生境为主的单个网格的面积抽样强度达2.4%,对农田杂灌为主的单个网格的面积抽样强度达1.8%。本文采用以下几种方法进行调查:

(1)样线法:于2019年7月1日至10月30日进行野外调查。提前测量布设样线的起点、中点和尾点

的经纬度,用手持式GPS(佳明GPSMAP 639sc)进行探点和引点。调查时3–5名调查队员平行行进,每人负责单宽15–30 m的样线范围,行进速度保持在1–2 km/h。记录哺乳动物实体、活动痕迹(粪便、体毛、爪印、食痕、卧痕、尿迹、洞穴及足迹链等)、地理位置、生境类型及受干扰情况等信息。

(2)红外相机监测法:在每条样线上布设2–5台红外相机,相机间相距100 m以上,相机距地面50–100 cm,捆扎于样线内典型生境的树干或岩石上,拍摄参数统一设置为中灵敏度,连续拍摄3张照片,再拍摄60 s短视频,拍摄间隔3 s,定期回收和更换存储卡。

(3)铗日法:在样线内啮齿类的典型生境布设鼠铗40–60个,鼠铗间距20 m。鼠铗于黄昏(18:00–19:00)布设,翌日早晨(07:00–08:00)采收。

(4)网捕法:采用网捕法调查翼手类动物。于黄昏(18:00–19:00)在山林、溶洞内及溶洞口布设雾网4–5张,翌日早晨(07:00–08:00)采收。

(5)访谈法和文献查阅法:在进行野外调查的同时,对当地猎户和护林人员进行访谈,向调查对

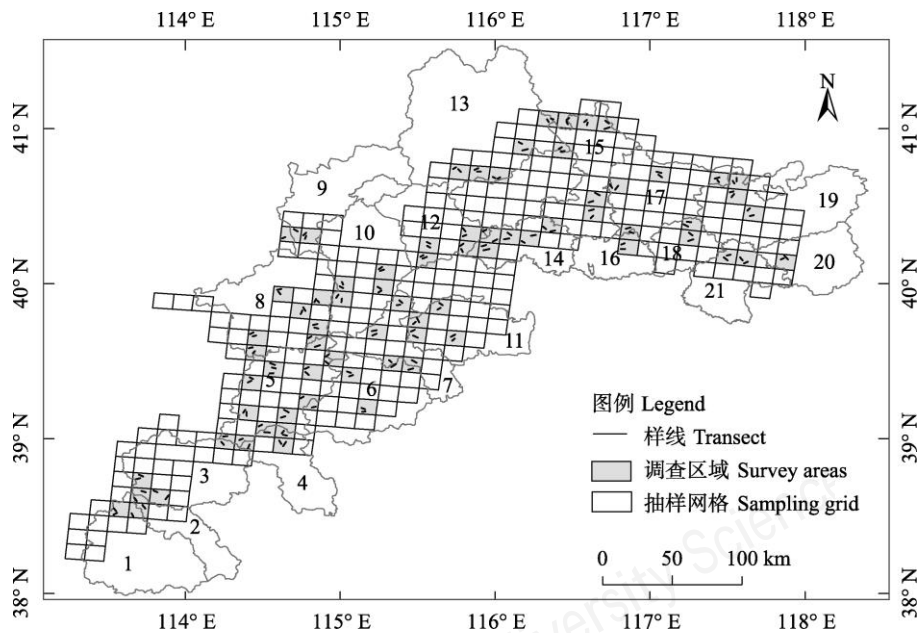


图1 太行山东北部调查区域及样线分布。1:平山县;2:灵寿县;3:阜平县;4:唐县;5:涞源县;6:易县;7:涞水县;8:蔚县;9:宣化县;10:涿鹿县;11:房山区;12:怀来县;13:赤城县;14:昌平区;15:怀柔区;16:顺义区;17:密云区;18:平谷区;19:兴隆县;20:遵化市;21:蓟州区。

Fig. 1 Surveying area and transect lines distribution in northeastern Taihang Mountains. 1, Pingshan County; 2, Lingshou County; 3, Fuping County; 4, Tangxian County; 5, Laiyuan County; 6, Yixian County; 7, Laishui County; 8, Yuxian County; 9, Xuanhua County; 10, Zhuolu County; 11, Fangshan District; 12, Huailai County; 13, Chicheng County; 14, Changping District; 15, Huairou District; 16, Shunyi District; 17, Miyun District; 18, Pinggu District; 19, Xinglong County; 20, Zunhua City; 21, Jizhou District.

象描述特定物种的特征、分布生境及习性等, 并出示物种图片让访谈对象指认, 再结合文献、工具书等进行核实。按照2021年新版《国家重点保护野生动物名录》确定太行山东北部哺乳动物保护等级 (http://www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20210205122418860831352/file/20210205151950336764982.pdf)。

1.3 数据分析

参考潘清华等(2007)、Smith等(2009)、张荣祖(2011)、蒋志刚等(2015, 2016, 2017), 确定物种的地理区划类别、保护等级及濒危等级等, 分析其区系特征。计算属的多样性指数(D_G)、科的多样性指数(D_F)及标准化的G-F指数(D_{G-F}) (蒋志刚和纪力强, 1999)。若区域内仅有1个物种, 或仅有几个分布在不同科的物种, 则定义该地区 D_{G-F} 指数为零。计算公式如下:

(1)科的多样性指数(D_F):

$$D_F = \sum_{k=1}^m D_{Fk}; D_{Fk} = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i; p_i = s_{ki} / S_k$$

式中, m 为哺乳动物科数, S_k 为 k 科的物种数, s_{ki} 为 k 科中 i 属的物种数, n 为 k 科中的属数。

(2)属的多样性指数(D_G):

$$D_G = -\sum_{j=1}^p D_{Gj} = -\sum_{j=1}^p q_j \ln q_j; q_j = s_j / S$$

式中, s_j 为 j 属中的物种数, S 为物种数, p 为属数。

(3)G-F指数(D_{G-F}):

$$D_{G-F} = 1 - \frac{D_G}{D_F}$$

区域的非单种科越多, D_{G-F} 指数越高, $0 \leq \frac{D_G}{D_F} \leq 1$ 。

对每个县(区)的多样性指数进行计算, 用 t -test检验两个片区间的多样性指数差异。采用平均动物区系相似性(average faunal resemblance, AFR)系数比较太行山片区和燕山片区的哺乳动物区系的相似性, 计算公式为 $AFR = C(N_1 + N_2) / 2N_1N_2$ (C 为两个区域共有的物种数; N_1 和 N_2 分别表示两个区域的总物种数)。AFR值域为0–1, 当AFR为0–0.40时, 表示疏远关系; 为0.40–0.59时, 表示周缘关系; 为0.60–0.79时, 表示密切关系; 为0.80–1时, 表示共同关系(杨道德等, 2008)。数据分析采用SPSS 25.0软件, 显著性水平为 $P = 0.05$ 。

2 结果

2.1 太行山东北部区域的哺乳动物物种

太行山东北部共记录野生哺乳动物68种(附录1), 隶属7目22科, 其中红外相机拍摄到11种, 通过野外直接目击实体、痕迹、访谈和文献记载等确定物种57种。啮齿目种类最多, 为24种, 占区域哺乳动物总种数的35.29%; 食肉目17种, 占比25%; 翼手目15种, 占比22.06%; 另有劳亚食虫目动物6种(8.82%)、偶蹄目3种(4.41%)和兔形目2种(2.94%); 灵长目动物最少, 仅有猕猴(*Macaca mulatta*) 1种(1.49%)。

研究区域内分布的国家I级重点保护野生动物有2种, 即金钱豹(*Panthera pardus*)和豺(*Cuon alpinus*), 国家II级重点保护野生动物有中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)等10种; 9种哺乳动物被IUCN红色名录(<https://www.iucnredlist.org/>)列为受胁物种(濒危、易危和近危); 31种被《中国脊椎动物红色名录》列为受胁物种, 占区域内兽类物种总数的44.12%。此外, 调查区域内分布的我国特有哺乳动物有岩松鼠(*Sciurotamias davidianus*)、中华鼯鼠(*Eospalax fontanierii*)、川西缺齿鼯鼠(*Chodsigoa hysibia*)、麝鼯(*Scaptochirus moschatus*)、北京鼠耳蝠(*Myotis pequinus*)、大卫鼠耳蝠(*M. davidii*)及毛腿鼠耳蝠(*M. fimbriatus*)共7种, 占我国特有哺乳动物总数的4.79%。

2.2 太行山东北部哺乳动物区系构成

区域内共有古北界物种45种, 占总物种数的66.18%; 东洋界物种15种, 占22.06%; 广布种8种, 占11.76%。其中, 太行山片区的古北界物种比例(66.18%, 45种)高于燕山片区(50%, 34种), 其东洋界物种数(13种, 19.12%)也较燕山区域多1种(12种, 17.65%) (表1)。

该区域分布的古北界物种中, 古北型最多, 达18种(26.47%), 华北型最少(2种, 2.94%); 东洋界物种中, 东洋型最多(8种, 11.76%), 而南中国型最少(3种, 4.41%)。太行山片区和燕山片区内均有10种动物分布型, 但太行山片区的东洋界物种中的南中国型比例(3种, 4.41%)要高于燕山片区(1种, 1.47%) (表1)。

2.3 物种多样性指数分析

太行山片区的 D_F 指数(2.994 ± 0.251 , $n = 13$)和

表1 太行山东北部区域的哺乳动物区系组成

Table 1 Mammal fauna in the northeastern Taihang Mountains

区系 Fauna	分布型 Distribution type	种数 No. of species (%)		
		太行山东北部 Northeastern Taihang Mountains	太行山片区 Taihang area	燕山片区 Yanshan area
古北界 Palearctic realm	古北型 Palaeartic type	18 (26.47)	18 (26.47)	15 (22.06)
	华北型 North China type	2 (2.94)	2 (2.94)	2 (2.94)
	全北型 Holarctic type	4 (5.88)	4 (5.88)	2 (2.94)
	中亚型 Central-Asia type	8 (11.76)	8 (11.76)	5 (7.35)
	季风区型 Monsoon type	9 (13.24)	9 (13.24)	6 (8.82)
	东北-华北型 Northeast-north China type	4 (5.88)	4 (5.88)	4 (5.88)
东洋界 Oriental realm	南中国型 Southern China type	3 (4.41)	3 (4.41)	1 (1.47)
	东洋型 Oriental type	8 (11.76)	7 (10.29)	8 (11.76)
	喜马拉雅-横断山区型 Himalaya-Hengduan Mountain type	4 (5.88)	3 (4.41)	3 (4.41)
广布种 Wide spread	不易归类的广布种 Inconvenience divide type and widely distributed species	8 (11.76)	8 (11.76)	4 (5.88)

表2 太行山片区与燕山片区哺乳动物物种多样性指数比较

Table 2 Comparison of mammal species diversity between Taihang area and Yanshan area

	物种数 No. of species	相同物种数 No. of common species	平均动物区系相似性 Average faunal resemblance (AFR)	科的多样性指数 Diversity of family index (D_F)	属的多样性指数 Diversity of genus index (D_G)	G-F指数 G-F index (D_{G-F})
太行山片区 Taihang area ($n = 13$)	66	48	0.844	2.994 ± 0.251	2.443 ± 0.161	0.145 ± 0.022
燕山片区 Yanshan area ($n = 10$)	50			2.458 ± 0.170	2.259 ± 0.149	0.078 ± 0.014
P (t -test)				0.157	0.572	0.046

D_G 指数(2.443 ± 0.161 , $n = 13$)略高于燕山片区($D_F = 2.458 \pm 0.170$, $D_G = 2.259 \pm 0.149$, $n = 10$), 但差异未达显著水平($P > 0.05$), D_{G-F} 指数(0.145 ± 0.022 , $n = 13$)显著高于燕山片区($D_{G-F} = 0.078 \pm 0.014$, $n = 10$) ($P < 0.05$), 表明两个片区的哺乳动物的科、属组成相同但太行山片区物种多样性高于燕山片区(表2)。此外, 燕山片区和太行山片区的平均动物区系相似性系数(AFR)为0.844, 两个片区的哺乳动物区系为共同关系。

3 讨论

3.1 太行山东北部哺乳动物物种

动物的分布受综合因素制约, 区域内的环境温度、降水、地形地貌特征、植被类型、食物资源和天敌等诸多因素对野生动物的分布均可施加影响(高贤明等, 2001)。历史上太行山东北部的水土保持及植被条件较好, 该区域的哺乳动物物种丰富度尚

维持在较好水平, 狼(*Canis lupus*)及黑熊(*Ursus thibetanus*)等均有分布(张荣祖, 2011)。自20世纪中期以来, 太行山东北部及京津冀周边区域对野生动物的干扰强度过大, 区域内大范围的林业砍伐、农业开垦等导致野生动物的生境质量下降或丧失(张洁, 1984; 陈卫等, 2004; 林鑫等, 2009), 加之区域内经济快速发展和高度的城市(镇)化, 使该区域的动物栖息地面积急剧减少, 导致许多野生动物濒危、群落多样性水平下降。如武明录等(2006)的研究表明, 原分布于河北太行山区的原麝(*Moschus moschiferus*)目前已无野生群。本研究结果表明, 太行山东北部共有68种哺乳动物, 仅占我国哺乳动物物种总数(693种)的9.81%, 特有哺乳动物物种比率(4.79%)远低于我国的哺乳动物特有率(21%), 属我国兽类资源相对贫乏区域。

本研究结果表明, 太行山东北部的大中型兽类主要有豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、獾类、野猪

(*Sus scrofa*)、中华斑羚、狍(*Capreolus pygargus*)、猕猴、貉(*Nyctereutes procyonoides*)、赤狐(*Vulpes vulpes*)、黄鼬(*Mustela sibirica*)，个别地区分布有金钱豹。而黑熊、狼、豺、兔狲(*Otocolobus manul*)、石貂(*Martes foina*)、艾鼬(*Mustela eversmanii*)、白鼬(*M. erminea*)等物种在历史上分布于该区域，但已多年未见报道。此次调查未直接发现上述大型动物的实体及痕迹，但多次访问均显示该区域疑似有分布，尚需基于实体、照片及DNA样品等的实证性确认。研究区域的啮齿动物以岩松鼠、松鼠(*Sciurus vulgaris*)、北花松鼠(*Tamias sibiricus*)、隐纹花松鼠(*Tamiops swinhoii*)、大林姬鼠(*Apodemus peninsulae*)和北社鼠(*Niviventer confucianus*)等为主，常见于太行山东北部的山林和农耕区域；一些人类伴生种如小家鼠(*Mus musculus*)、褐家鼠(*Rattus norvegicus*)等的鼠铗捕获率极低；而鼯鼠科和跳鼠科物种仅在调查访谈中有记录。另外，本研究仅实地调查到马铁菊头蝠(*Rhinolophus ferrumequinum*)、尖耳鼠耳蝠(*Myotis blythii*)、双色蝙蝠(*Vespertilio murinus*)、大棕蝠(*Eptesicus serotinus*)、褐山蝠(*Nyctalus noctula*)等5个翼手目物种，少于历史记录(战永佳等, 2005)，这可能与区域内的生境变化及人类活动加剧有关，实际调查和访谈均表明，原喜栖于房檐屋后或距社区近的山林的翼手类动物已很难发现。

从物种组成看，太行山东北部的兽类具有一定特殊性，分布有7种特有种、2种国家I级和10种国家II级重点保护野生动物，9种IUCN红色名录受胁物种以及31种《中国脊椎动物红色名录》受胁物种，具有较大的保护和科研价值。此外，按照2021年新版《国家重点保护野生动物名录》，研究区域有分布的白鼬、艾鼬及豹猫被新增为国家II级重点保护野生动物。

3.2 太行山东北部哺乳动物多样性及区系

太行山东北部属于暖温带半湿润大陆性季风气候，自然环境独特，动物区系特殊。本研究中，太行山片区与燕山片区的平均动物区系相似性(AFR)系数较高(0.844)，两个片区分布的兽类物种组成上极为相似，区系为共同关系。太行山片区的 D_F 指数(2.994 ± 0.251 , $n = 13$)、 D_G 指数(2.443 ± 0.161 , $n = 13$)高于燕山片区($D_F = 2.458 \pm 0.170$, $D_G = 2.259 \pm 0.149$, $n = 10$)， D_{G-F} 指数显著高于燕山片区($P < 0.05$)，表明两个片区的物种在科属水平上组成相同

但太行山片区的物种多样性要高于燕山片区，这与两个片区间的水热条件及植被差异有关。太行山片区和燕山片区为连片分布的山地-丘陵景观地貌，地势从西北向东南为阶梯状平缓倾斜，降水和均温均无急剧变化，主要的植被分布类型和优势树种也无明显差异(陈卫等, 2004; 李卓等, 2017)，均以温带落叶阔叶林为主，因此两个片区分布的哺乳动物物种、区系及构成相似。另一方面，太行山片区的地理纬度较燕山区域低，其水热条件、植被和食物资源等相对优于燕山区域，因此，本研究中的太行山片区的物种丰富度和多样性指数均高于燕山片区，为印证我国陆栖哺乳动物丰富度变化的纬度梯度格局又增添一例实证，即由南向北，随纬度攀升，哺乳动物物种丰富度逐渐递减(林鑫等, 2009)。

在我国动物地理区划中，太行山东北部主要属古北界华北区，北临蒙新区与东北区，包括西北部的黄土高原、晋冀山地及东部的黄淮平原。在本研究中，太行山东北部共分布有45种古北界物种(66.18%)和15种东洋界物种(22.06%)，其中古北界物种中的古北型物种最多(26.47%)、华北型最少(2.94%)，东洋界物种中的东洋型最多(11.76%)、南中国型最少(4.41%)，表明太行山东北部的兽类动物区系以古北界物种为主，呈现出古北界物种和东洋界物种混杂分布的动物区系特征。这与该区域在气候和地理上的过渡性有关，即太行山片区和燕山片区既有南北动物的交错分布，也有季风区及蒙新区动物的相互混杂(张荣祖, 1978, 2011)。

尽管本研究中的太行山片区和燕山片区的动物区系组成格局类似，均是古北界物种明显多于东洋界物种，但太行山片区的东洋界物种比例(19.12%)略高于燕山片区(17.65%)。区域的气温和降水等水热条件可直接影响野生动物的分布，也可通过影响其食物资源和隐蔽条件间接影响野生动物分布及多样性状况(Post & Stenseth, 1999)。太行山片区的纬度相对燕山区域较低，水热条件相对较好(张荣祖, 2011)，虽然南北动物在此混杂分布，但相对地，太行山片区南方性的东洋界物种分布较多。也正因如此，虽两个片区均有10个地理分布型兽类物种分布，但太行山片区的东洋界物种中的南中国型比例(4.41%)要高于燕山片区(1.47%)，而两个片区的喜马拉雅-横断山区型物种比例相同(4.41%)。

太行山东北部气候变暖趋势明显(王绍武和叶瑾琳, 1995)。在全球和区域性气候变暖背景下, 随增温效应的长时间序列上的累加, 加之人为活动加剧和环境变迁等综合效应, 有可能导致该区域的动物分布型发生变化, 从而导致区域内的东洋界物种的分布北移。

3.3 太行山东北部哺乳动物调查方法探讨

野生哺乳动物调查需多方法、多技术和多手段结合, 相互印证和补充, 才能更全面客观地评价研究区域的兽类多样性。本文综合采用样线法、红外相机监测法、铗日法和网捕法等兽类调查方法, 对太行山东北部的兽类多样性进行调查和评估。此外, 植物郁闭度可影响野外调查中的物种遇见率, 本研究虽于夏季进行, 但研究区域毗邻华北农业区, 多为稀疏次生林、次生灌草丛并伴有大片的农田景观, 生境较为开阔, 郁闭度较低。样线法作为本次兽类调查的首选方法, 适合于太行山东北部地势相对较平坦、生境较简单的地区(田园等, 2015)。此外, 通过将红外相机捆扎在样线内的典型生境的树干或岩石上, 拍摄视野较广阔, 因此可较好地发挥其监测优势。而由于调查区域地处京津冀周边, 城镇化率较高, 人为活动强度较大, 放牧、偷猎、山路开采、旅游等活动对动物造成极大干扰, 影响动物的生活习性和分布, 导致此地区的小型兽类物种数量与历史记载相比严重降低, 使铗日法和网捕法等方法的调查效率受限。因此, 我们结合文献查阅和访谈调查太行山东北部的兽类分布, 通过对当地经验丰富的猎户和护林人员的访谈可提供物种分布与否以及种群趋势等方面的补充信息, 能较客观地反映该区域的兽类多样性和区系分布。在后续研究中, 应选取重点案例区域, 进行定点调查以及啮齿类和翼手类等小型兽类的专项调查。

3.4 保护建议

太行山东北部已建立5个国家级自然保护区及15个省市级自然保护区, 但因地处京津冀超大城市圈周边, 较高强度的城市(镇)化及迅捷的经济发展给该区域内的哺乳动物保护及生境管理带来极大影响, 亟需开展监测和评估, 并基于研究结果优化区域的哺乳动物保育对策, 在生物多样性保护和生态管理上实现京津冀协同。

在当前新冠肺炎疫情背景下, 应开展对京津冀区域疫源性野生动物的专项调查, 查清该区域内疫

源动物的名录、分布、种群等, 并进行野生动物驯养、繁育及非法利用的调查, 编制相应的野生动物疫源病暴发风险防控及应急预案。

致谢: 中国人民大学环境学院的褚梦真、肖晨瑶、房璇、邓益娟和李杨喆等同学参与野外调查, 在此一并致谢。

ORCID

孟秀祥  <https://orcid.org/0000-0002-8930-032X>

参考文献

- Chen W, Gao W (1991) Report of investigation on mammalian of Songshan Natural Conservancy of Beijing. *Journal of Beijing Teachers College (Nature Sciences Edition)*, 12, 64–69. (in Chinese with English abstract) [陈卫, 高武 (1991) 北京松山自然保护区兽类调查报告. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 12, 64–69.]
- Chen W, Gao W, Fu BQ (2004) Mammals and their geographical distribution in Beijing. *Greening and Life*, (6), 42–43. (in Chinese) [陈卫, 高武, 傅必谦 (2004) 北京地区兽类及其地理分布. *绿化与生活*, (6), 42–43.]
- Cong MY, Cao D, Chen GP, Chen BZ, Sun FB (2017) Vertical characteristics of plant diversity in transition between Mount. Yan and Mount. Taihang. *Bulletin of Botanical Research*, 37, 673–681. (in Chinese with English abstract) [丛明吻, 曹迪, 陈国平, 陈宝政, 孙丰宾 (2017) 燕山和太行山过渡区植物多样性垂直变化特点. *植物研究*, 37, 673–681.]
- Gao SP, Li DM, Gao YJ, Wang RJ, Li JY, Wu YF (2012) Species abundance and distribution patterns of vertebrates in Hebei Province. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 29(3), 62–64. (in Chinese with English abstract) [高士平, 李东明, 高英杰, 王瑞君, 李巨勇, 吴跃峰 (2012) 河北省生物多样性动态监测指标设计: 以脊椎动物多样性分布的丰富度评价为例. *河北省科学院学报*, 29(3), 62–64.]
- Gao XM, Ma KP, Chen LZ (2001) Species diversity of some deciduous broad-leaved forests in the warm-temperate zone and its relations to community dynamics. *Acta Phytocologica Sinica*, 25, 283–290. (in Chinese with English abstract) [高贤明, 马克平, 陈灵芝 (2001) 暖温带若干落叶阔叶林群落物种多样性及其与群落动态的关系. *植物生态学报*, 25, 283–290.]
- Jia YK, Gao YR, Chen CA, Zhou E (1999) Survey of rodent species and their zoogeographical distributions in Beijing Area. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 10(2), 87–90. (in Chinese with English abstract) [贾延库, 高永荣, 陈长安, 周镆 (1999) 北京地区啮齿动物种类和地理分布调查. *中国媒介生物学及控制杂志*, 10(2), 87–90.]

- Jiang ZG, Ji LQ (1999) Avian-mammalian species diversity in nine representative sites in China. *Chinese Biodiversity*, 7, 220–225. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 纪力强 (1999) 鸟兽物种多样性测度的G-F指数方法. 生物多样性, 7, 220–225.]
- Jiang ZG, Li LL, Luo ZH, Tang SH, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Feng ZJ, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Ping XG, Fang HX (2016) Evaluating the status of China's mammals and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 552–567. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 李立立, 罗振华, 汤宋华, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 冯祚建, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 平晓鸽, 方红霞 (2016) 通过红色名录评估研究中国哺乳动物受威胁现状及其原因. 生物多样性, 24, 552–567.]
- Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammal diversity (2nd edition). *Biodiversity Science*, 25, 886–895. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性 (第2版). 生物多样性, 25, 886–895.]
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu SY, Luo ZH, Li CW (2015) China's mammal diversity. *Biodiversity Science*, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015) 中国哺乳动物多样性. 生物多样性, 23, 351–364.]
- Li DM, Wu YF, Sun LH, Zhang YW, Gao QH, Wu LN, Dong JX (2003) Analysis on avian-mammalian species diversity in Hebei Province. *Geography and Geo-Information Science*, 19(6), 80–82. (in Chinese with English abstract) [李东明, 吴跃峰, 孙立汉, 张彦威, 高庆华, 武丽娜, 董建新 (2003) 河北省区域鸟兽物种多样性分析. 地理与地理信息科学, 19(6), 80–82.]
- Li JL, Zhao HS, Du J, Wan SX (2013) Threats to wildlife diversity and conservation strategies in the Xiaowutai Mountain National Nature Reserve, Hebei. *Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, (1), 35–37. (in Chinese) [李吉利, 赵焕生, 杜娟, 万少欣 (2013) 河北小五台山国家级自然保护区野生动物多样性面临的威胁及保护对策. 河北林业科技, (1), 35–37.]
- Li Z, Sun RH, Zhang JC, Zhang C (2017) Temporal-spatial analysis of vegetation coverage dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan regions. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 7418–7426. (in Chinese with English abstract) [李卓, 孙然好, 张继超, 张翀 (2017) 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. 生态学报, 37, 7418–7426.]
- Lin X, Wang ZH, Tang ZY, Zhao SQ, Fang JY (2009) Geographic patterns and environmental correlates of terrestrial mammal species richness in China. *Biodiversity Science*, 17, 652–663. (in Chinese with English abstract) [林鑫, 王志恒, 唐志尧, 赵淑清, 方精云 (2009) 中国陆栖哺乳动物物种丰富度的地理格局及其与环境因子的关系. 生物多样性, 17, 652–663.]
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2011) China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2011–2030). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese) [中华人民共和国环境保护部 (2011) 中国生物多样性保护战略与行动计划 (2011–2030年). 中国环境科学出版社, 北京.]
- Pan QH, Wang YX, Yan K (2007) A Field Guide to the Mammals of China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [潘清华, 王应祥, 岩崑 (2007) 中国哺乳动物彩色图鉴. 中国林业出版社, 北京.]
- Post E, Stenseth NC (1999) Climatic variability, plant phenology, and northern ungulates. *Ecology*, 80, 1322–1339.
- Qin XB, Zhao TJ, Zhu JB (2008) Investigation of mammal resources in Baxianshan Nature Reserve. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, (4), 39–42. (in Chinese) [覃雪波, 赵铁建, 朱金宝 (2008) 天津八仙山自然保护区兽类资源调查. 天津农林科技, (4), 39–42.]
- Smith AT, Xie Y, Hoffmann RS (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [Smith A, 解焱, Hoffmann RS, (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Sun LH (1987) Eco-geographical division of small mammals in Hebei Province. *Geography and Geo-Information Science*, 3(2), 55–57, 54. (in Chinese) [孙立汉 (1987) 河北省小型兽类生态地理区划. 地理学与国土研究, 3(2), 55–57, 54.]
- Sun LH (2002) The research history of mammal and amphibious reptile and geographical division in Hebei Province. *Geography and Territorial Research*, 18(2), 64–68. (in Chinese with English abstract) [孙立汉 (2002) 河北哺乳及两栖爬行动物研究史与地理区划. 地理学与国土研究, 18(2), 64–68.]
- Tian Y, Feng YJ, Zhang CL, Yu BC, Tang XP, Hu HJ (2015) Effectiveness of line transects during wild animal surveys in mountain forests of South China. *Biodiversity Science*, 23, 109–115. (in Chinese with English abstract) [田园, 冯永军, 张春兰, 遇宝成, 唐小平, 胡慧建 (2015) 样线法在南方山地生态系统野生动物调查中的试点效果评价. 生物多样性, 23, 109–115.]
- Tong HW (2006) Mammalian faunal differentiations between North and South China during the Quaternary Period. *L'Anthropologie*, 110, 870–887. (in French with English abstract)
- Wang SW, Ye JL (1995) An analysis of global warming during the last one hundred years. *Scientia Atmospherica Sinica*, 19, 545–553. (in Chinese with English abstract) [王绍武, 叶瑾琳 (1995) 近百年全球气候变暖的分析. 大气科学, 19, 545–553.]
- Wu ML, Wang XH, An CL, Zhao J, Fu YS, Mao FL, Shang XH, Wang ZP (2006) Investigation of mammal resources in Hebei Province. *Journal of Hebei Forestry Science and*

- Technology, (2), 20–23. (in Chinese) [武明录, 王秀辉, 安春林, 赵静, 付芸生, 毛富玲, 尚辛亥, 王振鹏 (2006) 河北省兽类资源调查. 河北林业科技, (2), 20–23.]
- Xiao ZS, Li XY, Xiang ZF, Li M, Jiang XL, Zhang LB (2017) Overview of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON. *Biodiversity Science*, 25, 237–245. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李学友, 向左甫, 李明, 蒋学龙, 张礼标 (2017) 中国兽类多样性监测网的建设规划与进展. 生物多样性, 25, 237–245.]
- Yang DD, Liu S, Fei DB, Yu XL, Gu YL, Lu HJ, Chen HM, Zhu JC (2008) Field survey and faunal analysis on herpetological resources in Qiyunshan Nature Reserve, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Zoology*, 43(6), 68–76. (in Chinese with English abstract) [杨道德, 刘松, 费冬波, 喻兴雷, 谷颖乐, 卢何军, 陈辉敏, 朱家椿 (2008) 江西齐云山自然保护区两栖爬行动物资源调查与区系分析. 动物学杂志, 43(6), 68–76.]
- Yang SZ, An QX, Liu YR (2019) A survey and assessment of avian and mammalian resources in Xiaowutai International Hunting Ground, Hebei, China. *Chinese Journal of Wildlife*, 40, 332–344. (in Chinese with English abstract) [杨守庄, 安琪瑄, 刘琰冉 (2019) 河北小五台国际狩猎场鸟兽资源调查与评价. 野生动物学报, 40, 332–344.]
- Zang CX, Cai L, Li JQ, Wu XP, Li XG, Li JS (2016) Preparation of the China Biodiversity Red List and its significance for biodiversity conservation within China. *Biodiversity Science*, 24, 610–614. (in Chinese with English abstract) [臧春鑫, 蔡蕾, 李佳琦, 吴晓蕾, 李晓光, 李俊生 (2016) 《中国生物多样性红色名录》的制定及其对生物多样性保护的意义. 生物多样性, 24, 610–614.]
- Zhan YJ, Chen W, Gao W (2005) The status and conservation suggestions of Beijing Chiropteran. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 26(4), 57–59. (in Chinese with English abstract) [战永佳, 陈卫, 高武 (2005) 北京地区翼手类现状与保护. 首都师范大学学报(自然科学版), 26(4), 57–59.]
- Zhang J (1984) Characteristics of mammal fauna and eco-geography in Beijing area. *Acta Theriologica Sinica*, 4, 187–195. (in Chinese with English abstract) [张洁 (1984) 北京地区的兽类区系及生态地理特征. 兽类学报, 4, 187–195.]
- Zhang J (1984) On the structure of rodent community in Beijing area. *Acta Theriologica Sinica*, 4, 265–271. (in Chinese with English abstract) [张洁 (1984) 北京地区鼠类群落结构的研究. 兽类学报, 4, 265–271.]
- Zhang RZ (1978) On the zoogeographical characteristics of China: Mainly mammals. *Acta Geographica Sinica*, 33, 85–101. (in Chinese with English abstract) [张荣祖 (1978) 试论中国陆栖脊椎动物地理特征——以哺乳动物为主. 地理学报, 33, 85–101.]
- Zhang RZ (2011) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 李晟 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 太行山东北部哺乳动物名录

Appendix 1 List of mammals in northeastern Taihang Mountains
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020081-1.pdf>

卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥 (2021) 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 29(3), 331–339. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020081>

附录1 太行山东北部哺乳动物名录

Appendix 1 List of mammals in northeastern Taihang Mountains

物种 Species	保护等级 Protection Status	IUCN 红色名录 IUCN Red List	中国脊椎 动物红色 名录 Red List of China's Vertebrate	太行山 片区 Taihang area	燕山片区 Yanshan area	分布型 Distribution	动物 区系 Fauna	来源依据 Data source
(一) 啮齿目								
(1) 松鼠科								
岩松鼠 <i>Sciurotamias davidianus</i> *		LC	LC	√	√	E	古北界	野外调查, 红外相机
松鼠 <i>Sciurus vulgaris</i>		LC	NT	√	√	U	古北界	野外调查
北花松鼠 <i>Tamias sibiricus</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	野外调查
隐纹花松鼠 <i>Tamiops swinhoei</i>		LC	LC	√	√	W	广布种	野外调查
复齿鼯鼠 <i>Troglodytes xanthipes</i>		NT	VU	√	√	H	广布种	文献, 访问
小飞鼠 <i>Pteromys volans</i>		LC	VU	√	√	U	古北界	文献
沟牙鼯鼠 <i>Aeretes melanopterus</i>		NT	NT		√	H	广布种	文献, 访问
达乌尔黄鼠 <i>Spermophilus dauricus</i>		LC	LC	√	√	D	古北界	文献
(2) 仓鼠科								
大仓鼠 <i>Tscherskia triton</i>		LC	LC	√	√	X	古北界	野外调查
黑线仓鼠 <i>Cricetulus barabensis</i>		LC	LC	√	√	X	古北界	野外调查
长尾仓鼠 <i>Cricetulus longicaudatus</i>		LC	LC	√	√	D	古北界	野外调查
棕色田鼠 <i>Lasiopodomys mandarinus</i>		LC	LC	√	√	X	古北界	野外调查
棕背鼯 <i>Myodes rufocanus</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	文献
(3) 鼠科								
小家鼠 <i>Mus musculus</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	野外调查
褐家鼠 <i>Rattus norvegicus</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	野外调查
北社鼠 <i>Niviventer confucianus</i>		LC	LC	√	√	W	广布种	野外调查
黑线姬鼠 <i>Apodemus agrarius</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	野外调查
大林姬鼠 <i>Apodemus peninsulae</i>		LC	LC	√	√	X	古北界	野外调查
中华姬鼠 <i>Apodemus draco</i>		LC	LC	√	√	S	广布种	文献
子午沙鼠 <i>Meriones meridianus</i>		LC	LC	√	√	D	古北界	文献
(4) 鼯鼠科								
中华鼯鼠 <i>Eospalax fontanierii</i> *		LC	LC	√	√	B	古北界	文献, 访问
东北鼯鼠 <i>Myocpalax psilurus</i>		LC	LC	√	√	B	古北界	文献
草原鼯鼠 <i>Myocpalax aspalax</i>		LC	LC	√		D	古北界	文献
(5) 跳鼠科								
五趾跳鼠 <i>Allactaga sibirica</i>		LC	LC	√		D	古北界	野外调查
(二) 食肉目								
(6) 猫科								
豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i>	II	LC	VU	√	√	W	广布种	野外调查, 红外相机

卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥 (2021) 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 29(3), 331–339. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020081>

金钱豹 <i>Panthera pardus</i>	I	VU	EN	√	√	O	东洋界	野外调查	
猞猁 <i>Lynx lynx</i>	II	LC	EN	√		C	古北界	文献	
兔狲 <i>Otocolobus manul</i>	II	NT	EN	√		D	古北界	文献, 访问	
(7) 灵猫科									
果子狸 <i>Paguma larvata</i>		LC	NT	√	√	W	广布种	文献, 访问	
(8) 熊科									
黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	II	VU	VU	√	√	E	古北界	文献, 访问	
(9) 犬科									
赤狐 <i>Vulpes vulpes</i>	II	LC	NT	√	√	C	古北界	野外调查	
狼 <i>Canis lupus</i>	II	LC	NT	√	√	C	古北界	文献, 访问	
豺 <i>Cuon alpinus</i>	I	EN	EN		√	W	广布种	文献, 访问	
貉 <i>Nyctereutes procyonoides</i>	II	LC	NT	√	√	E	古北界	野外调查, 红外相机	
(10) 鼬科									
猪獾 <i>Arctonyx collaris</i>		VU	NT	√	√	W	广布种	野外调查, 红外相机	
亚洲狗獾 <i>Meles leucurus</i>		LC	NT	√	√	U	古北界	野外调查, 红外相机	
黄鼬 <i>Mustela sibirica</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	野外调查, 红外相机	
白鼬 <i>Mustela erminea</i>		LC	EN	√		C	古北界	文献, 访问	
艾鼬 <i>Mustela eversmanii</i>		LC	VU	√	√	U	古北界	文献, 访问	
黄喉貂 <i>Martes flavigula</i>	II	LC	NT	√	√	W	广布种	文献, 访问	
石貂 <i>Martes foina</i>		LC	EN	√		U	古北界	文献	
(三) 偶蹄目									
(11) 牛科									
中华斑羚 <i>Naemorhedus griseus</i>	II	VU	VU	√	√	E	古北界	野外调查, 红外相机	
(12) 鹿科									
狍 <i>Capreolus pygargus</i>		LC	NT	√	√	U	古北界	野外调查, 红外相机	
(13) 猪科									
野猪 <i>Sus scrofa</i>		LC	LC	√	√	U	古北界	野外调查, 红外相机	
(四) 劳亚食虫目									
(14) 猬科									
东北刺猬 <i>Erinaceus amurensis</i>		LC	LC	√	√	O	东洋界	野外调查	
达乌尔猬 <i>Mesechinus dauricus</i>		LC	LC	√	√	D	古北界	文献	
(15) 鼯鼠科									
格氏小麝鼯 <i>Crociodura gmelini</i>		LC	NT	√		O	东洋界	文献, 访问	

卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥 (2021) 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 29(3), 331–339. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020081>

川西缺齿鼯鼠 <i>Chodsigoa hypsibia</i> *	LC	LC	√		H	广布种	文献
喜马拉雅水麝鼠 <i>Chimarrogale himalayica</i>	LC	VU	√		S	广布种	文献
(16) 鼯鼠科							
麝鼠 <i>Scaptochirus moschatus</i> *	LC	NT	√	√	H	广布种	文献, 访问
(五) 灵长目							
(17) 猴科							
猕猴 <i>Macaca mulatta</i>	II	LC	LC	√	√	W	广布种 野外调查, 红外相机
(六) 兔形目							
(18) 兔科							
蒙古兔 <i>Lepus tolai</i>	LC	LC	√	√	O	东洋界	野外调查, 红外相机
(19) 鼠兔科							
达乌尔鼠兔 <i>Ochotona dauurica</i>	LC	LC	√	√	D	古北界	文献, 访问
(七) 翼手目							
(20) 菊头蝠科							
马铁菊头蝠 <i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	LC	LC	√	√	O	东洋界	野外调查
(21) 蝙蝠科							
尖耳鼠耳蝠 <i>Myotis blythii</i>	LC	NT	√		O	东洋界	文献, 访问
北京鼠耳蝠 <i>Myotis pequinus</i> *	LC	LC	√		E	古北界	文献
大卫鼠耳蝠 <i>Myotis davidii</i> *	LC	LC	√		E	古北界	文献
毛腿鼠耳蝠 <i>Myotis fimbriatus</i> *	LC	NT	√		S	广布种	文献
双色蝙蝠 <i>Vespertilio murinus</i>	LC	LC	√		U	古北界	文献, 访问
东方蝙蝠 <i>Vespertilio sinensis</i>	LC	LC	√	√	E	古北界	文献, 访问
大棕蝠 <i>Eptesicus serotinus</i>	LC	LC	√	√	U	古北界	文献, 访问
褐山蝠 <i>Nyctalus noctula</i>	LC	NT	√	√	U	古北界	文献, 访问
普通伏翼 <i>Pipistrellus pipistrellus</i>	LC	LC	√	√	E	古北界	文献
萨氏伏翼 <i>Hypsugo savii</i>	LC	NT	√		U	古北界	文献
大耳蝠 <i>Plecotus auritus</i>	LC	LC	√	√	U	古北界	文献
亚洲长翼蝠 <i>Miniopterus schreibersii</i>	NT	NT	√		O	东洋界	文献
白腹管鼻蝠 <i>Murina leucogaster</i>	LC	LC	√		E	古北界	文献
(22) 犬吻蝠科							
宽耳犬吻蝠 <i>Tadarida insignis</i>	LC	NT	√		O	东洋界	文献

1. 分类系统主要参考《中国哺乳动物多样性(第2版)》(蒋志刚等, 2017)。2. *表示特有种; 保护等级参考新版《国家重点保护野生动物名录》; 濒危等级: 濒危(Endangered, EN)、易危(Vulnerable, VU)、近危(Near Threatened, NT)、无危(Least Concern, LC)。3. √表示在某地区调查到。

4. 来源: 野外调查获得; 红外相机监测; 文献记载; 访问调查。5. 分布型: B: 华北型; C: 全北型; D: 中亚型; E: 季风区型; H: 喜马拉雅-横断山区型; O: 不易归类的广布种; S: 南中国型; U: 古北型; W: 东洋型; X: 东北-华北型。6. 动物区系: 古北界物种; 东洋界物种; 广布种。

1. Classification system reference *China's Mammal Diversity (2nd edition)* (Jiang et al, 2017). 2.* means endemic; For protection level, refer to the list of wildlife under state key protection (2021); The level of Endangered: EN, Endangered; VU, Vulnerable; NT, Near Threatened; LC, Least

- 卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥 (2021) 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 29(3), 331–339. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020081>
- Concern. 3. √ It was found in an area. 4. Source: Obtained through field investigation; Camera trap method; Documented; Interview survey. 5. Distribution type: B, North China type; C, Holarctic type; D, Central-Asia type; E, Monsoon type; H, Himalaya-Hengduan Mountain type; O, Inconvenience divide type and widely distributed species; S, Southern China type; U, Palaearctic type; W, Oriental type; X, Northeast-north China type. 6. Fauna: Species of Palaearctic realm; Species of Oriental realm; Wide spread species.
- Chen W, Gao W (1991) Report of investigation on mammalian of Songshan Natural Conservancy of Beijing. Journal of Beijing Teachers College (Nature Sciences Edition), 12, 64–69. (in Chinese with English abstract) [陈卫, 高武 (1991) 北京松山自然保护区兽类调查报告. 北京师范大学学报(自然科学版), 12, 64–69.]
- Chen W, Gao W, Fu BQ (2004) Mammals and their geographical distribution in Beijing. Greening and Life, (6), 42–43. (in Chinese) [陈卫, 高武, 傅必谦 (2004) 北京地区兽类及其地理分布. 绿化与生活, (6), 42–43.]
- Jia YK, Gao YR, Chen CA, Zhou E (1999) Survey of rodent species and their zoogeographical distributions in Beijing Area. Chinese Journal of Vector Biology and Control, 10(2), 87–90. (in Chinese with English abstract) [贾延库, 高永荣, 陈长安, 周锸 (1999) 北京地区啮齿动物种类和地理分布调查. 中国媒介生物学及控制杂志, 10(2), 87–90.]
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. Biodiversity Science, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鸮, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方虹霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammal diversity (2nd edition). Biodiversity Science, 25, 886–895. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性(第2版). 生物多样性, 25, 886–895.]
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu SY, Luo ZH, Li CW (2015) China's mammal diversity. Biodiversity Science, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015) 中国哺乳动物多样性. 生物多样性, 23, 351–364.]
- Li JL, Zhao HS, Du J, Wan SX (2013) Threats to wildlife diversity and conservation strategies in the Xiaowutai Mountain National Nature Reserve, Hebei. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, (1), 35–37. (in Chinese) [李吉利, 赵焕生, 杜娟, 万少欣 (2013) 河北小五台山国家级自然保护区野生动物多样性面临的威胁及保护对策. 河北林业科技, (1), 35–37.]
- Li DM, Wu YF, Sun LH, Zhang YW, Gao QH, Wu LN, Dong JX (2003) Analysis on avian-mammalian species diversity in Hebei Province. Geography and Geo-Information Science, 19(6), 80–82. (in Chinese with English abstract) [李东明, 吴跃峰, 孙立汉, 张彦威, 高庆华, 武丽娜, 董建新 (2003) 河北省区域鸟兽物种多样性分析. 地理与地理信息科学, 19(6), 80–82.]
- Pan QH, Wang YX, Yan K (2007) A Field Guide to the Mammals of China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [潘清华, 王应祥, 岩崑 (2007) 中国哺乳动物彩色图鉴. 中国林业出版社, 北京.]
- Qin XB, Zhao TJ, Zhu JB (2008) Investigation of mammal resources in Baxianshan Nature Reserve. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, (4), 39–42. (in Chinese) [覃雪波, 赵铁建, 朱金宝 (2008) 天津八仙山自然保护区兽类资源调查. 天津农林科技, (4), 39–42.]
- Smith AT, Xie Y, Hoffmann RS (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [Smith A, 解焱, Hoffmann RS (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Sun LH (1987) Eco-geographical division of small mammals in Hebei Province. Geography and Geo-Information Science, 3(2), 55–57, 54. (in Chinese) [孙立汉 (1987) 河北省小型兽类生态地理区划. 地理学与国土研究, 3(2), 55–57, 54.]
- Sun LH (2002) The research history of mammal and amphibious reptile and geographical division in Hebei Province. Geography and Territorial Research, 18(2), 64–68. (in Chinese with English abstract) [孙立汉 (2002) 河北哺乳及两栖爬行动物研究史与地理区划. 地理学与国土研究, 18(2), 64–68.]
- Wu ML, Wang XH, An CL, Zhao J, Fu YS, Mao FL, Shang XH, Wang ZP (2006) Investigation of mammal resources in Hebei Province. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, (2), 20–23. (in Chinese) [武明录, 王秀辉, 安春林, 赵静, 付芸生, 毛富玲, 尚辛亥, 王振鹏 (2006) 河北省兽类资源调查. 河北林业科技, (2), 20–23.]
- Yang SZ, An QX, Liu YR (2019) A survey and assessment of avian and mammalian resources in Xiaowutai International Hunting Ground, Hebei, China. Chinese Journal of Wildlife, 40, 332–344. (in Chinese with English abstract) [杨守庄, 安琪瑄, 刘琰冉 (2019) 河北小五台国际狩猎场鸟兽资源调查与评价. 野生动物学报, 40, 332–344.]
- Zhan YJ, Chen W, Gao W (2005) The status and conservation suggestions of Beijing Chiropteran. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 26, 57–59. (in Chinese with English abstract) [战永佳, 陈卫, 高武 (2005) 北京地区翼手类现状与保护. 首都师范大学学报(自然科学版), 26, 57–59.]

卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥 (2021) 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 29(3), 331–339. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020081>

Zhang J (1984) On the structure of rodent community in Beijing area. *Acta Theriologica Sinica*, 4, 265–271. (in Chinese with English abstract) [张洁 (1984) 北京地区鼠类群落结构的研究. 兽类学报, 4, 265–271.]

Zhang J (1984) Characteristics of mammal fauna and eco-geography in Beijing area. *Acta Theriologica Sinica*, 4, 187–195. (in Chinese with English abstract) [张洁 (1984) 北京地区的兽类区系及生态地理特征. 兽类学报, 4, 187–195.]

Zhang RZ (2011) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]



•研究报告•

如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护？

黄越^{1#}, 顾焱芸^{2#}, 阳文锐³, 闻丞^{2,4,5*}

1. 中国农业大学园艺学院, 北京 100094; 2. 北京镜朗生态科技有限公司, 北京 100091; 3. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045; 4. 昆明市朱雀鸟类研究所, 昆明 650233; 5. 北京大学生命科学学院, 北京 100871

摘要: 实现有效生物多样性保护的关键在于提升生物多样性丰富的人口密集区的保护效率。北京人口密集且生物多样性丰富, 存在3类具有生态保护功能的区划——自然保护区、生态保护红线和限制建设线。上述区域可视为生态保护潜力区。本文以在北京有分布的30种受胁鸟类为主要对象, 探讨现有生态保护潜力区对这些物种栖息地的覆盖程度, 并对如何改善上述受胁鸟类栖息地的保护状况进行了建议。根据物种对栖息地的选择, 基于高分辨率卫星解译的土地利用类型图, 利用最大熵模型(MaxEnt)掩膜栖息地分布图, 得到各受胁鸟类的预测空间分布。叠加这些分布获得北京受胁鸟类丰富度分布格局并进行验证。依据物种丰富度高低, 将受胁鸟类栖息地划分为一至四级(最重要的栖息地是一级栖息地, 以此类推)。同时, 依据地表覆盖类型和人类活动强度高低将北京市域划分为城市建成区、乡村生境区和自然生境区。分别计算3类保护潜力区对上述3类区域以及四级栖息地的覆盖面积比例。结果表明: (1) 95.64%的一级关键栖息地和86.32%的二级关键栖息地分布在乡村生境区, 但仅有0.69%和15.15%的乡村生境区分别被自然保护区和生态保护红线覆盖; (2)未受到自然保护区和生态保护红线覆盖的一、二级关键栖息地主要为水域和沼泽地等湿地、高覆盖度草地和部分耕地, 以及含有较高比例水体的大型城市绿地。基于以上结果, 我们建议至少在一定区域内试行如下保护措施: (1)严格保护湿地及其周边的高覆盖度草地, 确保面积不减少; (2)维持基本农田规模和粮食种植模式; (3)将乡村生境区位于河道附近的水域、沼泽地、高覆盖草地和灌木林纳入生态保护红线范围; (4)在公园绿地中划定生物多样性保护区; (5)优化平原地区林地结构。以上措施将使北京的受胁鸟类栖息地得到更好保护, 为中国东部人口密集区生物多样性保护提供示范。

关键词: 受胁鸟类栖息地; 生物多样性保护; 保护潜力区; 乡村生境区; 湿地; 城市绿地; 北京

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29, 340–350. doi: 10.17520/biods.2020171.

Huang Y, Gu YY, Yang WR, Wen C (2021) How to best preserve the irreplaceable habitats of threatened birds in Beijing? Biodiversity Science, 29, 340–350. doi: 10.17520/biods.2020171.

How to best preserve the irreplaceable habitats of threatened birds in Beijing?

Yue Huang^{1#}, Yiyun Gu^{2#}, Wenrui Yang³, Cheng Wen^{2,4,5*}

1 College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100094

2 Beijing Jinglang Ecological Technology Ltd., Beijing 100091

3 Beijing Municipal Institute of City Planning and Design, Beijing 100045

4 Kunming Rosefinch Bird Research Institute, Kunming 650233

5 School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871

ABSTRACT

Aims: Protecting biodiversity in highly populated metropolises is an important effort for global biodiversity conservation. Beijing is home not only to a large human population, but also large biodiversity clusters. Three levels of conservation management have been administratively delimited: the nature reserves, the ecological red line, and the construction control line. These groups, as a whole, represent the potential areas for conservation (PAC). We intend to

收稿日期: 2020-04-26; 接受日期: 2020-09-06

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0503301); 基于生物多样性的区域生态网络构建研究

共同第一作者 Co-first authors

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: 82335884@qq.com

explore the methods to conserve the endangered species of birds in Beijing.

Methods: Here, we explored the coverage of 30 recently recorded threatened bird species based on the existing PAC. Based on each selected species' habitat preferences, we calculated the species distribution models and combined it with the land use and land cover map to generate the potential distribution map. We then overlaid those maps to obtain the overall distribution pattern in Beijing for the selected bird species. This distribution pattern enabled us to calculate the species richness at any interested sites within our study area.

Results: Based on the species richness map, we ranked all habitats as four grades based on the number of endangered species present. We also classified urban, rural, and natural areas based on the intensity of urban land use and human activities. This allowed us to calculate the coverage of our ranked key habitats and different urbanization gradient by each of the three PAC groups. We had two major findings. First, 95.64% of grade I and 86.32% of grade II habitats are within the rural areas, whereas merely 0.69% of the rural areas are covered by nature reserves and 15.15% by the ecological protection red line. Second, the defined key habitats ranked as grade I and II but not yet under the umbrella of either the nature reserves or the ecological protection red line are mainly wetlands (waterbodies and marshlands), high coverage grasslands, farmlands, and some large-scale green patches in urban areas with large bodies of water. Based on these results, we offer the following suggestions to help with conservation: (1) preservation of wetlands and the high coverage grasslands surrounding the urban cores efficiently; (2) maintaining the scale of basic farmland and food crop planted; (3) including all bodies of water, marshlands, and high coverage grasslands alongside rivers in ecological protection red line area; (4) delimiting biodiversity conservation zones in large urban greenspaces such as major urban parks; and (5) optimizing the structure of woodland communities in rural and urban areas to satisfy the habitat needs of some specialist species.

Conclusion: Implementing those conservation practices will provide Beijing with more diverse avian communities. These efforts could be a good case for biodiversity conservation in other major cities of China to follow.

Key words: habitats of threatened birds; biodiversity conservation; potential areas for conservation; rural habitat; wetland; urban green spaces; metropolitan Beijing

2010年,《生物多样性公约》第十次缔约方大会通过了生物多样性“爱知目标”。“爱知目标”的主要内容之一是至2020年,生物多样性保护区应覆盖全球17%的陆地面积(CBD, 2011)。尽管中国保护地面积截至2017年已达到国土面积的约18% (唐小平和栾晓峰, 2017),但放眼中国东部地区,农田、城镇广布,保护地覆盖不足,而该区域恰恰又是包括鸟类在内的最受关注濒危物种的重要分布区域(闻丞等, 2015; Hu et al, 2017)。类似情况也见于全球其他生物多样性较丰富的国家(Mittermeier et al, 1999)。

北京是中国的首都,城市化率高达86.5% (北京市统计局和国家统计局北京调查总队, 2019),是全世界人口最稠密、经济最发达的地区之一。同时,北京所处的华北地区也是全球自然环境受损最严重的区域之一,超过80%土地上的自然生态系统已经被人为改变(Dinerstein et al, 2017)。对北京生物多样性保护策略的分析结果对中国其他人口密集区具有示范意义。

自然保护区是针对有代表性的保护对象所在的区域依法划出一定面积予以特殊保护和管理的

区域,是对包括生物多样性在内自然资源的重要保护形式。自20世纪80年代以来,北京建立了17个自然保护区。2006年,北京市批准《北京市限建区规划(2006年–2020年)》作为北京城市总体规划(2004年–2020年)的专项规划之一,从限制建设的角度将北京市域74.4%的土地划入限制建设线(禁建或限建)(龙瀛等, 2006; 何永, 2008; 丁志刚, 2009)。生态保护红线是生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域(郑华和欧阳志云, 2014)。2018年,北京市人民政府发布北京市生态保护红线(http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefa/gui/201905/t20190522_61382.html),面积占市域国土面积的26.1%。上述自然保护区、限制建设线和生态保护红线均以生态保护为目的,对存在于其间的生物多样性起到保护作用,故可被称为“生态保护潜力区”(下文简称“保护潜力区”)。

鸟类是具有高度移动性的环境指示物种,能够迅速地反映环境现状及其变化(Herrando et al, 2012)。北京现有的“保护潜力区”对受胁鸟类栖息地的保护效果如何?为解答上述问题,本研究尝试:

(1)以在北京有分布的受胁鸟类作为指标物种, 界定北京市域的受胁鸟类栖息地并对其进行分级; (2)分别分析3类保护潜力区对北京市域各级受胁鸟类栖息地的覆盖情况; (3)依据所处区域的栖息地重要性级别、类型及其被保护潜力区覆盖的情况, 分别探讨各类受胁鸟类栖息地的适宜保护和管理措施。

1 研究方法

1.1 研究区域及分区

本文以北京市域为研究范围(图1), 总面积16,405 km²。北京位于华北平原西北端, 西侧和北侧分别是太行山和燕山, 整体地势西北高, 东南低。自然植被以暖温带落叶阔叶林和针阔混交林为主。

目前, 北京城市建成区完全位于华北平原和延庆平原, 地表覆盖以不透水表面为主。农田、河流、村庄、水库、大型绿地斑块等用地类型集中在北京主城区周边海拔300 m以下的浅山区以及延庆平原周边海拔600 m以下的浅山区(人工用地总计占49.44%), 本文将此类区域视为乡村生境区。北京市平原地区周边海拔300 m以上山区及延庆平原周边海拔600 m以上山区地表主要被次生林和灌丛覆盖, 人为干扰较少(人工用地仅占1.54%), 本文将此类区域视为自然生境区(图1)。

1.2 数据来源

1.2.1 卫星影像图和数字高程模型

获取来自谷歌地球(Google Earth)的高分卫星影像, 空间分辨率为0.5 m, 覆盖北京市城市建成区和乡村生境区范围, 时相以2017年夏季为主。自然生境区卫星影像图下载自中科图新——图新地球4互联网免费三维数字地球, 分辨率为5 m; 同时获取该区域精度为30 m的数字高程模型。

1.2.2 北京市域受胁鸟类及其栖息地类型

基于IUCN的最新评估报告, 北京市域范围内分布有30种受胁鸟类(IUCN, 2020; Lepage, 2021), 名录如附录1。其中, 褐头鹀(*Turdus feae*)繁殖季节主要分布在自然生境区, 迁徙季节在城市绿地有零星记录; 褐马鸡(*Crossoptilon mantchuricum*)全年生活在自然生境区; 其余受胁鸟类均为迁徙过境或候鸟, 偏好平原区和浅山区的乡村生境, 或大面积城市绿地。依据《中国动物志·鸟纲》(中国科学院

中国动物志编辑委员会, 1978–2010)和《中国鸟类野外手册》(MacKinnon et al, 2000)等文献, 参考北京市域各区的土地利用特征和“中国土地资源分类系统”(http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=99), 归纳出北京市共分布有5个一类、18个二类鸟类栖息地(附录1)。

1.2.3 鸟类分布数据

从中国观鸟记录中心数据库获取在北京市域分布的30种受胁鸟类的点位数据(http://www.birdreport.cn/index.html), 并在Google地图中对其坐标进行人工校正。数据时限主要为2002–2013年, 并补充了2014–2015年部分鸟种数据。中国观鸟记录中心数据库鸟类分布点位经专家人工审核, 基于该数据库数据已发表多篇文章(Hu et al, 2017; Li et al, 2020)。协议获取eBird数据库26种受胁鸟类点位空间坐标作为模型验证数据, 时限为2013–2020年(eBird Basic Dataset, 2020), 未收录黑脸琵鹭(*Platalea minor*)、玉带海雕(*Haliaeetus leucoryphus*)、黄嘴白鹭(*Egretta eulophotes*)和白喉林鹀(*Cyornis brunneatus*)记录点。此外还参考了在北京猛禽监测点(Wen & Han, 2013)和城市绿地(Huang et al, 2015)开展的鸟类调研监测工作。

1.2.4 保护潜力区范围

从北京市城市规划设计研究院协议获取北京市自然保护区、北京市生态保护红线和北京市限制建设线3类保护潜力区数据。

1.3 数据分析

1.3.1 受胁鸟类栖息地空间分布

在地理信息系统(ArcGIS)中, 使用镶嵌工具拼接建成区和乡村生境区以及自然生境区卫星影像。

在城市建成区和乡村生境区采用土地利用及斑块面积等为主要因子提取除褐头鹀和褐马鸡以外的受胁鸟类栖息地。按照上文1.2.2节所述鸟类栖息地分类体系, 在卫星影像图上对北京城市建成区和乡村生境区的鸟类栖息地进行目视解译, 获得各区域鸟类栖息地分布图。

在自然生境区采用海拔、坡向、植被类型等作为主要因子提取褐头鹀和褐马鸡的栖息地。褐头鹀主要分布在海拔1,000 m以上的成熟林地(MacKinnon et al, 2000), 尤其是海拔1,730–1,930 m

的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林。褐马鸡在北京分布于海拔950–2,200 m, 坡向从东南135°至西北335° (张国钢等, 2004; 宋凯等, 2016)的针叶林、针阔混交林、灌丛林和草地的组合生境(张国钢

等, 2003, 2005, 2010)。依据以上栖息地选择特征, 提取褐头鹇和褐马鸡栖息地。

融合城市建成区、乡村生境区和自然生境区栖息地, 获得北京市域受胁鸟类栖息地空间分布图(图2)。

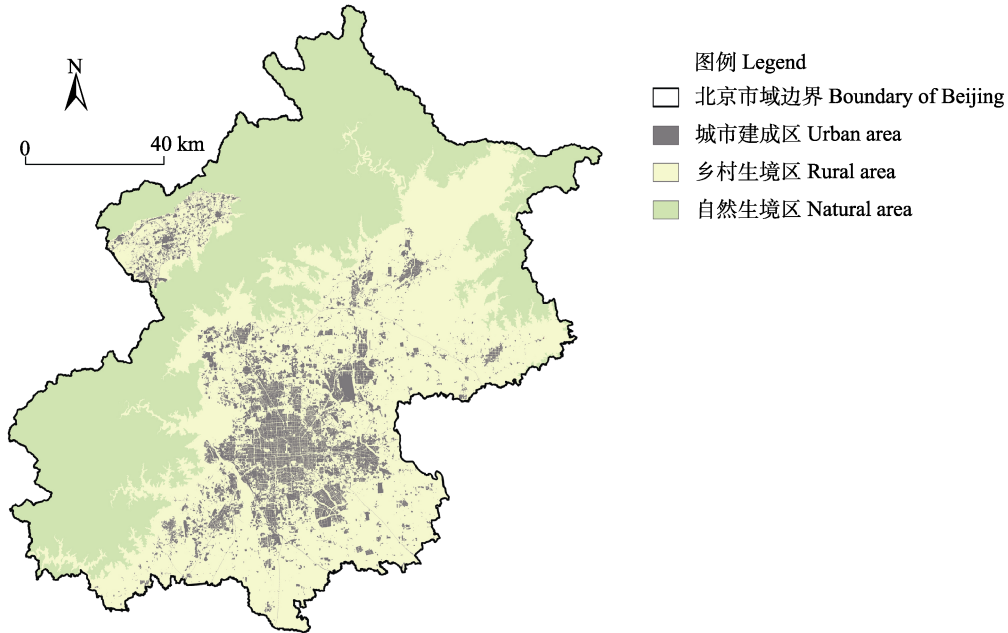


图1 北京市域城市建成区、乡村生境区和自然生境区范围
Fig. 1 The range of urban area, rural area and natural area in Beijing

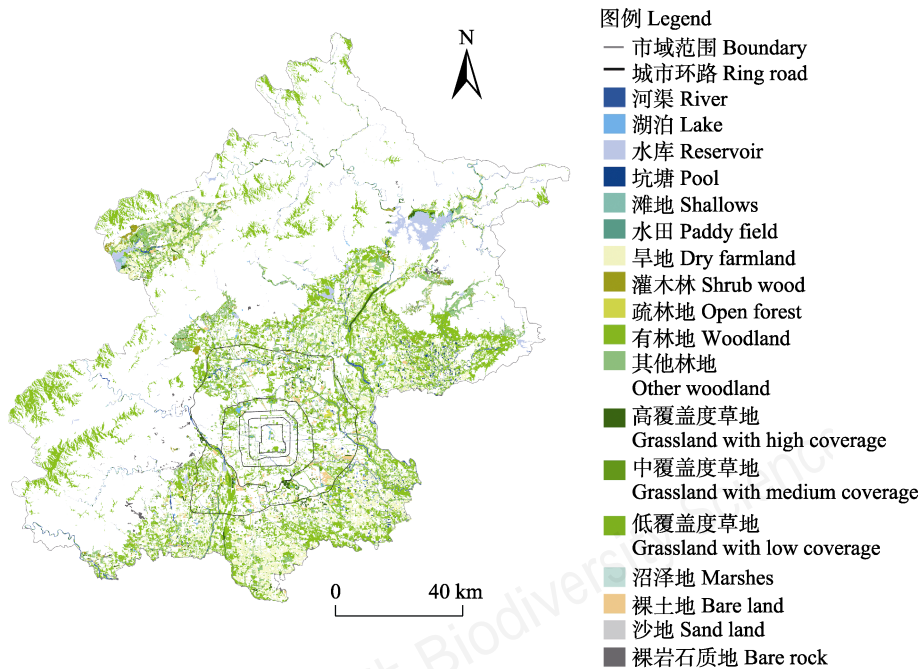


图2 北京市域受胁鸟类栖息地空间分布(其位于城市建成区、乡村生境区和自然生境区的比例分别是4.49%、81.14%和14.37%)
Fig. 2 The distribution map of the habitats of threatened birds in Beijing. The coverage ratio of the habitats of threatened birds to urban, rural and natural areas was 4.49%, 81.14%, and 14.37%, respectively.

1.3.2 受胁鸟类丰富度分布格局、栖息地分级及验证

使用30种受胁鸟类的实际空间分布点位,采用最大熵模型(MaxEnt)得到各鸟种全国尺度空间分布,并生成二值化栅格图层,精度为1 km (闻丞等, 2015; Hu et al, 2017)。根据1.3.1节获得的鸟类栖息地分布以及每种受胁鸟类的栖息地选择进行掩膜处理,掩膜精度为30 m,获得每种受胁鸟类预测分布图层。将30种受胁鸟类预测分布图层在ArcGIS软件中直接叠加,得到北京市域受胁鸟类丰富度分布格局。

根据受胁鸟类丰富度分布格局栅格数值,将得分>10的栅格划分为一级关键栖息地;得分5–10的划分为二级关键栖息地;得分3–5的划分为三级栖息地;得分1–3的为四级栖息地。

将从eBird获取的26种受胁鸟类点位数据在Google地图中进行人工校正,然后将校正后的数据在ArcGIS中直接落位到受胁鸟类栖息地分布格局上,并统计分布在各级栖息地中的点位比例,验证分布格局的有效性。

1.3.3 重要栖息地在三类区域的分布及其受保护比例

使用城市建成区、乡村生境区和自然生境区的空间数据提取计算各级重要栖息地分布在其中的面积比例。分别使用自然保护区、生态保护红线和限制建设线的空间数据提取计算3种保护潜力区覆盖城市建成区、乡村生境区和自然生境区的面积比例以及覆盖各级栖息地的面积比例。

2 结果

2.1 受胁鸟类栖息地空间分布

北京市域受胁鸟类栖息地如图2所示。受胁鸟类栖息地共计5,041.30 km²,占北京市域总面积的30.7%,其中70%以上分布在乡村生境区。

一类栖息地中,林地类栖息地面积最大,占受胁鸟类栖息地总面积的59.05%;耕地面积次之,占26.91%;水域面积占8.02%;草地和未利用地分别占3.27%和2.74%。二类栖息地中,有林地占地面积最大(49.59%);旱地次之,占26.90%;其他林地第三,占7.33%。一类和二栖地中的受胁鸟类栖息地面积及其占受胁鸟类栖息地总面积的比例详见附录2。

2.2 受胁鸟类丰富度分布格局、评级及验证

受胁鸟类丰富度分布格局验证结果如附录3。结果显示,83.48%的验证鸟类点位落在受胁鸟类栖息地分布区域中,其中一级关键鸟类栖息地覆盖41.74%的点位,二级关键栖息地覆盖6.09%的点位,三级栖息地覆盖5.80%的点位,四级栖息地覆盖29.57%的点位。

北京市域受胁鸟类丰富度分布格局如图3所示。乡村生境区的大型水库及其周边滩地,城市建成区的大型绿地、公园,及位于平谷区和通州区的坑塘水体是受胁鸟类丰富度最高的区域;其次为高覆盖度草地和旱地;有林地和自然生境区的受胁鸟类丰富度则较低。

一级关键栖息地主要包括了水域中的湖泊、水库、坑塘以及沼泽地;二级关键栖息地包括水域中的河渠、滩地和高覆盖度草地;三级栖息地则主要包括各类耕地、灌木林地、中覆盖度/低覆盖度草地;四级栖息地则包括林地、疏林地以及裸岩、裸土、沙地等。

各级栖息地占北京全市面积的比例及其在城市建成区、乡村生境区和自然生境区的分布比例如表1所示。结果显示,80%以上的一级、二级关键栖息地和三级栖息地,以及70%以上的四级栖息地位于乡村生境区;10.61%的二级关键栖息地位于城市建成区;一级和二级关键栖息地在自然生境区中分布很少,四级栖息地则有超过20%位于自然生境区。

表1 受胁鸟类各级栖息地在城市建成区、乡村生境区和自然生境区的分布比例及其占市域面积的比例

Table 1 The coverage ratio of the habitats of threatened bird to urban, rural and natural areas and the whole area of Beijing

分区 Types of landscape	一级关键栖 息地 The 1st level key habitats	二级关键栖 息地 The 2nd level key habitats	三级栖 息地 The 3rd level habitats	四级栖 息地 The 4th level habitats
城市建成区 Urban area	1.87%	10.61%	2.98%	4.88%
乡村生境区 Rural area	95.64%	86.32%	95.64%	74.72%
自然生境区 Natural area	2.49%	3.06%	1.37%	20.40%
北京市域 The whole area of Beijing	1.52%	1.10%	7.08%	20.33%

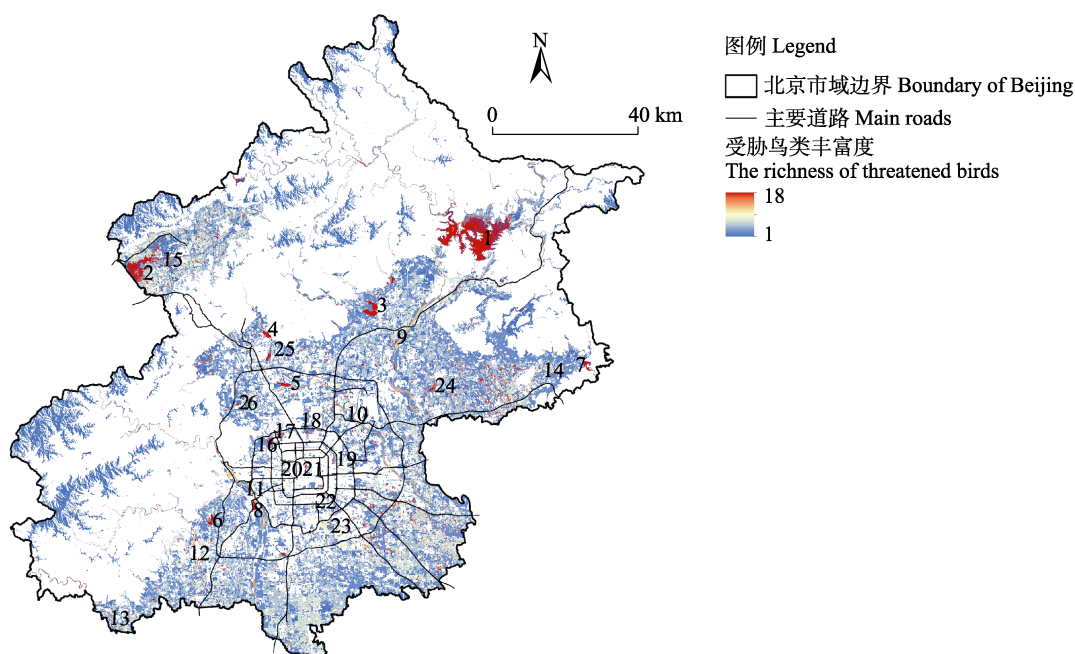


图3 北京市域受胁鸟类丰富度的空间分布格局。一级关键栖息地分别是: 1: 密云水库; 2: 官厅水库; 3: 怀柔水库; 4: 十三陵水库; 5: 沙河水库; 6: 崇青水库; 7: 海子水库; 8: 大宁水库及其周边的滩地; 9: 潮白河; 10: 温榆河; 11: 永定河; 12: 大石河; 13: 拒马河; 14: 沟河; 15: 妫水河等河渠; 16: 颐和园; 17: 圆明园; 18: 奥林匹克森林公园; 19: 朝阳公园; 20: 玉渊潭公园; 21: 中南海、北海和后海; 22: 龙潭西湖公园; 23: 麋鹿苑; 24: 汉石桥湿地市级自然保护区; 25: 白浮泉公园; 26: 翠湖国家城市湿地公园等城市绿地水体。

Fig. 3 A map of richness pattern of 30 threatened bird species and the habitat classification. The 1st level key habitats are as follows. 1, Miyun Reservoir; 2, Guanting Reservoir; 3, Huairou Reservoir; 4, Shisanling Reservoir; 5, Shahe Reservoir; 6, Chongqing Reservoir; 7, Haizi Reservoir; 8, Daning Reservoir; 9, Chaobai River; 10, Wenyu River; 11, Yongding River; 12, Dashi River; 13, Juma River; 14, Juhe River; 15, Guishui River; 16, The Summer Palace; 17, The Yuanmingyuan Park; 18, Olympic Forest Park; 19, Chaoyang Park; 20, Yuyuantan Park; 21, Zhongnanhai, Beihai and Houhai; 22, Longtan West Lake Park; 23, Miluyuan Park; 24, Hanshiqiao Municipal Wetland Nature Reserve; 25, Baifuquan Park; 26, Cuihu National Urban Wetland Park.

2.3 保护潜力区对北京市域的覆盖比例

自然保护区、生态保护红线和限制建设线的覆盖面积分别占北京市域面积的4.51%、26.83%和74.40%。三类保护潜力区对城市建成区、乡村生境区和自然生境区的覆盖比例如表2所示。北京市域的自然保护区覆盖率(4.51%)远低于全国平均水平(15.33%) (<http://www.mee.gov.cn/ywgz/zrst/bh/zrbhdjg/201905/P020190514616282907461.pdf>); 城市建成区受保护潜力区覆盖面积比例为5.75%; 生态保护红线覆盖了北京超过15%的乡村生境区和近50%的自然生境区; 限制建设线覆盖了63.20%的乡村生境区和几乎所有自然生境区。

2.4 重要栖息地保护空缺

三类保护潜力区对4个级别栖息地的覆盖比例如表3所示。结果显示, 自然保护区在北京市域内对一级关键栖息地的覆盖比例近10%, 对二级关键栖

息地和三级栖息地的覆盖比例则极低(分别为1.66%和0.39%)。生态保护红线覆盖了北京市域超过50%的一级关键栖息地和近1/3的二级关键栖息地, 但

表2 三类保护潜力区占北京市域比例及对城市建成区、乡村和自然生境区覆盖比例

Table 2 The coverage ratio of three categories of potential areas for conservation (PAC) to the whole area of Beijing, urban, rural and natural areas

保护潜力区 PAC	北京市域 Whole area of Beijing	城市建成区 Urban area	乡村生境区 Rural area	自然生境区 Natural area
自然保护区 Natural reserve	4.51%	0.17%	0.69%	9.46%
生态保护红线 Ecological protection red line	26.83%	0.65%	15.15%	44.77%
限制建设线 Construction control line	74.40%	4.93%	63.20%	99.50%

表3 三类保护潜力区对各级栖息地的保护比例**Table 3 The coverage ratio of three categories of potential areas for conservation (PAC) to the four levels of habitats**

保护潜力区 PAC	一级关键栖 息地 1st level key habitats	二级关键栖 息地 2nd level key habitats	三级栖息地 3rd level habitats	四级栖息地 4th level habitats
自然保护区 Natural reserve	9.01%	1.66%	0.39%	5.73%
生态保护红线 Ecological protection red line	59.82%	31.40%	3.83%	19.48%
限制建设线 Construction control line	75.67%	56.56%	68.87%	69.73%

覆盖的三级栖息地比例较低(3.83%)。限制建设线覆盖了3/4以上的一级关键栖息地、50%以上的二级关键栖息地以及大部分三、四级栖息地。

限制建设线已经覆盖了50%以上的受胁鸟类栖息地，然而，31.17%的一级关键栖息地，66.94%的二级关键栖息地，95.77%的三级栖息地和74.79%的四级栖息地未被自然保护区和生态保护红线覆盖。上述空缺地块位置分布如图4所示，其所属一类、二类栖息地类型及相应面积如表4所示。结果显示，未被

自然保护区和生态保护红线覆盖的受胁鸟类一级关键栖息地主要是湖泊、水库、坑塘、滩地和沼泽地等湿地和高覆盖度草地，二级关键栖息地主要是河渠、坑塘等湿地和高覆盖度草地、有林地和旱地，而三级栖息地主要是旱地、有林地和灌木林，四级栖息地主要是有林地、其他林地和旱地。

3 讨论

3.1 城市建成区受胁鸟类栖息地保护

分析结果显示有近2%的受胁鸟类一级关键栖息地和约11%的二级关键栖息地位于城市建成区。这些栖息地类型主要为具有悠久历史的皇家园林或者近几十年兴建的大型城市公园绿地及水域。国外研究显示，面积10–35 ha的公园即可维系其所在城市的大部分常见鸟类(Fernandez-Juricic & Jokimäki, 2001)；城市建成区也可为濒危物种提供栖息地(Jokimäki et al, 2018)。国内研究显示，北京城市建成区内的大型城市绿地可以为超过150种鸟类提供季节性或永久性栖息地(陈志强等, 2010; 闻丞等, 2014; 刘洋等, 2015; 滑荣等, 2019)。

北京城市建成区内的中南海、北海、后海、颐

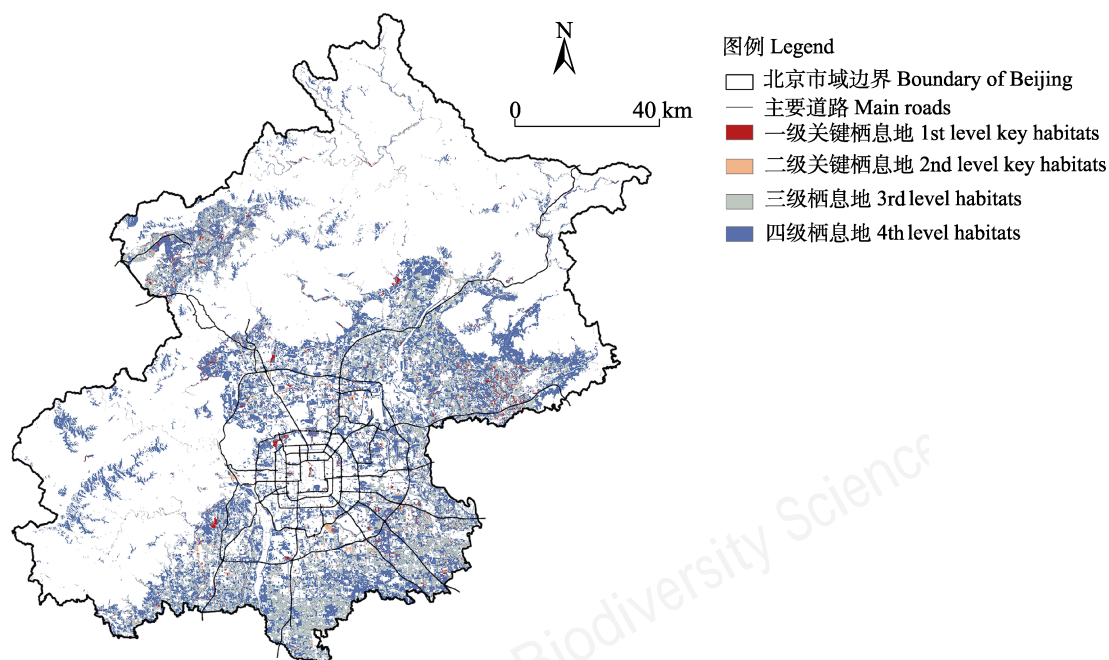
**图4 未被自然保护区和生态保护红线覆盖的受胁鸟类栖息地空间分布****Fig. 4 The distribution map of the habitats of threatened birds uncovered by nature reserves and the ecological protection red line**

表4 未被自然保护区和生态保护红线覆盖的受胁鸟类一级关键、二级关键、三级和四级栖息地类型及其面积(km²)Table 4 The types and area (km²) of the habitats of threatened birds uncovered by the nature reserves and the ecological protection red line

一类栖息地 Habitat I	二类栖息地 Habitat II	一级关键栖息地 1st level key habitats	二级关键栖息地 2nd level key habitats	三级栖息地 3rd level habitats	四级栖息地 4th level habitats
水域 Waters	河渠 River	0.600	33.434	8.409	17.644
	湖泊 Lake	16.765	1.884	0.162	0.783
	水库 Reservoir	7.720	0.345	0.054	3.853
	坑塘 Pool	39.389	9.231	1.167	3.940
	滩地 Shallows	3.205	1.152	0.184	0.597
耕地 Farmlands	水田 Paddy field	0.002	0.022	0.483	0.050
	旱地 Dry farmland	1.489	6.941	984.528	174.111
林地 Woodlands	灌木林 Shrub land	0.138	0.192	21.947	37.895
	疏林地 Open forest	0.092	0.236	0.274	33.018
	有林地 Woodland	2.716	8.152	32.228	1,479.720
	其他林地 Other woodland	0.564	0.612	4.678	319.142
草地 Grasslands	高覆盖度草地 Grassland with high coverage	19.786	39.669	1.054	15.808
	中覆盖度草地 Grassland with medium coverage	0.125	5.969	11.621	8.328
	低覆盖度草地 Grassland with low coverage	0.035	1.648	7.772	7.060
未利用地 Unutilized lands	沼泽地 Marsh	3.439	0.527	0.083	0.579
	裸土地 Bare land	0.149	0.398	0.653	86.917
	沙地 Sand land	0.010	0.013	0.037	0.866
	裸岩石质地 Bare rock	0.008	0	0.002	2.239
合计 Total		96.230	110.427	1,075.334	2,192.550

和园、圆明园、奥林匹克森林公园、朝阳公园、玉渊潭等大型绿地为大量鸟类提供了适宜栖息地, 包括青头潜鸭(*Aythya baeri*)、褐头鹑、黄胸鹑(*Emberiza aureola*)等受胁鸟种。上述绿地面积均在35 ha以上, 均有成为大多数鸟类、小型哺乳动物、两栖和爬行动物等类群稳定栖息地的潜质。但由于人类游憩空间和活动对栖息地的分割和干扰, 以及管理措施等方面的原因, 目前建成区内大部分栖息地的质量较差, 鸟类多样性较低(黄越, 2015)。

由于城市建成区具有以人为导向的社会、经济属性, 北京市的3类保护潜力区都极少涉及城市建成区(小于5%), 相应的保护政策目前也难以直接惠及该区域的生物多样性。自然保护区和生态保护红线尚未覆盖位于城市建成区内及其外围的公园, 尤其是具有悠久历史的皇家园林和近年建设拥有大面积水体的大型城市绿地。2019年, 北京市发布了《鸟类多样性及栖息地质量评价技术规程》地方标准, 明确要求在城市绿地和乡村生境区域针对受胁

鸟类、国家和北京市重点保护鸟类的特定栖息地要求, 开展栖息地质量评价、恢复设计和管理。在此基础上, 建议进一步细化对建成区大型绿地的分区管理规范, 划定生物多样性保育区, 保证现有和未来新建的大型城市绿地中能够保有10 ha或以上面积的完整栖息地, 包含一定面积的水体、沼泽、滩地和高覆盖草地; 降低人为活动干扰; 结合绿地养护和提升工程, 营造适宜各类生物栖息的生境, 特别是水域栖息地。

3.2 乡村生境区受胁鸟类栖息地保护

北京受胁鸟类栖息地有81.14%位于乡村生境区(图2); 其一级关键、二级关键和三级栖息地在乡村生境区中的比例均超过或接近90% (表1), 邻近河流的耕地、灌木林、水域和沼泽地是关键的一级和二级栖息地。然而, 由于中国仍然处在城市化进程中, 农业人口向城市转移, 大城市周边的乡村地区逐渐向城市转变(http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-03/12/content_5490385.htm)。乡村生境区

是连接城市建成区和自然生境区的过渡地带,在城市扩张的过程中,原本属于乡村的栖息地将变成建成区的栖息地,导致乡村生境区的城市化(Seto et al, 2012)。由此可见,对于北京市域受胁鸟类保护成效,乡村区域是有决定性作用的重点区域。

自然保护区对乡村生境区覆盖比例为0.69%,主要贡献来自野鸭湖、汉石桥两个湿地类型的自然保护区。生态保护红线划定区域对乡村生境区的覆盖比例为15.15%,主要贡献来自于潮白河、温榆河、永定河等河流及两岸防护绿地。限制建设线划定区域对乡村生境区的覆盖比例为63.20%,主要贡献包括基本农田、防护林等。乡村生境区受具有严格生态保护措施的自然保护区和生态保护红线覆盖不足。《北京城市总体规划(2016–2035年)》中的9条绿色楔形廊道大部分位于乡村生境区,因此加强乡村生境区生物多样性的研究和保护,制定适宜的生物多样性管理措施,有助于实现总体规划中对城乡一体化发展的要求,避免乡村生境区的重要栖息地在此过程中被忽视。

鉴于一、二级关键栖息地主要是水域及周边的滩地、高覆盖度草地,在2013年开始实施的《北京市湿地保护条例》基础上,应进一步严格保证水域、沼泽地、高覆盖草地等关键栖息地总面积不减少,且其质量在未来能够得到提升,这将为受胁鸟类、两栖类、濒危水生昆虫、鱼类等生物类群提供庇护所。对于接近河道生态保护红线的灌木林、高覆盖草地、水域和沼泽地,建议未来将其纳入生态保护红线范围内。

农田是一些大型受胁鸟类的重要栖息地(Li et al, 2020)。据鸟类分布数据,鹤(*Grus sp.*)、大鸨(*Otis tarda*)、雁(*Anser sp.*)等受胁鸟类在冬季和迁徙季,多利用位于水库附近的农田觅食。大片此类区域在过去3年的时间内,由于库滨带严禁种植业发展和水土保持林地的建设趋于消失。北京目前保有约1,000 km²基本农田(http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/cqgh/201907/t20190701_100008.html),占北京市域面积的6.10%。无论是出于粮食安全,还是受胁鸟类保护的考虑,特别建议维持位于大型水面附近基本农田的粮食种植功能。

对于目前属于三、四级栖息地的各类林地,应

结合未来“平原造林”和建成区外围新建的大型绿地空间,依据相关地方标准,增加适宜受胁鸟类栖息的灌木林、高覆盖度草地,而不是单纯种植乔木。尤其对于平原地区树种单一的大面积人工林,应结合更新抚育工作,增加食源和蜜源树种,以及灌木和草地栖息地。

3.3 自然生境区的栖息地保护

分析结果显示,生态保护红线划定和限制建设线划定区域分别占自然生境区的近44.77%和99.50%。总体而言,自然生境区受到了较好保护。尽管仅有不足5%的一、二级受胁鸟类关键栖息地分布于北京市域自然生境区,但这一广大区域为其他物种如大、中型哺乳动物预留了充足的栖息空间。

4 总结

使用指标物种丰富度分布模型指示保护区域具有争议(Lawton & Gaston, 2001; Moradi et al, 2019)。但不可否认的是,濒危物种分布空间与人类高密度聚居区具有空间一致性,濒危物种保护议题显得尤为复杂(Luck, 2007)。以往在人口高密度聚居的城市区域,开展物种栖息地保护的常用形式为“生态网络”,如欧盟的自然2000 (Natura 2000) (Pellissier et al, 2020)。本文基于全国鸟类分布模型,采用“物种–栖息地”方法在高密度人口聚居区识别濒危物种的栖息地(Lei et al, 2006)并掩膜鸟类分布模型,再采用不同来源鸟类点位数据对预测空间分布进行验证,从可行性上为在人口高密度地区识别濒危物种保护区域提供了另一种技术路线。

高密度人口聚居区的土地利用颇为精细化,因此,在人口高密度地区的濒危物种保护措施需要融入土地利用和管理行为中。首先,需要将濒危物种拟定保护区域纳入城市总体规划中,与现有具有保护性质的分区规划进行整合,甚至影响分区规划;其次,特别针对城市建成区和乡村生境区,受胁鸟类栖息地的保护需要融入现有各类土地的具体管理措施中,以保证城市土地在为人类生活提供空间和资源的同时也为野生动物提供必要的栖息环境。

参考文献

Beijing Municipal Bureau Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing (2019) Beijing

- Statistical Yearbook 2019. China Statistics Press, Beijing. (in Chinese) [北京市统计局, 国家统计局北京调查总队 (2019) 北京统计年鉴2019. 中国统计出版社, 北京.]
- Chen ZQ, Fu JP, Zhao XR, Ding CQ (2010) The construction of birds in Yuanmingyuan Relic Park, Beijing. *Chinese Journal of Zoology*, 45(4), 21–30. (in Chinese with English abstract) [陈志强, 付建平, 赵欣如, 丁长青 (2010) 北京圆明园遗址公园鸟类组成. *动物学杂志*, 45(4), 21–30.]
- CBD (Convention on Biological Diversity) (2011) Conference of the Parties Decision X/2: Strategic Plan for Biodiversity 2011–2020. <http://www.cbd.int/decision/cop/?id=12268>. (accessed on 2020-03-20)
- Dinerstein E, Olson D, Joshi A, Vynne C, Burgess ND, Wikramanayake E, Hahn N, Palminteri S, Hedao P, Noss R, Hansen M, Locke H, Ellis EC, Jones B, Barber CV, Hayes R, Kormos C, Martin V, Crist E, Sechrest W, Price L, Baillie JEM, Weeden D, Suckling K, Davis C, Sizer N, Moore R, Thau D, Birch T, Potapov P, Turubanova S, Tyukavina A, de Souza N, Pinteá L, Brito JC, Llewellyn OA, Miller AG, Patzelt A, Ghazanfar SA, Timberlake J, Klöser H, Shennan-Farpon Y, Kindt R, Lillesø JPB, van Breugel P, Graudal L, Vogé M, Al-Shammari KF, Saleem M (2017) An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience*, 67, 534–545.
- Ding ZG (2009) Construction Restriction Planning of Beijing (2006–2020). *Jiangsu Urban Planning*, (9), 38–43. (in Chinese) [丁志刚 (2009) 北京市限建区规划 (2006年–2020年). *江苏城市规划*, (9), 38–43.]
- eBird Basic Dataset (2020) Version: EBD_relMay-2020. Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, New York.
- Editorial Committee of Zoology of China, Chinese Academy of Sciences (1978–2010) Fauna of China (Avifauna) Volume 1–14. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国动物志编辑委员会 (1978–2010) 中国动物志(鸟纲), 1–14卷. 科学出版社, 北京.]
- Fernández-Juricic E, Jokimäki J (2001) A habitat island approach to conserving birds in urban landscapes: Case studies from southern and northern Europe. *Biodiversity & Conservation*, 10, 2023–2043.
- He Y (2008) Space restriction of urban-rural construction and development—Construction restriction planning of Beijing. *China Construction*, (9), 15–17. (in Chinese) [何永 (2008) 城乡建设发展的空间限制——北京市限建区规划. *中华建设*, (9), 15–17.]
- Herrando S, Weiserbs A, Quesada J, Ferrer X, Paquet JY (2012) Development of urban bird indicators using data from monitoring schemes in two large European cities. *Animal Biodiversity and Conservation*, 35, 141–150.
- Hu RC, Wen C, Gu YY, Wang H, Gu L, Shi XY, Zhong J, Wei M, He FQ, Lü Z (2017) A bird's view of new conservation hotspots in China. *Biological Conservation*, 211, 47–55.
- Hua R, Cui DY, Li SH, Liu J, Yan S, Yang J, Zhang CL, Li XG (2019) Investigations on bird diversity of the Summer Palace in Beijing, China. *Chinese Journal of Wildlife*, 40, 945–956. (in Chinese with English abstract) [滑荣, 崔多英, 李淑红, 刘佳, 颜素, 杨静, 张成林, 李晓光 (2019) 北京颐和园鸟类多样性调查. *野生动物学报*, 40, 945–956.]
- Huang Y (2015) The methodology of bird habitats' making and planning at Beijing urban green spaces. Tsinghua University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [黄越 (2015) 北京城市绿地鸟类生境规划与营造方法研究. 清华大学, 北京.]
- Huang Y, Zhao YZ, Li SH, von Gadow K (2015) The effects of habitat area, vegetation structure and insect richness on breeding bird populations in Beijing urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 1027–1039.
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (2020) The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-1. <https://www.iucnredlist.org>. (accessed on 2020-07-11)
- Jokimäki J, Suhonen J, Kaisanlahti-Jokimäki ML (2018) Urban core areas are important for species conservation: A European-level analysis of breeding bird species. *Landscape and Urban Planning*, 178, 73–81.
- Lawton JH, Gaston KJ (2001) Indicator species. In: *Encyclopedia of Biodiversity*, 437–450. Elsevier, Amsterdam.
- Lei FM, Zhao HF, Yin ZH (2006) Distribution pattern of endangered bird species in China. *Integrative Zoology*, 1, 162–169.
- Lepage D (2021) Avibase—The World Bird Database. <http://avibase.bsc-eoc.org/checklist.jsp?region=CNbj>. (accessed on 2020-03-20)
- Li L, Hu RC, Huang JK, Bürgi M, Zhu ZY, Zhong J, Lü Z (2020) A farmland biodiversity strategy is needed for China. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 772–774.
- Liu Y, Li Q, Zhang MQ (2015) Dynamic change in bird community in the Temple of Heaven in Beijing. *Ecological Science*, 34(4), 64–70. (in Chinese with English abstract) [刘洋, 李强, 张明庆 (2015) 北京天坛公园鸟类群落的动态变化研究. *生态科学*, 34(4), 64–70.]
- Long Y, He Y, Liu X, Du LQ (2006) Planning of the controlled-construction area in Beijing: Establishing urban expansion boundary. *City Planning Review*, 30(12), 20–26. (in Chinese with English abstract) [龙瀛, 何永, 刘欣, 杜立群 (2006) 北京市限建区规划: 制订城市扩展的边界. *城市规划*, 30(12), 20–26.]
- Luck GW (2007) A review of the relationships between human population density and biodiversity. *Biological Reviews*, 82, 607–645.
- MacKinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [MacKinnon J, Phillipps K, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Mittermeier RA, Mittermeier CG, Gil PR (1999) Megadiversity: Earth's biologically wealthiest nations. *Chelonian Conservation and Biology*, 3, 537.
- Moradi S, Ilanloo SS, Kafash A, Yousefi M (2019) Identifying high-priority conservation areas for avian biodiversity using species distribution modeling. *Ecological Indicators*, 97, 159–164.
- Pellissier V, Schmucki R, Pe'Er G, Aunins A, Brereton TM, Brotons L, Carnicer J, Chodkiewicz T, Chylarecki P, del

- Moral JC, Escandell V, Evans D, Foppen R, Harpke A, Heliölä J, Herrando S, Kuussaari M, Kühn E, Lehtikoinen A, Lindström Å, Moshøj CM, Musche M, Noble D, Oliver TH, Reif J, Richard D, Roy DB, Schweiger O, Settele J, Stefanescu C, Teufelbauer N, Touroult J, Trautmann S, van Strien AJ, van Swaay CAM, van Turnhout C, Vermouzek Z, Voříšek P, Jiguet F, Julliard R (2020) Effects of Natura 2000 on nontarget bird and butterfly species based on citizen science data. *Conservation Biology*, 34, 666–676.
- Seto KC, Güneralp B, Hutyra LR (2012) Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109, 16083–16088.
- Song K, Mi CR, Zhao YZ, Yang N, Sun YH, Xu JL (2016) Modeling habitat factors and suitability for the brown eared pheasant (*Crossoptilon mantchuricum*) in Baihuashan National Nature Reserve, Beijing. *Chinese Journal of Zoology*, 51, 363–372. (in Chinese with English abstract) [宋凯, 宓春荣, 赵玉泽, 杨南, 孙悦华, 徐基良 (2016) 百花山国家级自然保护区褐马鸡栖息地利用分析. *动物学杂志*, 51, 363–372.]
- Tang XP, Luan XF (2017) Developing a nature protected area system composed mainly of national parks. *Forest Resources Management*, (6), 1–8. (in Chinese with English abstract) [唐小平, 栾晓峰 (2017) 构建以国家公园为主体的自然保护地体系. *林业资源管理*, (6), 1–8.]
- Wen C, Gu L, Wang H, Lü Z, Hu RC, Zhong J (2015) GAP analysis on national nature reserves in China based on the distribution of endangered species. *Biodiversity Science*, 23, 591–600. (in Chinese with English abstract) [闻丞, 顾垒, 王昊, 吕植, 胡若成, 钟嘉 (2015) 基于最受关注濒危物种分布的国家级自然保护区空缺分析. *生物多样性*, 23, 591–600.]
- Wen C, Han D (2013) Raptor migration monitoring in the spring of 2009 at Baiwangshan, Beijing. *Chinese Birds*, 4, 319–327.
- Wen C, Han D, Li S, Shen XL, Chen W, Wang H, Zhu XJ, Xiao LY, Liu MQ, Lü Z (2014) Community structure of birds at Yanyuan, Peking University. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50, 416–428. (in Chinese with English abstract) [闻丞, 韩冬, 李晟, 申小莉, 陈炜, 王昊, 朱小健, 肖凌云, 刘美琦, 吕植 (2014) 北京大学燕园鸟类组成. *北京大学学报(自然科学版)*, 50, 416–428.]
- Zhang GG, Zhang ZW, Yang FY, Li SG (2010) Habitat selection of brown-eared pheasant at the Wulushan National Nature Reserve of Shanxi, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(11), 100–103. (in Chinese with English abstract) [张国钢, 张正旺, 杨凤英, 李世广 (2010) 山西五鹿山自然保护区褐马鸡栖息地的选择. *林业科学*, 46(11), 100–103.]
- Zhang GG, Zhang ZW, Zheng GM, Li XQ, Li JF, Huang L (2003) Spatial pattern and habitat selection of brown eared pheasant in Wulushan Nature Reserve, Shanxi Province. *Biodiversity Science*, 11, 303–308. (in Chinese with English abstract) [张国钢, 张正旺, 郑光美, 李晓强, 李俊峰, 黄雷 (2003) 山西五鹿山褐马鸡不同季节的空间分布与栖息地选择研究. *生物多样性*, 11, 303–308.]
- Zhang GG, Zheng GM, Zhang ZW (2004) Reintroduction of brown eared-pheasant *Crossoptilon mantchuricum* in Wutaishan Mountains of Shanxi, China. *Acta Zoologica Sinica*, 50, 126–132. (in Chinese with English abstract) [张国钢, 郑光美, 张正旺 (2004) 山西五台山地区褐马鸡的再引入. *动物学报*, 50, 126–132.]
- Zhang GG, Zheng GM, Zhang ZW, Guo JR, Wang JP, Gong SL (2005) Scale-dependent wintering habitat selection by brown-eared pheasant in Luyashan Nature Reserve of Shanxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 952–957. (in Chinese with English abstract) [张国钢, 郑光美, 张正旺, 郭建荣, 王建平, 宫树龙 (2005) 山西芦芽山褐马鸡越冬栖息地选择的多尺度研究. *生态学报*, 25, 952–957.]
- Zheng H, Ouyang ZY (2014) Practice and consideration for ecological red line. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 29, 457–461, 448. (in Chinese with English abstract) [郑华, 欧阳志云 (2014) 生态红线的实践与思考. *中国科学院院刊*, 29, 457–461, 448.]

(责任编辑: 杨军 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 北京市域受胁鸟类名录及二类栖息地类型

Appendix 1 The list of threatened birds and their habitats (II) in Beijing

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020171-1.pdf>

附录2 北京市域受胁鸟类栖息地各类型面积及比例

Appendix 2 The area and proportion of the habitats of threatened birds in Beijing

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020171-2.pdf>

附录3 eBird受胁鸟类点位数据落位空间分布模型比例

Appendix 3 The percent of point data from eBird locating in the distributing model

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020171-3.pdf>

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29(3): 340–350.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020171>

附录 1 北京市域受胁鸟类名录及二类栖息地类型。数据来源: International Union for Conservation of Nature (IUCN), <http://www.iucnredlist.org>。CR: 极度濒危; EN: 濒危; VU: 易危。
Appendix 1 The list of threatened birds and their habitats (II) in Beijing. Data sources: International Union for Conservation of Nature (IUCN), <http://www.iucnredlist.org>. CR, Critically Endangered; EN, Endangered; VU, Vulnerable.

种类	IUCN 受胁级别 ^a	二类栖息地类型
Species	IUCN threat level	Habitats (II)
青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	CR	河渠、湖泊、水库、坑塘、滩地、沼泽地 River, lake, reservoir, pool, shallows and marsh
白鹤 <i>Grus leucogeranus</i>	CR	湖泊、水库、坑塘、滩地 Lake, reservoir, pool and shallows
黄胸鹑 <i>Emberiza aureola</i>	CR	滩地、旱地、灌木林、疏林地、高覆盖度草地、沼泽地 Shallows, dry farmland, shrub land, open forest, grassland with high coverage and marsh
中华秋沙鸭 <i>Mergus squamatus</i>	EN	河渠、湖泊、水库、坑塘 River, lake, reservoir and pool
丹顶鹤 <i>Grus japonensis</i>	EN	湖泊、水库、坑塘、滩地、滩涂、水田、高覆盖度草地、沼泽地 Lake, reservoir, pool, shallows, tidal flat, paddy field, grassland with high coverage and marsh
东方白鹳 <i>Ciconia boyciana</i>	EN	湖泊、水库、坑塘、滩地、高覆盖度草地、沼泽地 Lake, reservoir, pool, shallows, grassland with high coverage and marsh
黑脸琵鹭 <i>Platalea minor</i>	EN	湖泊、水库、坑塘、滩地、沼泽地 Lake, reservoir, pool, shallows and marsh
大杓鹬 <i>Numenius</i>	EN	滩地、滩涂 Shallows and tidal flat
草原雕 <i>Aquila nipalensis</i>	EN	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、戈壁、裸土地 Grassland with high coverage, grassland with medium coverage, grassland with low coverage, Gobi and bare land
猎隼 <i>Falco cherrug</i>	EN	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、盐碱地、裸岩石质地 Grassland with high coverage, grassland with medium coverage, grassland with low coverage, saline-alkali land and bare rock
栗斑腹鹑 <i>Emberiza</i>	EN	灌木林、低覆盖度草地、沙地 Shrub land, grassland with low coverage and sand land
细纹苇莺 <i>Acrocephalus sorghophilus</i>	EN	河渠、湖泊、水库、坑塘、水田、高覆盖度草地、沼泽地 River, lake, reservoir, pool, paddy field, grassland with high coverage and marsh

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29(3): 340–350.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020171>

种类	IUCN 受胁级别 ^a	二类栖息地类型
Species	IUCN threat level	Habitats (II)
玉带海雕 <i>Haliaeetus</i>	EN	河渠、湖泊、水库、坑塘、滩地、沼泽地 River, lake, reservoir, pool, shallows and marsh.
白头鹤 <i>Grus monacha</i>	VU	河渠、湖泊、水库、坑塘、滩地、水田、高覆盖度草地、沼泽地 River, lake, reservoir, pool, shallows, paddy field, grassland with high coverage and marsh
大鸨 <i>Otis tarda</i>	VU	旱地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、裸土地 Dry farmland, grassland with high coverage, grassland with medium coverage, grassland with low coverage and bare land
遗鸥 <i>Ichthyaetus relictus</i>	VU	湖泊、水库、坑塘、滩地、滩涂、沼泽地 Lake, reservoir, pool, shallows, tidal flat and marsh
白肩雕 <i>Aquila heliaca</i>	VU	河渠、水库、坑塘、灌木林、疏林地、有林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、沼泽地 River, reservoir, pool, shrub land, open forest, woodland, grassland with high coverage, grassland with medium coverage, grassland with low coverage and Marsh
远东苇莺 <i>Acrocephalus</i>	VU	滩地、水田、沼泽地 Shallows, paddy field and Marsh
褐头鹑 <i>Turdus feae</i>	VU	有林地 Woodland
鸿雁 <i>Anser cygnoides</i>	VU	湖泊、水库、坑塘、滩地、旱地 Lake, reservoir, pool, shallows and dry farmland
小白额雁 <i>Anser erythropus</i>	VU	河渠、湖泊、水库、坑塘、滩地、水田、旱地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、沼泽地 River, lake, reservoir, pool, shallows, paddy field, dry farmland, grassland with high coverage, grassland with medium coverage and marsh
长尾鸭 <i>Clangula hyemalis</i>	VU	河渠、湖泊、水库、坑塘 River, lake, reservoir and pool
红头潜鸭 <i>Aythya ferina</i>	VU	湖泊、水库、坑塘 Lake, reservoir and pool
褐马鸡 <i>Crossoptilon</i>	VU	灌木林、疏林地、有林地 Shrub land, open forest and woodland
角鸬鹚 <i>Podiceps auritus</i>	VU	河渠、湖泊、水库、坑塘 River, lake, reservoir and pool

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29(3): 340–350.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020171>

种类	IUCN 受胁级别 ^a	二类栖息地类型
Species	IUCN threat level	Habitats (II)
白枕鹤 <i>Grus vipio</i>	VU	湖泊、水库、坑塘、滩地、水田、旱地、沼泽地 Lake, reservoir, pool, shallows, paddy field, dry farmland and marsh
黄嘴白鹭 <i>Egretta eulophotes</i>	VU	滩地 Shallows
田鸫 <i>Emberiza rustica</i>	VU	旱地、灌木林、有林地、其他林地、沼泽地 Dry farmland, shrub land, woodland, other woodland and marsh
乌雕 <i>Clanga clanga</i>	VU	湖泊、水库、坑塘、滩地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、沼泽地 Lake, reservoir, pool, shallows, grassland with high coverage, grassland with medium coverage, grassland with low coverage and marsh
白喉林鸫 <i>Cyornis brunneatus</i>	VU	灌木林、有林地 Shrub land and woodland

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29(3): 340–350.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020171>

附录 2 北京市域受胁鸟类栖息地各类型面积及比例。^a 湖泊面积大于等于 8 hm², 坑塘面积小于 8 hm²; ^b 数据来源: <http://www.bjwater.gov.cn/bjwater/300795/300797/638577/index.html>。

Appendix 2 The area and proportion of the habitats of threatened birds in Beijing. ^a The area of the lake is bigger than or equal to 8 hm², the area of pool is smaller than 8 hm². ^b Data source, <http://sw.swj.beijing.gov.cn/bjwater/1281848/1281923/index.html>

一类栖息地 Habitats (I)	二类栖息地 Habitats (II)	面积 Area (km ²)	百分比 Proportion
水域 Waters (8.02%)	河渠 River	128.34	2.55%
	湖泊 Lake ^a	23.63	0.47%
	水库 Reservoir ^b	161.93	3.21%
	坑塘 Pool ^a	60.78	1.21%
	滩地 Shallows	29.81	0.59%
耕地 Farmland (26.91%)	水田 Paddy Field	0.64	0.01%
	旱地 Dry farmland	1,356.02	26.90%
林地 Woodlands (59.05%)	灌木林 Shrub land	69.77	1.38%
	疏林地 Open forest	38.20	0.76%
	有林地 Woodland	2,499.78	49.59%
	其他林地 Other woodland	369.38	7.33%
草地 Grasslands (3.27%)	高覆盖度草地 Grassland with high coverage	111.33	2.21%
	中覆盖度草地 Grassland with medium coverage	32.98	0.65%
	低覆盖度草地 Grassland with low coverage	20.42	0.41%
未利用地 Unutilized lands (2.74%)	沼泽地 Marshes	11.78	0.23%
	裸土地 Bare land	94.70	1.88%
	沙地 Sand land	6.69	0.13%
	裸岩石质地 Bare rock	25.13	0.50%
合计 Total		5,041.30	100.00%

附录 3 eBird 受胁鸟类点位数据落位空间分布模型比例

Appendix 3 The percent of point data from eBird locating in the distributing model

物种 Species	在鸟类栖 息地范围 内 Percent in the range of habitats	一级关键 栖息地 The 1st Level Key Habitats	二级关键 栖息地 The 2nd Level Key Habitats	三级栖息 地 The 3rd Level Habitats	四级栖息地 The 4th Level Habitats	不在鸟类栖息地范 围 Percent outside the range of habitats
细纹苇莺 <i>Acrocephalus sorghophilus</i>	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
远东苇莺 <i>Acrocephalus tangorum</i>	100.00%	0.00%	20.00%	0.00%	80.00%	0.00%
鸿雁 <i>Anser cygnoides</i>	80.28%	40.85%	5.63%	7.04%	26.76%	19.72%
小白额雁 <i>Anser erythropus</i>	100.00%	50.00%	0.00%	50.00%	0.00%	0.00%
白肩雕 <i>Aquila heliaca</i>	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
草原雕 <i>Aquila nipalensis</i>	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	94.44%	44.44%	11.11%	5.56%	33.33%	5.56%
红头潜鸭 <i>Aythya ferina</i>	80.00%	38.00%	8.00%	4.00%	30.00%	20.00%
东方白鹳 <i>Ciconia boycciana</i>	100.00%	66.67%	0.00%	0.00%	33.33%	0.00%
乌雕 <i>Clanga clanga</i>	87.50%	12.50%	25.00%	0.00%	50.00%	12.50%
长尾鸭 <i>Clangula hyemalis</i>	100.00%	66.67%	0.00%	0.00%	33.33%	0.00%
褐马鸡 <i>Crossoptilon mantchuricum</i>	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
黄胸鹑	75.00%	32.14%	7.14%	0.00%	35.71%	25.00%

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29(3): 340–350.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020171>

物种 Species	在鸟类栖 息地范围 内 Percent in the range of habitats	一级关键 栖息地 The 1st Level Key Habitats	二级关键 栖息地 The 2nd Level Key Habitats	三级栖息 地 The 3rd Level Habitats	四级栖息地 The 4th Level Habitats	不在鸟类栖息地范 围 Percent outside the range of habitats
<i>Emberiza</i>						
<i>aureola</i>						
栗斑腹鸫	100.00%	66.67%	0.00%	0.00%	33.33%	0.00%
<i>Emberiza</i>						
<i>jankowskii</i>						
田鸫	91.30%	54.35%	4.35%	13.04%	19.57%	8.70%
<i>Emberiza</i>						
<i>rustica</i>						
猎隼	64.00%	32.00%	4.00%	4.00%	24.00%	36.00%
<i>Falco cherrug</i>						
丹顶鹤	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<i>Grus</i>						
<i>japonensis</i>						
白头鹤	80.00%	40.00%	0.00%	0.00%	40.00%	20.00%
<i>Grus monacha</i>						
白枕鹤	100.00%	40.00%	0.00%	0.00%	60.00%	0.00%
<i>Antigone vipio</i>						
遗鸥	90.00%	50.00%	0.00%	0.00%	40.00%	10.00%
<i>Ichthyaelus</i>						
<i>relictus</i>						
白鹤	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<i>Grus</i>						
<i>leucogeranus</i>						
中华秋沙鸭	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
<i>Mergus</i>						
<i>squamatus</i>						
大杓鹬	100.00%	50.00%	0.00%	0.00%	50.00%	0.00%
<i>Numenius</i>						
<i>madagascariensis</i>						
大鸨	85.71%	7.14%	14.29%	21.43%	42.86%	14.29%
<i>Otis tarda</i>						
角鹇鹇	84.62%	38.46%	7.69%	7.69%	30.77%	15.38%
<i>Podiceps</i>						
<i>auritus</i>						
褐头鹇	73.68%	63.16%	0.00%	0.00%	5.26%	26.32%

黄越, 顾焱芸, 阳文锐, 闻丞 (2021) 如何在北京充分实现受胁鸟类栖息地保护? 生物多样性, 29(3): 340–350.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020171>

物种 Species	在鸟类栖 息地范围 内 Percent in the range of habitats	一级关键 栖息地 The 1st Level Key Habitats	二级关键 栖息地 The 2nd Level Key Habitats	三级栖息 地 The 3rd Level Habitats	四级栖息地 The 4th Level Habitats	不在鸟类栖息地范 围 Percent outside the range of habitats
<i>Turdus feae</i>						
总计 Total	83.48%	41.74%	6.09%	5.80%	29.57%	16.52%



•研究报告•

盐地碱蓬盐沼与相邻泥质滩涂湿地迁徙期鹤鹑类的群落组成及行为差异

张菁¹, 白煜¹, 黄子强¹, 张正旺², 李东来^{1*}

1. 辽宁大学生命科学院, 沈阳 110036; 2. 北京师范大学生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京 100875

摘要: 盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)盐沼湿地是黄渤海地区河口区域的重要湿地类型, 是水鸟迁徙停歇期的重要栖息地。本研究以辽河口国家级自然保护区为研究地点, 通过对盐地碱蓬盐沼湿地和相邻泥质滩涂两个固定样区连续三年的水鸟组成调查和行为观察, 分析盐地碱蓬盐沼湿地在鹤鹑类多样性维持和栖息地利用中的作用。共记录到鹤鹑类水鸟28种6,348只次, 其中盐地碱蓬湿地记录到4科13种, 泥质滩涂记录到4科27种, 泥质滩涂的物种多样性显著高于盐地碱蓬盐沼湿地。此外, 盐地碱蓬盐沼湿地与相邻的泥质滩涂的鹤鹑类鸟类群落组成存在较大差异, 盐地碱蓬盐沼湿地的鸟类群落组成以体型较大的大杓鹑(*Numenius madagascariensis*)、白腰杓鹑(*N. arquata*)、灰鹤(*Pluvialis squatarola*)等为主, 而泥质滩涂以环颈鹤(*Charadrius alexandrinus*)、黑腹滨鹑(*Calidris alpina*)等小型鹤鹑类为主, 这说明两种生境在鸟类多样性维持中具有不同的功能。行为分析发现, 泥质滩涂中栖息鸟类的主要行为为取食(58.71%–93.26%), 而盐地碱蓬盐沼湿地鸟类的行为既包括较大比例的取食, 也包括休息, 特别是在春季迁徙期。这进一步说明, 两种生境在水鸟的栖息地利用中具有一定的生态功能差异。尽管盐地碱蓬盐沼湿地记录到的鸟类物种数和数量均低于泥质滩涂, 但是, 两种生境中存在较大比例的共同分布物种, 这说明其生态功能具有较强的生态互补性, 二者作为一种独特的湿地景观组合, 在鹤鹑类迁徙停歇期的栖息地利用和物种多样性维持中发挥着不可替代的作用。

关键词: 盐地碱蓬盐沼湿地; 大杓鹑; 栖息地利用; 鹤鹑类; 辽河口湿地

张菁, 白煜, 黄子强, 张正旺, 李东来 (2021) 盐地碱蓬盐沼与相邻泥质滩涂湿地迁徙期鹤鹑类的群落组成及行为差异. 生物多样性, 29, 351–360. doi: 10.17520/biods.2020189.

Zhang J, Bai Y, Huang ZQ, Zhang ZW, Li DL (2021) Community composition and behavioral differences of migrating shorebirds between two habitats within a *Suaeda salsa* saltmarsh–mudflat wetland mosaics. Biodiversity Science, 29, 351–360. doi: 10.17520/biods.2020189.

Community composition and behavioral differences of migrating shorebirds between two habitats within a *Suaeda salsa* saltmarsh–mudflat wetland mosaics

Jing Zhang¹, Yu Bai¹, Ziqiang Huang¹, Zhengwang Zhang², Donglai Li^{1*}

1 College of Life Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036

2 Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering of the Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875

ABSTRACT

Aims: The *Suaeda salsa* saltmarsh is a typical estuarine wetland along the coast of the Yellow Sea and provides an important stopover habitat for migratory waterbirds. From 2017 to 2019, we conducted a bird count and behavioral observation at Liaohokou National Nature Reserve to examine the community composition and behavioral differences of shorebirds in adjacent *S. salsa* saltmarsh and mudflat tideland habitats.

Methods: In adjacent *S. salsa* saltmarsh and mudflat tideland habitats, we counted and compared the difference of shorebird community composition and behavior during low tide period.

Results: A total of 6,348 birds comprising 4 families and 28 species were recorded. Species richness was higher in the mudflat than *S. salsa* saltmarsh in the spring and autumn. Moreover, we found there were significant differences in

收稿日期: 2020-05-07; 接受日期: 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(31672316; 31911540468)和中国海油海洋环境与生态保护公益基金(CF-MEEC/TR/2020-20)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lidonglai@lnu.edu.cn

shorebird community composition between the two habitats—the *S. salsa* saltmarsh was used more by large-bodied shorebirds (e.g., *Numenius madagascariensis*, *N. arquata*, *Pluvialis squatarola*) while the adjacent mudflat was used more often by small birds (e.g., *Charadrius alexandrinus* and *Calidris alpina*). These patterns indicated that the *S. salsa* saltmarsh has a distinct ecological function for the community formation and maintenance of species diversity of migratory shorebirds. In addition, behavioral data showed that foraging (58.71%–93.26%) was a dominant behavior of shorebirds for both habitats, but a significantly higher percentage of roosting behavior was found in the *S. salsa* saltmarsh, particularly during the spring stopover stage.

Conclusion: Our results indicate that the saltmarsh is an important roosting habitat for many shorebirds, and this function cannot be replaced by the adjacent intertidal mudflat. While the general biodiversity of the saltmarsh was lower than that of the mudflat, the large proportion of shared species-composition between the two habitats imply that these two habitats are complementary. As a unique combination for a wetland landscape, the *S. salsa* saltmarsh and mudflat play irreplaceable roles for providing stopover habitat and maintaining species diversity of shorebirds during migration.

Key words: *Suaeda salsa* saltmarsh; *Numenius madagascariensis*; habitat use; shorebirds; Liaohe Estuary wetland

河口湿地是一种位于河流入海处,由咸淡水交汇形成的复杂生态系统。因含有丰富的生物资源,河口湿地具有多种重要的生态功能,在全球生物多样性维持中发挥着独特的作用(杨永兴, 2002; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Murray et al, 2019)。河口湿地拥有众多的生境类型,如芦苇(*Phragmites communis*)湿地、潮间带湿地、海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)湿地、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)盐沼湿地等,不同类型的湿地为各种生态需求的鸟类提供了觅食地或休息场所。而多种湿地景观组合形成的协同生态效应,是鸟类多样性维持的重要机制(Li et al, 2011, 2013; Gomez-Sapiens et al, 2013; Jackson et al, 2019)。然而,过去的研究多注重对其中一种或少数几种生境的独立研究。如,对河口潮间带滩涂湿地的研究认为这种生境是鸕鹚类等水鸟最主要的觅食地,在整个生态系统中有着至关重要的作用(Choi et al, 2015; Jing et al, 2007)。而对潮间带上方的其他生境类型,如盐沼湿地的关注普遍较少。尽管也有研究认为河口盐沼湿地(saltmarsh)在水鸟的栖息地利用方面,与潮间带滩涂湿地具有一定的互补功能——如在涨潮或天气较差的时候可作为在潮间带取食水鸟的休息地(Burger et al, 1997; Ma et al, 2004; Jackson et al, 2019)。但这种湿地作为水鸟潜在觅食地所发挥的生态功能却很少得到关注(Masero et al, 2000; Jing et al, 2007; Li et al, 2013),特别是对于一些特殊类群和具有特殊生态需求的鸟类(Li et al, 2014, 2017),其生态功能还有待深入研究。

盐沼湿地是指位于海陆交错区、上覆耐盐灌木或草本植物的潮间带淤泥质滩涂湿地(牟晓杰等,

2015)。相关研究显示,水鸟对盐沼湿地的栖息地利用率较低,主要原因是这些区域的盐沼植物多以米草属(*Spartina*)、藨草属(*Scirpus*)和海蓬子属(*Salicornia*)等空间分布较密且植株较高的盐生植物为主,导致可进入性较差,而降低了鸟类的利用率(Darnell & Smith, 2004; Jing et al, 2007; Wan et al, 2009; Ma et al, 2011)。如我国东部沿海湿地不断入侵的互花米草(*Spartina alterniflora*)群落也主要是基于这个原因显著降低了相应栖息地的水鸟利用价值(Jing et al, 2007; Gan et al, 2009; Hua et al, 2015)。在我国东部沿海湿地,特别是位于黄渤海区域的河口区发育有一种原生盐沼湿地类型,被称为“红海滩”,即由盐地碱蓬构成的滩涂湿地景观。关于这种生境的重要生态功能或生态演替规律,国内已经开展了大量研究(Tian et al, 2017; Lu et al, 2018; 孙圳, 2018^①)。然而,关于盐地碱蓬盐沼湿地在鸟类栖息地利用方面的研究依然较少,之前的研究主要集中在水鸟的繁殖、觅食和群落构建方面,如江红星等(2002)研究认为,盐地碱蓬生境可作为黑嘴鸥(*Saundersilarus saundersi*)和鸕鹚类的重要繁殖地; Li等(2014, 2017)研究发现,盐地碱蓬盐沼湿地是丹顶鹤(*Grus japonensis*)迁徙期的重要觅食地。而盐地碱蓬盐沼湿地和潮间带作为重要的原生湿地景观组合,在维持整个水鸟群落多样性构成中具有独特的生态功能。潮间带滩涂湿地作为一种广布于全球滨海区域的生境类型,对全球滨海水鸟的迁徙和繁殖起着不可替代的作用(Ma et al, 2014; Studds et al, 2017; Murray et al, 2019)。但对于盐地碱蓬盐沼湿地

① 孙圳 (2018) 辽河口湿地翅碱蓬植被年际变化及其影响因素的相关性研究. 硕士学位论文, 大连海洋大学, 辽宁大连.

与潮间带滩涂湿地这两种空间上相邻又存在一定景观异质性的生境类型,在水鸟的群落构建、栖息地利用差异和相互功能关系方面还不十分清楚。

辽河口国家级自然保护区是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上一个非常重要的迁徙停歇地,也是国际重要湿地之一,每年迁徙季节均有大量的鸕鹚类在此进行能量补给、羽毛更换和繁殖(Bamford et al, 2008; China Coastal Waterbird Census Group et al, 2015; 陈龙等, 2019; Duan et al, 2020)。其中,河口两侧的盐地碱蓬盐沼湿地和潮间带泥质滩涂湿地均是鸕鹚类的重要栖息地。本研究选择位于自然保护区西侧的一片典型盐地碱蓬盐沼湿地及与其相邻的裸露泥质滩涂,作为两类观测区,开展比较性研究。通过系统的水鸟组成调查和行为观察,分析两种生境中鸟类群落组成及其主要的行为差异,揭示盐地碱蓬盐沼湿地在鸕鹚类群落构建、多样性维持及栖息地利用方面的作用。结合盐地碱蓬湿地面临的不断丧失的严峻形势,探讨加强盐地碱蓬湿地保护的重要性。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

辽河口国家级自然保护区(121°10′-122°30′ E, 40°30′-41°30′ N)地处渤海湾北部,位于辽宁省盘锦市。该保护区占地面积80,000 ha,除具有全亚洲最

大的芦苇湿地之外,还分布有多种湿地生态景观,如河流、潮间带滩涂、盐地碱蓬盐沼湿地、人工养殖池塘等。主要保护对象为丹顶鹤、黑嘴鸥和河口湿地生态系统,同时,也包括大量迁徙和繁殖的鸕鹚和鸥类等水鸟。之前的研究显示该区域至少承载了6万只以上的水鸟,其中有22种的种群数量达到了全球种群数量的1% (Bamford et al, 2008; China Coastal Waterbird Census Group et al, 2015)。

我们选择位于辽河口国家级自然保护区南小河黑嘴鸥保护站(121°36′ E, 40°51′ N)内连续分布的盐地碱蓬和潮间带滩涂作为研究点(图1)。研究区总面积为600 ha,除有少量水产养殖工人和油田生产人员外,人为活动干扰较少。该区域是迁徙期鸕鹚类等鸟类的主要觅食和休息地。盐地碱蓬属于藜科碱蓬属,是典型的盐生植物,成熟植株高度介于15-30 cm,所选择研究区域的植被主要由盐地碱蓬、芦苇、柽柳(*Tamarix chinensis*)组成,芦苇、柽柳主要分布于内陆淡水资源较为丰富的区域,而盐地碱蓬作为潮间带的一种先锋植物,主要分布在河口区域,盐地碱蓬分布范围受潮汐高度的影响较大,通常位于潮间带滩涂的中潮线上方(中国植物志, 1979)。辽河口国家级自然保护区的潮汐高度为1.4-4.4 m (国家海洋信息中心, <https://www.cnss.com.cn/tide/>),而该区域分布的盐地碱蓬主要在潮汐高度3.46 m以上区域,平均潮高(2.6-3.0 m)可以

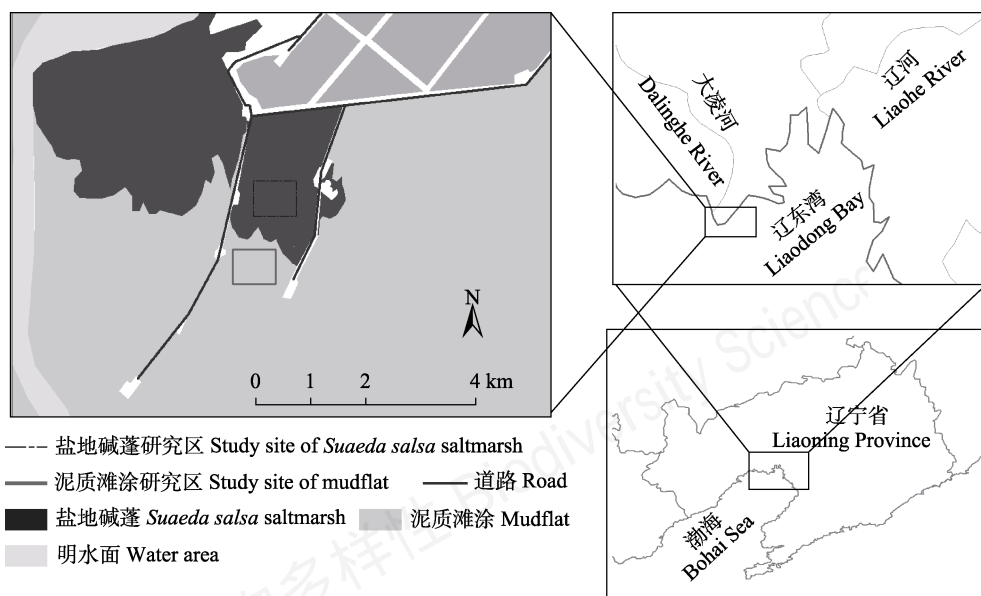


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of study site

淹没其他潮间带区域。盐地碱蓬盐沼湿地和潮间带滩涂两种生境的土壤组成均以淤泥和粘土为主,但后者含沙量略高于前者(Zhang et al, 2016)。

1.2 鸟类调查

采用直接计数法进行鸟类调查。我们于2017年秋季至2019年秋季,共进行了2年的春季(4–5月)和3年的秋季(8–11月)调查。所有调查集中在两个相邻的盐地碱蓬盐沼湿地和潮间带泥质滩涂观察区,大小为400 m × 500 m (图1)。于低潮时(最低潮前后2 h)利用20–60倍单筒望远镜(SWAROVSKI, HD80)和8 × 42双筒望远镜对样区内鸟类进行计数,记录鸟类的种类和数量,同时记录日期、时间、潮汐高度和生境类型。每次调查间隔5–7天,在天气良好的情况下开展。

同时,为了研究水鸟对不同生境的利用差异,采用瞬时扫描法对两种生境鸟类的主要行为进行记录。行为类型如下:(1)觅食行为:有明显的取食、吞咽等活动,具体表现为水鸟用喙不停地探寻食物或将喙直接插入泥中;(2)休息行为:鸟类单脚站立,将头偏向一侧并埋于翅下;(3)其他行为:包括警戒、理羽、打斗和惊飞等(孔德军等, 2008; Zhou et al, 2010; 蒋剑虹等, 2015)。

鸟类分类系统和物种名称参考《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美, 2017)。

1.3 数据分析

本研究记录到的水鸟以鸻形目中的鸻鹬类为主(数量百分比: 98.60%),而其他类群的水鸟(如雁鸭类和鹭类)数量较少(1.40%),未计入后续的统计分析。采用优势度指数(Y)来表征群落中的优势种: $Y = n_i/N \times 100\%$; 式中: n_i 为第 i 种的个体数; N 为所有种类总个体数。定义优势度指数大于10%的鸟类为优势种, 1%–10%的为常见种, 小于1%的为偶见种(Howes & Bakewell, 1989; 郑光美, 2012)。由于每次鸟类调查间隔5–7天,每一调查日只调查1次鸟类行为和数量;研究地从迁徙开始到迁徙高峰期鸟类数量从14,000只到60,000只,低潮期鸟类广泛分布于可觅食区域,相同个体出现在一个区域的可能性不高,所以我们把每次调查作为一个独立的样本。本研究的重点是比较不同生境之间的差异,调查方法使用的是配对实验设计,我们认为鸟类群落结构和生境在年间变化不大,所以没有考虑年度间差异的影响。采用配对样本 t 检验比较两种生境之间鸟类物

种丰富度和多度的差异;采用独立样本 t 检验比较两种生境中鸟类物种丰富度和多度的季节差异。以观察到每种行为的鸟类数量占鸟类总数的百分比计算鸟类行为比例,并采用独立样本 t 检验进行比较分析(蒋剑虹等, 2015)。所有数据(计量型)进行分析之前采用Kolmogorov-Smirnov进行正态检验,若不符合正态性则采用相应的非参数检验。

鸟类的群落结构利用非度量多维尺度标度法(non-metric multidimensional scaling, nMDS)进行分析,分析前以每次调查所记录数量为行,物种为列计算Bray-Curtis距离,借助R软件绘制nMDS碎石图,对群落结构的生境和季节差异进行图示化表示(Kruskal, 1964; Li et al, 2011)。群落相似性采用Jaccard指数表示: $C_j = j/(a + b - j)$, 式中 C_j 为相似性系数, a 为群落A中的物种数, b 为群落B中的物种数, j 为A、B两者共有物种数(蒋科毅等, 2013)。群落结构的nMDS分析借助RStudio-v1.2.1335 (RStudio, Inc., Boston, MA)的vegan R软件包完成,绘图使用ggplot2包(胡艺等, 2019)。其他统计分析在SPSS 21.0软件中完成。统计显著性标准设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 物种组成与数量

2017–2019年共进行了28次调查(春季11次,秋季17次;附录1),记录到鸻鹬类水鸟28种6,348只次。其中春季记录到15种1,371只次;秋季记录到25种4,977只次。

两种生境中鸻鹬类的物种组成具有较大差异。盐地碱蓬盐沼湿地共记录到4科13种,优势种为大杓鹬(*Numenius madagascariensis*)、白腰杓鹬(*N. arquata*)、黑嘴鸥、红嘴鸥(*Chroicocephalus ridibundus*);泥质滩涂调查到4科27种,优势种为环颈鸻(*Charadrius alexandrinus*)、蛎鹬(*Haematopus ostralegus*)、黑腹滨鹬(*Calidris alpina*)。两种生境同时记录到的物种有12种,占总记录物种数的39.3%,如黑嘴鸥、大杓鹬、白腰杓鹬、灰鸻(*Pluvialis squatarola*)等。其中,盐地碱蓬盐沼湿地单独记录到的物种有1种,为金斑鸻(*Pluvialis fulva*);泥质滩涂单独记录到的物种有15种,占比57.1%,如大滨鹬(*Calidris tenuirostris*)、黑尾鸥(*Larus crassirostris*)、青脚鹬(*Tringa nebularia*)、红脚鹬(*T. totanus*)等,详见附录1。

从物种丰富度上看, 泥质滩涂极显著高于盐地碱蓬盐沼湿地(春季: $t = -4.405$, $df = 10$, $P = 0.001$; 秋季: $t = -5.705$, $df = 16$, $P < 0.001$); 而两种生境均不存在明显的季节差异(盐地碱蓬: $t = 0.434$, $df = 26$, $P = 0.668$; 泥质滩涂: $t = -1.561$, $df = 26$, $P = 0.131$; 图2A)。两种生境的物种多度也具有类似的变化趋势, 泥质滩涂的物种多度均显著高于盐地碱蓬(春季: $t = -3.218$, $df = 10$, $P = 0.009$; 秋季: $Z = -3.516$, $P < 0.001$); 而两种生境鸟类的多度无显著的季节差异(盐地碱蓬: $Z = 0.719$, $P = 0.680$; 泥质滩涂: $Z = 1.133$, $P = 0.153$; 图2B)。

2.2 群落结构分析

由图3可见, 鸟类群落结构呈现明显的生境分化趋势, 季节间的差异不明显。在二维的nMDS权重图上, 盐地碱蓬生境中鸟类群落主要分布于nMDS

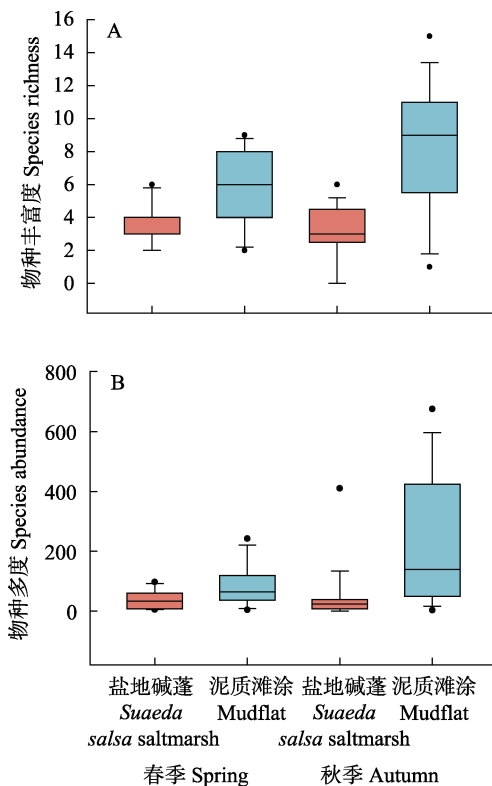


图2 不同生境和季节间鹤鹑鸟类物种丰富度(A)和物种多度(B)差异。春季: $n = 11$; 秋季: $n = 17$ 。箱子上下边界代表上下四分位数, 箱子中间实线为中位数, 上下边缘分别代表除异常值外的最大值和最小值, 实心圆点为离异值。

Fig. 2 The difference in species richness (A) and abundance (B) of shorebirds between two habitats in different migratory seasons. Spring: $n = 11$; autumn: $n = 17$. The solid lines in the box denote the median value and box edges show the upper and lower quartiles. The maximum and minimum show the largest and lowest data point excluding any outliers and the solid circles show outliers.

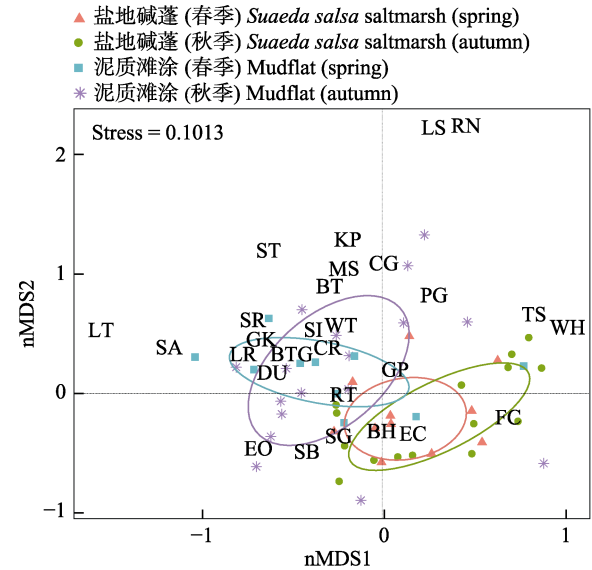


图3 不同生境和季节间鹤鹑类群落结构nMDS分析的权重图。FC: 大杓鹑; EC: 白腰杓鹑; WH: 中杓鹑; CG: 青脚鹑; CR: 红脚鹑; RT: 翻石鹑; TS: 翘嘴鹑; SR: 鹤鹑; DU: 黑腹滨鹑; BTG: 斑尾塍鹑; GK: 大滨鹑; EO: 蛎鹑; MS: 泽鹑; ST: 尖尾滨鹑; SA: 三趾滨鹑; RN: 红颈滨鹑; GP: 灰鸻; KP: 环颈鸻; PG: 金斑鸻; LS: 蒙古沙鸻; LR: 金眶鸻; SG: 黑嘴鸥; BH: 红嘴鸥; SI: 西伯利亚银鸥; SB: 灰背鸥; BT: 黑尾鸥; WT: 白翅浮鸥; LT: 白额燕鸥。

Fig. 3 nMDS plots of shorebird community between two habitats (*Suaeda salsa* saltmarsh vs. mudflat) in two migratory seasons. FC, *Numenius madagascariensis*; EC, *Numenius arquata*; WH, *Numenius phaeopus*; CG, *Tringa nebularia*; CR, *Tringa totanus*; RT, *Arenaria interpres*; TS, *Xenus cinereus*; SR, *Tringa erythropus*; DU, *Calidris apoina*; BTG, *Limosa lapponica*; GK, *Calidris tenuirostris*; EO, *Haematopus ostralegus*; MS, *Tringa stagnatilis*; ST, *Calidris acuminata*; SA, *Calidris alba*; RN, *Calidris ruficollis*; GP, *Pluvialis squatarola*; KP, *Charadrius alexandrinus*; PG, *Pluvialis fulva*; LS, *Charadrius mongolus*; LR, *Charadrius dubius*; SG, *Saundersilarus saundersi*; BH, *Chroicocephalus ridibundus*; SI, *Larus vegae*; SB, *Larus schistisagus*; BT, *Larus crassirostris*; WT, *Chlidonias leucopterus*; LT, *Sternula albigifrons*.

权重图的右下侧, 季节间重叠较大, 春、秋季群落相似性系数为0.46, 共有鸟种有6种, 白腰杓鹑、大杓鹑、黑嘴鸥、灰鸻和红嘴鸥对该生境群落特征贡献较高, 说明这些物种是盐地碱蓬生境的典型物种; 相反, 泥质滩涂生境中鸟类群落主要分布于nMDS权重图的左上侧, 且分布较为分散, 说明鸟类群落组成的波动较大。另外, 大滨鹑、黑腹滨鹑、环颈鸻、蛎鹑、鹤鹑(*Tringa erythropus*)、黑尾鸥等多种鸟类在该群落构成中的权重较高, 说明这种生境中鸟类的多样性更高, 并明显区别于盐地碱蓬生境。该生境春、秋季重叠较大, 相似性系数为0.41。同时, 季节间也存在一定的差别, 如大滨鹑、斑尾塍鹑、

白额燕鸥(*Sterna albifrons*)对春季鸟类群落的贡献较大, 而金眶鸻(*Charadrius dubius*)、蒙古沙鸻(*C. mongolus*)、红颈滨鹬(*Calidris ruficollis*)、三趾滨鹬(*C. alba*)对秋季鸟类群落的贡献较大(图3, 表1)。

2.3 鸟类行为的生境差异

从鸟类的行为来看, 该研究区域鸟类以取食行为为主(58.71%–93.26%), 其次为休息行为(5.99%–23.29%), 其他行为所占比例较低(0.34%–18%)。两种生境中鸟类的行为组成具有明显的季节差异, 春季盐地碱蓬生境中取食比例显著低于泥质滩涂($t = -2.115, df = 67.707, P = 0.038$; 图4), 而休

表1 不同季节和生境间鸻鹬类共有种的数量及其相似度
Table 1 Number of shared species and similarity coefficients of shorebirds among different seasons and habitats

	盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> saltmarsh		泥质滩涂 Mudflat	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
盐地碱蓬(春季) <i>Suaeda salsa</i> saltmarsh (Spring)	8	6 (0.46)	6 (0.40)	8 (0.32)
盐地碱蓬(秋季) <i>Suaeda salsa</i> saltmarsh (Autumn)		11	7 (0.41)	11 (0.44)
泥质滩涂(春季) Mudflat (Spring)			13	11 (0.41)
泥质滩涂(秋季) Mudflat (Autumn)				25

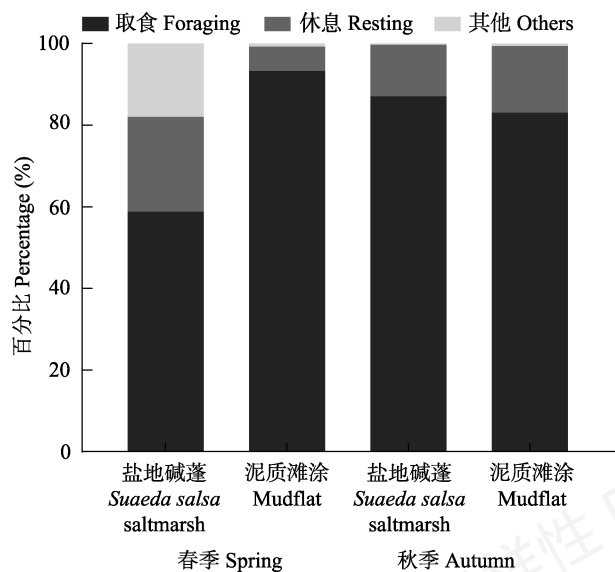


图4 不同生境和季节鸻鹬类各行为组成百分比
Fig. 4 Percentage of different behavior of shorebirds between two habitats in different migratory seasons

息行为比例较高(23.29% vs. 5.99%; $Z = -2.359, P = 0.018$); 秋季两种生境均以取食行为为主(> 87.0%), 各行为组成比例不存在显著性差异(取食行为: $t = 1.406, df = 176.64, P = 0.161$; 休息行为: $Z = -0.991, P = 0.322$; 图4)。

3 讨论

3.1 鸟类群落结构与组成

本研究发现, 盐地碱蓬盐沼湿地与相邻泥质滩涂的鸟类组成存在较大差异, 盐地碱蓬生境以鸥类和体型较大的鸻鹬类(如黑嘴鸥、大杓鹬、白腰杓鹬、灰鸻等)为主, 而泥质滩涂主要以环颈鸻、黑腹滨鹬、大滨鹬、蛎鹬等中小型鸻鹬类为主, 这说明两种生境对鸻鹬类等水鸟的群落构成和栖息地利用具有明显的功能差异。潮间带滩涂湿地作为小型滨鹬类和鸻类的重要栖息地, 与其他探究潮间带在鸻鹬类栖息地利用中的作用的研究结果类似(Yang et al, 2013; Choi et al, 2015, 2017; Peng et al, 2017)。同时, 本研究也证实盐地碱蓬盐沼湿地作为体型较大的鸻鹬类的重要栖息地, 在其栖息地利用中具有独特作用^①。这与多数关于盐沼湿地水鸟利用的研究结果差异较大。之前多数研究认为盐沼湿地在水鸟栖息地利用中的作用有限, 如Darnell和Smith (2004)对互花米草和欧洲海蓬子(*Salicornia* spp.)盐沼湿地的研究显示, 只有雀形目的鸟类可以利用此生境, 水鸟利用较少。我们推测导致不同研究结果存在差异的主要原因有两个: 第一, 构成盐沼的植被结构差异较大, 如Jing等(2007)和Ma等(2011)对互花米草和海三棱藨草盐沼湿地的研究显示, 较高和较密的植株限制了大部分鸟类在该区域的觅食; 而盐地碱蓬盐沼湿地主要由植株高度为15–35 cm且稀疏分布的盐地碱蓬构成。这对于体型较大的鸻鹬类的影响不大, 但对于体型较小的鸟类在该生境进行觅食和行走可能有一定影响; 第二, 本研究发现较多的鸻鹬类利用盐地碱蓬湿地, 这可能与底栖生物组成的生境类型特异性有关(Jing et al, 2007; Chen et al, 2019)。前期研究发现, 盐地碱蓬盐沼湿地丰富的滩涂蟹类是丹顶鹤迁徙期的重要食物资源(Li et al, 2014)。而本研究在盐地碱蓬盐沼湿地中记录到的大杓鹬、白腰杓鹬和黑嘴鸥主要取食滩涂蟹类(Li et al,

^① 黄子强 (2018) 鸻鹬类迁徙停歇期对翅碱蓬和潮间带湿地的栖息地利用。硕士学位论文, 辽宁大学, 沈阳。

2020)。相比之下,其他滨鹚鸟类更倾向于在泥质滩涂上取食蛤类、螺类和沙蚕等(Zhang et al, 2011; 张璇等, 2013; 冯晨晨等, 2019)。

尽管两种生境的群落组成存在较大差异,但依然有较大比例的共同分布物种。盐地碱蓬盐沼湿地记录到的13种鸟类中,有12种都在潮间带滩涂有分布记录,说明两种生境在鸟类的利用中存在较强的互补性。尽管在本研究中这种较高的物种组成相似性可能是由于两种生境较近的空间距离造成的,但是,也可能说明盐地碱蓬盐沼湿地和相邻的泥质滩涂湿地作为一种独特的湿地景观组合,在鸕鹚类多样性的维持中可以协同发挥作用,为迁徙期的鸟类提供重要的栖息地(Li et al, 2011, 2013)。从季节变化上看,盐地碱蓬盐沼湿地的水鸟组成的季节性差异较小,说明这种生境的生态功能相对稳定,主要为生态习性较为特化的鸕鹚类提供栖息地;而泥质滩涂的鸕鹚类组成季节变化较大,则可能与利用该栖息地鸟类的迁徙停歇策略的季节性差异有关,如斑尾塍鹚在南迁时的数量不到北迁期的一半(Battley et al, 2012; China Coastal Waterbird Census Group et al, 2015);另外,也可能与该栖息地的底栖生物资源的季节变化有关(Zhang et al, 2016; 侯文昊等, 2019),但还需要进一步的底栖生物调查来验证。





3.2 水鸟群落的行为组成差异

研究发现,鸕鹚类在两种生境中的主要行为为取食。这说明盐地碱蓬盐沼和滩涂湿地是鸕鹚类迁徙停歇期的重要觅食地,在能量积累和后续的迁徙活动中发挥着重要作用(Choi et al, 2014; 华宁, 2014)。同时,我们也发现春季迁徙期盐地碱蓬盐沼湿地中休息行为的比例较大,显著高于相邻的泥滩生境,这说明较多的鸕鹚类会选择在盐地碱蓬盐沼湿地休息。存在这种差异的主要原因可能是:在春季迁徙期,多数鸕鹚类经过长时间的长途迁徙,到达停歇地后需要较长的时间进行休息,恢复体能。研究表明,某些鸕鹚类,如红腹滨鹚(*Calidris canutus*)等,在迁徙期肌胃等消化器官发生萎缩,需要更多的休息时间,以恢复到正常的机能水平(Van Gils et al, 2005; Yang et al, 2013)。在此阶段,由于以下两方面原因,潮上滩的盐地碱蓬盐沼湿地可能成为鸕鹚类极为理想的休息地:第一,该生境距离潮间带滩涂等主要觅食地非常近,方便利用;第二,此生境由于稀疏的植被覆盖具有较好的隐蔽

和遮风效果,可以降低被捕食风险和维持体温所带来的能量损耗(Moreno et al, 1996; Tchabovsky et al, 2001)。尽管也有研究认为,鱼塘、盐池等生境可以作为鸕鹚类的休息地(Masero & Pérez-Hurtado, 2001; Lehnen & Krementz, 2013; Lei et al, 2018),但是,从人为干扰强度和距觅食地距离上来看,自然分布的盐地碱蓬盐沼湿地依然是最优的休息地。未来可以进一步开展不同类型休息地的栖息质量及鸟类利用评估。在秋季,两种生境中休息和觅食的比例不存在显著差异。这说明鸕鹚类也可以选择在某些潮间带上方的泥质滩涂区域进行休息,至于两种生境中休息个体的物种组成是否存在差异,以及是否有些鸟类选择以不同的行为利用两种生境,还需要进一步研究。

综上,盐地碱蓬盐沼湿地作为一种滨海湿地类型,在鸕鹚类的群落构成和栖息地利用中发挥着独特作用,特别是为大杓鹚等以滩涂蟹类为食的鸕鹚类提供重要的觅食栖息地,同时,也是大量鸕鹚类的休息地。除此之外,盐地碱蓬盐沼湿地与相邻的潮间带泥质滩涂湿地具有较强的生态互补性,二者作为独特的湿地景观组合,在地区鸕鹚类鸟类物种多样性维持中发挥着不可替代的作用。然而,有研究表明盐地碱蓬盐沼湿地正面临着严重的湿地丧失和破坏(Li et al, 2017; Tian et al, 2017; Lu et al, 2018),需要加强对该生境类型的研究保护和管理工作。此研究将为盐地碱蓬湿地的保护和恢复提供重要的参考依据。

ORCID

张菁  <https://orcid.org/0000-0003-4693-7707>
白煜  <https://orcid.org/0000-0002-5198-1924>
张正旺  <https://orcid.org/0000-0003-1063-7198>
李东来  <https://orcid.org/0000-0001-9155-5148>

参考文献

- Bamford M, Watkins D, Bancroft W, Tischler G, Wahl J (2008) Migratory Shorebirds of the East Asian-Australasian Flyway Population Estimates and Internationally Important Sites. Wetlands International Oceania, Canberra, Australia.
- Battley PF, Warnock N, Tibbitts TL, Gill RE Jr, Piersma T, Hassell CJ, Douglas DC, Mulcahy DM, Gartrell BD, Schuckard R, Melville DS, Riegen AC (2012) Contrasting extreme long-distance migration patterns in bar-tailed godwits *Limosa lapponica*. Journal of Avian Biology, 43, 21–32.

- Burger J, Howe MA, Hahn DC, Chase J (1997) Effects of tide cycles on habitat selection and habitat partitioning by migrating shorebirds. *The Auk*, 94, 743–758.
- Chen L, Zhang ML, Li FL, Yu WY (2019) Structure and diversity of bird communities in Liaohokou Wetlands in Spring 2017. *Wetland Science*, 17, 146–151. (in Chinese with English abstract) [陈龙, 张美玲, 李凤丽, 于文颖 (2019) 2017年春季辽河口湿地鸟类群落结构和多样性. *湿地科学*, 17, 146–151.]
- Chen P, Zhang Y, Zhu XJ, Lu CH (2019) Distribution of crabs along a habitat gradient on the Yellow Sea coast after *Spartina alterniflora* invasion. *PeerJ*, 7, e6775.
- China Coastal Waterbird Census Group, Bai QQ, Chen JZ, Chen ZH, Dong GT, Dong JT, Dong WX, Fu VWK, Han YX, Lu G, Li J, Liu Y, Lin Z, Meng DR, Martinez J, Ni GH, Shan K, Sun RJ, Tian SX, Wang FQ, Xu ZW, Yu YT, Yang J, Yang ZD, Zhang L, Zhang M, Zeng XW (2015) Identification of coastal wetlands of international importance for waterbirds: A review of China Coastal Waterbird Surveys 2005–2013. *Avian Research*, 6, 12.
- Choi CY, Battley PF, Potter MA, Ma ZJ, Melville DS, Sukkaewmanee P (2017) How migratory shorebirds selectively exploit prey at a staging site dominated by a single prey species. *The Auk*, 134, 76–91.
- Choi CY, Battley PF, Potter MA, Rogers KG, Ma ZJ (2015) The importance of Yalu Jiang coastal wetland in the north Yellow Sea to bar-tailed godwits *Limosa lapponica* and great knots *Calidris tenuirostris* during northward migration. *Bird Conservation International*, 25, 53–70.
- Choi CY, Gan XJ, Hua N, Wang Y, Ma ZJ (2014) The habitat use and home range analysis of Dunlin (*Calidris alpina*) in Chongming Dongtan, China and their conservation implications. *Wetlands*, 34, 255–266.
- Darnell TM, Smith EH (2004) Avian use of natural and created salt marsh in Texas, USA. *Waterbirds*, 27, 355–361.
- Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita (1979) *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植物志编委会 (1979) 中国植物志. 科学出版社, 北京.]
- Duan HL, Xia SX, Jackson MV, Zhao N, Liu Y, Teng JK, Meng Z, Yu XB, Shi JB (2020) Identifying new sites of significance to waterbirds conservation and their habitat modification in the Yellow and Bohai seas in China. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01031.
- Feng CC, Zhang SD, Liu WL, Zhao TT, Cao YD, Xiangyu JG, Ma ZJ (2019) Food composition of five migratory shorebirds at the Dandong Yalu River coastal wetland in spring migration. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 58, 497–505. (in Chinese with English abstract) [冯晨晨, 张守栋, 刘文亮, 赵天天, 曹一迪, 向余劲攻, 马志军 (2019) 丹东鸭绿江口湿地春季5种迁徙鹬类的食物组成. *复旦学报(自然科学版)*, 58, 497–505.]
- Gan XJ, Cai YT, Choi CY, Ma ZJ, Chen JK, Li B (2009) Potential impacts of invasive *Spartina alterniflora* on spring bird communities at Chongming Dongtan, a Chinese wetland of international importance. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 83, 211–218.
- Gomez-Sapiens MM, Soto-Montoya E, Hinojosa-Huerta O (2013) Shorebird abundance and species diversity in natural intertidal and non-tidal anthropogenic wetlands of the Colorado River delta, Mexico. *Ecological Engineering*, 59, 74–83.
- Hou WH, Lu WZ, Zhao KY, Zhang JL, Zhang RJ, Lei W, Liao GX, Liu CA (2019) Research on the temporal and spatial distribution characteristics of *Helice tiensinensis* in red beach of the Liaohe estuary. *Marine Environmental Science*, 38, 272–277. (in Chinese with English abstract) [侯文昊, 卢伟志, 赵开远, 张家林, 张瑞瑾, 雷威, 廖国祥, 刘长安 (2019) 辽河口红海滩天津厚蟹种群时空分布特征研究. *海洋环境科学*, 38, 272–277.]
- Howes J, Bakewell D (1989) *Shorebird Studies Manual*. AWB Press, Kuala Lumpur.
- Hu Y, Li QH, Li Y, He Y, Han MS, Sun RG, Gao TJ (2019) Analysis of structure and dynamics of metazooplankton community in Baihua Reservoir of Guizhou Province based on nMDS and RDA. *Research of Environmental Sciences*, 32, 1510–1518. (in Chinese with English abstract) [胡艺, 李秋华, 李钥, 何应, 韩孟书, 孙荣国, 高廷进 (2019) 基于nMDS和RDA方法分析贵州百花水库后生浮游动物群落结构动态. *环境科学研究*, 32, 1510–1518.]
- Hua N (2014) *Fuel Deposition of Shorebirds at Stopping Sites in the Yellow Sea During Spring Migration*. PhD dissertation, Fudan University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [华宁 (2014) 鹤鹬类春季在黄海区域迁徙停歇地的能量积累. 博士学位论文, 复旦大学, 上海.]
- Hua N, Tan K, Chen Y, Ma ZJ (2015) Key research issues concerning the conservation of migratory shorebirds in the Yellow Sea region. *Bird Conservation International*, 25, 38–52.
- Jackson MV, Carrasco LR, Choi CY, Li J, Ma ZJ, Melville DS, Mu T, Peng HB, Woodworth BK, Yang ZY, Zhang L, Fuller RA (2019) Multiple habitat use by declining migratory birds necessitates joined-up conservation. *Ecology and Evolution*, 9, 2505–2515.
- Jiang HX, Chu GZ, Qian FW, Lu J (2002) Breeding microhabitat selection of Saunders' gull (*Larus saundersi*) in Yancheng of Jiangsu Province, China. *Biodiversity Science*, 10, 170–174. (in Chinese with English abstract) [江红星, 楚国忠, 钱法文, 陆军 (2002) 江苏盐城黑嘴鸥 (*Larus saundersi*) 繁殖微生境的选择. *生物多样性*, 10, 170–174.]
- Jiang JH, Dai NH, Shao MQ, Huang ZQ, Lu P (2015) Time budget and foraging behavior of wintering common cranes inhabiting rice fields of Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 270–279. (in Chinese with English abstract) [蒋

- 剑虹, 戴年华, 邵明勤, 黄志强, 卢萍 (2015) 鄱阳湖区稻田生境中灰鹤越冬行为的时间分配与觅食行为. 生态学报, 35, 270–279.]
- Jiang KY, Wu M, Shao XX, Lü Y (2013) Diversity of bird communities in southern Hangzhou Bay and the Qiantang River estuary and their responses to reclamation of intertidal mudflats. *Biodiversity Science*, 21, 214–223. (in Chinese with English abstract) [蒋科毅, 吴明, 邵学新, 吕咏 (2013) 杭州湾及钱塘江河口南岸滨海湿地鸟类群落多样性及其对滩涂围垦的响应. 生物多样性, 21, 214–223.]
- Jing K, Ma ZJ, Li B, Li JH, Chen JK (2007) Foraging strategies involved in habitat use of shorebirds at the intertidal area of Chongming Dongtan, China. *Ecological Research*, 22, 559–570.
- Kong DJ, Yang XJ, Zhong XY, Dao MB, Zhu Y (2008) Diurnal time budget and behavior rhythm of wintering black-necked crane (*Grus nigricollis*) at Dashanbao in Yunnan. *Zoological Research*, 29, 195–202. (in Chinese with English abstract) [孔德军, 杨晓君, 钟兴耀, 道美标, 朱勇 (2008) 云南大山包黑颈鹤日间越冬时间分配和日活动节律. 动物学研究, 29, 195–202.]
- Kruskal JB (1964) Nonmetric multidimensional scaling: A numerical method. *Psychometrika*, 29, 115–129.
- Lehnen SE, Kremetz DG (2013) Use of aquaculture ponds and other habitats by autumn migrating shorebirds along the lower Mississippi River. *Environmental Management*, 52, 417–426.
- Lei WP, Masero JA, Piersma T, Zhu BR, Yang HY, Zhang ZW (2018) Alternative habitat: The importance of the Nanpu Salt pans for migratory waterbirds in the Chinese Yellow Sea. *Bird Conservation International*, 28, 549–566.
- Li DL, Chen SH, Guan L, Lloyd H, Liu YL, Lü JZ, Zhang ZW (2011) Patterns of waterbird community composition across a natural and restored wetland landscape mosaic, Yellow River delta, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91, 325–332.
- Li DL, Chen SH, Lloyd H, Zhu SY, Shan K, Zhang ZW (2013) The importance of artificial habitats to migratory waterbirds within a natural/artificial wetland mosaic, Yellow River delta, China. *Bird Conservation International*, 23, 184–198.
- Li DL, Ding YQ, Yuan Y, Lloyd H, Zhang ZW (2014) Female tidal mudflat crabs represent a critical food resource for migratory red-crowned cranes in the Yellow River delta, China. *Bird Conservation International*, 24, 416–428.
- Li DL, Liu Y, Sun XH, Lloyd H, Zhu SY, Zhang SY, Wan DM, Zhang ZW (2017) Habitat-dependent changes in vigilance behaviour of red-crowned crane influenced by wildlife tourism. *Scientific Reports*, 7, 16614.
- Li DL, Zhang J, Liu Y, Lloyd H, Pagani-Núñez E, Zhang ZW (2020) Differences in dietary specialization, habitat use and susceptibility to human disturbance influence feeding rates and resource partitioning between two migratory *Numenius* curlew species. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 245, 106990.
- Lu W, Xiao J, Lei W, Du J, Li Z, Cong P, Hou W, Zhang J, Chen L, Zhang Y, Liao GX (2018) Human activities accelerated the degradation of saline seepweed red beaches by amplifying top-down and bottom-up forces. *Ecosphere*, 9, e02352.
- Ma ZJ, Gan XJ, Cai YT, Chen JK, Li B (2011) Effects of exotic *Spartina alterniflora* on the habitat patch associations of breeding saltmarsh birds at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary, China. *Biological Invasions*, 13, 1673–1686.
- Ma ZJ, Li B, Zhao B, Jing K, Tang S, Chen J (2004) Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds?—A case study on Chongming Island, China. *Biodiversity and Conservation*, 13, 333–350.
- Ma ZJ, Melville DS, Liu JG, Chen L, Yang HY, Ren WW, Zhang ZW, Piersma T, Li B (2014) Rethinking China's new great wall. *Science*, 346, 912–914.
- Masero JA, Pérez-Hurtado A (2001) Importance of the supratidal habitats for maintaining overwintering shorebird populations: How redshanks use tidal mudflats and adjacent saltworks in Southern Europe. *The Condor*, 103, 21–30.
- Masero JA, Pérez-Hurtado A, Castro M, Arroyo GM (2000) Complementary use of intertidal mudflats and adjacent salinas by foraging waders. *Ardea*, 88, 177–191.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Island Press, Washington, DC.
- Moreno S, Villafuerte R, Delibes M (1996) Cover is safe during the day but dangerous at night: The use of vegetation by European wild rabbits. *Canadian Journal of Zoology*, 74, 1656–1660.
- Mou XJ, Liu XT, Yan BX, Cui BS (2015) Classification system of coastal wetlands in China. *Wetland Science*, 13 (1), 19–26. (in Chinese with English abstract) [牟晓杰, 刘兴士, 阎百兴, 崔保山 (2015) 中国滨海湿地分类系统. 湿地科学, 13(1), 19–26.]
- Murray NJ, Phinn SR, DeWitt M, Ferrari R, Johnston R, Lyons MB, Clinton N, Thau D, Fuller RA (2019) The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565, 222–225.
- Peng HB, Anderson GQA, Chang Q, Choi CY, Chowdhury SU, Clark NA, Gan XJ, Hearn RD, Li J, Lappo EG, Liu WL, Ma ZJ, Melville DS, Phillips JF, Syroechkovskiy EE, Tong MX, Wang SL, Zhang L, Zöckler C (2017) The intertidal wetlands of southern Jiangsu Province, China—Globally important for spoon-billed sandpipers and other threatened waterbirds, but facing multiple serious threats. *Bird Conservation International*, 27, 305–322.
- Studds CE, Kendall BE, Murray NJ, Wilson HB, Rogers DI, Clemens RS, Gosbell K, Hassell CJ, Jessop R, Melville DS, Milton DA, Minton CD, Possingham HP, Riegen AC, Straw P, Woehler EJ, Fuller RA (2017) Rapid population decline

- in migratory shorebirds relying on Yellow Sea tidal mudflats as stopover sites. *Nature Communications*, 8, 14895.
- Tchabovsky AV, Krasnov B, Khokhlova IS, Shenbrot GI (2001) The effect of vegetation cover on vigilance and foraging tactics in the fat sand rat *Psammomys obesus*. *Journal of Ethology*, 19, 105–113.
- Tian Y, Luo L, Mao D, Wang Z, Li L, Liang J (2017) Using Landsat images to quantify different human threats to the Shuangtai Estuary Ramsar site, China. *Ocean & Coastal Management*, 135, 56–64.
- Van Gils JA, Battley PF, Piersma T, Drent R (2005) Reinterpretation of gizzard sizes of red knots world-wide emphasises overriding importance of prey quality at migratory stopover sites. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272, 2609–2618.
- Wan S, Qin P, Liu J, Zhou H (2009) The positive and negative effects of exotic *Spartina alterniflora* in China. *Ecological Engineering*, 35, 444–452.
- Yang HY, Chen B, Ma ZJ, Hua N, Van Gils JA, Zhang ZW, Piersma T (2013) Economic design in a long-distance migrating molluscivore: How fast-fuelling red knots in Bohai Bay, China, get away with small gizzards. *Journal of Experimental Biology*, 216, 3627–3636.
- Yang YX (2002) New knowledge on the progress of international wetland science research and priority field and prospect of Chinese wetland science research. *Advance in Earth Sciences*, 17, 508–514. (in Chinese with English abstract) [杨永兴 (2002) 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望. *地球科学进展*, 17, 508–514.]
- Zhang A, Yuan X, Yang X, Shao S, Li J, Ding D (2016) Temporal and spatial distributions of intertidal macrobenthos in the sand flats of the Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea in China. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 172–179.
- Zhang X, Hua N, Ma Q, Xue WJ, Feng XS, Wu W, Tang CD, Ma ZJ (2011) Diet of great knots (*Calidris tenuirostris*) during spring stopover at Chongming Dongtan, China. *Chinese Birds*, 2, 27–32.
- Zhang X, Hua N, Tang CD, Ma Q, Xue WJ, Wu W, Ma ZJ (2013) Food composition and sources of dunlins (*Calidris alpina*) at Chongming Dongtan: Stable isotope analysis. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 52, 112–118. (in Chinese with English abstract) [张璇, 华宁, 汤臣栋, 马强, 薛文杰, 吴巍, 马志军 (2013) 崇明东滩黑腹滨鹬 (*Calidris alpina*) 食物来源和组成的稳定同位素分析. *复旦学报(自然科学版)*, 52, 112–118.]
- Zheng GM (2012) *Ornithology*. Beijing Normal University Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2012) 鸟类学. 北京师范大学出版社, 北京.]
- Zheng GM (2017) *A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China*, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2017) 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 科学出版社, 北京.]
- Zhou B, Zhou LZ, Chen JY, Cheng YQ, Xu WB (2010) Diurnal time-activity budgets of wintering hooded cranes (*Grus monacha*) in Shengjin Lake, China. *Waterbirds*, 33, 110–115.

(责任编辑: 王勇 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 不同生境和季节鸻鹬鸟类的优势度

Appendix 1 The dominance index of shorebirds among different habitats and seasons in our study

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020189-1.pdf>

张菁, 白煜, 黄子强, 张正旺, 李东来 (2021) 盐地碱蓬盐沼与相邻泥质滩涂湿地迁徙期鸻鹬类的群落组成及行为差异. 生物多样性, 2021, 29(3): 351–360. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020189>

附录1 不同生境和季节鸻鹬鸟类的优势度

Appendix 1 The dominance index of shorebirds among different habitats and seasons in our study

物种 Species	优势度 Dominance degree (%)		
	总数量 Total numbers (mean ±SD)	春季 Spring (n = 11)	秋季 Autumn (n = 17)
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> saltmarsh			
大杓鹬 <i>Numenius madagascariensis</i>	9.28 ± 15.45	8.78	41.55
黑嘴鸥 <i>Saundersilarus saundersi</i>	7.93 ± 12.37	40.88	6.71
白腰杓鹬 <i>Numenius arquata</i>	9.07 ± 12.14	30.48	18.84
红嘴鸥 <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	1.93 ± 6.34	-	19.87
灰鸻 <i>Pluvialis squatarola</i>	3.57 ± 7.02	16.86	5.29
中杓鹬 <i>Numenius phaeopus</i>	0.96 ± 1.99	1.15	4
环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i>	0.61 ± 2.47	0.46	1.94
灰背鸥 <i>Larus schistisagus</i>	0.25 ± 0.84	-	0.9
斑尾塍鹬 <i>Limosa lapponica</i>	0.11 ± 0.42	0.69	-
金斑鸻 <i>Pluvialis fulva*</i>	0.11 ± 0.57	0.69	-
黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	0.11 ± 0.42	-	0.39
西伯利亚银鸥 <i>Larus smithsonianus</i>	0.11 ± 0.57	-	0.39
蛎鹬 <i>Haematopus ostralegus</i>	0.04 ± 0.19	-	0.13
泥质滩涂 <i>Mudflat</i>			
大滨鹬 <i>Calidris tenuirostris*</i>	11.04 ± 22.28	34.26	-
环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i>	51.89 ± 76.40	16.63	33.34
黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	31.04 ± 49.49	27.05	14.83
蛎鹬 <i>Haematopus ostralegus</i>	31.39 ± 51.38	0.89	20.73
黑嘴鸥 <i>Saundersilarus saundersi</i>	12.46 ± 17.31	6.43	6.59
大杓鹬 <i>Numenius madagascariensis</i>	7.18 ± 12.89	1.77	6.38
白腰杓鹬 <i>Numenius arquata</i>	7.29 ± 7.82	6.32	3.95
灰鸻 <i>Pluvialis squatarola</i>	4.79 ± 5.92	2.77	3.57
斑尾塍鹬 <i>Limosa lapponica</i>	1.46 ± 3.01	2.44	0.59

张菁, 白煜, 黄子强, 张正旺, 李东来 (2021) 盐地碱蓬盐沼与相邻泥质滩涂湿地迁徙期鸻鹬类的群落组成及行为差异. 生物多样性, 2021, 29(3): 351–360. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020189>

物种 Species	优势度 Dominance degree (%)		
	总数量 Total numbers (mean ±SD)	春季 Spring (n = 11)	秋季 Autumn (n = 17)
灰背鸥 <i>Larus schistisagus</i>	2.57 ±9.25	-	1.71
黑尾鸥 <i>Larus crassirostris</i> *	2.00 ±4.74	-	1.33
红嘴鸥 <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	2.00 ±4.10	-	1.33
青脚鹬 <i>Tringa nebularia</i> *	1.39 ±4.39	-	1.05
红脚鹬 <i>Tringa tetanus</i> *	1.43 ±3.14	0.10	0.88
尖尾滨鹬 <i>Calidris acuminata</i> *	1.18 ±5.86	-	0.74
西伯利亚银鸥 <i>Larus smithsonianus</i> *	1.11 ±3.74	-	0.74
泽鹬 <i>Tringa stagnatilis</i>	0.36 ±1.10	-	0.43
鹤鹬 <i>Tringa erythropus</i> *	0.61 ±2.36	-	0.40
中杓鹬 <i>Numenius phaeopus</i>	0.25 ±0.70	-	0.38
三趾滨鹬 <i>Calidris alba</i> *	0.54 ±2.83	-	0.36
金眶鸻 <i>Charadrius dubius</i> *	0.43 ±2.26	-	0.29
翻石鹬 <i>Arenaria interpres</i> *	0.25 ±0.70	0.22	0.14
翘嘴鹬 <i>Xenus cinereus</i> *	0.21 ±0.63	0.11	0.14
白额燕鸥 <i>Sternula albifrons</i> *	0.04 ±0.19	0.11	-
须浮鸥 <i>Chlidonias hybrida</i> *	0.07 ±0.38	-	0.05
红颈滨鹬 <i>Charadrius ruficollis</i> *	0.04 ±0.19	-	0.02
蒙古沙鸻 <i>Charadrius mongolus</i> *	0.07 ±0.26	-	0.02

*为只在该生境中记录到的物种; - 代表该生境该季节没有记录到该物种。

* means the species only recorded in this habitat; - means the habitat for which no species have been recorded in that season



•研究报告•

跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状

赵阳^{1,2,3}, 牛诚祎², 李雪健^{2,4}, 刘海波², 孙光³, 罗遵兰^{3*}, 赵亚辉^{ID2*}

1. 河北大学生命科学学院, 河北保定 071002; 2. 中国科学院动物研究所动物进化与系统学重点实验室, 北京 100101; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 4. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 汉江是南水北调中线工程和引汉济渭等跨流域调水工程重要的水源区, 了解其鱼类多样性的现状及变化对于水生态保护尤为重要。作者于2016–2017年间对汉江洋县段干流与6条主要支流的鱼类多样性组成进行了两次调查, 以Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Jaccard相似性系数对洋县境内7条河流进行评估, 同时通过相对重要性指数(index of relative importance, *IRI*)判定优势种, 利用鱼类丰度生物量(abundance biomass comparison, *ABC*)曲线分析鱼类受干扰情况。结合历史记录, 调查区域内共分布有土著鱼类76种, 隶属于6目14科57属, 以鲤形目鲤科和鲇形目鲿科鱼类为主, 分别占土著鱼类总数的57.89%和11.84%; 珍稀濒危鱼类共计5种, 包括3种国家级保护水生野生动物。鱼类多样性分析结果显示汉江干流的丰富度指数和多样性指数显著高于6条支流。7条河流的*IRI*指数显示优势种为宽鳍鱮(*Zacco platypus*)。ABC曲线显示目前调查区域内鱼类小型化现象明显、鱼类受到较严重干扰。水利水电工程建设对于调查区域鱼类多样性影响最大, 干流大型水库(大坝)通过改变原有流水生境、阻断河流纵向连通性、淹没重要鱼类产卵场等对鱼类多样性和群落组成产生不利影响; 支流引水式的中小型电站造成下游河段减、脱水而使河道发生断流以及生境破碎化, 从而威胁土著鱼类的生存。在跨流域调水过程中, 应重视不同水系鱼类引入的潜在生态风险。对引汉济渭工程的水源区鱼类多样性现状的调查, 有助于未来跨流域调水过程中鱼类变化的动态监测和外来物种的预警。

关键词: 淡水鱼类; 大坝; 引汉济渭; 保护; 长江

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29, 361–372. doi: 10.17520/biods.2020158.

Zhao Y, Niu CY, Li XJ, Liu HB, Sun G, Luo ZL, Zhao YH (2021) Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer. Biodiversity Science, 29, 361–372. doi: 10.17520/biods.2020158.

Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer

Yang Zhao^{1,2,3}, Chengyi Niu², Xuejian Li^{2,4}, Haibo Liu², Guang Sun³, Zunlan Luo^{3*}, Yahui Zhao^{ID2*}

1 College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002

2 Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

4 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

ABSTRACT

Aims: The Hanjiang River is an important water source of the Middle Route Scheme of South-North Water Diversion Project and Hanjiang to Weihe River Inter-basin Water Transfer Project. It is necessary to understand the current status and changes of fish species diversity for future conservation of aquatic ecosystem.

Methods: In order to investigate the fish diversity and resource status in Yangxian section of the Hanjiang River, we

收稿日期: 2020-04-20; 接受日期: 2020-07-04

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)、中国生物多样性监测与研究网络-内陆水体鱼类多样性监测专项网(Sino BON - Inland Water Fish Diversity Observation Network)和国家科技基础资源调查专项(2019FY101800)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zhaoyh@ioz.ac.cn; luozunlan@163.com

surveyed the fish diversity of main stream and six tributaries twice from 2016 to 2017. The indices of Margalef, Shannon-Wiener, Pielou's, and Jaccard were used to evaluate the main streams and branches in Yangxian County. The index of relative importance (*IRI*) was calculated to determine the dominant species, and the abundance biomass comparison (*ABC*) was used to analyze the interference to fish.

Results: With historical data, our survey showed that this section of the river has 76 native species belonging to 57 genera, 14 families, and 6 orders. Fishes from Cyprinidae and Bagridae are dominant, accounting for 57.89% and 11.84% of the total number of native species, respectively. There are five endangered species, and three of them are classified as National Protected Wild Animals in China. The results of fish diversity analysis showed that the richness index and diversity index of the main stream of the Hanjiang River were significantly higher than those of the six tributaries. *IRI* index showed that the dominant species was *Zacco platypus*. An analysis of the *ABC* curve indicated that the fish community has been seriously disturbed.

Conclusion: Water conservancy and hydropower projects are the main influences that were correlated with a decrease of fish diversity and populations. The construction of large dams on the main stream will change the habitat from flowing water to still water, and disrupt the connection between upper and lower streams, and cause the disappearance of spawning grounds. Small-sized hydropower stations on the river branches will reduce the water of downstream affecting the fish populations. The inter-basin water transfer project has the potential possibility to introduce fish species from different river systems. Our study provides basic data for the dynamic monitoring of fish diversity and an early warning of invasive species during the construction of the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project.

Key words: freshwater fishes; dams; Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project; conservation; Yangtze River

汉江属于长江水系，是长江最大的一级支流。汉江源自陕西省宁强县，途经勉县、汉台、南镇、城固、洋县等地，最终从湖北省武汉市汇入长江，全长共1,577 km，总流域面积 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ (景朝霞等, 2019)。汉江流域是中国南北气候过渡带和中西部的生态走廊，也是长江经济带的重要组成部分，区位优势十分明显(王学雷和宋辛辛, 2019)。汉江水资源非常丰富，其支流多达340条，是国家南水北调中线调水工程和引汉济渭重要的水源地，水生态的保护和开发受到极大重视，其生态环境问题对于我国社会经济发展具有举足轻重的战略地位(张海斌等, 2006; 王学雷和宋辛辛, 2019)。

汉江洋县段位于丹江口水库以上，属汉江上游，地处陕西省，北靠秦岭，南邻巴山。洋县境内河流众多，汉江干流自西向东穿越其境，境内长度约87 km，天然落差84.5 m，年径流量 $7.159 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。干流沿途分出许多支流(如渭水河、溢水河、倪水河、酉水河、金水河、子午河等)，支流多呈平行状，南北走向，汇入汉江(陈章存等, 1991)。洋县境内有两个自然保护区：陕西汉中朱鹮自然保护区和长青国家级自然保护区，酉水河和渭水河两河部分流域分布在两个保护区内。汉江洋县段鱼类多样性十分丰富，具有典型代表性，且对丹江口水库以上汉江上游水域的生态安全有重要的指示意义(卢金友和林

莉, 2020)。然而关于汉江洋县段鱼类多样性组成的研究或报道十分零星，有些调查时间比较久远，如1959–1979年间陕西省动物研究所和中国科学院水生生物研究所对秦岭部分地区做了鱼类调查，随后于1987年出版的《秦岭鱼类志》中对汉江洋县段的鱼类略有涉及(陕西省动物研究所等, 1987)。其他一些研究工作也只涉及酉水河和渭水河(王开锋等, 2003; 王启军等, 2012)，缺乏鱼类多样性和鱼类资源数据。

此外，汉江洋县段的黄金峡水利枢纽不但是汉江干流梯级电站的第一级，同时也是引汉济渭的枢纽工程，其建设可能产生的生态影响亟需引起关注。因此作者于2016–2017年间，针对汉江洋县段及其附属支流的鱼类多样性和资源现状进行了完整系统地专项调查，并对鱼类多样性现状和分布进行了分析，以期对鱼类资源保护，以及有效开展河流管理提供参考指导作用；汉江洋县段作为引汉济渭水源地之一，鱼类群落结构和多样性的调查结果将从侧面反映河流健康状况，为水环境监测提供参考；同时为监测跨流域调水工程和水利工程建设对水生生态的影响提供基础数据，对评估跨流域调水的生态风险和对鱼类多样性潜在影响具有一定参考作用。

1 材料与方法

1.1 样本采集

2016年11月和2017年4月, 根据从洋县水利局获取的县域水系图和河流基本状况等调查材料, 在洋县境内的汉江干流和6条支流(金水河、西水河、饶水河、溢水河、坪堵河、湑水河)共设置样点25个(图1), 每次调查持续约1个月。采用地笼和挂网实地捕捞, 挂网的网长为30 m, 网高为1.2 m, 网目规格为1 cm, 每个样点放置1张挂网, 采样时间为12 h; 地笼长3.8 m, 宽0.25 m, 高0.2 m, 每个样点放置3个地笼, 采样时间为12 h。捕捞的鱼类部分放归河流, 其余采用无水乙醇或10%福尔马林固定。同时访问渔民、市场、餐馆等有鱼类交易和消费的地方, 收集鱼类样本。鱼类标本在实验室进行鉴定, 主要依据《中国动物志》鱼类已出版各卷册(陈宜瑜, 1998; 褚新洛等, 1999; 乐佩琦, 2000; 伍汉霖和钟俊生, 2008)、《中国鲤科鱼类志》(上、下卷)(伍献文, 1981, 1982)和《秦岭鱼类志》(陕西省动物研究所等, 1987); 鱼类分类系统及物种最新有效名称依据《中国内陆鱼类物种与分布》(张春光和赵亚辉, 2016)。标本编号后全部保藏于中国科学院动物研究所国家动物博物馆鱼类标本馆内。同时, 作者对中国科学院动物研究所鱼类标本馆中分布于该区域的鱼类历史采集记录进行了收集整理。

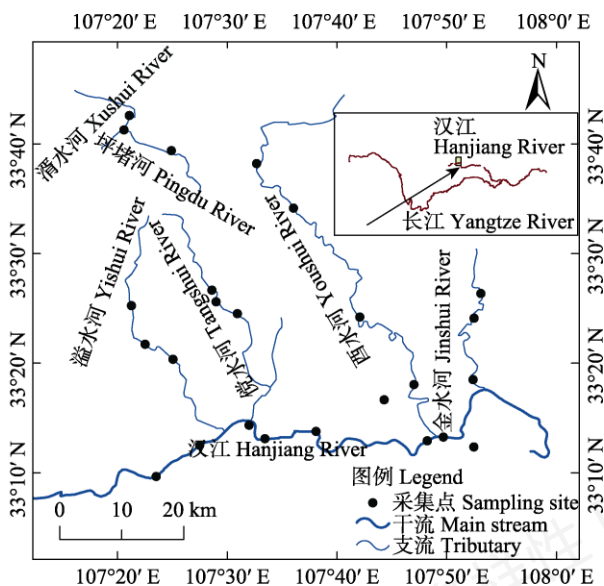


图1 汉江洋县段鱼类采集点分布图
Fig. 1 Sampling sites in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

1.2 数据分析

1.2.1 群落多样性分析

采用Margalef丰富度指数(D)(Margalef, 1958)、Shannon-Wiener多样性指数(H')(Parry et al, 1984)、Pielou均匀度指数(E)(Blanchard et al, 2004)、Jaccard相似性系数(q)(陈小华等, 2008)对鱼类群落多样性进行分析, 各指数计算公式如下:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = H' / \ln S \quad (3)$$

$$q = c / (a + b - c) \quad (4)$$

式中, S 为野外采集鱼类总种数, N 为野外采集鱼类总个体数, P_i 为第 i 种鱼类的个体数占鱼类总数的比例, a 是A群落的物种数, b 是B群落的物种数, c 是A、B两个群落共有的物种数, 当 q 值处于0–0.25之间时, 表明群落极不相似; 处于0.25–0.5时为中等不相似; 0.5–0.75时为中等相似; 0.75–1.00时为极相似。

在计算鱼类丰富度、多样性和均匀度指数时, 以土著鱼类为基础, 外来物种不计。

1.2.2 优势种

通过种类相对重要性指数(index of relative importance, IRI)(Pinkas et al, 1970)判定群落优势种, 公式如下:

$$IRI = (C\% + W\%) \times F\% \times 10^4 \quad (5)$$

式中, $C\%$ 为某种鱼类数量占采集鱼类总数的百分比, $W\%$ 为某种鱼生物量占总采集鱼类生物量的百分比, $F\%$ 为某种鱼出现的频率。以 $IRI > 1,000$ 的作为优势种; IRI 在100–1,000的为重要种; IRI 在10–100的为常见种; IRI 在1–10的为一般种; $IRI < 1$ 的为少见种(林小植等, 2016)。

1.2.3 丰度生物量曲线(ABC曲线)

ABC曲线(abundance biomass comparison curve)可以对鱼类群落受外界干扰的情况进行评价^①。该曲线由数量优势度和生物量优势度2条曲线组成, 2条曲线与坐标轴所围面积的差值称为 W 值。 W 为正值时, 鱼类群落未受干扰; W 趋于0时, 鱼类群落处于中度干扰; W 为负值时, 鱼类群落处于严重干扰

① 孙莎莎 (2013) 最近10年长江靖江沿岸鱼类群落特征的时间格局研究. 硕士学位论文, 上海海洋大学, 上海.

状态^①。计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{X_i - Y_i}{50 - (S - 1)} \quad (6)$$

式中, X_i 和 Y_i 是ABC曲线中种类序号对应的生物量和数量累积百分比, S 是出现物种数。

通过SPSS 20.0软件进行文中相关数据的统计检验, 采用单因素方差分析检验鱼类多样性指数和优势种在季节间的差异。

1.2.4 生态类型与食性划分

将调查区域内鱼类的生态类型按栖息空间划分为中上层、近底层和底层^①, 按食性分为肉食性、植食性和杂食性(附录1)。

2 结果

2.1 鱼类物种组成

调查共采集鱼类标本53种2,589尾, 隶属4目11科43属, 结合馆藏历史标本及相关文献, 研究区域计有鱼类78种, 隶属于6目14科58属(附录1)。野外调查在酉水河捕获丁鲷(*Tinca tinca*), 其在中国的自然分布区为新疆额尔齐斯河流域, 当地村民解释是2011年发大水冲毁鱼池后外逃入酉水河的; 此外, 捕获的鱼类中钝吻棒花鱼(*Abbottina obtusirostris*)分布于长江上游(张春光和赵亚辉, 2016), 在这一地区应无自然分布。因此去除以上两种鱼类之后, 土著鱼类有76种, 隶属于6目14科57属。

从目级水平分析, 鲤形目鱼类有3科37属52种, 占总种数的68.42%; 其次是鲇形目, 为4科7属13种, 占总种数的17.11%; 鲈形目为4科4属7种, 占总种数的9.21%; 鲑形目为1科2属2种, 占总种数的2.63%; 合鳃鱼目和鳗鲡目均为1科1属1种, 各占总种数的1.32%。科级水平上表现出了较高的多样性, 共有14科, 其中鲤科占主体部分, 共44个种, 占土著鱼类总种数的57.89%; 其次是鳢科, 共9个种, 占总种数的11.84%; 花鳅科共6个种, 占总种数的7.89%; 虾虎鱼科共3个种, 占总种数的3.95%; 条鳅科、鲃科、鲑科和脂鲈科均有2个种, 各占总种数的2.63%; 钝头鮠科、鮡科、合鳃鱼科、沙塘鳢科、鳢科和鳗鲡科均有1个种, 各占总种数的1.32%。

在我国鲤科鱼类12个亚科中, 调查区域分布有

10个亚科, 其中鮡亚科包含物种数最多, 有12属16种, 占鲤科总数的36.36%; 其次是鮠亚科, 有9属11种, 占总数的25%; 鱮亚科2属4种, 占总数的9.09%; 雅罗鱼亚科3属3种, 占总数的6.82%; 鲟亚科、鲃亚科、鲢亚科和鲤亚科均为2属2种, 各占总数的4.55%; 鲃亚科和鳅鲃亚科均有1属1种, 各占2.27%。缺少主要分布于青藏高原的裂腹鱼亚科和主要分布于东洋区的野鲮亚科的种类。

2.2 鱼类群落多样性

2.2.1 鱼类群落多样性指数的空间变化

汉江洋县段干流的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数最高, 分别是6.91、3.03和0.79, 金水河和酉水河次之。溢水河、倪水河、涪水河和坪堵河4条支流的丰富度和多样性指数都处于较低的水平, 相差不明显。所有河流的均匀度指数都处于相近的水平, 差别较小(图2a)。

2.2.2 鱼类群落多样性指数的季节变化

鱼类群落多样性指数在春季和秋季间表现出了一定的差异(图2), 涪水河与坪堵河春季未进行鱼类采集, 无法进行季节比较。汉江干流秋季的丰富度指数和多样性指数都要高于春季; 金水河与溢水河春季高于秋季, 其他支流秋季高于春季。所有河流春秋两季的均匀度指数间没有显著差异($P = 0.077, > 0.05$)。

综合干流和支流分析, 所有河流春秋两季的物种丰富度间都无显著差异($P = 0.784, > 0.05$), 多样性指数在两季节间也无显著差异($P = 0.838, > 0.05$), 说明鱼类多样性的季节分布无明显区别(图2)。

2.3 不同河流鱼类群落的Jaccard相似性系数

在计算鱼类相似性系数时, 以野外采集获得的土著鱼类为基础, 外来物种不计入内。洋县汉江干流以及其他支流的相似性系数见表1, 倪水河和溢水河的鱼类相似性系数最高, 为0.71, 倪水河与酉水河、涪水河与坪堵河的鱼类相似性系数在0.5–0.75, 为中等相似, 溢水河、涪水河和坪堵河3条支流与汉江干流的鱼类相似性系数均 < 0.25 , 为极不相似, 其余所有河流之间的相似性系数在0.25–0.5范围内, 即中等不相似。

2.4 鱼类优势种分析

野外调查采集的土著鱼类中只有宽鳍鱮(*Zacco platypus*)是优势种(IRI 为1,031.97)(表2), 短须颌须

^① 肖文磊 (2016) 仙女湖鱼类群落特征及鱼产潜力分析. 硕士学位论文, 南昌大学, 南昌。

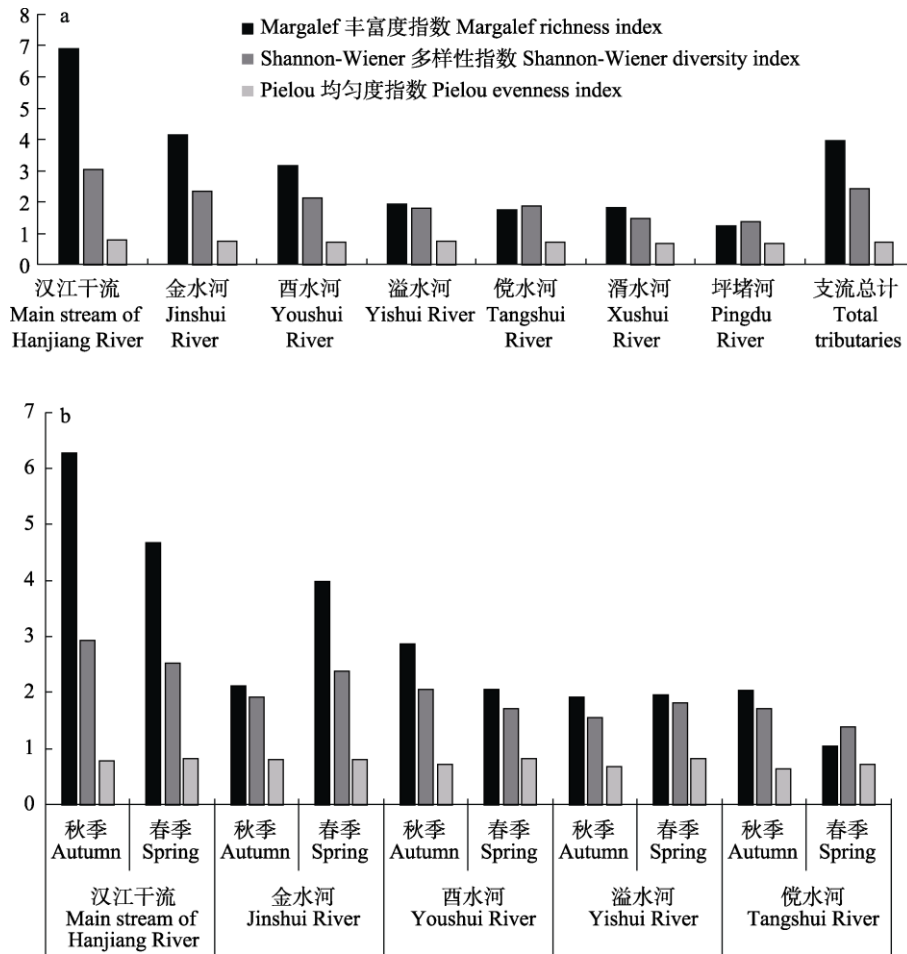


图2 汉江洋县段各河流鱼类群落多样性(a)及鱼类群落多样性的季节变化(b)

Fig. 2 Fish diversity of different rivers (a) and seasonal variation of fish diversity of different rivers (b) in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

表1 汉江洋县段各河流鱼类的Jaccard相似性系数

Table 1 The Jaccard similarity coefficient in different rivers in the Yangxian section of the Hanjiang River

	酉水河 Youshui River	溢水河 Yishui River	傥水河 Tangshui River	涪水河 Xushui River	坪堵河 Pingdu River	汉江 Hanjiang River
金水河 Jinshui River	0.48	0.26	0.33	0.33	0.25	0.41
酉水河 Youshui River		0.39	0.50	0.32	0.35	0.32
溢水河 Yishui River			0.71	0.33	0.29	0.19
傥水河 Tangshui River				0.47	0.43	0.26
涪水河 Xushui River					0.60	0.15
坪堵河 Pingdu River						0.10

鮡 (*Gnathopogon imberbis*)、马口鱼 (*Opsariichthys bidens*)、似鮡 (*Pseudogobio vaillanti vaillant*)、拉氏鱮 (*Phoxinus lagowskii*)、大斑花鳅 (*Cobitis macrostigma*)、乐山小鰾鮡 (*Microphysogobio kiatingensis*)和银鮡 (*Squalidus argentatus*)为重要种。

调查区域洋县鱼类优势种和重要种的季节变

化差异不显著 ($P = 0.169, > 0.05$) (表2), 秋季优势种是宽鳍鱮和短须颌须鮡, 春季优势种是马口鱼。

汉江干流以及6条主要支流的鱼类优势种见表3。干流没有优势种, IRI值最高的是银鮡, 是汉江干流重要种。金水河优势种有3种, 分别是似鮡、宽鳍鱮和马口鱼; 溢水河优势种有4种, 分别是大斑花

表2 汉江洋县段鱼类优势种和重要种的季节变化
Table 2 Seasonal variation of fish dominant species and important species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

物种 Species	相对重要性指数 Index of relative importance (IRI)		
	总计 Total	秋季 Autumn	春季 Spring
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	1,031.97	1,952.15	–
短须颌须鮠 <i>Gnathopogon imberbis</i>	918.31	1,279.67	383.99
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	761.68	632.14	1,151.37
似鮠 <i>Pseudogobio vaillanti vaillanti</i>	588.57	968.44	–
拉氏鲮 <i>Phoxinus lagowskii</i>	263.62	459.69	–
乐山小鲮 <i>Microphysogobio kiatingensis</i>	234.78	389.86	–
银鮠 <i>Squalidus argentatus</i>	148.60	340.77	–
大斑花鮠 <i>Cobitis macrostigma</i>	239.22	236.36	270.79
花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	–	144.64	–
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	–	122.10	–
圆吻鲴 <i>Distoechodon tumirostris</i>	–	117.47	–
鲫 <i>Carassius auratus</i>	–	113.58	–
尖头鮠 <i>Culter oxycephalus</i>	–	–	172.79
多鳞白甲鱼 <i>Onychostoma macrolepis</i>	–	–	169.57
神农吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius shennongensis</i>	–	–	163.97
鲇 <i>Silurus asotus</i>	–	–	103.77

鳅、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、稀有花鳅(*Cobitis rarus*)和短须颌须鮠; 浠水河优势种有5种, 分别是短须颌须鮠、宽鳍鱮、拉氏鲮、似鮠和马口鱼; 酉水河优势种有4种, 分别是马口鱼、似鮠、宽

表3 汉江洋县段鱼类优势种的空间变化
Table 3 Spatial variation of dominant fish species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

物种 Species	相对重要性指数 Index of relative importance (IRI)						
	汉江 Hanjiang River	金水河 Jinshui River	溢水河 Yishui River	浠水河 Tangshui River	酉水河 Youshui River	涪水河 Xushui River	坪堵河 Pingdu River
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	–	1,775.83	–	1,904.29	1,312.76	7,872.73	4,161.01
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	–	1,013.00	–	1,237.04	5,750.20	–	–
拉氏鲮 <i>Phoxinus lagowskii</i>	–	–	–	1,806.22	–	–	6,876.49
银鮠 <i>Squalidus argentatus</i>	859.67	–	–	–	–	–	–
似鮠 <i>Pseudogobio vaillanti vaillanti</i>	–	2,039.71	–	1,478.20	1,895.42	–	5,129.72
短须颌须鮠 <i>Gnathopogon imberbis</i>	–	–	1,172.40	3,290.10	1,303.19	6,877.97	1,148.46
红尾荷马条鳅 <i>Homatula variegata</i>	–	–	–	–	–	1,995.12	–
大斑花鳅 <i>Cobitis macrostigma</i>	–	–	6,300.01	–	–	–	–
稀有花鳅 <i>Cobitis rarus</i>	–	–	1,488.03	–	–	–	–
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	–	–	1,571.80	–	–	–	–

鳍鱮和短须颌须鮠; 涪水河优势种共3种, 分别是宽鳍鱮、短须颌须鮠和红尾荷马条鳅(*Homatula variegata*)。坪堵河优势种有4种, 分别是宽鳍鱮、拉氏鲮、似鮠和短须颌须鮠。

2.5 鱼类体重分布及生态习性

图3显示渔获物中体重< 10 g的物种在数量上具有极大的优势, 占总数量的84.28%, 其次是体重为10–100 g的物种。体重为10–100 g的物种在生物量方面具有主要优势, 占总体重的44.49%。表明调查区域的鱼类主要以中小型鱼类为主, 例如宽鳍鱮、拉氏鲮、短须颌须鮠等。

从图4a可以看出, 7条河流中主要以栖息于中下层和底层的鱼类为主。其中共5种鱼类属于中上层栖息鱼类, 占总体的9.80%; 26种鱼类属于近底层栖息鱼类, 占总体的50.98%; 20种鱼类属于底层栖息鱼类, 占总体的39.22% (附录1)。从图4b可以看出, 7条河流中植食性鱼类普遍较少, 其余河流中仅汉江干流和酉水河中肉食性鱼类多于杂食性鱼类。共24种鱼类属于肉食性为主的鱼类, 占总体的47.06%; 7种属于植食性为主的鱼类, 占总体的13.73%; 20种属于杂食性鱼类, 占总体的39.22% (附录1)。

2.6 ABC曲线

从图5可以看出, 总体、秋季、春季鱼类群落ABC曲线中, 物种丰度曲线均在生物量曲线之上, 并且W值都小于0, 表明调查区域整体鱼类群落受到严重干扰, 秋季和春季鱼类也受到不同程度的干扰。

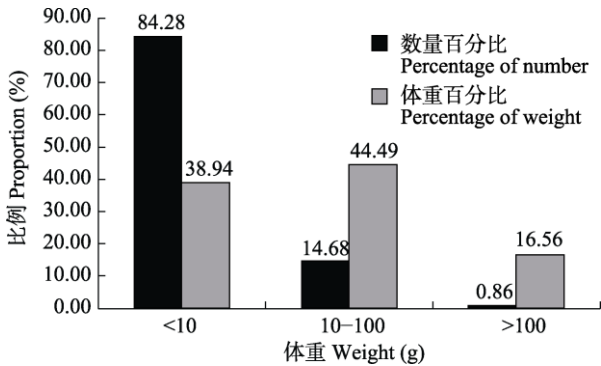


图3 汉江洋县段不同体重范围鱼类的数量和重量占总数量和总体重的比例

Fig. 3 The proportion of fish quantity and weight to total quantity and weight in different weight ranges in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

3 讨论

3.1 鱼类物种组成与多样性

3.1.1 区系组成

汉江洋县段共有土著鱼类76种, 占汉江上、中游鱼类总数的72.38%; 其中鲤科鱼类占土著鱼类总数的57.89%, 与汉江上、中游鲤科鱼类占比60%的结果非常接近(陕西省动物研究所等, 1987), 这充分反映出汉江洋县段具有很高的流域代表性。整个汉

江水系分布有鲤科鱼类12个亚科中的11个(陕西省动物研究所等, 1987), 而在调查区域中, 除裂腹鱼亚科在调查中没有发现外, 其余10亚科的鱼类均有记录(附录1)。此外, 汉江洋县段还是整个秦岭地区鱼类区系的一个缩影, 除鲮形目外(秦岭只分布有青鲮(*Oryzias latipes*) 1种), 研究区域包含了秦岭地区鱼类的其他所有目(陕西省动物研究所等, 1987)。秦岭地区分布的一些重要鱼类在调查区域都有分布, 如川陕哲罗鲑(*Hucho bleekeri*)、秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)等。

从区系组成上看, 汉江洋县段的鱼类属于长江中游鱼类区系, 但与邻近水系相比还存在一定的差异性。例如相较嘉陵江水系, 此处缺乏裂腹鱼亚科和野鲮亚科的种类, 但分布于大渡河、岷江上游的川陕哲罗鲑在此处分布而不见于嘉陵江水系; 像神农吻虾虎鱼(*Rhinogobius shennongensis*)等种类, 则只见于本水系(张春光和赵亚辉, 2016)。而同汉江中游的鱼类组成相比, 调查区域缺乏平鳍鳅科、钝头鮠科、银鱼科、刺鳅科、斗鱼科等鱼类(李修峰等, 2005), 但如前文提到的川陕哲罗鲑、秦岭细鳞鲑等, 则主要分布于此处的支流中。

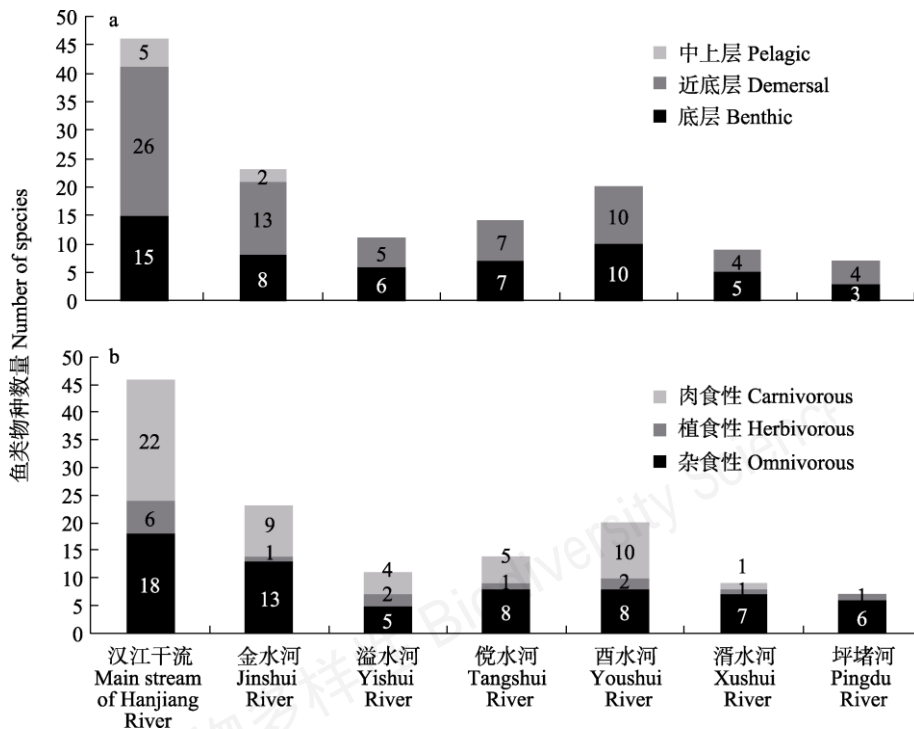


图4 汉江洋县段各河流鱼类按栖息空间以及食性划分的生态习性

Fig. 4 Ecological habits of fish in the Yangxian section of the Hanjiang River basin by habitation space and food preference

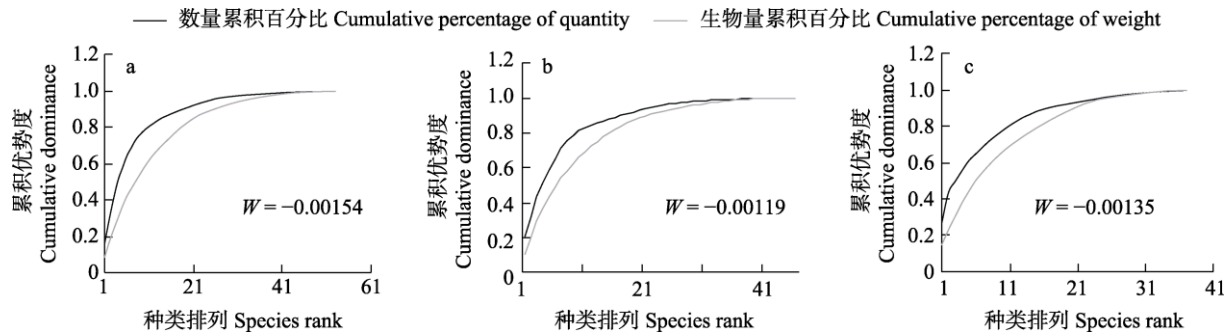


图5 汉江洋县段鱼类丰度生物量曲线。a: 鱼类总体; b: 秋季鱼类; c: 春季鱼类。

Fig. 5 Plot abundance biomass comparison of fish in the Yangxian section of the Hanjiang River basin. A, Fish population; B, Fish in autumn; C, Fish in spring.

3.1.2 珍稀濒危鱼类组成

调查区域内分布有国家I级重点保护水生野生动物川陕哲罗鲑以及国家II级重点保护水生野生动物秦岭细鳞鲑和多鳞白甲鱼 (*Onychostoma macrolepis*), 土著鱼类名录中, 在《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)中被评定为极危(CR)的有1种, 即川陕哲罗鲑; 被评定为濒危(EN)的有3种, 分别是秦岭细鳞鲑、日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)和神农吻虾虎鱼; 被评定为易危(VU)的1种, 为多鳞白甲鱼。合计属于受胁物种范畴的鱼类5种, 占土著鱼类总数的6.58%。评定为无危的共有57种, 占总数的75%; 数据缺乏的共12种, 占总数的15.79%; 还有2种在红色名录中未被提及(附录1)。

总体上看, 濒危鱼类所占比例较低, 只占土著鱼类总数的6.58%, 这一数字远低于中国整体受胁淡水鱼类的比例(20.44%) (曹亮等, 2016)。但从区域上看, 整个长江中下游共有受胁物种28种, 汉江洋县段就占了其中的17.86%, 而汉江洋县段的流域面积则只占到长江中下游流域面积的0.4%左右。另外, 尽管调查区域的珍稀濒危鱼类只有5种, 但其中的川陕哲罗鲑、秦岭细鳞鲑和多鳞白甲鱼均被列入了《国家重点保护野生动物名录》中。同时也要看到, 数据缺乏或未被评估的物种也占到了当地土著鱼类总数的18.42%, 说明相当比例的物种其种群现状和受胁状态是我们所不了解的, 在后续的研究中应作为调查重点。

3.1.3 鱼类多样性现状

总体上看, 目前洋县鱼类区系组成相对完整, 且覆盖了绝大多数目、科和亚科, 同中国很多河流相比, 鱼类多样性现状比较良好。

从调查鱼类的优势种组成可以看出, *IRI*指数最

高的是宽鳍鱮(表2)。虽然不同季节不同河流的优势种不同, 但是多数物种都属于小型鱼类。从ABC曲线中(图5)可以看出, 总体上生物量曲线始终位于数量曲线之下, *W*为负数, 说明河流稳定性低, 受干扰严重, 且鱼类个体普遍较小。春秋两季的ABC曲线走势相同, 春季*W*值小于秋季, 说明春季的鱼类更偏小型化。渔获物体重分布也显示出同样趋势(图3), 说明汉江洋县段的鱼类小型化严重, 其中杂食性鱼类数量较多, 这些都是水体质量下降的表现。鱼类的小型化也与人为过度捕捞有关, 野生鱼类面临严重的捕捞压力, 而水生态恢复时期较短, 导致鱼类小型化问题越来越严重。不容忽视的是鱼类小型化的结果与调查过程中使用的渔具也存在一定关系, 地笼和挂网不易捕捞到体型较大的鱼类, 会对结果产生一定的影响。

根据《水生生物监测手册》(国家环保总局, 1992)中Shannon-Wiener多样性指数(*H'*)的分级评价标准, 汉江的*H'* > 3, 表示个体分布均匀, 水体清洁; 金水河和酉水河的*H'*介于2和3之间, 说明两个支流的个体分布比较均匀, 水体轻度污染; 其余4条支流的多样性指数介于1和2之间, 表明个体分布比较均匀, 水体中度污染。

王卓等(2019) 2016年春季在汉江上游平川段调查到鱼类29种, 数量上占优势的鱼类是鲤科和花鳅科, 分别占总数的72.41%和17.24%。我们在汉江洋县段干流共采集鱼类46种, 其中春季采集22种, 秋季41种, 与王卓等(2019)在汉江上游的调查结果相近, 春季鱼类种类较少, 说明汉江干流在不同季节鱼类组成有很大的不同, 通常春季物种丰富度低于秋季。

3.1.4 多样性的空间差异

洋县境内水系以东西走向的汉江干流为主, 还有多条以南北走向为主的支流, 造成鱼类多样性在空间上的分布不均。从鱼类物种组成和多样性分析结果(图2)可以看出, 汉江干流和支流的区别较大。支流鱼类物种数是干流的67.39%; 而干支流共有物种25种, 只占到调查鱼类总数的49.01%。干流与各支流的相似性系数在0-0.50范围内(表1), 相似性较低, 这一特点与干、支流不同的生态环境有关。干流河道宽阔, 地势相对平缓, 流速较低, 水资源丰富, 给鱼类提供了多样的栖息环境, 而众多支流多属山涧溪流, 河道普遍较浅并狭窄, 蜿蜒曲折, 落差较大, 更适合小型鱼类生存。此外, 尽管支流的物种数量不高, 但却分布有很多珍稀濒危物种, 例如列入保护名录的川陕哲罗鲑和秦岭细鳞鲑, 只局限分布于干流北侧支流的上游。干、支流在鱼类多样性组成上的差异对于未来流域鱼类多样性保护将有重要意义。

渭水中下游区段在洋县境内分布, 坪堵河是渭水河的支流, 河流总长较短。由于渭水河上游建有多级小型水电站, 造成中下游水资源匮乏, 洋县段水资源主要用作农业灌溉, 农业利用会造成水生生态恶化, 导致对鱼类资源的严重破坏, 所以两条河流鱼类物种数在所有支流中是最少的, 且数量相近, 物种相似性属于中等相似范畴(表1)。其余4条支流, 鱼类物种数从西至东逐渐增加, 物种越来越多样化, 其中溢水河与倪水河的相似性系数最高(0.71), 属于中等相似范围, 剩余支流间相似性系数较低, 均属于中等不相似范围。

3.1.5 鱼类群落结构的空间差异

鱼类群落结构在空间上呈现明显横向分布特征, 从坪堵河至金水河, 鱼类群落结构逐渐变化(图4)。汉江干流以肉食性近底层鱼类为主, 渭水河和溢水河主要以杂食性底层鱼类为主, 坪堵河和金水河以杂食性近底层鱼类为主, 倪水河和酉水河近底层鱼类和底层鱼类占比相同, 倪水河以杂食性鱼类为主, 酉水河以肉食性鱼类为主, 可以看出, 大多数支流都是以杂食性鱼类为主, 人为活动造成水域质量下降, 进而影响杂食性鱼类比例, 汉江干流和酉水河是肉食性鱼类为主, 说明受人类活动影响较小, 水域质量相对良好。

3.2 鱼类多样性面临水利水电工程的影响

调查区域多为山地, 河流密集, 且水量多、落差大, 特别是支流水利水电工程密集。据当地水利局提供的资料, 县域内共有各种类型水库89个。

汉江上游干流已修建了一系列梯级电站, 目前洋县境内的汉江干流尚未建设有大型的水电站, 但规划建设的黄金峡水利枢纽是整个汉江干流的第一梯级电站, 向下衔接石泉电站(水库)。同时黄金峡水利枢纽也是引汉济渭工程的两个水源之一, 工程以供水为主, 兼顾发电及航运等综合效益(毛拥政, 2014)。黄金峡水利枢纽坝址位于石泉水库库尾下游2 km处, 未来水利枢纽建成后, 将和黄金峡下游的一系列梯级水库构成首尾相连的水库群, 从整体上改变整个汉江干流上游原有的水域生态环境, 原先的流水生境转变为以静水生境为主的水库水体。栖息环境的剧烈变化将直接影响原有河流的鱼类群落组成, 使得一些适应流水生境的鱼类种群数量降低, 甚至有些鱼类会逐渐退出原先栖居的河段; 取而代之的将以静水为适宜生境的种类。同时形成的水库环境, 若配合不适当的养殖引种, 将为外来物种的泛滥形成条件。黄金峡河段是汉江上游传统的渔业产区, 还是鱼类重要的产卵场所, 分布有相连的家鱼产卵场。历史调查得知, 峡内的大瓦滩、长新滩、黄龙滩等都是鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等重要家鱼的产卵场(范维端, 1986)。这些产漂流性卵的鱼类, 需要较长的流水河段供受精卵在漂流过程中逐渐发育孵化, 目前下游的一系列水库已经对这些产漂流性卵鱼类的生存产生严重威胁。未来一旦黄金峡水库形成, 流水河段进一步消失, 将使得这些重要经济鱼类的野生种群彻底从区域内消失。此外建成的大坝还会阻碍上下游鱼类之间的交流, 并深刻改变固有的一些水文条件, 变化的水温、流速和流量等都会影响鱼类的产卵繁殖。因此设计规划过鱼设施(张鹏利等, 2017)、进行流域尺度的梯级水库生态流量调节(汪登强等, 2019; 马雅丽和彭昆, 2020), 以及珍稀濒危鱼类的增殖放流都将是未来工程建设中重要的补偿机制。

在支流上, 目前已建设有众多的中小型电站(如倪河水电站、酉河水电站等), 这些小水电站是造成支流鱼类多样性和鱼类资源下降的主要原因。例

如金水河上游的3个水电站都是引水式水电站,这类水电站除了破坏河流纵向连通性,使得生境片段化之外,还会在下游形成减水或脱水河段,有时很长一段河道呈现干涸状态。支流本身流程较短,生活的多是一些定居性鱼类,水体生境的彻底消失将直接威胁支流生活的众多小型鱼类。因此科学合理地泄放生态流量,特别是在鱼类繁殖季节保证河道不断流,对于支流土著鱼类的保护至关重要。此外洋县的若干支流是川陕哲罗鲑和秦岭细鳞鲑等保护物种的重要栖息地,这些鱼类对环境的需求高,除了需要富氧的流水生境外,水质还要保持清洁,目前调查区域内的很多支流现况已经很难满足这样的环境条件,应加以高度重视。

前已述及,干流和支流在鱼类物种组成上存在较大差异,且支流水环境由于众多小水电站的存在而高度破碎化,因此支流很难作为干流鱼类的替代生境;干流环境破坏后,一些原先在干流分布的种类,亦很难退却到相应支流繁衍并完成生活史。因此未来在栖息地保护设计中,应充分考虑到干、支流鱼类物种组成上的差异性,尽量在干流和支流都进行栖息地保护规划,以期更好地保护地方的土著鱼类。


3.3 跨流域调水的生态风险及其对鱼类多样性的潜在影响

汉江水资源充沛、水质整体状况良好,加之特殊的地理位置,使其链接到不同的跨流域调水工程。例如南水北调中线工程的水源区,即是汉江流域丹江口库区及上游地区(刘伯涛和李崇贵,2019),汉江之水跨越淮河、黄河,最终进入到以京津冀为主的海河流域。除此之外,调查区域所涉及汉江洋县段,更是引汉济渭工程的重要水源地之一。引汉济渭工程的主要任务就是从陕西汉江上游干流跨流域调水进入渭河流域关中地区,向渭河沿岸的西安、咸阳、渭南、杨陵等21个直接受水对象供水(党辉等,2019)。在跨流域调水过程中,以水生生物为核心探讨调水工程生态影响的研究尚不多(罗昊和周雪欣,2017),积累的数据和经验亦不足。

从鱼类多样性的角度考虑,跨流域调水最大的生态风险之一就是外来物种的引入。秦岭是中国重要的生物地理分界线,位于秦岭以北的黄河水系与秦岭以南的长江水系在鱼类多样性组成上有很大差异。例如秦岭北坡的鱼类种类较少,只有99种;

而南坡种类较多,计有142种(陕西省动物研究所等,1987)。调查区域汉江洋县段在淡水鱼类生物地理区上属华东区江淮亚区,而引汉济渭工程的受水区则属华东区的河海亚区(李思忠,1981),这一区别导致了引汉济渭工程引水区和受水区之间较大的鱼类组成差异。通过引水,可能导致自然分布于长江流域而不至于黄河流域的种类人为扩散到黄河流域。例如受水区渭河水系缺乏鲑形目的鮭科、钝头鮭科,鲤形目鲤科中的圆吻鲴属(*Distoechodon*)、华鳊属(*Sinibrama*)等种类,而这些恰恰都分布于汉江洋县段。尽管未来在调水过程中会有一些预防措施,且成鱼也很难通过多级泵站进入到新的水体,但仍然存在鱼卵、鱼苗等通过调水工程进入到黄河流域的生态风险。故而非常有必要对引水区和受水区的鱼类多样性进行详细调查,积累本底信息,通过种类组成对比和适生性分析等手段,对潜在的外来物种建立预警机制。本项工作记录了引汉济渭工程引水区鱼类多样性的现状,为未来对跨流域调水可能的生态风险分析和动态跟踪监测提供了重要的前期材料。

ORCID

赵亚辉  <https://orcid.org/0000-0002-4615-596X>

参考文献

- Blanchard F, Leloc'H F, Hily C, Boucher J (2004) Fishing effects on diversity, size and community structure of the benthic invertebrate and fish megafauna on the Bay of Biscay coast of France. *Marine Ecology Progress Series*, 280, 249–260.
- Cao L, Zhang E, Zang CX, Cao WX (2016) Evaluating the status of China's continental fish and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 598–609. (in Chinese with English abstract) [曹亮, 张鹏, 臧春鑫, 曹文宣 (2016) 通过红色名录评估研究中国内陆鱼类受威胁现状及其成因. *生物多样性*, 24, 598–609.]
- Chen XH, Li XP, Cheng X (2008) Spatial-temporal distribution of fish assemblages in the upstreams of Huangpu River and Suzhou Creek. *Biodiversity Science*, 16, 191–196. (in Chinese with English abstract) [陈小华, 李小平, 程曦 (2008) 黄浦江和苏州河上游鱼类多样性组成的时空特征. *生物多样性*, 16, 191–196.]
- Chen YY (1998) *Fauna of China · Osteichthyes · Cypriniformes (II)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈宜瑜 (1998) 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目(中卷). 科学出版社, 北京.]
- Chen ZC, Yuan SL, Gao JZ (1991) Yangxian County

- Overview. Shaanxi Administration, (16), 49. (in Chinese) [陈章存, 袁社龄, 高敬智 (1991) 洋县概况. 陕西政报, (16), 49.]
- Chu XL, Zheng BS, Dai DY (1999) Fauna of China · Osteichthyes · Siluriformes. Science Press, Beijing. (in Chinese) [褚新洛, 郑葆珊, 戴定远 (1999) 中国动物志 硬骨鱼纲 鲇形目. 科学出版社, 北京.]
- Dang H, Ma QR, Song XF, Li HW (2019) Analysis and countermeasures of the impact of the Han-to-Weihe River Transfer Project on the water environment of the water-receiving area. Shaanxi Water Resources, (7), 73–75. (in Chinese) [党辉, 马清瑞, 宋晓峰, 李宏伟 (2019) 引汉济渭工程对受水区水环境的影响分析及对策. 陕西水利, (7), 73–75.]
- Fan WD (1986) The current situation of fishery resources and opinions on development and utilization in the upper reaches of the Hanjiang River. Reservoir Fisheries, (4), 33–38. (in Chinese) [范维端 (1986) 汉江上游渔业资源的现状和开发利用意见. 水利渔业, (4), 33–38.]
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. Biodiversity Science, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Jing ZX, Xia J, Zhang X, Wang Q, Shi W, Ma XY (2019) Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River. Research of Environmental Sciences, 32, 104–115. (in Chinese with English abstract) [景朝霞, 夏军, 张翔, 王强, 石卫, 马协一 (2019) 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律. 环境科学研究, 32, 104–115.]
- Li SZ (1981) Distribution and Division of Freshwater Fishes in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李思忠 (1981) 中国淡水鱼类的分布区划. 科学出版社, 北京.]
- Li XF, Huang DM, Xie WX, Chang XL, Yang HY, Zhang YQ, He JQ (2005) Status of fisher resources in the middle reaches of the Hanjiang River. Journal of Lake Sciences, 17, 366–372. (in Chinese with English abstract) [李修峰, 黄道明, 谢文星, 常秀岭, 杨汉运, 张友谦, 何家庆 (2005) 汉江中游鱼类资源现状. 湖泊科学, 17, 366–372.]
- Lin XZ, Li DM, Liu HZ, Lin HS, Yang SR, Fan HJ, Wen RS (2016) Fish species diversity and its seasonal variations in the Chaozhou section of Hanjiang River, Guangdong Province. Biodiversity Science, 24, 185–194. (in Chinese with English abstract) [林小植, 李冬梅, 刘焕章, 林鸿生, 杨少荣, 范汉金, 温茹淑 (2016) 广东韩江潮州江段鱼类多样性及季节变化. 生物多样性, 24, 185–194.]
- Liu BT, Li CG (2019) Comprehensive evaluation of ecological environment in water supply area of the middle-route of the South-to-North Water Diversion Project. Bulletin of Science and Technology, 35, 191–196. (in Chinese with English abstract) [刘伯涛, 李崇贵 (2019) 南水北调中线工程水源区生态环境综合评价. 科技通报, 35, 191–196.]
- Lu JY, Lin L (2020) Problems and countermeasures on water eco-environment in Hanjiang River Ecological Economic belt. Research of Environmental Sciences, 33, 1179–1186. (in Chinese with English abstract) [卢金友, 林莉 (2020) 汉江生态经济带水生态环境问题及对策. 环境科学研究, 33, 1179–1186.]
- Luo H, Zhou XX (2017) Analysis on ecological impact identification and evaluation index system of Inter Basin Water Diversion Project. Environmental Science and Management, 42, 190–194. (in Chinese with English abstract) [罗昊, 周雪欣 (2017) 跨流域调水工程的生态影响识别及评价指标体系研究. 环境科学与管理, 42, 190–194.]
- Ma YL, Peng K (2020) Research on optimal operation of cascade reservoirs in Hanjiang River Basin. Water Resources Planning and Design, (2), 63–66, 101. (in Chinese) [马雅丽, 彭昆 (2020) 汉江流域梯级水库群优化调度研究. 水利规划与设计, (2), 63–66, 101.]
- Mao YZ (2014) Research on general arrangement of Huangjinxia hydro-junction. Shaanxi Water Resources, (2), 53–55. (in Chinese) [毛拥政 (2014) 黄金峡水利枢纽总布置研究. 陕西水利, (2), 53–55.]
- Margalef R (1958) Information theory in ecology. General System Yearbook, 3, 36–71.
- State Environmental Protection Administration (1992) Aquatic Monitoring Manual. Southeast University Press, Nanjing. (in Chinese) [国家环保总局 (1992) 水生生物监测手册. 东南大学出版社, 南京.]
- Parry GDR, Johnson MS, Bell RM, Edwards RW, Wathern P (1984) Ecological methodology. In: Planning and Ecology (eds Roberts RD, Roberts TM), pp. 37–98. Springer, Dordrecht.
- Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK (1970) Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. Fish Bulletin, 152, 1–105
- Shaanxi Institute of Zoology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Department of Biology, Lanzhou University (1987) Fishes in Qinling Mountains Area. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陕西省动物研究所, 中国科学院水生生物研究所, 兰州大学生物系 (1987) 秦岭鱼类志. 科学出版社, 北京.]
- Wang DQ, Gao L, Duan XB, Chen DQ, Meng Q, Liu SP (2019) Preliminary analysis of the early resources of fish in

- the lower reaches of the Hanjiang River and the effect of cascade joint ecological regulation on fish reproduction. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28, 1909–1917. (in Chinese) [汪登强, 高雷, 段辛斌, 陈大庆, 孟秋, 刘绍平 (2019) 汉江下游鱼类早期资源及梯级联合生态调度对鱼类繁殖影响的初步分析. 长江流域资源与环境, 28, 1909–1917.]
- Wang KF, Zhang HX, Yang XZ, Wei WK, Zhao Y, Hu WX (2003) Fish resources and diversity in Changqing National Reserve. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 31, 5–9. (in Chinese with English abstract) [王开锋, 张红星, 杨兴中, 魏武科, 赵阳, 胡万兴 (2003) 陕西长青自然保护区鱼类资源及其多样性. 陕西师范大学学报(自然科学版), 31, 5–9.]
- Wang QJ, Zhao H, Luo L, Zhang HX, Wang ZQ, Li JW (2012) Study on the diversity of fish resources in the Xushui River Basin. *Journal of Hydroecology*, 33, 100–103. (in Chinese) [王启军, 赵虎, 罗磊, 张红星, 王中乾, 李军文 (2012) 渭水河流域鱼类资源多样性研究. 水生态学杂志, 33, 100–103.]
- Wang XL, Song XX (2019) Study on the change of hydrological regime in the middle and lower reaches of Hanjiang River under the influence of cascade water conservancy projects. *Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition)*, 53, 685–691. (in Chinese with English abstract) [王学雷, 宋辛辛 (2019) 梯级水库叠加影响下汉江中下游流域水文情势变化研究. 华中师范大学学报(自然科学版), 53, 685–691.]
- Wang Z, Song C, Yan WL, Zhu LF (2019) Biodiversity and spatial pattern of fish in the Pingchuan segment of the upper reaches of Hanjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28, 1675–1681. (in Chinese with English abstract) [王卓, 宋策, 闫文龙, 朱来福 (2019) 汉江上游平川段鱼类群落多样性及空间格局分析. 长江流域资源与环境, 28, 1675–1681.]
- Wu HL, Zhong JS (2008) *Fauna of China · Osteichthyes · Perciformes (V) · Gobioidae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [伍汉霖, 钟俊生 (2008) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲈形目(五) 虾虎鱼亚目. 科学出版社, 北京.]
- Wu XW (1981) *Fishes of Cyprinidae in China (I)*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [伍献文 (1981) 中国鲤科鱼类志(上卷). 上海科学技术出版社, 上海.]
- Wu XW (1982) *Fishes of Cyprinidae in China (II)*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [伍献文 (1982) 中国鲤科鱼类志(下卷). 上海科学技术出版社, 上海.]
- Yue PQ (2000) *Fauna of China · Osteichthyes · Cypriniformes*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦 (2000) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目. 科学出版社, 北京.]
- Zhang CG, Zhao YH (2016) *Species Diversity and Distribution of Inland Fishes in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张春光, 赵亚辉 (2016) 中国内陆鱼类物种与分布. 科学出版社, 北京.]
- Zhang HB, Zhong L, Yang JY, Mao ZY, Yang GL, Li Y, Xu TQ (2006) On fish species diversity of Hanjiang River in Shaanxi Province. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 34, 60–66. (in Chinese with English abstract) [张海斌, 钟林, 杨军严, 毛治彦, 杨甘霖, 李云, 许涛清 (2006) 汉江陕西段河流湿地鱼类物种多样性研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 34, 60–66.]
- Zhang PL, Zhu SH, Wan JW, Li XF (2017) Design of high-head fish-pass structure for Huangjinxia Water Control Project. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 48(28), 44–48. (in Chinese with English abstract) [张鹏利, 朱世洪, 万继伟, 黎贤访 (2017) 黄金峡水利枢纽高水头过鱼建筑物设计. 水利水电技术, 48(28), 44–48.]

(责任编辑: 陈小勇 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 汉江洋县段淡水鱼类物种名录

Appendix 1 List of freshwater fish species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020158-1.pdf>

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

附录1 汉江洋县段淡水鱼类物种名录

Appendix 1 List of freshwater fish species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
一、鳗鲡目 <i>Anguilliformes</i>					
(一) 鳗鲡科 <i>Anguillidae</i>					
1. 鳗鲡属 <i>Anguilla</i>					
(1) 日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	√			EN	
二、鲤形目 <i>Cypriniformes</i>					
(二) 鲤科 <i>Cyprinidae</i>					
I 鲴亚科 <i>Danioninae</i>					
2. 鳊属 <i>Zacco</i>					
(2) 宽鳍鳊 <i>Zacco platypus</i>	√	√		LC	D/O
3. 马口鱼属 <i>Opsariichthys</i>					
(3) 马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	√	√		LC	D/C
II 雅罗鱼亚科 <i>Leuciscinae</i>					
4. 青鱼属 <i>Mylopharyngodon</i>					
(4) 青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	√			LC	
5. 丁鲋属 <i>Tinca</i>					
(5) 丁鲋 <i>Tinca tinca</i>		√	√	LC	
6. 鲃属 <i>Phoxinus</i>					
(6) 拉氏鲃 <i>Phoxinus lagowskii</i>	√	√		LC	D/O
7. 草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i>					
(7) 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		√		LC	D/H
III 鲃亚科 <i>Culterinae</i>					
8. 鳊属 <i>Parabramis</i>					

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
(8) 鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>		√		LC	D/H
9. 华鳊属 <i>Sinibrama</i>					
(9) 伍氏华鳊 <i>Sinibrama wui</i>		√		LC	D/O
10. 飘鱼属 <i>Pseudolaubuca</i>					
(10) 银飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	√	√		LC	P/O
11. 鲮属 <i>Hemiculter</i>					
(11) 鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	√	√		LC	P/O
12. 原鲃属 <i>Cultrichthys</i>					
(12) 红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	√	√		LC	P/C
13. 鲃属 <i>Culter</i>					
(13) 尖头鲃 <i>Culter oxycephalus</i>	√	√		LC	D/O
(14) 翘嘴鲃 <i>Culter ilishaeformis</i>	√			LC	
14. 红鲃属 <i>Erythroculter</i>					
(15) 蒙古红鲃 <i>Erythroculter mongolicus</i>		√			P/C
15. 鲃属 <i>Chanodichthys</i>					
(16) 戴氏鲃 <i>Chanodichthys dabryi</i>	√				
(17) 蒙古鲃 <i>Chanodichthys mongolicus</i>	√			LC	
16. 鲂属 <i>Megalobrama</i>					
(18) 团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	√			LC	
IV 鲴亚科 <i>Xenocyprininae</i>					
17. 圆吻鲴属 <i>Distoechodon</i>					
(19) 圆吻鲴 <i>Distoechodon tumirostris</i>	√	√		LC	D/O
18. 似鳊属 <i>Pseudobrama</i>					
(20) 似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	√			LC	

赵阳, 牛诚祜, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
V 鲢亚科 Hypophthalmichthyinae					
19. 鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>					
(21) 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	√	√		LC	P/H
20. 鳊属 <i>Aristichthys</i>					
(22) 鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	√			LC	
VI 鲮亚科 Acheilognathinae					
21. 鲮属 <i>Acheilognathus</i>					
(23) 大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>		√		LC	D/O
22. 鳊鲂属 <i>Rhodeus</i>					
(24) 高体鳊鲂 <i>Rhodeus ocellatus</i>	√	√		LC	D/H
(25) 中华鳊鲂 <i>Rhodeus sinensis</i>	√	√		LC	D/H
(26) 彩石鳊鲂 <i>Rhodeus lighti</i>	√			LC	
VII 鮡亚科 Gobioidae					
23. 鲮属 <i>Hemibarbus</i>					
(27) 唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	√	√		LC	D/C
(28) 花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i>	√	√		LC	D/C
24. 鲮属 <i>Sarcocheilichthys</i>					
(29) 黑鳍鲮 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	√	√		LC	D/O
25. 麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>					
(30) 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	√	√		LC	D/C
26. 银鮡属 <i>Squalidus</i>					
(31) 银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>		√		LC	D/O
(32) 亮银鮡 <i>Squalidus nitens</i>		√		LC	D/O
27. 似鮡属 <i>Pseudogobio</i>					

赵阳, 牛诚祯, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
(33) 似鮡 <i>Pseudogobio vaillanti vaillant</i>	√	√		LC	B/O
28.小鰾属 <i>Microphysogobio</i>					
(34) 乐山小鰾 <i>Microphysogobio kiatingensis</i>		√		DD	B/O
29.颌须鮡属 <i>Gnathopogon</i>					
(35) 短须颌须鮡 <i>Gnathopogon imberbis</i>	√	√		DD	D/O
(36) 银色颌须鮡 <i>Gnathopogon argentatus</i>	√			DD	
30.吻鮡属 <i>Rhinogobio</i>					
(37) 吻鮡 <i>Rhinogobio typus</i>	√	√		LC	B/C
31.棒花鱼属 <i>Abbottina</i>					
(38) 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	√			LC	
(39) 乐山棒花鱼 <i>Abbottina kiatingensis</i>	√			DD	
(40) 钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>		√	√	LC	
32.铜鱼属 <i>Coreius</i>					
(41) 铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	√			LC	
33.蛇鮡属 <i>Saurogobio</i>					
(42) 蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	√			LC	
34.片唇鮡属 <i>Platysmacheilus</i>					
(43) 片唇鮡 <i>Platysmacheilus exiguus</i>	√			LC	
VIII 鰕鲇亚科 <i>Gobiobotinae</i>					
35.鰕鲇属 <i>Gobiobotia</i>					
(44) 宜昌鰕鲇 <i>Gobiobotia ichangensis</i>	√			LC	
IX 鲤亚科 <i>Cyprininae</i>					
36.鲤属 <i>Cyprinus</i>					
(45) 鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	√	√		LC	D/O

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
37. 鲤属 <i>Carassius</i>					
(46) 鲤 <i>Carassius auratus</i>	√	√		LC	D/O
X 鲃亚科 <i>Barbinae</i>					
38. 多甲鱼属 <i>Onychostoma</i>					
(47) 多鳞白甲鱼 <i>Onychostoma macrolepis</i>	√	√		VU	D/O
(三) 条鳅科 <i>Noemacheilidae</i>					
39. 荷马条鳅属 <i>Homatula</i>					
(48) 红尾荷马条鳅 <i>Homatula variegata</i>	√	√		LC	B/O
40. 高原鳅属 <i>Triplophysa</i>					
(49) 贝氏高原鳅 <i>Triplophysa bleekeri</i>	√			DD	
(四) 花鳅科 <i>Cobitidae</i>					
XI 花鳅亚科 <i>Cobitinae</i>					
41. 花鳅属 <i>Cobitis</i>					
(50) 中华花鳅 <i>Cobitis sinensis</i>	√			LC	
(51) 稀有花鳅 <i>Cobitis rarus</i>		√		LC	B/H
(52) 大斑花鳅 <i>Cobitis macrostigma</i>		√		LC	B/H
42. 泥鳅属 <i>Misgurnus</i>					
(53) 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	√	√		LC	B/C
43. 副泥鳅属 <i>Paramisgurnus</i>					
(54) 大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>		√		LC	B/O
XII 沙鳅亚科 <i>Botiinae</i>					
44. 副沙鳅属 <i>Parabotia</i>					
(55) 花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>	√			LC	
三、鲇形目 <i>Siluriformes</i>					

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
(五) 钝头鮠科 Amblycipitidae					
45. 鮠属 <i>Liobagrus</i>					
(56) 拟缘鮠 <i>Liobagrus marginatoides</i>	√	√		DD	D/C
(六) 鲢科 Sisoridae					
46. 纹胸鲃属 <i>Glyptothorax</i>					
(57) 中华纹胸鲃 <i>Glyptothorax sinense</i>	√			LC	
(七) 鲃科 Siluridae					
47. 鲃属 <i>Silurus</i>					
(58) 鲃 <i>Silurus asotus</i>	√	√		LC	B/C
(59) 大口鲃 <i>Silurus meridionalis</i>	√	√		LC	B/C
(八) 鲿科 Bagridae					
48. 黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>					
(60) 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	√	√		LC	B/C
(61) 瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	√			LC	
49. 鮠属 <i>Leiocassis</i>					
(62) 叉尾鮠 <i>Leiocassis tenuifurcatus</i>	√	√		DD	B/C
(63) 粗唇鮠 <i>Leiocassis crassilabris</i>	√	√		DD	B/C
50. 拟鲿属 <i>Pseudobagrus</i>					
(64) 盩堂拟鲿 <i>Pseudobagrus ondon</i>	√	√		DD	D/C
(65) 圆尾拟鲿 <i>Pseudobagrus tenuis</i>	√	√		DD	D/C
(66) 切尾拟鲿 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	√			DD	
(67) 凹尾拟鲿 <i>Pseudobagrus emarginatus</i>	√			DD	
51. 鲢属 <i>Hemibagrus</i>					
(68) 大鳍鲢 <i>Hemibagrus macropterus</i>	√	√		LC	B/C

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
四、合鳃鱼目 Synbranchiformes					
(九) 合鳃鱼科 Synbranchidae					
52. 黄鳝属 <i>Monopterus</i>					
(69) 黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	√	√		LC	B/C
五、鲑形目 Salmoniformes					
(十) 鲑科 Salmonidae					
53. 哲罗鲑属 <i>Hucho</i>					
(70) 川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	√	√		CR	
54. 细鳞鲑属 <i>Brachymystax</i>					
(71) 秦岭细鳞鲑 <i>Brachymystax tsinlingensis</i>	√	√		EN	
六、鲈形目 Perciformes					
(十一) 脂鲈科 Percichthyidae					
55. 鳊属 <i>Siniperca</i>					
(72) 斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	√	√		LC	D/C
(73) 大眼鳊 <i>Siniperca kneri</i>		√		LC	D/C
(十二) 沙塘鳢科 Odontobutidae					
56. 小黄黝属 <i>Micropercops</i>					
(74) 小黄黝鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>		√		LC	B/O
(十三) 虾虎鱼科 Gobiidae					
57. 吻虾虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>					
(75) 波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>		√		LC	B/C
(76) 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>		√		LC	B/C
(77) 神农吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius shennongensis</i>		√		EN	B/C
(十四) 鳢科 Channidae					

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
58. 鱧属 <i>Channa</i>					
(78) 乌鱧 <i>Channa argus</i>	√	√		LC	B/C

历史记录数据来自陕西省动物研究所等(1987), 《中国脊椎动物红色名录》数据来自蒋志刚等(2016)。P: 中上层; D: 近底层; B: 底层; H: 植食性; C: 肉食性; O: 杂食性。
 Historic records from Shaanxi Institute of Zoology et al (1987), Red List of China's Vertebrates from Zhigang Jiang et al (2016). P, Pelagic; D, Demersal; B, Benthic; H, Herbivorous; C, Carnivorous; O, Omnivorous.



•研究报告•

复合污染尾矿废水中真菌群落多样性及其驱动机制

刘晋仙^{1*}, 柴宝峰¹, 罗正明^{1,2}

1. 山西大学黄土高原研究所, 黄土高原生态恢复山西省重点实验室, 太原 030006; 2. 忻州师范学院地理系, 山西忻州 034000

摘要: 金属尾矿废水中含有重金属以及多种有机和无机污染物, 然而在该极端生境中仍然有大量微生物存在。为了揭示碱性尾矿废水中真菌群落的组成模式和多样性格局及其维持机制, 本文利用ITS1区rDNA基因扩增子测序和qPCR技术对山西中条山十八河尾矿库废水中5个不同采样点真菌群落的组成、丰度和分布格局进行了研究。通过主坐标分析(PCoA)比较不同采样点间群落结构的差异性; 通过冗余分析(RDA)探讨了水体理化因子对真菌群落结构的影响; 通过零模型分析了影响群落结构的主要因素; 通过网络图分析了真菌类群之间的种间相互作用。结果表明, 布勒掷孢酵母属(*Bullera*)、*Schizangiella*、支顶孢属(*Acremonium*)和亚罗酵母属(*Yarrowia*)是主要的优势属, 真菌群落在不同采样地点从门到属水平的相对丰度均有明显变化。真菌群落丰度沿水流方向逐渐增加且与有机碳(TOC)浓度呈显著正相关。真菌群落的 α -多样性与pH、重金属(As和Cu)、无机碳(IC)和铵态氮(NH_4^+)浓度显著相关。真菌群落的空间结构在不同采样点具有明显差异, 这种差异性与理化因子没有显著关系; 不同采样点真菌群落的零偏差值均大于零, 且不同物种之间存在复杂的种间相互作用。以上结果说明, 在尾矿废水中环境因子只对真菌群落的 α -多样性有显著影响, 而群落的 β -多样性主要受种间相互作用关系的影响, 表明在碱性铜尾矿废水中存在比较复杂的真菌群落动态模式。

关键词: 尾矿废水; 真菌群落; 多样性; 维持机制

刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明 (2021) 复合污染尾矿废水中真菌群落多样性及其驱动机制. 生物多样性, 29, 373–384. doi: 10.17520/biods.2020181.
Liu JX, Chai BF, Luo ZM (2021) Driving forces and the diversity of fungal communities in complex contaminated tailings drainage. Biodiversity Science, 29, 373–384. doi: 10.17520/biods.2020181.

Driving forces and the diversity of fungal communities in complex contaminated tailings drainage

Jinxian Liu^{1*}, Baofeng Chai¹, Zhengming Luo^{1,2}1 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Shanxi Key Laboratory of Ecological Restoration on Loess Plateau, Taiyuan 030006
2 Department of Geography, Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi 034000

ABSTRACT

Aims: Metal tailings drainage contains heavy metals and a variety of organic and inorganic pollutants, but a large number of microorganisms still exist in this extreme habitat. In order to reveal the composition pattern and diversity maintaining mechanism of fungal communities in alkaline copper mine drainage, the composition, abundance and distribution pattern of fungal communities in five water sites in Shibahe tailings reservoir were studied by using the rDNA gene amplification sequencing and qPCR in ITS1 area.

Methods: The fungal community compositions among different sample points were compared by principal coordinate analysis (PCoA). The relationship between physicochemical factors and the distribution of fungal communities were analyzed by redundancy analysis (RDA). The main factors influencing community structure were analyzed by null model. The interactions between fungal genera were analyzed by network.

Results: the results showed that *Bullera*, *Schizangiella*, *Acremonium* and *Yarrowia* were the dominant genera. The relative abundance of fungal communities varied significantly from phylum to genus level in different sampling sites. The abundance of fungal communities increased gradually along the direction of water flow and was positively

收稿日期: 2020-04-30; 接受日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(31801962)和山西省基础研究项目(201901D211129; 201901D211457)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liujinxian@sxu.edu.cn

correlated with the concentration of total organic carbon (TOC). PH, heavy metals (As and Cu), inorganic carbon (IC) and ammonium nitrogen (NH_4^+) were significantly correlated with the α -diversity of the communities. The distribution of fungal communities in different sample sites was obviously different. The physicochemical factors had no significant effect on the distribution of fungal community. The null deviation values of fungal communities in different sampling sites were greater than zero, and there were complex interactions among different genera.

Conclusions: These results indicated that the environmental factors only have a significant correlation with the α -diversity of the fungal communities, while the β -diversity was mainly affected by the interaction between species in tailings drainage. Our findings highlight that there is a relatively complex fungal community dynamic pattern in alkaline copper tailings drainage.

Key words: tailings drainage; fungal communities; diversity; maintenance mechanism

矿石在湿法冶炼过程中产生大量尾矿废水, 金属尾矿废水中含有多种污染物, 包括重金属和多种有机以及无机悬浮剂。由于尾矿废水中污染物质成分多样, 构成了复杂的复合污染系统。尾矿废水会对周边的农田、河流以及地下水等造成了不同程度的影响(贺梦醒等, 2011), 最终影响人类健康, 因此对尾矿废水治理是恢复生态学的重要议题。尾矿废水这样的极端环境通常被认为不适合大多数生物生长(Newsham, 2012), 例如在酸性或碱性尾矿废水中存在极端pH水平和较高浓度的重金属, 这些生境似乎接近了生物活动的极限。然而在现实中, 虽然这些极端的环境并不是多种生物的理想栖息地, 但是它们的生物多样性却比预期的高。极端生境作为一个确定的、极具物种筛选力的生境, 是生物多样性的来源, 为生物实现特殊适应机制创造了有利条件。研究表明, 适应性较强、种类多样的微生物在酸性(Baker & Banfield, 2003; Sun et al, 2016)和碱性(Bier et al, 2015; Liu et al, 2018)尾矿废水中均有分布。尾矿废水的污染梯度对微生物群落组成和结构有明显的分拣效应, 在高污染区域微生物群落组成、结构和多样性发生了明显变化, 且微生物生物量和活性明显降低(Bier et al, 2015)。已有的对尾矿废水微生物群落适应性的研究大多针对的是细菌群落, 对真菌群落的研究还非常有限(马燕和余晓斌, 2017), 尤其是在碱性尾矿废水中, 真菌群落的多样性和适应机制的研究还未见报道。

真菌是地球上几乎所有生态系统都普遍存在的重要微生物组分之一, 它们具有较高的系统发育和功能多样性。除了在极端高温和深层地下生物圈外(Newsham, 2012), 几乎在任何有能量来源的极端条件下都能找到真菌群落的身影, 如极地苔原

(Osono et al, 2012)、深海底泥(Nagano et al, 2010; Jebaraj et al, 2010)、重金属污染土壤(Li et al, 2012)、干旱河谷(Dreesens et al, 2014)以及尾矿废水(马燕和余晓斌, 2017)等多种极端环境。通过环境筛选在尾矿废水中存活下来的那些真菌类群, 具有适应其生境的生长策略。这些真菌类群通过一系列的生化反应在水质净化和生态环境恢复过程中发挥着重要作用, 如降解有机污染物、络合重金属等, 且较细菌的作用更强(Iram et al, 2009)。同时, 真菌的菌丝体可为细菌群落提供附着位点, 形成生物膜, 从而提高彼此的适应性。微生物群落组成、结构和空间分布格局的变化可反映其生境的改变, 因此研究尾矿废水中真菌群落组成和多样性格局的变化可表征水体的污染程度。在不同极端环境中影响真菌群落组成和分布的因素存在差异(Newsham, 2012), 在酸性土壤和水体中pH梯度是引起真菌群落组成和多样性发生变化的最主要的因素(Glassman et al, 2017; Aguilera & González-Toril, 2019), 但是在碱性尾矿废水这样的复合污染环境中真菌群落的分布模式和适应策略目前还不清楚。

中条山铜矿是北方最大的铜生产基地, 为全国最大的金属地下开采矿山。在矿山采选、矿石冶炼过程中有大量含有多种重金属的尾矿废水和废渣产生, 由于悬浮剂硫化钠、中和剂碱石灰以及其他有机试剂在悬浮过程中的使用, 使得尾矿中有机化合物、硫化物含量过高且呈碱性。本研究选择不同采样点尾矿废水中的真菌群落为研究对象, 探讨北方铜尾矿废水中: (1)真菌群落的组成和空间分布格局; (2)驱动这种分布格局形成的主要因素。旨在阐明在金属尾矿废水中真菌群落的多样性维持机制, 为废水污染程度与微生物群落多样性格局的相互

影响研究提供新的数据支持, 同时为不同污染区域的生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中条山铜矿基地是我国的六大铜基地之一, 储量占全国5%以上。本研究的采样地点位于山西省垣曲县的十八河尾矿库, 该尾矿库担负隶属于中条山有色金属集团的铜矿峪矿选厂以及篦子沟矿选厂尾矿的贮存任务, 建成于1972年4月, 目前已使用48年。现已筑15级子坝, 每道子坝高5 m, 坝顶长度1,714.8 m, 坝高85 m, 面积200万m², 最大库容1.25亿 m³, 目前库容1亿m³, 汇水面积约54.6 km²。该尾矿库是选矿废水和废渣的永久贮存地点, 为保证尾矿库的安全在上端坝体设有渗流孔, 下端坝体设有防洪洞, 因此尾矿库坝体上下两端均有废水渗流到尾矿库外面。该区域属大陆性季风气候, 四季分明, 春季干旱多风, 夏季雨量集中, 冬季少雪干燥。

1.2 样地设置与样品采集

在尾矿库中间区域沿水流方向从上游到下游设置了3个采样点(STW1、STW2和STW3), 在尾矿库上下两端设置了2个渗流水采样点(SUSW和SDSW)。利用自动水样采集器(W2BC-9600)收集水样, 取样深度距表层1 m。每个样品取水2 L, 每个采样点取3个重复, 样品采集于2016年9月。水样在原地通过0.2 μm的微孔滤膜(Millipore, 津腾, 天津)过滤用于收集水体微生物, 后将滤膜置于便携式液氮罐中, 用于后续微生物基因组提取。过滤后的水带回实验室用于理化参数的分析, 所有测试分析在1个月内完成。

1.3 DNA提取、荧光定量PCR和高通量测序

利用Fast DNA SPIN (MP Biomedicals, Santa Ana, CA, USA)试剂盒, 参照说明书提取滤膜上微生物的DNA, 提取好的DNA样品测定浓度和纯度后分别进行荧光定量PCR扩增和一般PCR扩增。扩增真菌的ITS1区片段。用酶标仪(Infinite M200 PRO, Tecan, Switzerland)测定DNA模板和质粒的浓度, 然后稀释到10 ng/μL后进行荧光定量PCR扩增(CFX96, BioRad, USA)。引物序列为ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3')和ITS2R (5'-GCTGCGTTC TTCATCGATGC-3') (Orgiazzi et al, 2012), 每个反应

体系包括10 μL SYBR® Premix Ex Taq™ (Tli RNaseH Plus) (TaKaRa, Dalian, China), 前后引物各1 μL (10 μM), 1 μL的DNA模板, 然后用无菌水补至20 μL。PCR反应过程包括: 95°C预变性 3 min, 扩增(条件: 95°C 20 s, 58°C 30 s, 72°C 30 s), 共40个循环; 最后添加溶解曲线, 每个循环增加0.5°C/s, 从65°C-95°C用来分析PCR产物是否特异。通过将已知拷贝数的质粒按10倍梯度连续稀释后进行定量PCR便可获得标准曲线, 从而获得目的基因的拷贝数, 质粒的拷贝数梯度是10³-10⁸, 扩增效率是98.5%。质粒的制备过程参照Liu等(2018)描述的方法进行, 一般PCR扩增体系参照刘晋仙等(2019)的方法。PCR扩增产物通过胶回收纯化后在Illumina MiSeq测序平台上进行高通量测序。

1.4 生物信息学分析

测序得到的原始双端序列数据, 使用fastp和FLASH软件进行质控优化。删除尾部质量值在20以下、长度小于50 bp以及含N碱基的序列; 将有重叠区的成对序列拼接成一条序列, 最小重叠区长度为10 bp; 拼接序列的重叠区允许的最大错配比率为0.2; 根据序列首尾两端的标签和引物区分样品, 并调整序列方向, 标签允许的错配数为0, 最大引物错配数为2, 将序列分配到不同样品。优化后的序列按97%的相似性使用Usearch version 7.0软件(<http://drive5.com/uparse/>)进行可操作分类单元(operational taxonomic units, OTUs)聚类, 将所有优化序列与OTU代表序列比对, 选出与代表序列相似性在97%以上的序列, 生成OTU表格, 每个OTU中数量最多的序列为代表序列; 以UNITE Release 7.2 (<http://unite.ut.ee/index.php>)真菌数据库为参考对OTU序列进行比对鉴定, 通过RDP Classifier软件(<https://sourceforge.net/projects/rdp-classifier/>)对序列分类注释, 获得物种的分类信息, 物种分类的置信度为0.7。本研究测序的样品中获得382,717条高质量序列, 平均序列长度为259 bp; 对得到的高质量序列, 按最小样本序列数抽平(63,438)用于后续的α多样性和β多样性分析。在Mothur version 1.30.2软件 (https://www.mothur.org/wiki/Download_mothur)中计算群落的α多样性指数, 如Chao1丰度估计、Shannon和Simpson多样性指数以及盖度。本研究的测序和生物信息服务在上海派森诺生物科技有限公司完成。

1.5 理化性质分析

水体pH、溶解氧(DO)、电导率(EC)、硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)含量通过便携式水质检测仪(Aquaread AP-2000, UK)原位测定;总碳(TC)、总有机碳(TOC)和无机碳(IC)含量用TOC分析仪(Shimadzu, TOC-V_{CPH}, Japan)测定;亚硝态氮(NO_2^-)和硫酸盐(SO_4^{2-})含量用全自动间断化学分析仪(DeChem-Tech, CleverChem380, Germany)测定;所有重金属(As、Cd、Cu、Pb、Zn)含量用ICP-AES (iCAP 6000, Thermo Fisher, UK)测定。

1.6 数据分析

在分析之前对不符合正态分布的 NO_2^- 、 NH_4^+ 以及所有重金属数据进行平方根转换,对TOC和IC数据进行对数转换。不同采样点间的水体理化参数和真菌拷贝数的差异在SPSS 20.0 (IBM SPSS, USA)中采用One-way ANOVA分析,并通过Waller-Duncan进行组间比较; α -多样性指数与环境参数的相关性通过Spearman相关系数检验;在CANOCO version 5.0软件中通过主坐标分析(PCoA)比较不同采样点之间的群落相似性,并通过vegan R软件包中的非参数多元分析(PERMANOVA)函数检验分组间差异;在CANOCO中首先通过前选择(interactive forward selection)筛选出对优势类群和群落结构有显著影响的因子,然后通过冗余(redundancy analysis)分析不同环境因子对群落结构的影响程度;根据Tucker等(2016)和Chase等(2011)构建的 β -零偏差值来定量分析确定性过程和随机过程在群落构建中的相对重要性, $[(\beta_{\text{obs}} - \beta_{\text{null}})/\beta_{\text{null}}]$ 偏离零表示群落的构建是确定性过程决定的,正值表示种间相互作用,负值表示环境选择,接近零表示随机过程在群落构建中起决定作用;不同物种之间的种间关系强弱通过Spearman相关系数表示,在网络构建过程中只保留相关系数 $r > 0.6$,且 $P < 0.05$ 的数值,并通过Gephi version 0.9.2软件可视化。所有统计分析的置信区间均为95% ($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 尾矿废水的理化性质

pH、 NO_3^- 和 NO_2^- 浓度在STW1中最大,且显著高于STW3、SDSW和SUSW(表1)。pH、EC、 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 沿着水流方向形成明显的梯度:

STW1 > STW2 > STW3。DO、TC、TOC和IC浓度在STW3最大,表现为沿水流方向增加的趋势(STW1 < STW2 < STW3),且尾矿库内水中EC、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、TC和TOC浓度与下游渗流水(SDSW)中的浓度显著不同。重金属As、Cu和Zn的浓度在不同采样点也存在差异(表1)。

2.2 真菌群落组成与分类鉴定

在STW1、STW2、STW3、SUSW和SDSW这5个采样点中,真菌群落的原始序列数在STW2最小,在SUSW最大;OTU个数分别为404.67、118.66、499.58、460.05和237.33;Chao1指数与OTUs具有相似的变化趋势,也是在STW3最大,在STW2最小(表2)。5个采样点的Shannon指数分别为5.49、2.39、5.09、2.98和2.58;Simpson指数与Shannon指数的变化趋势也有相似性,同样也是在STW1最大而在STW2最小。5个采样点的盖度值(coverage)均大于0.99,表明测序样品的真菌群落可代表该区域真实的真菌群落(表2)。ITS rDNA的拷贝数变化代表真菌群落丰度的变化,真菌群落的丰度从上游(STW1)到下游(STW3)逐渐增多,且差异显著($P < 0.01$),在SUSW采样点真菌群落的拷贝数最小(图1)。

真菌群落隶属于子囊菌门、担子菌门、被孢霉门、隐真菌门、毛霉菌门和壶菌门6个已命名的门以及未鉴定类群(图2)。在门水平,真菌群落在5个采样点均有分布,但是它们的相对丰度存在差异:在SDSW中子囊菌门的相对丰度最高(92.99%);担子菌门的相对丰度在SUSW中最高(70.17%);被孢霉门在STW3中的相对丰度最高(7.08%);在STW2中多数类群属于未分类群(80.64%)。

在5个采样点中,优势纲(相对丰度 > 1%)共12个,平均相对丰度为70.68%;优势目共15个,平均相对丰度为70.55%;优势科共11个,平均相对丰度为51.75%;优势属共19个,平均相对丰度为49.60%(图3)。在STW1和SUSW中相对丰度最大的属均是隶属于担子菌门银耳目银耳纲的布勒掷孢酵母属(*Bullera*),其相对丰度分别为31.84%和68.43%;在STW2中隶属于被孢霉门被孢霉目被孢霉纲的被孢霉属(*Mortierella*)相对丰度最大,为1.79%;在STW3中隶属于子囊菌门肉座菌目粪壳菌纲的支顶孢属(*Acremonium*)的相对丰度最大,为15.25%;在SDSW中隶属于酵母菌目酵母菌纲子囊菌门的亚罗酵母属(*Yarrowia*)相对丰度最大,为41.57%(图3)。

表1 不同采样点水体理化参数(平均值±标准误) (n = 3)

Table 1 Water physical and chemical parameters in different sample sites (mean±SE) (n = 3)

因子 Parameter	采样点 Sample site				
	STW1	STW2	STW3	SUSW	SDSW
pH	9.382 ± 0.095 ^a	9.131 ± 0.053 ^a	8.147 ± 0.048 ^b	8.190 ± 0.032 ^b	8.014 ± 0.076 ^b
溶解氧 DO (mg/L)	8.560 ± 0.195 ^a	10.218 ± 0.466 ^a	10.661 ± 0.527 ^a	10.643 ± 0.281 ^a	11.114 ± 3.292 ^a
电导率 EC (uS/cm)	1,834.333 ± 31.205 ^a	1,832.001 ± 20.466 ^a	865.143 ± 3.106 ^b	1,427.333 ± 59.218 ^{ab}	404.333 ± 8.511 ^c
硝态氮 NO ₃ ⁻ (mg/L)	134.373 ± 5.417 ^a	85.170 ± 1.553 ^{ab}	14.315 ± 1.142 ^{bc}	5.265 ± 0.345 ^c	4.698 ± 0.364 ^c
亚硝态氮 NO ₂ ⁻ (mg/L)	10.548 ± 0.405 ^a	6.959 ± 0.20 ^{ab}	1.259 ± 0.096 ^{bc}	0.575 ± 0.057 ^c	0.478 ± 0.044 ^c
铵态氮 NH ₄ ⁺ (mg/L)	1.453 ± 0.003 ^{ab}	1.715 ± 0.019 ^a	0.340 ± 0.116 ^b	2.333 ± 0.030 ^a	0.387 ± 0.015 ^b
总碳 TC (mg/L)	20.600 ± 0.035 ^c	24.723 ± 0.818 ^{bc}	34.523 ± 3.215 ^{ab}	25.070 ± 0.023 ^{bc}	52.315 ± 0.136 ^a
总有机碳 TOC (mg/L)	7.597 ± 0.003 ^{abc}	8.520 ± 1.529 ^{bc}	14.100 ± 0.075 ^{ab}	5.253 ± 0.020 ^c	19.344 ± 3.374 ^a
无机碳 IC (mg/L)	13.005 ± 0.032 ^c	16.202 ± 0.291 ^{bc}	20.179 ± 2.703 ^{bc}	19.820 ± 0.001 ^{ab}	43.015 ± 0.061 ^a
硫酸盐 SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1,582.500 ± 2.977 ^a	1,207.558 ± 100.997 ^a	837.255 ± 38.754 ^{ab}	897.900 ± 97.900 ^{ab}	117.655 ± 11.311 ^c
砷 As (mg/L)	2.407 ± 0.021 ^a	2.853 ± 0.171 ^a	0.155 ± 0.012 ^b	0.180 ± 0.009 ^{ab}	0.003 ± 0.003 ^b
镉 Cd (mg/L)	0.004 ± 0.001 ^a	0.002 ± 0.001 ^a	0.002 ± 0.003 ^a	0.003 ± 0.002 ^a	BDL
铜 Cu (mg/L)	0.017 ± 0.009 ^{ab}	0.032 ± 0.004 ^a	0.016 ± 0.004 ^{ab}	0.006 ± 0.002 ^b	0.008 ± 0.001 ^b
铅 Pb (mg/L)	0.060 ± 0.036 ^a	0.021 ± 0.013 ^a	0.025 ± 0.030 ^a	0.043 ± 0.006 ^a	BDL
锌 Zn (mg/L)	0.012 ± 0.001 ^{ab}	0.011 ± 0.004 ^b	0.009 ± 0.003 ^b	2.741 ± 1.058 ^a	0.249 ± 0.057 ^a

采样点STW1、STW2和STW3代表尾矿库内沿水流方向从上游到下游的3个采样点, SUSW代表上游渗流水采样点, SDSW代表下游渗流水采样点。同一行不同字母表示在0.05水平下差异显著($P < 0.05$); BDL表示在检出限以下。

The sample sites STW1、STW2 and STW3 represent the three sample sites from upstream to downstream along the flow direction in the tailings reservoir, SUSW represents the upstream seepage water sampling point, and SDSW represents the downstream seepage water sampling point. Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$); BDL is below the detection limit.

表2 十八河尾矿废水中5个采样点真菌群落的丰富度和多样性(平均值±标准误) (n = 3)。

Table 2 Richness and diversity index of the fungal communities in five sample sites of tailings drainage from Shibahe (mean±SE) (n = 3)

采样点 Sampling point	序列数 Sequence number	OTU个数 OTUs	Chao1指数 Chao1 index	Shannon指数 Shannon index	Simpson指数 Simpson index	盖度 Coverage
STW1	76,565.673 ± 251.658 ^c	404.675 ± 13.436 ^c	478.636 ± 25.356 ^b	5.496 ± 0.012 ^a	0.948 ± 0.001 ^a	0.999 ± 0.000 ^a
STW2	63,438.606 ± 317.863 ^d	118.658 ± 6.813 ^c	135.338 ± 10.784 ^d	2.387 ± 0.019 ^c	0.554 ± 0.005 ^d	0.998 ± 0.001 ^a
STW3	80,413.333 ± 224.795 ^b	499.582 ± 12.000 ^a	519.275 ± 16.587 ^a	5.096 ± 0.015 ^b	0.938 ± 0.001 ^b	0.997 ± 0.001 ^b
SUSW	81,207.36 ± 165.631 ^a	460.055 ± 6.084 ^b	484.696 ± 11.345 ^b	2.982 ± 0.017 ^c	0.586 ± 0.004 ^d	0.996 ± 0.001 ^b
SDSW	81,094.014 ± 45.935 ^a	237.336 ± 19.759 ^d	259.418 ± 11.001 ^c	2.585 ± 0.013 ^d	0.692 ± 0.002 ^c	0.999 ± 0.001 ^a

同一列不同字母表示在0.05水平下差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$)

2.3 真菌群落组成与环境参数的相关性

真菌群落的OTUs和Chao 1指数与pH、As和Cu浓度显著负相关; Shannon指数与IC浓度显著负相关, Simpson指数与NH₄⁺浓度显著负相关; 真菌群落的丰度(拷贝数)与TOC含量显著正相关(表3)。

冗余分析发现, 在门水平pH和NH₄⁺对真菌群落有一定的影响, 但是影响不显著($F = 1.3$, $P = 0.306$) (图4a); 真菌优势纲在不同采样点的分布格局受到pH、NH₄⁺和IC的影响, 但是影响也不显著($F = 5.1$, $P = 0.134$) (图4b); 真菌优势目在不同采

样点的分布格局主要受到IC和pH的影响($F = 4.5$, $P < 0.05$) (图4c); 真菌优势科在不同采样点的分布格局主要受到TOC和Cu的影响($F = 15.4$, $P = 0.051$) (图4d); 真菌优势属在不同采样点的分布格局主要受到IC、Cu和NH₄⁺的影响($F = 4.5$, $P < 0.05$) (图4e)。

2.4 真菌群落空间结构及其影响因素

基于Bray-Curtis距离的PCoA排序结果表明真菌群落不同采样点的空间结构存在差异($R = 0.36$, $P < 0.05$) (图5a)。通过前选择筛选出的对真菌群落空间分布影响较大的因子是IC和pH, 但是这2个理

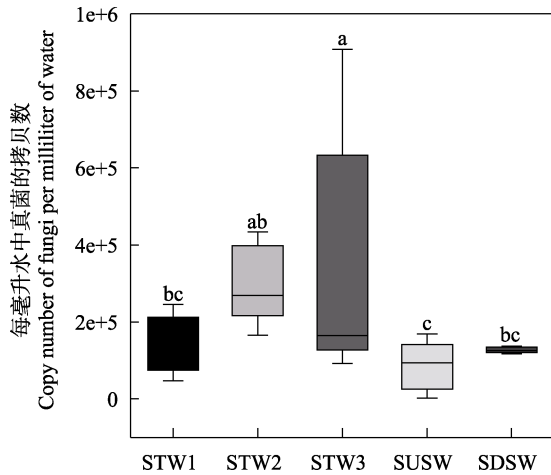


图1 不同采样点真菌群落ITS rDNA拷贝数。STW1、STW2和STW3表示尾矿库中3个采样点，SUSW和SDSW表示尾矿库外2个渗流水采样点。

Fig. 1 Fungal ITS rDNA copy numbers at the different sample points. STW1, STW2 and STW3 represent three sample sites in the tailings reservoir, SUSW and SDSW represent two seepage water sample sites outside the tailings reservoir.

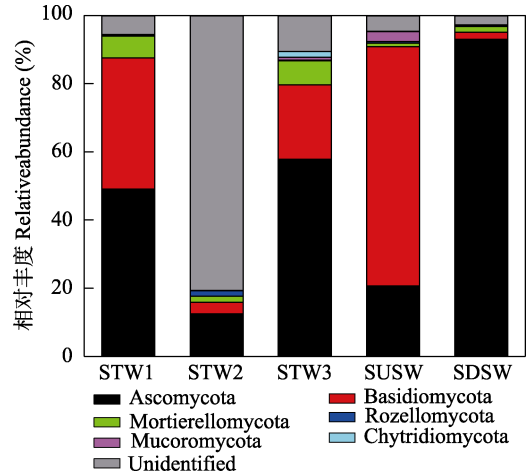


图2 不同采样点真菌群落门类水平的组成。STW1、STW2和STW3表示尾矿库中3个采样点，SUSW和SDSW表示尾矿库外2个渗流水采样点。

Fig. 2 Fungal community composition of each sampling point at the phyla level. STW1, STW2 and STW3 represent three sampling points in the tailings reservoir, SUSW and SDSW represent two seepage water sample sites outside the tailings reservoir.

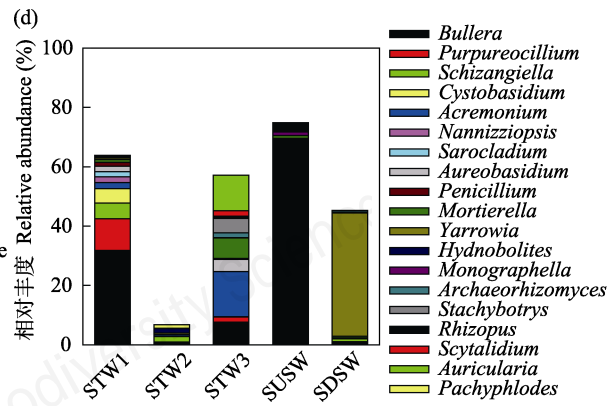
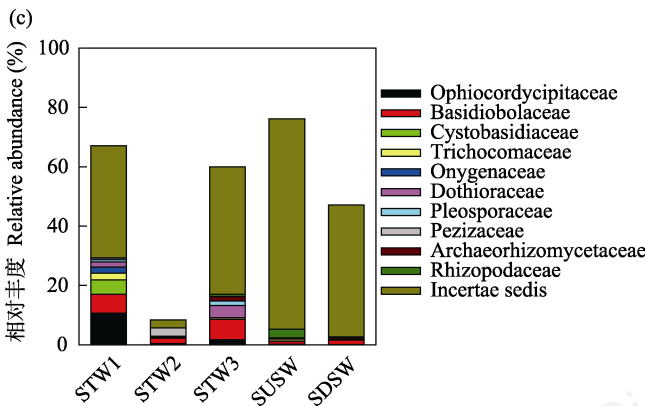
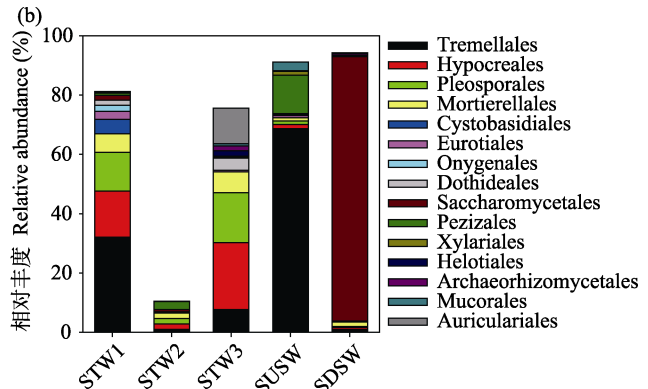
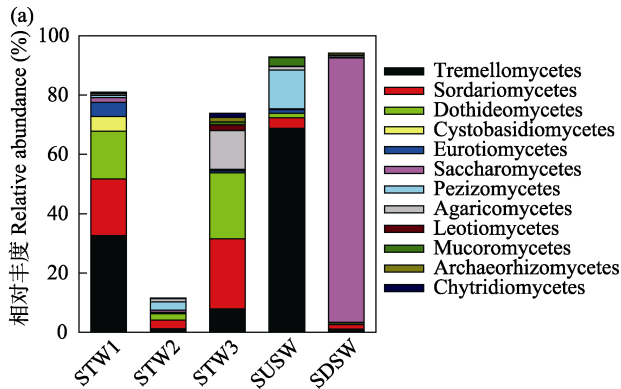


图3 不同采样点真菌群落的优势类群。(a)纲水平；(b)目水平；(c)科水平；(d)属水平。STW1、STW2和STW3表示尾矿库中3个采样点，SUSW和SDSW表示尾矿库外2个渗流水采样点。

Fig. 3 Dominant fungi in different sample sites. (a) Class level; (b) Order level; (c) Family level; (d) Genus level. STW1, STW2 and STW3 represent three sampling points in the tailings reservoir, SUSW and SDSW represent two seepage water sample sites outside the tailings reservoir.

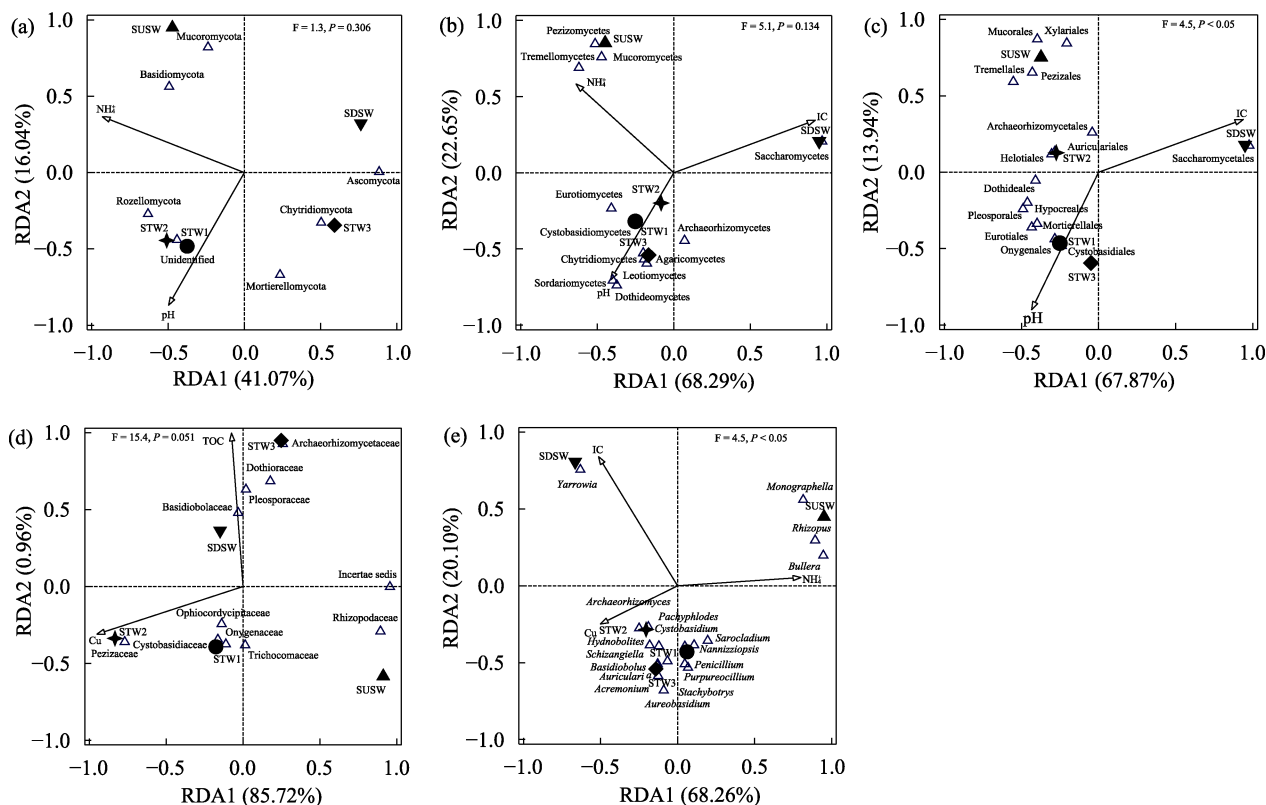


图4 真菌优势类群组成与环境因子的RDA分析。(a)门水平;(b)纲水平;(c)目水平;(d)科水平;(e)属水平。NH₄⁺: 铵态氮; IC: 无机碳; TOC: 总有机碳; Cu: 铜。

Fig. 4 RDA showing the relationship between environmental parameters and composition of dominant fungal taxa. (a) Phylum level; (b) Class level; (c) Order level; (d) Family level; (e) Genus level. NH₄⁺: Ammonium nitrogen; IC: Inorganic carbon; TOC: Total organic carbon; Cu: Copper.

表3 真菌群落的α多样性指数与环境参数的相关性系数
Table 3 Correlation coefficient of α diversity index of fungal communities and environmental parameters

环境因子 Parameter	OTUs	Chao 1 指数 Chao 1 index	Shannon index	Simpson index	拷贝数 Copies
pH	-0.706**	-0.710**	-0.258	-0.268	0.107
DO	-0.193	-0.179	-0.329	-0.404	0.057
EC	-0.338	-0.336	-0.007	-0.200	0.257
NO ₃ ⁻	-0.132	-0.129	0.346	0.293	0.493
NO ₂ ⁻	-0.132	-0.132	0.350	0.296	0.471
NH ₄ ⁺	-0.189	-0.198	-0.214	-0.536*	-0.307
TC	0.106	0.086	-0.343	-0.118	-0.004
TOC	0.060	0.080	-0.025	0.297	0.425*
IC	-0.203	-0.244	-0.530*	-0.434	-0.498
SO ₄ ²⁻	-0.262	-0.270	0.229	0.068	0.007
As	-0.628*	-0.632*	-0.186	-0.261	0.104
Cd	-0.376	-0.340	-0.004	0.082	-0.021
Cu	-0.616*	-0.579*	-0.400	-0.239	0.346
Pb	-0.126	-0.082	0.179	0.039	-0.190
Zn	0.179	0.161	-0.050	-0.146	-0.350

环境参数代号和单位同表1 Environmental parameters are the same as Table 1. *P < 0.05; **P < 0.01.

化因子对群落空间结构的影响不显著($F = 2.8, P = 0.062$) (图5b)。零模型分析发现在5个采样点真菌群落的零偏差值均大于零,且在5个采样点的零偏差值存在差异,在SUSW和SDSW中较大,而在STW1中最小(图5c)。

不同真菌类群之间存在显著的相互作用关系,在223个真菌属中有相互关系的属共220个,连接的边1,761条,其中只有5条边显示负相关性,占全部边的0.28%。在整个网络中共有6个独立的模块,每个模块的节点和边的个数不同,模块1中的节点个数最多,而模块4中边的个数最多(图6)。

3 讨论

3.1 尾矿废水中的真菌群落组成和影响因素

沿废水流动方向水体理化参数形成了明显的污染梯度,氮含量沿水流方向逐渐减少而碳含量逐渐增加,且库内水的pH、EC和SO₄²⁻显著高于渗流水(表1)。由于尾矿坝用尾矿砂堆积而成,因此尾矿坝

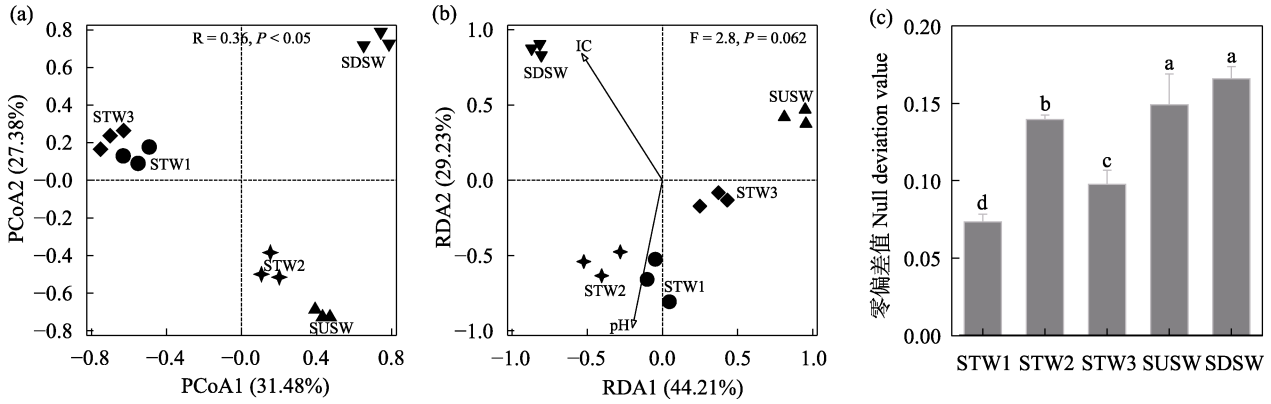


图5 真菌群落空间分布格局及其影响因素。(a)在OTU水平基于Bray-Curtis距离的真菌群落PCoA排序结果；(b)真菌群落结构与环境因子的冗余分析；(c)基于Bray-Curtis距离的零偏差结果。IC：无机碳；STW1、STW2和STW3表示尾矿库中3个采样点，SUSW和SDSW表示尾矿库外2个渗流水采样点。

Fig. 5 Spatial distribution pattern of fungal community structure and its influencing factors. (a) PCoA analysis based on Bray-Curtis similarities of fungal communities at OTU level; (b) RDA showing the relationship between environmental parameters and fungal communities; (c) Null deviation result based on Bray-Curtis distance. IC: Inorganic carbon; STW1, STW2 and STW3 represent three sample sites in the tailings reservoir, SUSW and SDSW represent two seepage water sample sites outside the tailings reservoir.

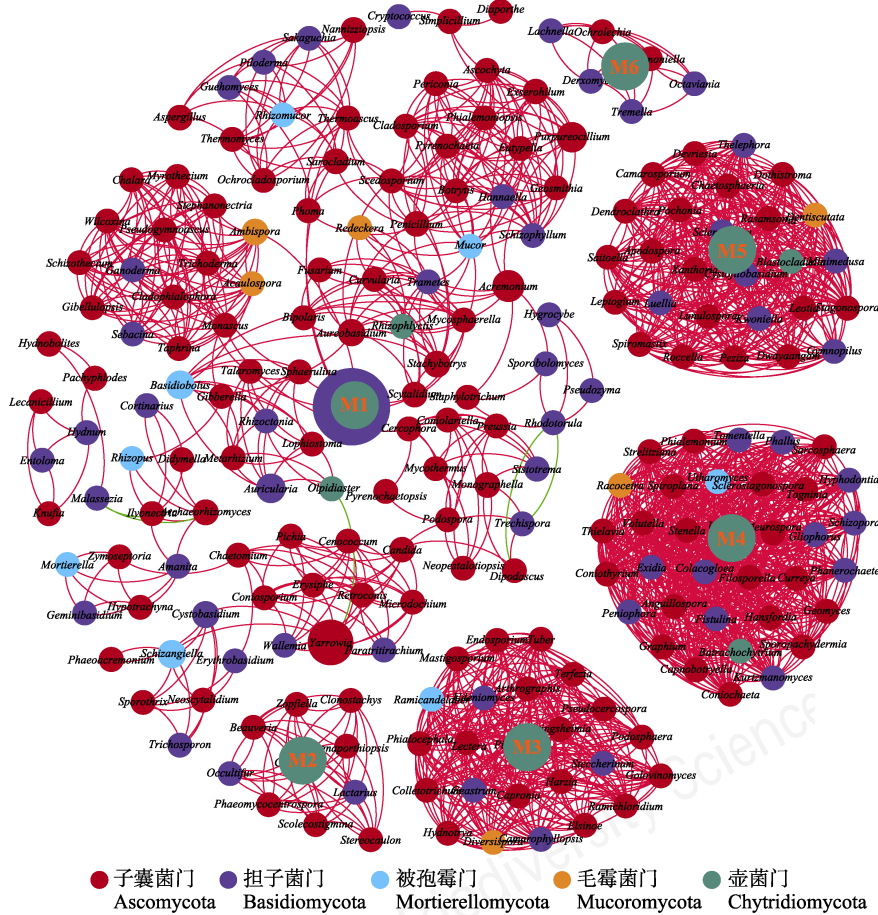


图6 属水平真菌类群间相互作用网络图。每个节点代表一个属，M1–M6代表6个独立模块，节点大小与丰度成正比，有显著相关性的节点通过线连接起来，红线表示正相关，绿线表示负相关。

Fig. 6 Network interactions of fungal groups at genus level. Each circle represents a genus and M1–M6 represent the six independent modules in the network diagram. The sizes of the circles are proportional to the value of abundance. Lines connecting two nodes represent the interactions between them. Red lines represent the positive significant correlations and green lines represent a negative significant correlation.

体就像一个过滤柱,尾矿水在渗流过程中含有的部分重金属和其他污染物被过滤掉,因此渗流水SUSW和SDSW中pH、EC、NO₃⁻、NO₂⁻和SO₄²⁻的含量低于库内水(STW)。在这样的环境梯度下,不同采样点真菌群落的 α -多样性(表2)和丰度(图1)存在差异。比较有意思的是,在中度污染的STW2采样点真菌群落的丰富度(OTUs和Chao 1)最小(表2),这似乎与“中度干扰假说”(Connell, 1978)相悖。一方面,可能是由于在STW2采样点重金属Cu和As的浓度相对较高(表1),且这两个重金属的浓度与真菌群落的OTU个数和Chao 1指数显著负相关(表3)。在本研究中,虽然已测的每种重金属的浓度都较低(表1),但是多种重金属共存时真菌对重金属的耐受性会降低,且Cu和Zn共存时其毒性会增加(樊霆, 2009); As是毒性较强的重金属之一,在STW1和STW2采样点As的浓度超过国标要求的工业废水排放标准(0.5 mg/L),而较高浓度的As会对微生物群落产生明显抑制作用,降低微生物的数量和多样性(杨振兴等, 2015),从而使As浓度最高的STW2采样点真菌群落的多样性较低。另一方面, pH也对真菌群落丰富度有显著影响(表3),在土壤(Glassman et al, 2017)和水体(Bier et al, 2015; Sun et al, 2016)中, pH梯度对微生物群落的组成均影响显著。真菌群落生长的最适pH范围是5.0–8.0 (樊霆, 2009),而在我们的研究区域pH范围是8.014–9.382,因此对真菌群落的多样性有显著影响。

在5个采样点中, Shannon和Simpson指数在STW2采样点也最小(表2),且与IC和NH₄⁺浓度显著负相关(表3)。大多数真菌类群是异养生物,碳源是它们的主要能量来源,因此在IC浓度高的地方真菌群落聚集引起群落均匀度降低(Jebaraj et al, 2010); 武俊男等(2018)的研究结果表明NH₄⁺能降低真菌群落的丰富度和多样性,这与我们的研究结果一致。

真菌群落的丰度沿水流方向(STW1到STW3)逐渐增加,这主要受到有机碳含量变化的影响(表3),在有机碳含量高的地方真菌群落能获得更多的能量(Arifi et al, 2012),因此在STW3采样点真菌群落的丰度也高。但是,在有机碳含量最高的SDSW采样点真菌群落的丰度反而较低(图1)。我们推测可能的原因是在下游流速缓慢且污染程度较低的渗流水中藻类的种类和数量较高(遗憾的是我们没有分析藻类的组成和数量)。

真菌群落的相对丰度不论是在门(图2)还是纲、目、科和属水平上(图3)均有差异。子囊菌门和担子菌门是6个门中相对丰度最高的2个门,子囊菌门的相对丰度沿水流方向从STW1到SDSW逐渐增加,而担子菌门的相对丰度则逐渐减小(图2)。这表明碳以及其他营养资源稀缺且存在pH和重金属胁迫的环境有利于菌丝生长缓慢的担子菌门中的真菌类群生长(Gostinčar et al, 2010)。担子菌门的优势属是布勒掷孢酵母属和囊担菌属(图3d),它们对极端环境都有较强的适应性。布勒掷孢酵母属能很好地利用烃类等难降解有机碳作为碳源,且通过分泌特殊种类的 β -葡糖苷酶来增强对酸碱性的耐受力(魏娜等, 2014),因此能在pH值为9.38的碱性尾矿废水中繁殖增长。囊担菌属对极端环境也有很好的适应性,徐炜(2014)对深海沉积物和深海热液区的真菌群落研究发现,这些样品中均发现有囊担菌属真菌类群,说明它们可以耐受高温、低氧以及高压的极端环境。我们的研究结果证实囊担菌属在复合污染的尾矿废水中也能很好地适应。在可利用资源增加且胁迫降低的生境中,利于菌丝体快速生长的子囊菌增加,促使子囊菌占据更多的空间(Sterkenburg et al, 2015)。许多子囊菌可产生强大的降解酶并能高效利用底物,可以最大限度地利用现有资源并将其转化为生物量,因此在可利用资源较多的下游子囊菌的丰度较高。

3.2 真菌群落的分布格局和维持机制

在不同采样点真菌群落的分布从门到OTU水平均有变化,环境因子只在目和属水平对这种格局的形成有显著影响(图4, 图5)。这是因为从门到OTU内的物种可能具有非常不同的生态位,而真菌的不同功能分类群对环境驱动因素的反应可能不同(Sterkenburg et al, 2015)。在目水平,不同采样点真菌群落分布格局的形成主要受pH和IC的影响,而属水平主要受IC、NH₄⁺和Cu的影响(图4)。在本研究中即使重金属的浓度较低,但在属水平Cu对真菌群落的影响也是显著的。有研究表明在重金属污染地区筛选出的一些真菌菌株对重金属有很好的耐受和富集作用(杨振兴等, 2015)。研究表明对重金属有较好耐受性的真菌类群主要是青霉菌属(*Penicillium*)、木霉属(*Trichoderma*)和曲霉属(*Aspergillus*) (樊霆, 2009; 闫华等, 2018),且这些研究多数是在稳定可控的室内环境下完成。本研究中

只有青霉菌属属于优势属(相对丰度为0.002%–1.407%),相对丰度只在采样点STW1超过1%(图3d)。重金属对微生物群落的影响程度因重金属价态不同而差异明显(杨振兴等,2015),这可能也是重金属Cu对真菌优势属有显著影响的重要原因。无机碳对真菌群落生长具有积极的促进作用,可促进真菌胞外酶的活性,从而增强其对环境胁迫的抵抗力(李艳红等,2013),而重金属对真菌群落的影响主要表现在抑制真菌对碳源的利用上,可降低真菌对碳源的利用力和利用率(闫华等,2018),从而影响真菌群落的组成和多样性。无机碳和重金属对真菌群落的这种拮抗作用,使真菌群落达到稳定的动态平衡。

在OTU水平上不同采样点的真菌群落虽然具有不同的空间分布(图5a),但是通过RDA前选择筛选出的2个因子(pH和IC)的影响并不显著(图5b)。这表明在尾矿废水这样的生境中真菌群落空间格局的分布模式,并不是环境因子直接筛选的结果,而零模型分析结果(图5c)表明种间相互作用是影响群落空间分布格局的主要因素。在许多生态系统中,不同物种之间的相互作用对群落分布格局和生态系统功能至关重要。在生态系统循环过程中,微生物类群之间的相互作用似乎比物种丰富度和丰度以及多样性对生态系统过程和功能的贡献更大(Lupatini et al, 2014)。在本研究中我们通过网络图分析发现,真菌群落的不同属之间存在显著的相互作用,且主要表现为正相关性(图6)。表明在尾矿废水中不同真菌类群之间主要表现为一种互利的相互作用,从而提高各自的抵抗力。真菌类群之间的种间相互关系网络形成了大小和复杂程度不同的6个模块(图6),这表明不同物种在生态系统过程中发挥的功能不同(Zhou et al, 2011),且各自的作用大小不同,一个物种与其关联的物种越多,表明该物种越重要。这也说明一个物种在生态系统中是否具有重要作用与其丰度没有直接的关系,丰度小的物种也可能是关键物种,反之亦然。我们的研究结果表明,在复合污染的铜尾矿废水中微生物之间直接和间接相互作用的复杂网络控制着生态系统的过程和结果。在这个相互作用的复杂网络中,在遗传、形态和功能上具有多样性的真菌类群发挥着多种作用,它们与水体中其他类群之间既有拮抗作用,也有协同作用(Grossart et al, 2019)。虽然同种生物

往往由于对资源的竞争普遍存在拮抗作用(Selbmann et al, 2013),如水生丝孢菌对其他物种的生长具有抑制作用,但是在极端生境中它们却主要表现为协同作用。这表明,在生态网络中不同微生物类群之间表现为协同作用还是拮抗作用,会因生境的不同而发生变化。

综上所述,中条山十八河尾矿废水沿排出方向从上游到下游形成了污染梯度,在该生境中真菌群落的组成在不同采样点明显不同。真菌群落的丰度沿污染梯度从上游到下游逐渐增加,这种变化主要受到TOC浓度变化的影响;pH、重金属(As和Cu)、IC和 NH_4^+ 是影响真菌群落 α -多样性变化的主要因子。子囊菌门和担子菌门是2个主要的优势门,它们的相对丰度沿水平方向呈相反的变化趋势,表明它们对环境的适应机制不同。担子菌门中的优势属布勒掷孢酵母属和囊担菌属能够适应高污染生境,因此可作为尾矿区域生态恢复的备选菌群。真菌群落 β -多样性在不同采样点的差异,主要由种间相互作用引起。总的来说,在碱性尾矿废水中真菌群落的 α -多样性主要受环境因子影响,而 β -多样性主要受种间相关作用影响。

ORCID

刘晋仙  <https://orcid.org/0000-0002-1957-0981>

柴宝峰  <https://orcid.org/0000-0002-0024-0659>

罗正明  <https://orcid.org/0000-0003-3719-629X>

参考文献

- Aguilera A, González-Toril E (2019) Eukaryotic Life in Extreme Environments: Acidophilic Fungi. pp. 21–38. Springer, Cham.
- Arfi Y, Marchand C, Wartel M, Record E (2012) Fungal diversity in anoxic-sulfidic sediments in a mangrove soil. *Fungal Ecology*, 5, 282–285.
- Baker BJ, Banfield JF (2003) Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, 44, 139–152.
- Bier RL, Voss KA, Bernhardt ES (2015) Bacterial community responses to a gradient of alkaline mountaintop mine drainage in Central Appalachian streams. *The ISME Journal*, 9, 1378–1390.
- Chase JM, Kraft NJB, Smith KG, Vellend M, Inouye BD (2011) Using null models to disentangle variation in community dissimilarity from variation in α -diversity. *Ecosphere*, 2, 1–11.
- Connell JH (1978) Diversity in tropical rain forests and coral

- reefs. *Science*, 199, 1302–1310.
- Dreesens LL, Lee CK, Cary SC (2014) The distribution and identity of edaphic fungi in the McMurdo dry valleys. *Biology*, 3, 466–483.
- Fan T (2009) Resistance Mechanism and Enrichment Characteristics of Fungi to Heavy Metals. PhD dissertation, Hunan University, Changsha. (in Chinese with English abstract) [樊霆 (2009) 真菌对重金属的抗性机制和富集特性研究. 博士学位论文, 湖南大学, 长沙.]
- Glassman SI, Wang IJ, Bruns TD (2017) Environmental filtering by pH and soil nutrients drives community assembly in fungi at fine spatial scales. *Molecular Ecology*, 26, 6960–6973.
- Gostinčar C, Grube M, de Hoog S, Zalar P, Gunde-Cimerman N (2010) Extremotolerance in fungi: Evolution on the edge. *FEMS Microbiology Ecology*, 71, 2–11.
- Grossart HP, Wyngaert SV, Kagami M, Wurzbacher C, Cunliffe M, Rojas-Jimenez K (2019) Fungi in aquatic ecosystems. *Nature Reviews Microbiology*, 17, 339–354.
- He MX, Gao Y, Sun QY (2011) Influence of mine tailings drainage on microbial diversity in the river sediment and paddy soil. *Environmental Science*, 32, 1778–1785. (in Chinese with English abstract) [贺梦醒, 高毅, 孙庆业 (2011) 尾矿废水对河流沉积物和稻田土壤细菌多样性的影响. *环境科学*, 32, 1778–1785.]
- Iram S, Ahmad I, Javed B, Yaqoob S, Akhtar K, Kazmi MR, Badar-uz-Zaman (2009) Fungal tolerance to heavy metals. *Pakistan Journal of Botany*, 41, 2583–2594.
- Jebaraj CS, Raghukumar C, Behnke A, Stoeck T (2010) Fungal diversity in oxygen-depleted regions of the Arabian Sea revealed by targeted environmental sequencing combined with cultivation. *FEMS Microbiology Ecology*, 71, 399–412.
- Li HY, Li DW, He CM, Zhou ZP, Mei T, Xu HM (2012) Diversity and heavy metal tolerance of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China. *Fungal Ecology*, 5, 309–315.
- Li YH, Jiang Y, Wang WJ, Zhang BY (2013) Effect of organic and inorganic carbon on extracellular enzyme activity of acid phosphatase and proteases in three kinds of fungal hyphae. *Bulletin of Botanical Research*, 33, 404–409. (in Chinese with English abstract) [李艳红, 姜勇, 王文杰, 张宝友 (2013) 有机碳和无机碳对3种真菌胞外酸性磷酸酶和蛋白酶活性的影响. *植物研究*, 33, 404–409.]
- Liu JX, Li C, Jing JH, Zhao PY, Luo ZM, Cao MW, Ma ZZ, Jia T, Chai BF (2018) Ecological patterns and adaptability of bacterial communities in alkaline copper mine drainage. *Water Research*, 133, 99–109.
- Liu JX, Li C, Luo ZM, Wang X, Bao JB, Chai BF (2019) Distribution pattern and diversity maintenance mechanisms of fungal community in subalpine lakes. *Environmental Science*, 40, 2382–2393. (in Chinese with English abstract) [刘晋仙, 李鑫, 罗正明, 王雪, 暴家兵, 柴宝峰 (2019) 亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制. *环境科学*, 40, 2382–2393.]
- Liu YH, Zhao HX (2000) Advances in theory of disturbance and species diversity preservation. *Journal of Beijing Forestry University*, 22, 101–105. (in Chinese with English abstract) [刘艳红, 赵惠勋 (2000) 干扰与物种多样性维持理论研究进展. *北京林业大学学报*, 22, 101–105.]
- Lupatini M, Suleiman AKA, Jacques RJS, Antonioli ZI, de Siqueira Ferreira AO, Kuramae EE, Roesch LFW (2014) Network topology reveals high connectance levels and few key microbial genera within soils. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 1–11.
- Ma Y, Yu XB (2017) Research progress on bioaccumulation of heavy metals in wastewater by filamentous fungi. *Biotechnology Bulletin*, 33(10), 59–63. (in Chinese with English abstract) [马燕, 余晓斌 (2017) 丝状真菌生物富集重金属废水的研究进展. *生物技术通报*, 33(10), 59–63.]
- Nagano Y, Nagahama T, Hatada Y, Nunoura T, Takami H, Miyazaki J, Takai K, Horikoshi K (2010) Fungal diversity in deep-sea sediments—The presence of novel fungal groups. *Fungal Ecology*, 3, 316–325.
- Newsham KK (2012) Fungi in extreme environments. *Fungal Ecology*, 5, 379–380.
- Orgiazzi A, Lumini E, Nilsson RH, Giralanda M, Vizzini A, Bonfante P, Bianciotto V (2012) Unravelling soil fungal communities from different Mediterranean land-use backgrounds. *PLoS ONE*, 7, e34847.
- Osono T, Ueno T, Uchida M, Kanda H (2012) Abundance and diversity of fungi in relation to chemical changes in arctic moss profiles. *Polar Science*, 6, 121–131.
- Selbmann L, Egidio E, Isola D, Onofri S, Zucconi L, de Hoog GS, Chinaglia S, Testa L, Tosi S, Balestrazzi A, Lantieri A, Compagno R, Tigini V, Varese GC (2013) Biodiversity, evolution and adaptation of fungi in extreme environments. *Plant Biosystems*, 147, 237–246.
- Sterkenburg E, Bahr A, Durling MB, Clemmensen KE, Lindahl BD (2015) Changes in fungal communities along a boreal forest soil fertility gradient. *New Phytologist*, 207, 1145–1158.
- Sun WM, Xiao EZ, Krumins V, Dong YR, Xiao TF, Ning ZP, Chen HY, Xiao QX (2016) Characterization of the microbial community composition and the distribution of Fe-metabolizing bacteria in a creek contaminated by acid mine drainage. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 8523–8535.
- Tucker CM, Shoemaker LG, Davies KF, Nemergut DR, Melbourne BA (2016) Differentiating between niche and neutral assembly in metacommunities using null models of β -diversity. *Oikos*, 125, 778–789.
- Wei N, Xu Q, Zhang N, Li BX (2014) Ballistosporous yeasts:

- A review on systematics, cell differentiation, and their applications. *Microbiology China*, 41, 1211–1218. (in Chinese with English abstract) [魏娜, 徐琼, 张宁, 李炳学 (2014) 掷孢酵母及其应用研究进展. *微生物学通报*, 41, 1211–1218.]
- Wu JN, Liu YX, Zhou X, Wang TY, Gao Q, Gao YH, Liu SX (2018) Effects of long-term different fertilization on soil fungal communities in black soil based on the Illumina MiSeq platform. *Acta Microbiologica Sinica*, 58, 1658–1671. (in Chinese with English abstract) [武俊男, 刘昱辛, 周雪, 王天野, 高强, 高云航, 刘淑霞 (2018) 基于Illumina MiSeq测序平台分析长期不同施肥处理对黑土真菌群落的影响. *微生物学报*, 58, 1658–1671.]
- Xu W (2014) Fungal Community Structure and Abundance of Deep-sea Sediments from the Pacific Ocean and Hydrothermal Vent Samples from the South Atlantic Ocean. PhD dissertation, Xiamen University, Xiamen. (in Chinese with English abstract) [徐炜 (2014) 太平洋深海沉积物与南大西洋深海热液区样品的真菌群落结构和丰度研究. 博士学位论文, 厦门大学, 厦门.]
- Yan H, Ouyang M, Zhang XH, Duo Y, Zhao XJ, Zhang YJ, Zheng JF, Liu XY, Pan GX, Bian RJ, Li LQ (2018) Effects of different gradients of heavy metal contamination on soil fungi community structure in paddy soils. *Soils*, 50, 513–521. (in Chinese with English abstract) [闫华, 欧阳明, 张旭辉, 多应, 赵熙君, 张玉娇, 郑聚锋, 刘晓雨, 潘根兴, 卞荣军, 李恋卿 (2018) 不同程度重金属污染对稻田土壤真菌群落结构的影响. *土壤*, 50, 513–521.]
- Yang ZX, Tian CK, Dang CY, Chang F, Ni JR (2015) Comparative study on Pb(II), Cd(II), As(III), Cr(VI) resistance characteristics of fungus. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Natural Science)*, 51, 667–676. (in Chinese with English abstract) [杨振兴, 田从魁, 党晨原, 常方, 倪晋仁 (2015) 真菌对重金属Pb(II), Cd(II), As(III)和Cr(VI)耐受性的比较研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 51, 667–676.]
- Zhou JZ, Deng Y, Luo F, He ZL, Yang YF (2011) Phylogenetic molecular ecological network of soil microbial communities in response to elevated CO₂. *mBio*, 2, e00122-11.

(责任编辑: 高程 责任编辑: 时意专)



•研究报告•

黄海生态区保护空缺分析

曲方圆^{1,2}, 李淑芸¹, 赵林林^{1,2}, 杨松颖^{3,4}, 万铭扬⁴, 蔡吕彤³, 张朝晖^{1,2*}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东青岛 266237; 3. 世界自然基金会(瑞士)北京代表处, 北京 100037; 4. 深圳市一个地球自然基金会, 广东深圳 518000

摘要: 黄海生态区是世界自然基金会筛选出来的全球最优先保护的43个海洋生态区之一。目前, 我国已在黄海生态区内建立多处海洋保护地, 有效保护了其海洋生态系统及生物多样性。然而我国海洋保护地管理和建设中仍有许多问题, 存在较多保护空缺区域。因此, 完善黄海生态区内的海洋保护地建设是非常关键的。本文利用空缺分析法研究了黄海生态区内的重要滨海湿地、关键物种以及重点海域, 以识别保护空缺理论图斑, 从而提出新建保护地的提议。根据空缺分析结果, 黄海生态区内的主要保护空缺为辽河口湿地、曹妃甸海草床、天津塘沽和黄骅湿地、胶东半岛湿地、舟山群岛等。建议优化整合黄河口海洋保护地, 扩大或新建斑海豹(*Phoca largha*)、勺嘴鹬(*Eurynorhynchus pygmeus*)保护地, 并加强对东亚江豚(*Neophocaena asiaorientalis sunameri*)以及小须鲸(*Balaenoptera acutorostrata*)的调查研究, 以形成更有效的海洋保护地网络。

关键词: 黄海生态区; 海洋保护地; 空缺分析; 关键物种; 滨海湿地

曲方圆, 李淑芸, 赵林林, 杨松颖, 万铭扬, 蔡吕彤, 张朝晖 (2021) 黄海生态区保护空缺分析. 生物多样性, 29, 385–393. doi: 10.17520/biods.2020443. Qu FY, Li SY, Zhao LL, Yeung CW, Wan MY, Cai LT, Zhang ZH (2021) Conservation gap analysis for the Yellow Sea Ecoregion. Biodiversity Science, 29, 385–393. doi: 10.17520/biods.2020443.

Conservation gap analysis for the Yellow Sea Ecoregion

Fangyuan Qu^{1,2}, Shuyun Li¹, Linlin Zhao^{1,2}, Chungwing Yeung^{3,4}, Mingyang Wan⁴, Lyutong Cai³, Zhaohui Zhang^{1,2*}

1 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061

2 Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237

3 World Wide Fund for Nature (Switzerland) Beijing Representative Office, Beijing 100037

4 Shenzhen One Planet Foundation, Shenzhen, Guangdong 518000

ABSTRACT

Aims: The Yellow Sea Ecoregion is one of 43 marine ecoregions and is considered a global conservation priority as identified by World Wide Fund for Nature. The Yellow Sea Ecoregion comprises 460,000 km², has a mean water depth of 46 m, and contains abundant biodiversity and biological resources. Due to intensified anthropogenic activities and global climate change, the Yellow Sea Ecoregion is facing severe transboundary threats, which have had strong negative impacts on important habitats and key species of the region. To address this issue, the World Wide Fund for Nature organized Chinese, Japanese, and Korean scientists to prepare an assessment report on the status of biodiversity in the Yellow Sea Ecoregion, in which 23 potential priority areas were identified to promote conservation of the region. Until 2019, China had established 152 marine protected areas covering an area of 80,400 km² in the Yellow Sea Ecoregion, which aim to protect marine ecosystems and biodiversity. However, several issues with China's management and construction of the marine protected areas, such as a lack of top-level design, limited management capacity, a lack of financial funding, and poorly balanced spatial development, leave many conservation gaps to be filled to ensure protected areas operate effectively. Therefore, it is of vital importance to improve the designation, management and development of marine protected areas within the Yellow Sea Ecoregion.

Methods: In this paper, the research area was the portion of the Yellow Sea Ecoregion identified by World Wide Fund for Nature under China's jurisdiction. We used a gap analysis to identify important yet unprotected coastal wetland, key marine species, and marine ecosystems of the Yellow Sea Ecoregion. We first identified the important ecological

收稿日期: 2020-11-29; 接受日期: 2021-02-09

基金项目: 世界自然基金会(WWF)海洋项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhangzhaohui@fio.org.cn

function zones, areas rich in biodiversity, important habitats, and landscape geological relics and mapped their distribution as potential priority areas. Next, we collected information on the distribution of existing marine protected areas. We then used ArcGIS 10.4 to compare the distributions of our identified potential priority areas with the distributions of existing marine protected areas to identify conservation gaps, and proposed new marine protected areas based on the identified gap patches.

Results: Based on our analysis, the key conservation gaps of the Yellow Sea Ecoregion were located in the Yellow River estuary; the coastal wetlands in the Liaohe Estuary, Huanghua and Tanggu, the Jiaodong Peninsula, and Jiangsu Province; the Caofeidian seagrass bed; the Zhoushan fishing ground; and the breeding area and migratory route of spotted seal. The Daliao River Estuary and the southern part of Liaohe Estuary wetlands in Yingkou, the Caofeidian seagrass bed, the wetland along the east coast of Huanghua, the Tiaozini wetland, the Yuhe Estuary, and the Weihe Estuary wetland were the relatively larger gap patches. Spotted seal (*Phoca largha*), Spoon-billed Sandpiper (*Eurynorhynchus pygmeus*), East Asian Finless Porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*) and Common Minke Whales (*Balaenoptera acutorostrata*) were key species of concern.

Conclusions: Our results suggest that new marine protected areas for Spotted Seal and Spoon-billed Sandpiper be established near Dalian along Jiangsu coast. At the same time, a lack of accurate distribution data hinders understanding the protection needs of East Asian Finless Porpoises and Common Minke Whales. To enhance our understanding of their distributions, further research and surveys of East Asian Finless Porpoises and Common Minke Whales are needed to inform the establishment of suitable protected areas and bolster the effectiveness of the marine protected network. We recommend that strengthening the scientific designation and management of marine protected areas, actively integrating resources from all sectors of society to conduct research and assessment, guaranteeing funding sources, promoting sustainable development of marine ecological industry, enhancing capacity building and the degree of stakeholder participation, and applying more creative cooperation approaches are fundamental to ensuring the success of future designation, management, and development of marine protected areas in the Yellow Sea Ecoregion.

Key words: Yellow Sea Ecoregion; marine protected area; gap analysis; key species; coastal wetland; biodiversity; conservation

世界自然基金会(World Wide Fund for Nature, WWF)于1997年开始致力于生态区的保护事业,以应对全球不断加快的物种灭绝速度和生境的持续退化。世界自然基金会组织全球科学家们进行评估,筛选出了238个能代表全球生物多样性中最具保护价值的陆地和水域生态区,其中陆地生态区有142个,淡水生态区53个,海洋生态区43个(Olson & Dinerstein, 2002)。

黄海生态区(Yellow Sea Ecoregion, YSE)是全球最优先保护的43个海洋生态区之一,是唯一涉及中国海域的生态区。其空间范围以黄海为核心,两侧扩展至整个渤海和东海北部,海域面积达460,000 km²。该区域具有极其丰富的生物多样性和生物资源,同时也面临着人类活动的巨大威胁(Zhang et al, 2019)。世界自然基金会组织中、日、韩三国的科学家于2008年完成了《黄海生态区生物多样性评估报告》(Tobai et al, 2008),选划了23个潜在优先地区(potential priority areas, PPA),并以此为重点推动黄海生态区的保护工作。中国政府一直注重该海域的保护工作,截至2018年,全国已经建成

各级海洋保护地(marine protected areas, MPAs) 271处,其中国家级海洋保护地102处,总面积达12.4万 km²,约占国家管辖海域面积的4.1% (赵林林等, 2019)。截至2019年底,黄海生态区已选划建立海洋自然保护区、海洋特别保护区、海域水产种质资源保护区共152处,总面积8.04万 km²,基本覆盖了黄海生态区沿岸省/市,有效保护了生态区内的海洋生态系统及生物多样性。这些海洋保护地的建设与管理对黄海生态区范围内的珍稀濒危生物、重要生境和重要资源的保护都有着重要作用。然而我国目前的海洋保护地管理和建设过程中面临顶层设计缺乏、管理能力和管护条件弱、管理人才和资金少、空间发展不平衡等问题。一些重要的海洋生态系统、生态功能区仍未划入海洋保护地,具有较多区域的保护空缺(赵林林等, 2019)。

因此,确定保护优先区和加强对重要栖息地以及物种的保护和管理至关重要,而空缺分析(gap analysis)是完成这些任务的有效工具。在当前中国全面开展自然保护地改革创新背景下,研究黄海生态区保护空缺有助于促进黄海生态区的整体性

保护和以国家公园为主体的自然保护地体系建设。本文旨在通过对黄海生态区进行保护空间识别以及空缺图斑分析, 识别应建保护地而未建区域为保护空缺理论图斑, 并基于此对黄海生态区滨海湿地以及重要物种等的未来保护区的建设布局提出建议, 以期促进黄海生态区的海洋生态保护工作。

1 材料与方法

1.1 研究海域

黄海生态区是全球大型大陆架海洋生态系统之一, 是世界自然基金会认定的全球最优先保护的238个生态区之一。位于亚洲大陆与太平洋之间(117°–126° E, 31°–41° N), 北至黄渤海海岸线, 南至中国长江口、韩国济州岛最南端和洛东江河口, 面积46万km², 平均水深46 m, 为半封闭浅海。

黄海生态区中国海域范围包括渤海、黄海和东海北部, 中国侧的大陆岸线北起辽宁盘锦辽河入海口, 经辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海市6省市至长江口止, 海岸线长6,500多km。中国侧的主要入海河流包括辽河、海河、鸭绿江、黄河、淮河入海水道、长江等, 主要海湾包括辽东湾、渤海湾、莱州湾、海州湾、杭州湾等, 并分布有长山群岛、庙岛群岛、灵山岛、连岛等岛屿。

如无特殊说明, 下文的黄海生态区特指世界自然基金会划定的黄海生态区范围内的中国管辖海域范围, 不包括朝鲜和韩国管辖海域。

1.2 数据来源

空缺分析所用数据主要包括海洋功能区划、生态保护红线、海洋保护区、黄海生态区的物种信息等。具体如下:

(1) 辽宁、河北、天津、山东、江苏和上海等省市的《海洋功能区划(2011–2020年)》。将现有功能区划中的8大类型区域(农渔业、港口航运、工业与城镇用海、矿产与能源、旅游休闲娱乐、海洋保护、特殊利用和保留区)中的海洋保护区提取出来。

(2) 辽宁、河北、天津、山东、江苏和上海等省市的《海洋生态保护红线划定方案》。海洋重点生态功能区中包含了海洋保护区、重要滨海湿地、重要河口、特殊保护海岛、重要砂质岸线、自然景观与文化历史遗迹、重要滨海旅游区和重要渔业海域等类型, 这些作为保护目标数据。

(3) 物种分布数据主要是世界自然基金会、韩国

海洋科学研究院(KIOST)和韩国环境研究所(KEI)等2006年出版的《黄海生态区: 全球的财富、共同的责任》报告中相关的数据。

(4) 滨海湿地数据以2018年的遥感卫星图片为基础, 人工解译识别提取海岸线以下的潮间带作为滨海湿地的数据。

1.3 数据处理

保护地空缺分析是指利用地理信息系统(GIS)和卫星图像并结合实地调查资料, 通过叠加不同目标要素层(如滨海湿地、不同物种空间分布、植被类型等)来识别尚未纳入到保护地体系的应保护区域的过程。空缺分析于1988年由Burley首次提出并被Scot在夏威夷项目中首次应用, 现已成为大空间尺度上识别生物多样性保护地的有效方法之一(刘吉平等, 2005)。

空缺分析主要分为3个步骤: 首先通过对黄海生态区的一些重要生态功能区、生物多样性丰富区、保护物种栖息地、景观地质遗迹和历史文化重要区进行保护空间识别, 本文主要依据世界自然基金会前期在黄海生态区开展的潜在优先区识别工作成果来生成背景图; 然后根据收集的信息生成黄海生态区现有海洋保护地空间分布图; 最后利用ArcGIS 10.4软件进行潜在优先区与已建保护地在空间分布上的对比分析, 识别出应建而未建区域作为保护空缺理论图斑。

2 结果

空缺分析结果表明(图1), 黄海生态区保护的关键空缺区域及保护对象为: 黄河口(整合优化现有保护地, 保护黄河口生态系统)、辽河口湿地(保护湿地生态系统)、河北曹妃甸海草床(保护海草资源)、天津塘沽和黄骅湿地(保护湿地生态系统)、胶东半岛湿地(保护湿地生态系统)、舟山群岛(保护海洋渔业资源)、斑海豹(*Phoca largha*)繁殖区以及洄游通道(扩大现有保护地, 保护斑海豹)、江苏滨海湿地(保护珍稀濒危鸟类以及湿地生态系统)等。下面将根据重要滨海湿地、物种及海域来进行详细阐述。

2.1 重要滨海湿地

滨海湿地是黄海生态区的重要生境类型之一, 除了直接提供各类生态产品和服务外, 也是黄海生态区鸟类的重要栖息地和停歇地, 但近年来退化较为严重。根据2018年遥感卫星图片的解译结果, 黄

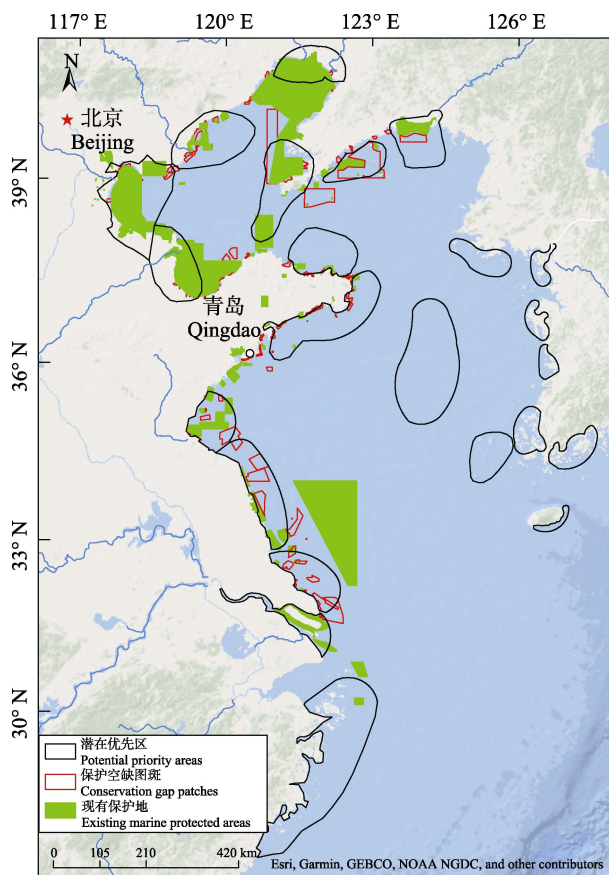


图1 黄海生态区内现有海洋保护地、潜在优先区以及保护空缺图斑分布图

Fig. 1 Existing marine protected areas, potential priority areas and conservation gap patches in the Yellow Sea Ecoregion

海生态区内现存的滨海湿地约86.7万ha。其中渤海约39.2万ha，黄海及长江口约47.5万ha。空缺图斑的分析结果按区域分述如下：

(1)辽河口湿地。辽河口湿地在本文中泛指辽东湾内以辽河为核心的滨海湿地，主要包括营口市的大清河口、大辽河口及辽河口南侧湿地，盘锦的辽河口湿地、锦州市的大凌河口、长湖沟河口、小凌河口湿地，葫芦岛市的茨山河口、兴城河口南侧、贾河口、东沙河口湿地，面积约13.2万ha。目前已建辽河口国家级自然保护区等，未纳入保护地的较大斑块(指1,000 ha以上，下同)主要有：营口市的大辽河口和辽河口南侧湿地，面积约2.16万ha；锦州的小凌河口湿地，面积约0.22万ha；葫芦岛市的茨山河口湿地，面积约0.14万ha。

(2)河北滦南湿地。主要集中分布于唐山市近岸，包括曹妃甸南侧至乐亭海域的海草床、沙河口与双龙河口湿地，总面积约4.3万ha。此区域是渤海内最

值得保护的区域，特别是曹妃甸海草床是国内已知最大的海草床湿地，目前该区域尚无保护地，较大的保护空缺斑块主要有：曹妃甸海草床，面积约2.71万ha；沙河口与双龙河口湿地，面积约1.56万ha(含部分天津近岸)。

(3)天津塘沽和黄骅湿地。主要包括天津范围内的蓟运河口、独流碱河口湿地和黄骅东海岸湿地，面积约2.31万ha。目前该区域有北大港湿地省级自然保护区、天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区等，未纳入保护地的较大斑块主要有：蓟运河口湿地，面积约0.12万ha；独流碱河口湿地，面积约0.23万ha；黄骅东海岸湿地，面积约1.95万ha(含部分天津近岸)。

(4)黄河三角洲和莱州湾湿地。这是渤海内较为典型的三角洲湿地，主要包括滨州市的漳卫新河口、马颊河口、东营北岸湿地、黄河口及东营东海岸湿地、小清河口、广利河口、新弥河口、虞河口、潍河口、北胶莱河口等，总面积约18.9万ha。目前该区域有滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区、黄河三角洲国家级自然保护区、东营广饶沙蚕类生态国家级海洋特别保护区、山东昌邑海洋生态国家级特别保护区等多处保护地，保护较好。还未纳入保护地的较大斑块主要有：新弥河口湿地，面积约0.28万ha；虞河口及潍河口湿地，面积约1.61万ha；北胶莱河口，面积约0.39万ha。

(5)胶东半岛湿地。胶东半岛多为基岩海岸，滨海湿地较少，主要包括威海五垒岛湾、乳山湾、丁字湾、青岛鳌山湾、胶州湾、日照两城河口湿地等，总面积约1.8万ha，基本上均已纳入保护地范围。目前该区域已有乳山塔岛湾海洋生态国家级海洋特别保护区、莱阳五龙河口滨海湿地国家级海洋特别保护区、胶州湾国家级海洋公园、日照国家级海洋公园等，未纳入保护地的较大斑块主要有丁字湾湿地，面积约0.60万ha。

(6)江苏滨海湿地。该区域为黄海生态区内最大的成片滨海湿地，也是迁徙鸟类的重要通道，具备较高的生态功能和保护价值。主要包括连云港沿岸、盐城沿岸、辐射沙洲、南通沿岸湿地等，总面积约20.1万ha，基本上均已纳入保护地范围。目前该区域已有江苏连云港海州湾国家级海洋公园、大丰麋鹿国家级自然保护区、江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区、江苏小洋口国家级海洋公园等，未

纳入保护地的较大斑块主要有: 灌河口湿地, 面积约0.14万ha; 条子泥湿地, 面积约1.27万ha; 如东环东河口湿地, 面积约0.43万ha。

(7)长江口湿地。该区域是受长江影响形成的河口湿地, 总面积约11.2万ha, 目前已有启东长江口(北支)湿地省级自然保护区、上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区、上海九段沙湿地国家级自然保护区、上海市长江口中华鲟省级自然保护区等, 基本上均已纳入保护地范围, 无空缺图斑。

2.2 重要物种及海域

根据2021年2月新颁布的《国家重点保护野生动物名录》(<http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/09/5586227/files/e007df5cdb364bcdcbcb89d169047d6c5.pdf>), 在黄海生态区内分布的海洋重要保护物种主要有食肉目(所有种)、鲸目(海豚科)、海龟科、棱皮龟科、杜父鱼科(松江鲈鱼*Trachidermus fasciatus*)、海龙鱼科、鲟科(鳊*Huso dauricus*)、鳗鲡科(花鳗鲡*Anguilla marmorata*)、文昌鱼纲(青岛文昌鱼*Branchiotoma belcheri*)、鳃鳔纲(多鳃孔舌形虫*Glossobalanus polybranchioporos*、黄岛长吻虫*Saccoglossus hwangtauensis*、青岛橡头虫*Glandiceps qingdaoensis*)等。除斑海豹、中华白海豚(*Sousa chinensis*)、海龟科物种、棱皮龟(*Dermochelys coriacea*)、鳊、多鳃孔舌形虫、黄岛长吻虫、青岛橡头虫为国家I级保护动物外, 其余均为国家II级保护动物。

本文选取在黄海生态区关注度较高的斑海豹、珍稀濒危鸟类和鲸豚类等物种, 以及“三场一通道”等重要生态功能区进行保护地空缺分析。

(1)斑海豹。斑海豹由于种群受威胁较大, 在2021年新版的《国家重点保护野生动物名录》中由原来的II级保护动物升级为I级保护动物。斑海豹是唯一可以在黄海生态区进行繁殖的鳍足类海洋哺乳动物, 海冰是斑海豹繁殖和栖息最重要的条件之一, 每年在辽东湾海域的冰上产仔、抚幼。斑海豹的主要活动和栖息海域在山东长岛海域、辽东半岛-朝鲜白翎岛-韩国济州岛沿岸海域, 偶尔出现于其他海域(王丕烈等, 2008)。目前已建有辽宁大连斑海豹国家级自然保护区和山东庙岛群岛斑海豹省级自然保护区, 基本覆盖了其全部重要区域。保护空缺主要有: 辽东湾底营口和盘锦近岸, 这里是斑海豹的主要繁殖区域, 目前部分位于水产种质保护区

范围内, 未纳入大连斑海豹国家级自然保护区范围; 辽东半岛南侧海域, 为斑海豹的洄游通道和活动场所, 已在长海县海域建有国家级海洋公园, 但大部分海域仍未纳入保护地。

(2)珍稀鸟类。黄海生态区周边的大量滩涂湿地是众多珍稀鸟类的栖息地和停歇地。在中国记录有173种水鸟和9种海鸟, 包括丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白头鹤(*G. monacha*)、白枕鹤(*G. vipio*)、黑脸琵鹭(*Platalea minor*)、鸳鸯(*Aix galericulata*)、东方白鹤(*Ciconia boyciana*)、花脸鸭(*Anas formosa*)、大天鹅(*Cygnus cygnus*)、黑嘴鸥(*Larus saundersi*)、蛎鹬(*Haematopus ostralegus*)、小青脚鹬(*Tringa guttifer*)、勺嘴鹬(*Eurynorhynchus pygmeus*)、大杓鹬(*Numenius madagascariensis*)、鸿雁(*Anser cygnoides*)、白鹤(*Grus leucogeranus*)、遗鸥(*Larus relictus*)等。据统计, 每年有超过100万只水鸟在此停歇和进食, 补充能量后完成迁徙。这些鸟类主要依托滨海湿地进行栖息和停留(陈克林等, 2015; Duan et al, 2020), 相关的保护地空缺分析结果请参阅重要滨海湿地部分的描述。

(3)江豚及其他鲸豚类。东亚江豚(*Neophocaena asiaorientalis sunameri*)俗称江猪或海猪, 属鲸目鼠豚科江豚属, 为国家II级保护动物。它是在黄海生态区中常见的小型海洋哺乳类, 常栖息在黄河口以及莱州湾、辽东湾、渤海湾内的各河口近岸咸淡水交汇水域。环境污染、误捕、营养不良和疾病、海岸工程都可能引起江豚非正常死亡, 甚至给整个种群带来毁灭性的打击(左涛等, 2018)。根据不完全统计, 全国海域的江豚年误捕量超2,000头, 约占小型鲸类总误捕量的70%, 显示江豚面临较大的误捕威胁(杨光等, 1999)。目前尚无以东亚江豚为保护对象的海洋保护地。根据估算, 目前黄渤海东亚江豚的种群数量不及20世纪80年代初的20%, 部分水域甚至不足5%。但东亚江豚种群数量、分布和误捕状况等本底资料极其匮乏, 资源和人类活动改变对东亚江豚造成的影响也不甚清楚(<http://m.news.cctv.com/2018/06/08/ARTIIBWcb4KEq8nR6za5jXBN180608.shtml>), 因此其主要停留地或主要活动区域未能确定, 需要进行更多的调研以取得更多基线数据, 作为海洋保护地建设的考虑基础。

黄海生态区内还经常出现重要海洋哺乳类, 如灰鲸(*Eschrichtius robustus*)、小须鲸(*Balaenoptera*

acutorostrata)、蓝鲸(*B. musculus*)、长须鲸(*B. physalus*)、北太平洋露脊鲸(*Eubalaena japonica*)等,在2021年发布的《国家重点保护野生动物名录》中均升级为国家I级保护动物。但由于缺少资料且在黄海生态区停留时间较短,无法确定黄海生态区对于这些物种的重要性及其面临的威胁,当前同样未纳入到海洋保护地范围。

(4)具有重要生态功能的海域。由于长江和黄河带来的丰富营养物质,再加上光照和浅水的共同作用,使得黄海生态区蕴育了丰富的海洋生命。黄海生态区内存在许多经济鱼类的产卵场、索饵场、育幼场和洄游通道(即“三场一通道”),如长江口、苏北浅滩、黄河口及莱州湾、辽河口及辽东湾、渤海海峡及黄海冷水团等,对于补充黄海生态区的生物资源具有重要作用(李晓炜等, 2018)。目前基本上都已纳入水产种质资源保护区和其他类型的海洋保护地进行保护,较大的空缺图斑有:舟山群岛海域,是重要渔业场和生物资源的补充地;长江口北侧海域,是重要渔业场和生物资源的补充地;海阳—石岛海域,是重要渔业场和生物资源的补充地;黄海冷水团海域,是重要渔业场和生物资源的补充地。

3 讨论

3.1 黄海生态区海洋保护地空间现状及未来布局

3.1.1 渤海

渤海海域面积约7.8万km²,大陆海岸线长2,796 km(侯西勇等, 2018)。滨海湿地资源丰富,滩涂湿地、海草床等广泛分布,是黑鹳(*Ciconia nigra*)、白尾海雕(*Haliaeetus albicilla*)、遗鸥、大天鹅等珍稀濒危物种的重要栖息地。环渤海区域河口密布,黄河、海河、辽河三大流域共有100多条河流入海,形成各具特色的河口生态系统。渤海海峡口宽59 km,两侧分布有30多个岛屿。庙岛群岛、辽东湾、大连半岛南侧等海域是斑海豹等物种的栖息地(张晓龙, 2005; Shi et al, 2020)。

目前渤海已建立各级各类海洋保护地63处,总面积约4.03万km²,占渤海总面积的52.3%(有较多的交叉重叠区域),涉及辽宁省、河北省、天津市和山东省,保护了部分滨海湿地、海湾、河口、海岛、泻湖等典型海洋生态系统以及文昌鱼(*Branchiostoma*)、斑海豹等珍稀濒危海洋生物物种。从保护地空间分布看,已建保护地主要位于渤海沿

岸,以及东部和西南部海域,但渤海中部、渤海湾中北部、莱州湾南岸等区域分布少,重要生态区存在保护空缺,部分重要滨海湿地、珍稀物种栖息地未得到有效保护。

因此,建议在保护地选划时,根据渤海生态系统分布特征、地理环境特点和资源禀赋,考虑典型海洋生态系统以及重要海洋生物栖息地及洄游通道的保护需求,结合保护空缺分析结果,开展海洋保护地建设。

对于渤海区域保护地空间布局,建议在黄河口区域开展海洋保护地整合优化,将原黄河口生态国家级海洋特别保护区、黄河三角洲国家级自然保护区整合为一个保护地,并向东部海洋延伸,加强对黄河口生态系统的保护。在斑海豹、珍稀鸟类重要栖息地以及辽河口湿地、河北曹妃甸海草床生态系统、天津塘沽和黄骅湿地、莱州湾湿地等具有重要保护价值的湿地区域选划建立海洋自然保护地。此外,渤海中部海域水产种质资源丰富,是渤海重要海洋生物的产卵场和洄游通道,建议将该区域与山东长岛现有自然保护地整合,并入海洋自然保护地进行管理。

3.1.2 黄海

黄海是太平洋西部最大的边缘海,位于中国与朝鲜半岛之间,分为北黄海和南黄海两部分,面积38万km²,占黄海生态区总面积的82.6%,有鸭绿江、大同江、汉江、淮河等河流入海,涉及辽宁、山东和江苏3个省(Zhang et al, 2019)。

黄海区域已建海洋类保护地77处,主要分布在沿岸区域,且大部分面积较小,在黄海北部、中部和西南部尚存在多处保护空缺,如黄海北部区域的长海诸岛、胶东半岛湿地、江苏如东湿地、黄海冷水团区域等。因此,本文建议在长海诸岛、海洋岛等海域、江苏如东湿地建立海洋保护地,并推动海阳—石岛和黄海冷水团等具有重要海洋生态功能海域建立较大型海洋保护地。

3.1.3 东海北部

该区域面积较小,已建11处保护地,主要位于上海及浙江沿岸区域,涉及世界自然基金会提出的23个优先保护区中的长江入海口湿地区域、舟山群岛及周边海域,具有重要的保护价值。鉴于该区域湿地保护较好,因此,本文建议重点在长江口北侧海域和舟山群岛海域的渔业场和生物资源补充地

建立保护地。

3.2 重要保护物种

3.2.1 斑海豹

斑海豹是中、朝、韩三国海域的一个共有物种, 具有非常重要的社会影响力, 一直受到国内外的广泛关注。斑海豹是国家I级保护动物, 是目前唯一在中国辽东湾繁殖的鳍足类海洋哺乳动物, 也是世界上斑海豹8个分布区最南端的一个(焦凤荣, 2015)。由于斑海豹具有较高的经济价值, 长期以来遭到过量猎杀, 致使其种群数量急剧减少。另一方面, 城市化的扩张、滩涂养殖业和航运的发展、油田的开采及近海排污等, 对斑海豹繁殖的生境质量也造成较大的破坏(Yan et al, 2018)。目前, 中国已建立辽宁大连斑海豹国家级自然保护区、庙岛群岛斑海豹省级自然保护区, 开展了宣传教育、渔政执法、资源监测、科研、救助和放流等工作, 使斑海豹等动物资源和生态环境得到有效保护, 但保护力度仍不能满足需求。因此, 建议采取通过扩大原保护地范围或新建海洋保护地, 将斑海豹的繁殖区和洄游通道纳入自然保护地管理, 并实施严格执法、加大宣传力度等措施, 加强对斑海豹及其栖息地的保护。

3.2.2 勺嘴鹬

勺嘴鹬属于鸻形目, 被列为世界自然保护联盟(IUCN)红色名录极危(CR)物种, 是一种仅分布于东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上的涉禽, 估计其大约数量为360-600只。从历史资料的记录来看, 中国境内江苏省发现的勺嘴鹬种群数量最大, 其中东台市条子泥和如东县小洋口及东凌村为勺嘴鹬迁徙路线上最重要的迁徙停歇地, 如东记录的勺嘴鹬最大数量为103只, 是迄今为止发现的勺嘴鹬数量最大的迁徙停歇地(彭鹤博等, 2017)。勺嘴鹬在繁殖期以外的时期仅在滨海滩涂湿地分布, 其主要觅食地为潮间带滩涂, 较少到其他类型的栖息地活动。主要以滩涂湿地上的双壳类、多毛类、甲壳类、腹足类等底栖动物为食(Pain et al, 2011)。迁徙停歇地的栖息地急剧丧失被认为是勺嘴鹬种群数量下降的最主要原因(Ma et al, 2014; Xia et al, 2017)。因此滨海滩涂湿地对勺嘴鹬的生存至关重要。建议江苏省政府实施有效的保护措施, 在如东湿地选划海洋保护地, 并制定有针对性的保护计划, 加强对滩涂湿地的管理, 增加与高校科研院所、非政府组织的合作及沟通, 共同促进勺嘴鹬及其栖息地的保护。

3.2.3 江豚及其他鲸豚类

由于江豚以及其他鲸类的主要停留地或主要活动区域未能确定, 因此需要进行种群资源调查和分布规律研究, 了解和掌握其种群数量现状和洄游模式, 以期为鲸豚类的保护提供数据支持。同时建议加强监督管理以及保护宣传力度, 推动鲸豚类海洋保护地建设。

3.3 重要保护生态系统

海草床作为典型的海洋生态系统, 具有很高的生态价值和经济价值。根据2018年声呐探测结果, 河北唐山乐亭-曹妃甸沿海地区分布着面积约30 km² (外围面积约90 km²)的鳗草(*Zostera marina*)海草床, 是目前中国国内分布面积最大的鳗草海草床(周毅等, 2019)。该海草床有丰富的游泳动物和底栖生物, 仔稚鱼和稚幼贝资源也十分丰富, 是渔业资源关键生境以及繁殖和育幼场所, 对于当地渔业可持续发展至关重要(刘慧等, 2016)。实地考察也发现诸如修筑堤坝、围堰养殖以及捕捞作业等人类活动已经在曹妃甸地区影响了海草的分布和生长, 在此地建立海草保护区、科学管理和利用海草资源是保护此地海草资源的最佳方式(周毅等, 2019)。

4 建议

针对黄海生态区的海洋保护地建设, 我们有如下几点建议:

(1) 加强保护地科学规划与管理。国家与地方应统一布局、积极整合各类海洋保护地, 共同制定总体规划, 推动海洋保护地管理制度更新。海洋保护地的划定应基于科学认知。通过海洋生物资源调查, 探明物种多样性、指标物种的种群数量和分布、繁殖期、生态系统连通性以及生境破碎化等情况, 并积极推动科学方法和技术的标准化, 为保护地的科学划定和保护管理计划的设计和和实施提供基础。在有条件的情况下, 还可以进行沿海社区经济发展情况的相关调研, 为后续渔业可持续发展与产业转型提供科学依据。

(2) 积极整合社会各界资源, 开展深入研究和评估工作。例如邀请具备不同知识背景的专家学者及相关生态保护从业人员进行合作科考, 指导保护区划定。同时还应充分发挥当地社区群众的积极性, 通过举办培训、宣讲等活动, 向本地居民深度科普生态功能、环境经济价值等知识, 取得本地居民的

认同和支持,引导本地居民在生产生活中协助生态资源(如主要的捕鱼位置、当地重要自然资源的分布等)和文化调研,进而开展社区参与的保护区划定工作。

(3)针对保护地的资金来源保障、海洋生态产业可持续发展,以及能力建设和提高社会参与度等方面,引进更多创新合作模式。

(a)国家及地方政府应加大海洋生态保护建设的财政投入,同时广泛筹集社会资金,吸纳社会资金投入生态环境保护与建设,鼓励和吸引国内外民间资本投资生态保护,尤其是要探索在政府投入引导下的社会多元化投入机制;发展创新融资机制,充分借鉴国际保护地管理经验,在黄海生态区保护地推行绿色金融工具,拓宽资金来源。

(b)黄海生态区渔业资源丰富,应充分发挥海洋环境和资源优势,开展生态养殖,加强科技创新,提高渔业生产设备水平;实施可持续渔业认证,降低水产养殖对环境和社会的影响,保障水产业健康可持续发展。探索除了渔业之外的可持续产业,例如通过调动社会资金的参与,采用发行债券、基金等方式推动海洋友好型产业的发展,如集保护、旅游、教育于一体的多功能海洋公园的开发建设、发展休闲渔业、开发生态旅游等。


(c)保护区的良性发展离不开保护区内外群众的支持和参与。通过创新管理模式和开展能力建设,例如对基层政府工作人员、本地环保社会组织和本地居民开展有针对性的培训,提高各参与方人员的综合素质;充分发挥媒体和公众的力量,利用新媒体传播途径提升保护工作的社会影响和公益号召力,感召更多人参与进来,为保护工作贡献力量并不断创新。

本研究以黄海生态区为案例分析了海洋保护地的未来发展,对全国的保护地建设具有借鉴意义。《生物多样性公约》第十五次缔约方大会将在昆明举行,各国将制定“2020年后全球生物多样性框架”,其中包括通过保护地和其他有效地区保护措施,提升保护地面积、连通性与有效管理,保护生物多样性重点地区的具体目标。在未来的履约过程中,中国可通过全国性的重要生态区域识别、科学化空缺分析,优先创建海洋类型国家公园,构建合理有效的海洋保护地网络体系,增加海洋保护地面积,并加强国际交流合作,以有效保护关键物种

与栖息地;在提升生态保护效果的同时,以发展可持续蓝色经济的方式支持当地社区的生计。通过积极履约的实践典范,以利于中国的海洋生态文明建设,并起到“海洋生态文明强国”的国际领导作用。

ORCID

曲方圆  <https://orcid.org/0000-0001-9667-3178>

张朝晖  <https://orcid.org/0000-0001-8225-2946>

参考文献

- Chen KL, Yang XZ, Lü Y (2015) Vital stopover of shorebirds migration on the East Asian-Australasian flyway: Wetlands of Yellow Sea and Bohai Sea. *Wetland Science*, 13, 1–6. (in Chinese with English abstract) [陈克林, 杨秀芝, 吕咏 (2015) 鸻鹬类鸟东亚-澳大利西亚迁飞路线上的重要驿站: 黄渤海湿地. *湿地科学*, 13, 1–6.]
- Duan HL, Xia SX, Jackson MV, Zhao N, Liu Y, Teng JK, Meng Z, Yu XB, Shi JB (2020) Identifying new sites of significance to waterbirds conservation and their habitat modification in the Yellow and Bohai Seas in China. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01031.
- Hou XY, Zhang H, Li D, Hou W, Song Y (2018) Development trend, environmental and ecological impacts, and policy recommendations for Bohai Sea reclamation. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 3311–3319. (in Chinese with English abstract) [侯西勇, 张华, 李东, 侯婉, 宋洋 (2018) 渤海围填海发展趋势、环境与生态影响及政策建议. *生态学报*, 38, 3311–3319.]
- Jiao FR (2015) Protection and management of spotted seal resource in Liaodong Bay. *China Fisheries*, (4), 35–38. (in Chinese) [焦凤荣 (2015) 辽东湾斑海豹资源的保护与管理. *中国水产*, (4), 35–38.]
- Li XW, Zhao JM, Liu H, Zhang H, Hou XY (2018) Status, problems and optimized management of spawning, feeding, overwintering grounds and migration route of marine fishery resources in Bohai Sea and Yellow Sea. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (5), 147–157. (in Chinese with English abstract) [李晓炜, 赵建民, 刘辉, 张华, 侯西勇 (2018) 渤海渔业资源三场一通道现状、问题及优化管理政策. *海洋湖沼通报*, (5), 147–157.]
- Liu H, Huang XP, Wang YL, Liang ZR, Gu B, Su JL (2016) Newly discovered seagrass bed and its ecological characteristics in the coastal area of Caofeidian, Bohai Sea. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 1677–1683. (in Chinese with English abstract) [刘慧, 黄小平, 王元磊, 梁洲瑞, 古彬, 苏纪兰 (2016) 渤海曹妃甸新发现的海草床及其生态特征. *生态学杂志*, 35, 1677–1683.]
- Liu JP, Lü XG, Yin SB (2005) GAP analysis: A geographic approach to protect biological diversity. *Progress in Geography*, 24(1), 41–51. (in Chinese with English abstract) [刘吉平, 吕宪国, 殷书柏 (2005) GAP分析: 保护生物多样性的地理学方法. *地理科学进展*, 24(1),

- 41–51.]
- Ma ZJ, Melville DS, Liu JG, Chen Y, Yang HY, Ren WW, Zhang ZW, Piersma T, Li B (2014) Rethinking China's new great wall—Massive seawall construction in coastal wetlands threatens biodiversity. *Science*, 346, 912–914.
- Olson DM, Dinerstein E (2002) The global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89, 199–224.
- Pain D, Green R, Clark N (2011) On the edge: Can the spoon-billed sandpiper be saved? *British Birds*, 104, 350–363.
- Peng HB, Cai ZY, Zhang L, Gan XJ, Liu WL, Li J, Jiang ZY, Wang SL, Ma ZJ (2017) Distribution and conservation status of the spoon-billed sandpiper in China. *Chinese Journal of Zoology*, 52, 158–166. (in Chinese with English abstract) [彭鹤博, 蔡志扬, 章麟, 干晓静, 刘文亮, 李静, 蒋忠由, 王松林, 马志军 (2017) 勺嘴鹬在中国的分布状况和面临的主要威胁. *动物学杂志*, 52, 158–166.]
- Shi HH, Lu JF, Zheng W, Sun JK, Li J, Guo Z, Huang JT, Yu ST, Yin LT, Wang YZ, Ma YX, Ding DW (2020) Evaluation system of coastal wetland ecological vulnerability under the synergetic influence of land and sea: A case study in the Yellow River Delta, China. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111735.
- Tobai S, Kim W, Choi Y, Pae S, Wang S, Lee C (2008) Biological Assessment Report of the Yellow Sea Ecoregion: Ecologically Important Areas for the Yellow Sea Ecoregion's biodiversity. WWF, KORDI, and KEI.
- Wang PL, Han JB, Ma ZQ (2008) Status survey of spotted seal (*Phoca largha*) in Bohai and Yellow Sea. *Chinese Journal of Wildlife*, 29(1), 29–31, 39. (in Chinese with English abstract) [王丕烈, 韩家波, 马志强 (2008) 黄渤海斑海豹种群现状调查. *野生动物*, 29(1), 29–31, 39.]
- Xia SX, Yu XB, Millington S, Liu Y, Jia YF, Wang LZ, Hou XY, Jiang LG (2017) Identifying priority sites and gaps for the conservation of migratory waterbirds in China's coastal wetlands. *Biological Conservation*, 210, 72–82.
- Yan HK, Wang N, Wu N, Lin WN (2018) Maritime construction site selection from the perspective of ecological protection: The relationship between the Dalian offshore airport and spotted seals (*Phoca largha*) in China based on the noise pollution. *Ocean & Coastal Management*, 152, 145–153.
- Yang G, Zhou KY, Xu XR, Leatherwood S (1999) A survey on the incidental catches of small cetaceans in coastal waters of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10, 713–716. (in Chinese with English abstract) [杨光, 周开亚, 徐信荣, Stephen Leatherwood (1999) 中国沿岸小型鲸类误捕情况的调查. *应用生态学报*, 10, 713–716.]
- Zhang XL (2005) The Environmental Change and Degradation of Modern Yellow River Delta Coastal Wetland. PhD dissertation, Ocean University of China, Qingdao, Shandong. (in Chinese with English abstract) [张晓龙 (2005) 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究. 博士学位论文, 中国海洋大学, 山东青岛.]
- Zhang ZH, Qu FY, Wang SQ (2019) Sustainable development of the Yellow Sea Large Marine Ecosystem. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 163, 102–107.
- Zhao LL, Cheng MN, Ying PX, Qu FY, Zhang ZH (2019) Current status, facing problems, countermeasures and suggestions of China's marine protected areas. *Ocean Development and Management*, 36(5), 3–7. (in Chinese with English abstract) [赵林林, 程梦璇, 应佩璇, 曲方圆, 张朝晖 (2019) 我国海洋保护地现状、问题及发展对策. *海洋开发与管理*, 36(5), 3–7.]
- Zhou Y, Xu S, Xu SC, Yue SD, Gu RT, Zhang XM, Xu M, Zhang Y, Zhang YL, Zhang ZH (2019) New discovery of larger seagrass beds with areas > 0.50 km² in temperate waters of China. II. The largest *Zostera marina* bed in China discovered in the coastal waters of Tangshan in the Bohai Sea by sonar detection technology. *Marine Sciences*, 43(8), 50–55. (in Chinese with English abstract) [周毅, 许帅, 徐少春, 岳世栋, 顾瑞婷, 张晓梅, 许敏, 张玉, 张云岭, 张振海 (2019) 中国温带海域新发现较大面积(大于0.5 km²)海草床. II. 声呐探测技术在渤海唐山沿海海域发现中国面积最大的鳗草海草床. *海洋科学*, 43(8), 50–55.]
- Zuo T, Sun JQ, Shi YQ, Wang J (2018) Primary survey of finless porpoise population in the Bohai Sea. *Acta Theriologica Sinica*, 38, 551–561. (in Chinese with English abstract) [左涛, 孙坚强, 时永强, 王俊 (2018) 渤海江豚种群现状初探. *兽类学报*, 38, 551–561.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 黄祥忠)



•综述•

中国纳入一级保护的极小种群野生植物濒危机制

姚志^{1,2}, 郭军², 金晨钟^{2*}, 刘勇波^{1,2*}

1. 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 2. 湖南人文科技学院农田杂草防控技术与应用协同创新中心, 湖南娄底 417000

摘要: 为科学有效地保护极小种群野生植物, 明确其濒危机制具有重要意义。本文通过分析中国28种极小种群一级保护野生植物的种群特征及其濒危的内在原因和受威胁因素等, 总结了极小种群野生植物的濒危机制。极小种群野生植物的种群特征表现为遗传多样性低(13种)、衰退型种群结构(11种)、聚集型分布(11种)且分布区域狭窄(20种)。极小种群野生植物濒危的内在原因主要是繁殖力低(21种)和竞争能力弱(16种)。受威胁因素主要包括过度采挖等人类活动导致的种群数量减少(15种)和生境破坏(25种)以及气候变化等。因此, 除了保护极小种群野生植物免遭人类活动破坏, 保护策略应加强关注种群规模的维持和遗传多样性的保护。

关键词: 极小种群野生植物; 种群特征; 濒危机制; 人为干扰; 保护遗传多样性

姚志, 郭军, 金晨钟, 刘勇波 (2021) 中国纳入一级保护的极小种群野生植物濒危机制. 生物多样性, 29, 394–408. doi: 10.17520/biods.2020316.

Yao Z, Guo J, Jin CZ, Liu YB (2021) Endangered mechanisms for the first-class protected Wild Plants with Extremely Small Populations in China. Biodiversity Science, 29, 394–408. doi: 10.17520/biods.2020316.

Endangered mechanisms for the first-class protected Wild Plants with Extremely Small Populations in China

Zhi Yao^{1,2}, Jun Guo², Chenzhong Jin^{2*}, Yongbo Liu^{1,2*}

1 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 Hunan Provincial Collaborative Innovation Center for Field Weeds Control, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi, Hunan 417000

ABSTRACT

Aims: It is important to clearly identify the mechanisms that leads Wild Plants with Extremely Small Populations to become endangered as a way to effectively protect these WPESP.

Progresses: Here, we review the population characteristics, internal causes, and external threat factors for the first-class protected WPESP (28 species in China) and accordingly discuss the mechanisms leading to plants becoming endangered. Most WPESP displayed at least one of four population characteristics that likely resulted in their current endangered status. First, 20 WPESP species (such as *Parakmeria omeiensis*, *Abies beshanzuensis* and *Cycas changjiangensis*) had a narrow distribution area. Combining a narrow distribution area with low fertility and weak competitive capacity as intrinsic factors results in WPESP species to become endangered. Second, the distribution structure for 11 WPESP species was aggregated (e.g., *Abies ziyuanensis*, *Kmeria septentrionalis*, *Metasequoia glyptostroboides*). Third, there was declining population structures for 11 WPESP (e.g., *Thuja sutchuenensis*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Pinus squamaia*). This declining population structure has a negative role in maintaining stable population growth. The fourth population characteristic was that the genetic diversity of 13 WPESP species (46%) was low (e.g., *Manglietia decidua*, *Abies yuanbaoshanensis*, *Cycas debaoensis*). Low genetic diversity is unfavorable for these species to adapt to a changing environment and leads them to face risks of extinction. Twenty-one WPESP species (75%) exhibited low fertility, such as *Acer yangjuechi* and *Abies beshanzuensis*. The poor seed quality and low yield of WPESP species leads to a difficult regeneration of populations. The competitive capacity of 57%

收稿日期: 2020-08-07; 接受日期: 2020-10-15

基金项目: 生态环境部生物多样性调查与评估项目(2019HJ2096001006)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: liuyb@craes.org.cn; hnljcz@sina.com

WPESP species (16) is relatively weak (e.g., *Shaniodendron subaequale* and *Cathaya argyrophylla*), which decreases growth and reproduction for these species. External factors that threaten WPESP mainly include overexploitation decreasing abundance (15 species), human activities and natural disasters destroying habitats (25 species), and geological movements plus climate change affecting the survival of WPESP.

Prospects: In addition to protecting WPESP against destruction from human activities, conservation strategies should focus on the maintenance of population size and the conservation of genetic diversity of WPESP.

Key words: Wild Plants with Extremely Small Populations (WPESP); population characteristics; endangered mechanism; human disturbance; conservation of genetic diversity

中国受威胁植物有3,000多种(覃海宁等, 2017), 其中分布区域狭窄或呈间断分布的野生植物被定义为“极小种群野生植物”(臧润国等, 2016; Yang et al, 2020)。极小种群野生植物长期受外界因素胁迫干扰, 种群呈现衰退和数量持续减少趋势, 种群及个体数量极少, 有些已经低于稳定存活界限的最小可存活种群, 随时面临灭绝的风险(Ren et al, 2012)。极小种群野生植物多为中国特有植物, 在生态和经济上具有重要价值(Ma et al, 2013)。如果不及保护, 其潜在的基因价值和生物特征就会随物种的绝灭而消失(张则瑾等, 2018)。因此, 明确极小种群野生植物濒危机制, 提高保护成效, 有助于维持生态平衡和促进生态可持续发展, 对我国的生物多样性保护具有重要意义(Guisan et al, 2013; 张则瑾等, 2018)。

极小种群野生植物的物种濒危机制研究已从单一的种群生态学和群体遗传学研究发展成多学科交叉的综合性研究, 并取得了令人鼓舞的进展(Aguilar et al, 2006; Lowe et al, 2017)。《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划》确定了首批120种重点保护的极小种群野生植物(Ren et al, 2014)。其中, 中国特有的纳入一级保护的极小种群野生植物有33种(<http://www.iplant.cn/rep/protlist>)。经检索, 目前暂时没有关于玉龙杓兰(*Cypripedium forrestii*)、丽江杓兰(*C. lichiangense*)、斑叶杓兰(*C. margaritaceum*)、小花杓兰(*C. micranthum*)和昌江石斛(*Dendrobium changjiangense*)等5种特有极小种群野生植物的研究报道。故本文将讨论和分析28种极小种群野生植物的特征及濒危因素, 拟为制定极小种群植物的保护对策提供科学依据。从检索到的783篇关于这28种极小种群野生植物的文献中, 选取具有详细分布区域和种群特征的138篇研究性文章。从物种的分布地点可以发现, 这28种极小种群野生植物主要集中分布在我国南方(图1), 具有明显

的分布区域狭窄特征。

1 极小种群野生植物的种群特征

1.1 种群规模小

种群规模小是极小种群野生植物的主要特征, 有15种的种群规模小于1,000株(表1), 例如猪血木(*Euryodendron excelsum*)、天目铁木(*Ostrya rehderiana*)、云南蓝果树(*Nyssa yunnanensis*)等。百山祖冷杉(*Abies beshanzuensis*)野生存活数量只有3株, 是世界上最为濒危的12种植物之一(Zhu et al, 2019); 普陀鹅耳枥(*Carpinus putoensis*)是极小种群野生植物中现存野生植株最少的物种之一, 仅存1株, 有“地球独子”之称(Sheng & Zhu, 2018)。虽然有10个物种的个体数量和种群数量较多, 但多数个体都聚集在一个或两个种群中; 其他18个物种种群规模小, 增加了消失的风险。例如瑶山苣苔(*Dayaoshania cotinifolia*), 除了2个40株以上的较大种群外, 大部分为10株以下的小种群(王玉兵等, 2008); 在德保苏铁(*Cycas debaoensis*)的15个种群中, 除了扶平种群为800株左右外, 其余种群规模都不足10株, 其中平洋种群与下洋种群个体数量分别只有2株和6株, 具有消失的风险(王超红, 2007^①; 潘光波和赵峰磊, 2011)。

1.2 种群多为零星或岛状狭域分布

根据28种极小种群野生植物已有的地理分布现状, 崖柏(*Thuja sutchuenensis*)、百山祖冷杉、峨眉拟单性木兰(*Parakmeria omeiensis*)等20个物种呈零星或岛状的狭域分布(表1)。例如葫芦苏铁(*Cycas changjiangensis*)仅分布在海南省昌江县坝王岭约70 km²的狭小范围内(简曙光等, 2005); 百山祖冷杉现存野生植株仅3株, 占地面积不足2 km² (Zhu et al, 2019); 巧家五针松(*Pinus squamaia*)只分布在云南

^① 王超红 (2007) 德保苏铁居群生物学及其保护生物学研究. 硕士学位论文, 广西师范大学, 广西桂林.

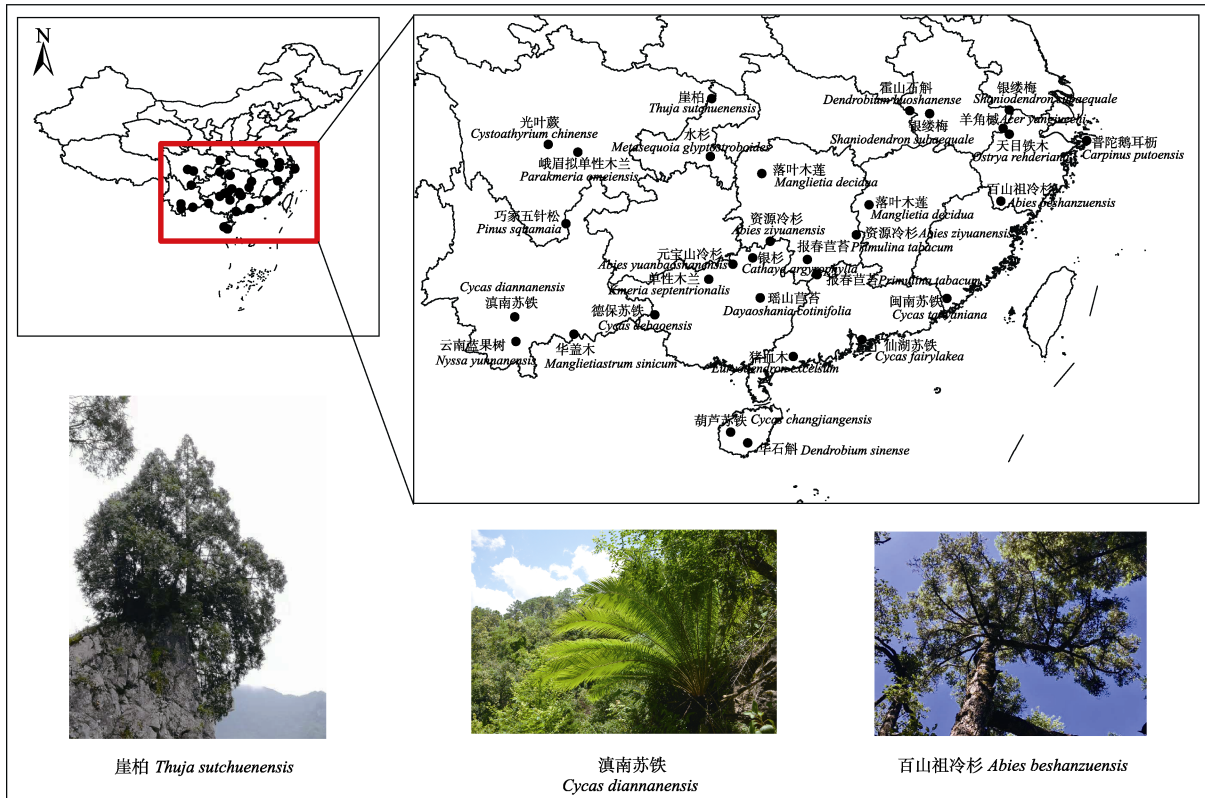


图1 27种极小种群野生植物地理分布图(灰干苏铁无分布点数据)。崖柏图片由姚志提供, 滇南苏铁图片由龚洵提供, 百山祖冷杉图片由向巧萍提供。

Fig. 1 Distribution of 27 Wild Plants with Extremely Small Populations (No distribution data of *Cycas hongheensis*). The picture of *Thuja sutchuenensis* is provided by Zhi Yao, *Cycas diannanensis* is provided by Xun Gong, and *Abies beshanzenensis* is provided by Qiaoping Xiang.

东北部巧家县新华镇杨家湾一个山脊的东西两个坡面上, 分布面积仅5 km²①。

1.3 种群呈聚集型分布格局

在28种极小种群野生植物中, 种群分布格局呈聚集型的有资源冷杉(*Abies ziyuanensis*)、单性木兰(*Kmeria septentrionalis*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等11种(表1), 不利于种群的维持和发展。有些物种的分布格局在不同生长阶段和生境条件下会表现出差异, 例如元宝山冷杉(*Abies yuanbaoshanensis*)在幼苗、幼树阶段为聚集分布, 中龄阶段向随机分布发展, 大树呈均匀分布(李先琨等, 2002a); 银杉(*Cathaya argyrophylla*)在银杉-亮叶青冈(*Cyclobalanopsis phanera*)林中为典型的聚集分布, 而在银杉-甜槠(*Castanopsis eyrei*)林中因个体数量不均衡死亡而出现随机分布的格局(谢宗强,

1999)。

1.4 极小种群野生植物遗传多样性低

有13种极小种群野生植物的遗传多样性较低, 这些物种对环境的适应力较差, 影响了物种的进化潜力(表1)。例如, 廖文芳等(2004)利用ISSR分子标记研究落叶木莲(*Manglietia decidua*)的遗传多样性, 并与同科的其他物种以及其他特有植物的遗传多样性进行了比对, 发现落叶木莲的遗传多样性极低(Nei's基因多样性0.0637, Shannon多样性指数0.0936, 多态位点百分率17.28%); 王燕等(2004)使用AFLP分子标记方法, 发现元宝山冷杉种群的遗传多样性较低(Nei's基因多样性0.1510, Shannon多样性指数0.1735, 多态位点百分率50.96%)。

一般认为濒危植物的遗传多样性水平较低, 但仙湖苏铁(*Cycas fairylakea*)、猪血木、崖柏等7个极小种群野生植物的遗传多样性较高(表1)。例如, 王晓明等(2006)应用ISSR分子标记研究了仙湖苏铁野

① 陶翠 (2013) 中国五针松组濒危植物的濒危机制探究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

表 1 28 种极小种群野生植物主要性状表
Table 1 Main characters of 28 Wild Plants with Extremely Small Populations

物种 Species	现存数量 Existing numbers (ind.)	IUCN 濒危等级 Endangered status in IUCN	种群特征 Population characteristics			濒危因素 Endangered factors			参考文献 References
			分布类型 Distribution type	分布格局 Distribution pattern	年龄结构 Age structure	遗传多样性 Genetic diversity	种子发芽率 Germination rate of seeds	人为采挖 Human activities	
百山祖冷杉 <i>Abies beshanzuensis</i>	3	CR	岛状分布 ID	星散分布 SD	低 L	✓	1%~2%	✓	Hu et al, 2004; Wu et al, 2010
资溪冷杉 <i>Abies ziyuanensis</i>	494	CR	岛状分布 ID	聚集型 AD	稳定型 SP	✓	2%~4%	✓	Ning et al, 2005; Ning & Tang, 2005; Zhang et al, 2007; Zhang, 2009; Liu et al, 2011; Wang et al, 2013
元宝山冷杉 <i>Abies yuanbaoshanensis</i>	小于 900 Less than 900	CR	岛状分布 ID	聚集型 AD	稳定型 SP	✓	2.5%	✓	Tang et al, 2001; Li et al, 2002b, c; Wang et al, 2004; Wu et al, 2010; Liang & Pan, 2012; Yang J et al, 2019
葫芦苏铁 <i>Cycas changjiangensis</i>	约 7,300 About 7,300	CR	星散分布 SD	星散分布 SD	高 H	✓		✓	Li, 2004; Jian et al, 2005; Sun XL et al, 2019
德保苏铁 <i>Cycas debaensis</i>	1,085	CR	星散分布 SD	星散分布 SD	低 L	✓		✓	Ma et al, 2003; Pan & Zhao, 2011; Zhan et al, 2011; Luo et al, 2013; Xu et al, 2015; Wang YH et al, 2018
仙湖苏铁 <i>Cycas fairylatea</i>	1,500	CR	星散分布 SD	聚集型 AD	衰退型 DP	✓	33.3%	✓	Jian et al, 2006; Wang XM et al, 2006; Wang DB et al, 2007, 2009; Sun YJ et al, 2019
滇南苏铁 <i>Cycas diannanensis</i>	219	CR	星散分布 SD	星散分布 SD	较低 RL				Liu et al, 2015
灰干苏铁 <i>Cycas hongheensis</i>	1	CR	星散分布 SD	星散分布 SD					Wu & Zhang et al, 2008; Zheng et al, 2017
闽南苏铁 <i>Cycas taiwaniana</i>	1	EN	星散分布 SD	星散分布 SD					Liu & Xie, 2007; Nong et al, 2011; Wang et al, 2019
银杉 <i>Cathaya argyrophylla</i>	约 3,500 About 3,500	EN	岛状分布 ID	聚集型 AD	衰退型 DP	✓	21%	✓	Xie & Chen, 1994, 1999a, b; Wang et al, 1996; Xie et al, 1999a, b; Xie & Li, 2000
光叶蕨 <i>Cystoathyrium chinense</i>	58	EW	星散分布 SD	星散分布 SD		✓	57.8%	✓	Wei & Zhang, 2014; Yu et al, 2015; Wen et al, 2016
瑶山芭蕉 <i>Dayaoshania cotinifolia</i>	9,600	CR			较高 RH	✓	28%	✓	Wang YB et al, 2008
霍山石斛 <i>Dendrobium huoshanense</i>		CR			低 L	✓	10.6%	✓	Chen et al, 2013
华石斛 <i>Dendrobium sinense</i>		EN	星散分布 SD	星散分布 SD	衰退型 DP	✓	0.6%	✓	Jiang et al, 2011; Wang TX et al, 2018; Bian et al, 2017
猪血木 <i>Euryodendron excelsum</i>	179	CR	岛状分布 ID	聚集型 AD	稳定型 SP	✓	42.7%	✓	Shen et al, 2007, 2008; Cui & Su, 2015; Wang et al, 2015; Li et al, 2019
单性木兰 <i>Kmeria septentrionalis</i>	309	VU	星散分布 SD	聚集型 AD	稳定型 SP	✓	0.05%	✓	Pan et al, 2008; Jin et al, 2013; Peng et al, 2015, 2016
落叶木莲 <i>Manglietia decidua</i>	约 27,000 About 27,000	VU	岛状分布 ID	岛状分布 ID	衰退型 DP	✓		✓	Yu et al, 1999; Yuan, 2005; Zhan et al, 2013; Yang et al, 2017
华盖木 <i>Manglietiastrum sinicum</i>	18	CR	星散分布 SD	星散分布 SD	衰退型 DP	✓	2%~7%	✓	Tian et al, 2003; Yuan, 2009; Zheng et al, 2008; Chu et al, 2012; Ding et al, 2014
云南蓝果树 <i>Nyssa yunnanensis</i>	8	CR	星散分布 SD	星散分布 SD	较低 RL	✓	7%	✓	Zhang et al, 2014, 2019; Wu et al, 2015; Yang XC et al, 2019
天目铁木 <i>Ostrya rehderiana</i>	5	CR	星散分布 SD	星散分布 SD	低 L	✓	16.2%	✓	Wang ZL et al, 2008; Luo et al, 2018; Yang et al, 2018

表 1 (续) Table 1 (continued)

物种 Species	现存数量 Existing numbers (ind.)	IUCN 濒危等级 Endangered status in IUCN	种群特征 Population characteristics			濒危因素 Endangered factors			参考文献 References
			分布类型 Distribution type	分布格局 Distribution pattern	年龄结构 Age structure	遗传多样性 Genetic diversity	人为采挖 Human activities	生境破坏 Habitat destruction	
峨眉拟单性木兰 <i>Parakmeria omeiensis</i>	20	CR	星散分布 SD	分散型 SP	稳定型 SP	0.08%	✓	✓	Yu et al, 2011, 2019; Chen et al, 2015
银缕梅 <i>Shaniodendron subaequale</i>	超过 2,000 More than 2,000	CR	岛状分布 ID	聚集型 AD	衰退型 DP	20%	✓	✓	Hu et al, 2011; Gong et al, 2012; Li et al, 2012; Zhang et al, 2016; Wang L et al, 2018; Ye, 2019
巧家五针松 <i>Pinus squamaia</i>	34	CR	聚集型 AD	聚集型 AD	衰退型 DP	55%	✓	✓	Lu et al, 1999; Zhang et al, 2005; Wang et al, 2020
报春巨舌 <i>Primulina tabacum</i>	约 1 万 About 10,000	EN	聚集型 AD	聚集型 AD	高 H		✓	✓	Ren, 2003; Miao et al, 2013; Dai et al, 2018
崖柏 <i>Thuja suchuenensis</i>	约 4,500 About 4,500	EN	岛状分布 ID	聚集型 AD	衰退型 DP	24%	✓	✓	Liu et al, 2004, 2005, 2013; Liu & Xiao, 2008; Zhu et al, 2014; Ma et al, 2017
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	5,746	CR	聚集型 AD	聚集型 AD	衰退型 DP	19.73%	✓	✓	Cheng et al, 2007; Xiong et al, 2010; Lin et al, 2017; Zhu & Xu, 2019; Wu et al, 2020
普陀鹅耳枥 <i>Carpinus putoensis</i>	1	CR			低 L	2.18%	✓	✓	Li et al, 2010; Zhang et al, 2011a, b; Sheng & Zhu, 2018
羊角槭 <i>Acer yangjuechi</i>	1	VU				36.19%	✓	✓	Xu et al, 2012; Chen et al, 2017, 2019

CR: 濒危; EN: 濒危; VU: 易危。
 CR: Critically Endangered; EN: Endangered; VU: Vulnerable; ID: Island distribution; SD: Scattered distribution; AD: Aggregation distribution; SP: Stabbling population; DP: Decaying population; L: Low; H: High; RH: Relatively high; RL: Relatively low.

生种群遗传多样性, 发现其遗传多样性高于其他苏铁类植物和濒危植物 (Nei's 基因多样性 0.2196, Shannon 多样性指数 0.3445, 多态位点百分率 87.01%); 张仁波等 (2007) 采用 RAPD 分子标记对崖柏天然种群遗传多样性进行研究, 发现崖柏种群的遗传多样性与其他濒危植物相比较为丰富 (Nei's 基因多样性 0.3015, Shannon 多样性指数 0.4360, 多态位点百分率 72.09%), 表明遗传多样性不是造成这些物种濒危的首要因素, 反而是人类活动和生境破坏等因素导致其面临较高的灭绝风险 (刘建峰和肖文发, 2008; 苏金源等, 2020)。

1.5 种群结构多为衰退型

在 28 种极小种群野生植物中, 德保苏铁、崖柏、水杉等 11 个物种的种群年龄结构表现为衰退型 (表 1), 即幼龄个体少而老龄个体多、死亡率大于萌发率等, 这种种群结构由于难以维持种群增长可能会导致种群灭绝。例如因幼龄个体存活率较低, 导致水杉种群幼龄个体不断减少, 老龄个体逐渐增加, 难以维持种群整体的长期稳定 (林勇等, 2017); 银缕梅 (*Shaniodendron subaequale*) 种群年龄结构差异较大, 大部分种群缺乏幼龄个体, 各个年龄段都有着较高的死亡率, 有些种群衰退严重 (龚滨等, 2012)。

2 导致极小种群野生植物濒危的因素

2.1 繁殖力低使种群更新缓慢

在自然条件下, 物种濒危的关键环节是种子向幼苗的转化过程, 这个过程涉及果实成熟、种子萌发等, 没有足够数量的幼苗, 种群就难以更新。有 21 种濒危植物的种子品质差且产量很少 (表 1), 导致种子向幼苗的转化率较低, 形成的幼苗数量较少^{①②③④}。百山祖冷杉野生植株仅有 3 株, 人工繁育的后代能结实嫁接的植株也不多, 种子发芽率仅有 1%–2% (吴友贵等, 2010); 羊角槭 (*Acer yangjuechi*) 种子内没有胚乳, 饱满种子生活力仅有 20.53%, 在其果实生长期, 果序脱落率高达

① 袁建国 (2005) 百山祖冷杉濒危机制与保护对策研究. 硕士学位论文, 浙江大学, 杭州。
 ② 翟月婷 (2010) 霍山石斛试管丛生芽及原球茎继代增殖措施的研究. 硕士学位论文, 安徽农业大学, 合肥。
 ③ 许小连 (2012) 濒危植物羊角槭生殖生物学的初步研究. 硕士学位论文, 浙江农林大学, 杭州。
 ④ 付迪 (2019) 珍稀濒危植物天目铁木的生殖生物学研究. 硕士学位论文, 杭州师范大学, 杭州。

67.7%, 落果率高达87.3%, 而且果实败育率高(石柏林等, 2006; 肖志成和高捍东, 2008), 这些特征均导致种群更新缓慢。

2.2 种间竞争能力差

物种在群落内的竞争能力差, 获得资源就少, 从而直接或间接地影响其生长发育。有16种极小种群野生植物在种间竞争中处于不利地位, 多表现为生长缓慢(表1)(莫耐波等, 2012; 陶翠, 2013^①; 王鑫等, 2017)。银杉由于对光的需求大, 只有在群落的林窗内光照充足的条件下其幼苗才有机会发展, 当它们进入成年期后, 在群落竞争中则处于不利地位(谢宗强等, 1998, 谢宗强和陈伟烈, 1999a, b); 银缕梅与青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)和其他阔叶树种之间的生态位重叠程度较高, 在争夺光照、水分、土壤养分时处于弱势, 导致其在群落中居于次要和从属地位(方顺清等, 2004; 黄绍辉等, 2006)。

3 极小种群野生植物的受威胁因素

3.1 动物取食影响极小种群野生植物种群更新

动物取食野生植物的叶片、果实、种子等不仅影响植物的生长发育, 也阻碍了种群的更新(表1)(潘光波和赵峰磊, 2011; 梁凌林和潘庆宝, 2012; 赵燕, 2018)。例如, 鼠类在单性木兰种子散播初期至种子萌发期均有取食现象, 包括地表和土壤中的种子, 导致单性木兰天然更新过程中由种子转化成幼苗时存在严重障碍(赖家业等, 2007; 潘春柳等, 2008); 银杉球果产量很少, 成熟后被昆虫、鸟类、哺乳类动物取食达到15%, 落到地表的种子几乎全被鸟类和鼠类取食, 只有埋于土壤较深层(3 cm以下)的种子才得以保留, 存活种子数量极小, 成为银杉种群更新的主要障碍(谢宗强等, 1998; 谢宗强和陈伟烈, 1999a; 谢宗强和李庆梅, 2000)。

3.2 人为过度采挖和砍伐降低种群规模

在28种极小种群野生植物中, 有15种由于经济价值、观赏价值和商业价值高而被人为大量采挖和砍伐, 直接导致数量快速减少, 成为其濒危的直接因素(表1)。例如崖柏因木材质地坚硬而长期被砍伐用作建筑材料, 现在重庆城口县的建筑中仍能发现用于建筑材料的崖柏木材(Guo et al, 2019)。德保苏铁由于具观赏性而有较高的经济价值, 被当地居民

肆意采挖, 导致其数量从2001年的2,200多株锐减到2010年的1,100多株, 特别是成年德保苏铁的数量减少更为严重(潘光波和赵峰磊, 2011; 农安, 2014)。

3.3 人为开发利用破坏极小种群野生植物的生境

工程建设、旅游开发和过度垦荒等因素破坏了24种极小种群野生植物生存的原有生境(表1), 具体表现为生境破碎化或面积变小, 从而使得种群规模减小。瑶山苣苔由于人为活动对其原生境的破坏, 个体数由1999年的9,600株锐减到2006年的1,000株左右, 减少了近90% (王玉兵等, 2008)。灰干苏铁(*Cycas hongheensis*) 2020年的个体数量比1992年减少了47%; 水杉原生种群母树由1983年的5,779株减少至2003年的5,393株(王希群等, 2005; 程丹丹等, 2007)。

3.4 气候变化和自然灾害威胁物种的生存

气候变化和自然灾害等严重威胁物种的生存, 迫使它们或者改变自身性状以适应环境, 或者迁移到其他适生区域。在28种极小种群野生植物中有15种子遗植物(表1)(李晓笑, 2013^②; Zhu et al, 2019; 邓莎等, 2020), 这些物种在经历过晚第三纪气候变冷以及第四纪冰期的影响后, 世代周期变长, 繁殖能力降低, 如银杉、崖柏、资源冷杉等。崖柏由260万年前的山西榆社盆地南迁到现存分布区——大巴山山区, 该区温暖湿润的气候条件对崖柏起到了“避难所”的作用(陈冬梅等, 2011; 邱迎君等, 2011; Cui et al, 2015)。现存的5株天目铁木中, 有一株高7 m、有300多年寿命的植株主干顶部遭受过雷击(管康林和陶银周, 1988); 百山祖冷杉生长在水沟边, 曾在20世纪60年代被大水冲倒一株^③; 瑶山苣苔在2008年由于冻害而导致直接死亡的有100多株(王玉兵等, 2008)。

4 极小种群野生植物的濒危机制

基于前文对28种极小种群野生植物的种群和个体特征以及受威胁因素分析, 发现导致其濒危的原因有4个。(1)在种群尺度上, 衰退型种群结构和聚集狭域分布特征是导致其濒危的原因之一, 这使得

① 陶翠 (2013) 中国五针松组濒危植物的濒危机制探究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

② 李晓笑 (2013) 中国 5 种冷杉属植物生态濒危机制研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

③ 袁建国 (2005) 百山祖冷杉濒危机制与保护对策研究. 硕士学位论文, 浙江大学, 杭州.

其遗传多样性过低,从而对环境的适应力和进化潜力降低,进一步提高了濒危的风险。(2)在个体尺度上,大多数极小种群野生植物的种子品质差且产量少,繁育力低,形成的幼苗数量少,导致种群变小且难以更新;加上极小种群野生植物在种间竞争中处于弱势地位,直接或间接影响其生长发育,进一步影响了种群大小。(3)人为过度采挖、自然灾害等因素导致个体数量降低,工程建设、旅游开发和过度垦荒等导致的生境破坏或消失使得野生植物种群数量减少,是极小种群野生植物濒危的主要原因。(4)宏观尺度的全球气候变化等是导致极小种群野生植物濒危的历史原因。

5 保护建议

极小种群野生植物因其分布地域狭窄、种群衰退严重,个体数量低于其稳定存活界限,是急需优先拯救的国家重点保护濒危植物。优先保护极小种群野生植物有助于延缓物种多样性的流失、维护生态平衡以及促进生态可持续发展,对我国生物多样性保护具有重要意义。就地保护是其保护的主要措施之一(张文辉等, 2002; Kramer et al, 2008),在必要时建立保护区或植物园,对种质和生物资源进行迁地保护是全球植物保护战略的重点(Larkin et al, 2016)。

在就地保护和迁地保护措施的基础上,基于28种极小种群野生植物的濒危机制分析,我们建议:(1)对自身繁育力低的极小种群野生植物,开展人工繁育并加强野外回归工作,提高种群的自我更新能力(Ren et al, 2014);(2)修复栖息地内破坏的生态系统,提高群落生态系统的稳定性,改善其生境条件;(3)除了采取措施增加个体数量之外,应加强对极小种群野生植物的种群结构和遗传多样性的研究,保护整个种群的遗传多样性。

ORCID

刘勇波  <https://orcid.org/0000-0003-1618-8813>

参考文献

Aguilar R, Ashworth L, Galetto L, Aizen MA (2006) Plant reproductive susceptibility to habitat fragmentation: Review and synthesis through a meta-analysis. *Ecology Letters*, 9, 968–980.

Bian ZX, Yan CY, Yao XJ, Yang FS (2017) Determination of

seed viability in endangered orchid of *Dendrobium sinense*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 38, 403–407. (in Chinese with English abstract) [边子星, 颜彩燕, 姚肖健, 杨福孙 (2017) 濒危华石斛种子活力测定方法研究. *热带作物学报*, 38, 403–407.]

Chen CW, Dai J, Yao HJ, Han BX, Chen NF (2013) Research progress on resources and identification of *Dendrobium huoshanense*. *Research and Practice on Chinese Medicines*, 27(3), 84–87. (in Chinese) [陈存武, 戴军, 姚厚军, 韩邦兴, 陈乃富 (2013) 霍山石斛资源与鉴定研究进展. *现代中药研究与实践*, 27(3), 84–87.]

Chen DM, Kang HZ, Liu CJ (2011) An overview on the potential Quaternary glacial refugia of plants in China mainland. *Bulletin of Botanical Research*, 31, 623–632. (in Chinese with English abstract) [陈冬梅, 康宏樟, 刘春江 (2011) 中国大陆第四纪冰期潜在植物避难所研究进展. *植物研究*, 31, 623–632.]

Chen J, Fan JC, Lu CT, Zhao B (2015) Biological characteristics and conservation measures of endangered species of *Parakmeria omeiensis*. *Science and Technology of Sichuan Agriculture*, (4), 22–25. (in Chinese) [陈娟, 范继才, 卢昌泰, 赵波 (2015) 濒危树种峨眉拟单性木兰的生物学特征及保育措施. *四川农业科技*, (4), 22–25.]

Chen XB, Liu Y, Zhao MS, Tu SP (2017) Embryo development and dormancy releasing of *Acer yangjuechi*, the extremely endangered plant. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(4), 65–73. (in Chinese with English abstract) [陈香波, 刘杨, 赵明水, 涂淑萍 (2017) 极度濒危树种羊角槭的种胚发育与休眠解除. *林业科学*, 53(4), 65–73.]

Chen XB, Lü XL, Liu Y, Zhao MS, Cui XH, Zhang DM (2019) Floral morphology and flowering process of *Acer yangjuechi*, the extremely endangered plant. *Bulletin of Botanical Research*, 39, 329–337. (in Chinese with English abstract) [陈香波, 吕秀立, 刘杨, 赵明水, 崔心红, 张冬梅 (2019) 极度濒危树种羊角槭花部形态特征及开花动态. *植物研究*, 39, 329–337.]

Cheng DD, Ge JW, Lai XL, Liu XQ, Fan SH (2007) Status and conservation strategy of native population of *Metasequoia glyptostroboides*. *Environmental Science & Technology*, 30(5), 48–50, 118. (in Chinese with English abstract) [程丹丹, 葛继稳, 赖旭龙, 刘宪群, 范深厚 (2007) 原生水杉种群的现状及其保护对策. *环境科学与技术*, 30(5), 48–50, 118.]

Cui LM, Su YJ (2015) SSR markers for a critically endangered species *Euryodendron excelsum* and a distantly related species *Ternstroemia gymnanthera* (Ternstroemiaceae). *Biochemical Systematics and Ecology*, 58, 288–292.

Cui YM, Sun B, Wang HF, Ferguson DK, Wang YF, Li CS, Yang J, Ma QW (2015) Exploring the formation of a disjunctive pattern between eastern Asia and north America based on fossil evidence from *Thuja* (Cupressaceae). *PLoS ONE*, 10, e0138544.

Chu YX, Li F, Ouyang ZQ (2012) Cutting propagation

- techniques of *Managlietastrum sinicum*. Forest Inventory and Planning, 37(1), 128–130. (in Chinese with English abstract) [楚永兴, 李帆, 欧阳志勤 (2012) 华盖木扦插育苗技术. 林业调查规划, 37(1), 128–130.]
- Dai WT, Miao SY, Tao WQ, Li CB, Zhao XJ (2018) Plant diversity of key national protected species *Primulina tabacum* distribution area. Chinese Wild Plant Resources, 37(3), 64–67, 75. (in Chinese with English abstract) [戴文坛, 缪绅裕, 陶文琴, 李春波, 赵新建 (2018) 国家保护植物报春苣苔分布地的植物多样性研究. 中国野生植物资源, 37(3), 64–67, 75.]
- Deng S, Wu YN, Wu KL, Fang L, Li L, Zeng SJ (2020) Breeding characteristics and artificial propagation of 14 species of Wild Plant with Extremely Small Populations (WPESP) in China. Biodiversity Science, 28, 385–400. (in Chinese with English abstract) [邓莎, 吴艳妮, 吴坤林, 房林, 李琳, 曾宋君 (2020) 14种中国典型极小种群野生植物繁育特性和人工繁殖研究进展. 生物多样性, 28, 385–400.]
- Ding JY, Yuan CM, Cao MM, Liu WW, Yu C, Zhang HY, Zhang Y, Di YT, He HP, Li SL, Hao XJ (2014) Antimicrobial constituents of the mature carpels of *Manglietastrum sinicum*. Journal of Natural Products, 77, 1800–1805.
- Fang SQ, Yan JF, Weng Q, Huang SH (2004) Population ecological status quo and protection study on *Shaniodendron subaequale* M. B. Deng, H. T. Wei in Longchi Mountain Reserve in Yixing. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 31(2), 4–5, 11. (in Chinese with English abstract) [方顺清, 颜建法, 翁琴, 黄绍辉 (2004) 宜兴龙池山自然保护区银缕梅种群生态现状及保护研究. 江苏林业科技, 31(2), 4–5, 11.]
- Gong B, Xia YJ, Zhang GF, Lu Y, Sun G (2012) Population structure and spatial pattern of *Parrotia subaequalis*, a rare and endangered species endemic to China. Journal of Ecology and Rural Environment, 28, 638–646. (in Chinese with English abstract) [龚滨, 夏洋洁, 张光富, 陆芸, 孙国 (2012) 中国特有珍稀濒危树种银缕梅种群结构和空间格局. 生态与农村环境学报, 28, 638–646.]
- Guan KL, Tao YZ (1988) Current situation and propagation of rare tree species—*Ostrya rederiana*. Journal of Zhejiang Forestry College, 5(1), 93–95. (in Chinese) [管康林, 陶银周 (1988) 濒危树种——天目铁木的现状和繁殖. 浙江林学院学报, 5(1), 93–95.]
- Guo XY, Wang MM, Wu JF, Wu GY, Zhang X, Huo LQ, Liu HX, Chen YH, Xie GW, Tan HB, Qiu SX (2019) Chemical constituents of the trunks and roots of *Thuja sutchuenensis*. Fitoterapia, 134, 264–269.
- Guisan A, Tingley R, Baumgartner JB, Naujokaitis-Lewis I, Sutcliffe PR, Tulloch AIT, Regan TJ, Brotons L, McDonald-Madden E, Mantyka-Pringle C, Martin TG, Rhodes JR, Maggini R, Setterfield SA, Elith J, Schwartz MW, Wintle BA, Broennimann O, Austin M, Ferrier S, Kearney MR, Possingham HP, Buckley YM (2013) Predicting species distributions for conservation decisions. Ecology Letters, 16, 1424–1435.
- Hu BZ, Shao SL, Qian H, Zhou QZ (2004) Study on aspect and structure properties of *Abies beshanquensis*. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 24(3), 12–16, 27. (in Chinese with English abstract) [胡伯智, 邵顺流, 钱华, 周启忠 (2004) 百山祖冷杉森林植物群落的外貌与结构特征研究. 浙江林业科技, 24(3), 12–16, 27.]
- Hu YM, Fang GF, Luo XM (2011) Status of *Parrotia subaequalis* in taxonomy, reasons for its endangerment and protective measures. Anhui Forestry Science and Technology, 37, 46–48. (in Chinese with English abstract) [胡一民, 方国富, 骆绪美 (2011) 银缕梅的分类学地位、濒危原因与保护对策. 安徽林业科技, 37, 46–48.]
- Huang SH, Fang YM, Zhang QX, Fang SQ, Wang B, Chen H (2006) Study on cuttage propagation of *Shaniodendron subaequale*. Journal of Southwest Forestry College, 26(5), 94–96. (in Chinese with English abstract) [黄绍辉, 方炎明, 张启香, 方顺清, 王波, 陈花 (2006) 银缕梅扦插繁殖试验. 西南林学院学报, 26(5), 94–96.]
- Jian SG, Wu M, Liu N (2005) Genetic diversity of *Cycas changjiangensis* detected by allozyme analysis. Guihaia, 25, 566–569, 561. (in Chinese with English abstract) [简曙光, 吴梅, 刘念 (2005) 葫芦苏铁遗传多样性的等位酶分析. 广西植物, 25, 566–569, 561.]
- Jian SG, Liu N, Gao ZZ, Wei Q, Xie ZH, Wu M, Ren H (2006) Biological characteristics of wild *Cycas fairylakea* population in Guangdong Province, China. Frontiers of Biology in China, 1, 430–433.
- Jiang HY, Yang FS, Song XQ (2011) Preliminary study on artificial sowing of *Dendrobium sinense* in natural habitat in Bawangling Natural Reserve, Hainan Island. Tropical Forestry, 39(2), 40–43. (in Chinese with English abstract) [姜昊颖, 杨福孙, 宋希强 (2011) 华石斛原生境条件下人工播种的初步探讨. 热带林业, 39(2), 40–43.]
- Jin JY, Qin WG, Tan WN, Luo LJ, Qin GL (2013) Interspecific association among dominant populations in endangered plant *Kmeria septentrionalis* communities. Journal of West China Forestry Science, 42, 86–94. (in Chinese with English abstract) [金俊彦, 覃文更, 谭卫宁, 罗柳娟, 覃国乐 (2013) 濒危植物单性木兰群落主要种群种间联结性研究. 西部林业科学, 42, 86–94.]
- Kramer AT, Ison JL, Ashley MV, Howe HF (2008) The paradox of forest fragmentation genetics. Conservation Biology, 22, 878–885.
- Lai JY, Pan CL, Qin WG, Wei GF (2007) The floral syndrome and its pollination adaptability in *Kmeria septentrionalis* (Magnoliaceae). Acta Botanica Yunnanica, 29, 303–308. (in Chinese with English abstract) [赖家业, 潘春柳, 覃文更, 韦国富 (2007) 单性木兰花部综合特征及其传粉适应性. 云南植物研究, 29, 303–308.]
- Larkin DJ, Jacobi SK, Hipp AL, Kramer AT (2016) Keeping

- all the PIECES: Phylogenetically informed *ex situ* conservation of endangered species. PLoS ONE, 11, e0156973.
- Li DQ (2004) Status quo & protection countermeasure on Guangxi wild sago plam resources. Central South Forest Inventory and Planning, 23(3), 33–36. (in Chinese with English abstract) [黎德丘 (2004) 广西野生苏铁资源现状与保护对策. 中南林业调查规划, 23(3), 33–36.]
- Li HP, Yue CL, Yu QJ, Yang ZJ, Shao SL, Yu LP (2012) Advance of research on *Parrotia subaequalis*. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 32, 79–84. (in Chinese with English abstract) [李贺鹏, 岳春雷, 郁庆君, 杨在娟, 邵顺流, 俞立鹏 (2012) 珍稀濒危植物银缕梅的研究进展. 浙江林业科技, 32, 79–84.]
- Li WX, Xing F, Zhou YB, Guo WX, Huang YL (2019) Characterization of the complete chloroplast genome of *Euryodendron excelsum* (Pentaphtylacaceae), a critically endangered species endemic to China. Conservation Genetics Resources, 11, 275–278.
- Li XK, Su ZM, Ou ZL, Ning SJ, Tang RQ, Li RT (2002a) On intraspecific and interspecific competition among *Abies yuanbaoshanensis* community. Journal of Plant Resources and Environment, 11(1), 20–24. (in Chinese with English abstract) [李先琨, 苏宗明, 欧祖兰, 宁世江, 唐润琴, 李瑞棠 (2002a) 元宝山冷杉群落种内与种间竞争的数量关系. 植物资源与环境学报, 11(1), 20–24.]
- Li XK, Su ZM, Xiang WS, Ning SJ, Tang RQ, Ou ZL, Li RT (2002b) Study on the structure and spatial pattern of the endangered plant population of *Abies yuanbaoshanensis*. Acta Ecologica Sinica, 22, 2246–2253. (in Chinese with English abstract) [李先琨, 苏宗明, 向悟生, 宁世江, 唐润琴, 欧祖兰, 李瑞棠 (2002b) 濒危植物元宝山冷杉种群结构与分布格局. 生态学报, 22, 2246–2253.]
- Li XK, Xiang WS, Tang RQ (2002c) Analysis of the life table of endangered population *Abies yuanbaoshanensis*. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 10(1), 9–14. (in Chinese with English abstract) [李先琨, 向悟生, 唐润琴 (2002c) 濒危植物元宝山冷杉种群生命表分析. 热带亚热带植物学报, 10(1), 9–14.]
- Li XP, Yu CY, Wu YY, Hong ZY, Sun J, Chen YP, Miao LX (2010) The biological reason for endangerment of *Carpinus putoensis* and measures for gene conservation. Scientia Silvae Sinicae, 46(7), 69–76. (in Chinese with English abstract) [李修鹏, 俞慈英, 吴月燕, 洪中跃, 孙晶, 陈叶平, 缪玲霞 (2010) 普陀鹅耳枥濒危的生物学原因及基因资源保存措施. 林业科学, 46(7), 69–76.]
- Liang LL, Pan QB (2012) Current situation and protection of *Abies yuanbaoshanensis*. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 35(4), 12–14. (in Chinese with English abstract) [梁凌林, 潘庆宝 (2012) 元宝山冷杉资源现状及保护初探. 内蒙古林业调查设计, 35(4), 12–14.]
- Liao WF, Xia NH, Deng YF, Zheng QY (2004) Study on genetic diversity of *Manglietia decidua* (Magnoliaceae). Acta Botanica Yunnanica, 26, 58–64. (in Chinese with English abstract) [廖文芳, 夏念和, 邓云飞, 郑庆衍 (2004) 华木莲的遗传多样性研究. 云南植物研究, 26, 58–64.]
- Lin Y, Ai XR, Yao L, Guo QJ, Zhang MX, Chen J (2017) Population structure and dynamics of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees. Chinese Journal of Ecology, 36, 1531–1538. (in Chinese with English abstract) [林勇, 艾训儒, 姚兰, 郭秋菊, 张敏霞, 陈俊 (2017) 水杉原生母树种群结构与动态. 生态学杂志, 36, 1531–1538.]
- Liu J, Zhou W, Gong X (2015) Species delimitation, genetic diversity and population historical dynamics of *Cycas diannanensis* (Cycadaceae) occurring sympatrically in the Red River region of China. Frontiers in Plant Science, 6, 696.
- Liu JF, Shi SQ, Chang EM, Yang WJ, Jiang ZP (2013) Genetic diversity of the critically endangered *Thuja sutchuenensis* revealed by ISSR markers and the implications for conservation. International Journal of Molecular Sciences, 14, 14860–14871.
- Liu JF, Jiang ZP, Xiao WF, Wang JX (2005) A preliminary study on the population pattern and dynamics of critically endangered plant, *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae). Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 27, 708–712. (in Chinese with English abstract) [刘建锋, 江泽平, 肖文发, 王建修 (2005) 极度濒危植物——崖柏种群空间格局与动态的初步研究. 江西农业大学学报, 27, 708–712.]
- Liu JF, Xiao WF, Guo ZH, Jiang ZP, Liu ZY (2004) A preliminary study on population structure and dynamics of a rare and endangered plant, *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae). Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 26, 377–380. (in Chinese with English abstract) [刘建锋, 肖文发, 郭志华, 江泽平, 刘正宇 (2004) 珍稀濒危植物——崖柏种群结构与动态初步研究. 江西农业大学学报, 26, 377–380.]
- Liu JF, Xiao WF (2008) RAPD analysis of the genetic diversity of a critically endangered plant, *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae). Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 30, 68–72. (in Chinese with English abstract) [刘建锋, 肖文发 (2008) 濒危植物崖柏遗传多样性的RAPD分析. 江西农业大学学报, 30, 68–72.]
- Liu N, Xie JG (2007) Distribution and type locality of *Cycas taiwaniana*. Acta Phytotaxonomica Sinica, 45, 246–250. (in Chinese with English abstract) [刘念, 谢建光 (2007) 台湾苏铁的分布及模式产地. 植物分类学报, 45, 246–250.]
- Liu ZH, Zhang JL, Liu YH, Tang SQ (2011) Spatial pattern analysis of *Abies ziyuanensis* population in Dayuan. Guihaia, 31, 614–619. (in Chinese with English abstract) [刘招辉, 张建亮, 刘燕华, 唐绍清 (2011) 大院资源冷杉种群的空间分布格局分析. 广西植物, 31, 614–619.]
- Lowe WH, Kovach RP, Allendorf FW (2017) Population genetics and demography unite ecology and evolution. Trends in Ecology & Evolution, 32, 141–152.

- Lu SJ, Deng LL, Li XW (1999) A study on endangered causes of *Pinus squamata*. Journal of Northwest Forestry University, 14(1), 42–44. (in Chinese with English abstract) [陆素娟, 邓莉兰, 李乡旺 (1999) 五针白皮松濒危原因初步研究. 西北林学院学报, 14(1), 42–44.]
- Luo WH, Deng T, Zhao B, Huang SX, Tang WX (2013) Seed dormancy and germination of endangered species *Cycas debaoensis*. Seed, 32, 72–74. (in Chinese) [骆文华, 邓涛, 赵博, 黄仕训, 唐文秀 (2013) 濒危植物德保苏铁种子休眠与萌发. 种子, 32, 72–74.]
- Luo Y, Wu SB, Ku WP, Yang SZ, Wu JS (2018) Community structure characteristics and species diversity of rare and endangered plants of *Ostrya rehderiana*. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 59, 2061–2064. (in Chinese) [罗远, 吴世斌, 库伟鹏, 杨淑贞, 吴家森 (2018) 珍稀濒危植物天目铁木群落结构及物种多样性. 浙江农业科学, 59, 2061–2064.]
- Ma FQ, Qin AL, Guo QS, Jian ZJ, Pei SX, Wang XF, Zhang SQ, Xing JC (2017) Geographical distribution and habitat characteristics of critically endangered species, *Thuja sutchuenensis*. Chinese Journal of Ecology, 36, 1777–1784. (in Chinese with English abstract) [马凡强, 秦爱丽, 郭泉水, 简尊吉, 裴顺祥, 王祥福, 张世强, 邢继畴 (2017) 极度濒危物种崖柏的地理分布及其生境特征. 生态学杂志, 36, 1777–1784.]
- Ma XY, Jian SG, Wu M, Liu N (2003) The population characters and conservation of *Cycas debaoensis* Y. C. Zhong et C. J. Chen. Guihaia, 23, 123–126, 142. (in Chinese with English abstract) [马晓燕, 简曙光, 吴梅, 刘念 (2003) 德保苏铁居群特征及保护措施. 广西植物, 23, 123–126, 142.]
- Ma YP, Chen G, Grumbine RE, Dao ZL, Sun WB, Guo HJ (2013) Conserving plant species with extremely small populations (PSESP) in China. Biodiversity and Conservation, 22, 803–809.
- Miao SY, Tang ZX, Deng DM, Zhou JT, Pan LJ, Wang HL, Li CB, Huang FC (2013) Habitual characteristics of *Primulina tabacum* populations in a cave at Shangbaichang, Lianzhou, Guangdong. Ecology and Environmental Sciences, 22, 554–562. (in Chinese with English abstract) [缪绅裕, 唐志信, 邓冬梅, 周健桃, 潘丽君, 王厚麟, 李春波, 黄福长 (2013) 广东连州上柏场报春苣苔种群及其生境特征. 生态环境学报, 22, 554–562.]
- Mo NB, Xie YZ, Qin KP, Tu DH, Wang YB (2012) Traits of concomitant communities of rare and endangered plant *Dayaoshania cotinifolia*. Guangxi Forestry Science, 41, 242–247. (in Chinese with English abstract) [莫耐波, 谢云珍, 覃康平, 涂德华, 王玉兵 (2012) 珍稀濒危植物瑶山苣苔伴生群落特征. 广西林业科学, 41, 242–247.]
- Ning SJ, Tang RQ (2005) A preliminary study on degenerate mechanism of the population of *Abies ziyuanensis* in Yinzhulaoshan, Guangxi. Guihaia, 25, 289–294, 320. (in Chinese with English abstract) [宁世江, 唐润琴 (2005) 广西银竹老山资源冷杉种群退化机制初探. 广西植物, 25, 289–294, 320.]
- Ning SJ, Tang RQ, Cao JW (2005) Current status and conservation countermeasures of germplasm resources of *Abies ziyuanensis*. Guihaia, 25, 197–200, 280. (in Chinese with English abstract) [宁世江, 唐润琴, 曹基武 (2005) 资源冷杉现状及保护措施研究. 广西植物, 25, 197–200, 280.]
- Nong A (2014) Study on protection *in situ* and breeding of *Cycas debaoensis* in Guangxi. Agriculture and Technology, 34(2), 97, 99. (in Chinese) [农安 (2014) 广西德保苏铁就地保护与繁育研究. 农业与技术, 34(2), 97, 99.]
- Nong BX, Huang YY, Liu C (2011) Genetic relationships analysis in some species of *Cycas* in China by RAPD markers. Guihaia, 31, 167–174, 226. (in Chinese with English abstract) [农保选, 黄玉源, 刘驰 (2011) 基于RAPD分析的中国苏铁属部分种类亲缘关系探讨. 广西植物, 31, 167–174, 226.]
- Pan CL, Lai JY, Li XD, Shi HM (2008) Seed rain and natural regeneration of *Kmeria septentrionalis* in Mulun of Guangxi. Chinese Journal of Ecology, 27, 2235–2239. (in Chinese with English abstract) [潘春柳, 赖家业, 黎向东, 石海明 (2008) 单性木兰种子雨与天然更新的初步调查. 生态学杂志, 27, 2235–2239.]
- Pan GB, Zhao FL (2011) Study on the geographical distribution of *Cycas debaoensis* in the wild and priority protected areas. Agricultural Research and Application, (4), 30–32. (in Chinese) [潘光波, 赵峰磊 (2011) 野生德保苏铁植物地理分布及优先保护区域研究. 农业研究与应用, (4), 30–32.]
- Peng YH, He QF, Tan CQ, Shen WH, Qin WG, He F (2016) Quantitative analysis of stand spatial structure of a rare species *Kmeria septentrionalis* in Guangxi. Chinese Journal of Ecology, 35, 363–369. (in Chinese with English abstract) [彭玉华, 何琴飞, 谭长强, 申文辉, 覃文更, 何峰 (2016) 广西极小种群单性木兰群落空间结构量化. 生态学杂志, 35, 363–369.]
- Peng YH, Zheng W, He QF, Shen WH, Liu J, Tan WN, He F (2015) Soil characteristics of *Kmeria septentrionalis* communities. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 35(10), 44–48. (in Chinese with English abstract) [彭玉华, 郑威, 何琴飞, 申文辉, 刘建, 谭卫宁, 何峰 (2015) 单性木兰群落的土壤特征. 中南林业科技大学学报, 35(10), 44–48.]
- Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, Zhao LN, Yu SX, Liu HY, Liu B, Yan YH, Xiang JY, Xia NH, Peng H, Li ZY, Zhang ZX, He XJ, Yin LK, Lin YL, Liu QR, Hou YT, Liu Y, Liu QX, Cao W, Li JQ, Chen SL, Jin XH, Gao TG, Chen WL, Ma HY, Geng YY, Jin XF, Chang CY, Jiang H, Cai L, Zang CX, Wu JY, Ye JF, Lai YJ, Liu B, Lin QW, Xue NX (2017) Threatened species list of China's higher plants. Biodiversity Science, 25, 696–744. (in Chinese and in English) [覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 赵莉娜,

- 于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 严岳鸿, 向建英, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林秦文, 薛纳新 (2017) 中国高等植物受威胁物种名录. 生物多样性, 25, 696–744.]
- Qiu YJ, Yi GM, Ning ZL, Huang HW (2011) Geographic distribution, current status of resources and endangered factors of endangered plant *Nothotsuga longibracteata*. Journal of Plant Resources and Environment, 20, 53–59. (in Chinese with English abstract) [邱迎君, 易官美, 宁祖林, 黄宏文 (2011) 濒危植物长苞铁杉的地理分布和资源现状及致危因素分析. 植物资源与环境学报, 20, 53–59.]
- Ren H, Peng SL, Zhang DX, Jian SG, Wei Q, Zhang QM, Liu N, Li SJ, Chen WB, Zhuang YZ (2003) The ecological and biological characteristics of an endangered plant, *Primulina tabacum* Hance. Acta Ecologica Sinica, 23, 1012–1017. (in Chinese with English abstract) [任海, 彭少麟, 张莫湘, 简曙光, 韦强, 张倩媚, 刘念, 李世晋, 陈文杉, 庄益智 (2003) 报春苣苔的生态生物学特征. 生态学报, 23, 1012–1017.]
- Ren H, Jian SG, Liu HX, Zhang QM, Lu HF (2014) Advances in the reintroduction of rare and endangered wild plant species. Science China Life Sciences, 57, 603–609.
- Ren H, Zhang QM, Lu HF, Liu HX, Guo QF, Wang J, Jian SG, Bao HO (2012) Wild plant species with extremely small populations require conservation and reintroduction in China. Ambio, 41, 913–917.
- Shen SK, Ma HY, Liu XY, Wang YH (2007) The endangered causes and preserving strategies for *Euryodendron excelsum*, a plant endemic to China. Ecology and Environment, 16, 1819–1823. (in Chinese with English abstract) [申仕康, 马海英, 刘湘永, 王跃华 (2007) 中国特有植物猪血木的濒危原因及保护对策. 生态环境, 16, 1819–1823.]
- Shen SK, Ma HY, Wang YH, Wang BY, Shen GZ (2008) The structure and dynamics of natural population of the endangered plant *Euryodendron excelsum* H. T. Chang. Acta Ecologica Sinica, 28, 2404–2412. (in Chinese with English abstract) [申仕康, 马海英, 王跃华, 王博轶, 申国柱 (2008) 濒危植物猪血木 (*Euryodendron excelsum* H.T.Chang) 自然种群结构及动态. 生态学报, 28, 2404–2412.]
- Sheng QQ, Zhu ZL (2018) Photosynthetic capacity, stomatal behavior and chloroplast ultrastructure in leaves of the endangered plant *Carpinus putoensis* W. C. Cheng during gaseous NO₂ exposure and after recovery. Forests, 9, 561.
- Shi BL, Wu JS, Zhong TL (2006) Research on seed properties and germination test of six species of *Acer*. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 26(3), 38–40. (in Chinese with English abstract) [石柏林, 吴家森, 钟泰林 (2006) 6种槭树属植物种子特性及其发芽试验. 浙江林业科技, 26(3), 38–40.]
- Su JY, Yan Y, Li C, Li D, Du FK (2020) Informing conservation strategies with genetic diversity in Wild Plant with Extremely Small Populations: A review on gymnosperms. Biodiversity Science, 28, 376–384. (in Chinese with English abstract) [苏金源, 燕语, 李冲, 李丹, 杜芳 (2020) 通过遗传多样性探讨极小种群野生植物的致濒机理及保护策略: 以裸子植物为例. 生物多样性, 28, 376–384.]
- Sun XL, Shi SZ, Liu ZW, Li XC, Chen Q (2019) Study on seed breeding about the endangered plant *Cycas changjiangensis*. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 47, 117–119. (in Chinese with English abstract) [孙湘来, 石绍章, 刘志伟, 李小成, 陈庆 (2019) 濒危植物葫芦苏铁种子繁育技术研究. 安徽农业科学, 47, 117–119.]
- Sun YJ, Chen XX, Fu QF, Gong YQ, Kuang JH, Li N, Rong JW, Liao WB (2019) Niche characteristics of dominant species of *Cycas fairylakea* community in Meilin Reservoir, Shenzhen. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 39(11), 63–70. (in Chinese with English abstract) [孙延军, 陈晓熹, 付奇峰, 龚奕青, 邝嘉慧, 李楠, 荣建伟, 廖文波 (2019) 深圳市梅林水库仙湖苏铁群落优势种群生态位研究. 中南林业科技大学学报, 39(11), 63–70.]
- Tang RQ, Li XK, Ou ZL, Li RT (2001) The fruiting characteristics and reproductive capacity of seeds of *Abies yuanbaoshanensis*. Bulletin of Botanical Research, 21, 403–408. (in Chinese with English abstract) [唐润琴, 李先琨, 欧祖兰, 李瑞棠 (2001) 濒危植物元宝山冷杉结实特性与种子繁殖力初探. 植物研究, 21, 403–408.]
- Tian K, Zhang GX, Cheng XF, He SJ, Yang YM, Yang YX (2003) The habitat fragility of *Manglietiastrum sinicum*. Acta Botanica Yunnanica, 25, 551–556. (in Chinese with English abstract) [田昆, 张国学, 程小放, 和世钧, 杨宇明, 杨永兴 (2003) 木兰科濒危植物华盖木的生境脆弱性. 云南植物研究, 25, 551–556.]
- Wang DB, Ji SY, Chen FP (2009) The spatial distribution pattern of main populations in *Cycas fairylakea* community. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 34, 93–97. (in Chinese with English abstract) [汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏 (2009) 仙湖苏铁群落主要种群的空间分布格局. 西南师范大学学报(自然科学版), 34, 93–97.]
- Wang DB, Ji SY, Chen FP, Peng SL (2007) Age estimation and age structure of *Cycas fairylakea* population in Shenzhen City. Chinese Journal of Applied Ecology, 18, 476–480. (in Chinese with English abstract) [汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏, 彭少麟 (2007) 仙湖苏铁种群年龄判断及年龄结构特征. 应用生态学报, 18, 476–480.]
- Wang L, Jing HJ, Fan Q, Chen CQ, Liao WB (2013) Living situation and characteristics of the community of endangered *Abies beshanzuensis* var. *ziyuanensis* in Mount Nanfengmian of Jiangxi Province. Guihaia, 33, 651–656. (in

- Chinese with English abstract) [王蕾, 景慧娟, 凡强, 陈春泉, 廖文波 (2013) 江西南风面濒危植物资源冷杉生存状况及所在群落特征. 广西植物, 33, 651–656.]
- Wang L, Zhao K, Ruan XD, Zhang C, Cao KB, Sun JJ (2018) Study on the population structure characteristics of the rare and endangered species *Parrotia subaequalis*—Taking Jinzhai County in Anhui Province as an example. *Forest Resources Management*, (3), 81–87. (in Chinese with English abstract) [王林, 赵凯, 阮向东, 张超, 曹科斌, 孙晶晶 (2018) 珍稀濒危物种银缕梅种群结构特征研究——以安徽省金寨县为例. 林业资源管理, (3), 81–87.]
- Wang RY, Zhang YP, Li WQ, Lin HJ (2020) A study on the *ex-situ* conservation of germplasm resources of *Pinus squamaia*. *Yunnan Nongye Keji*, (2), 4–6. (in Chinese) [王茹芸, 张玉萍, 李卫琼, 林洪君 (2020) 巧家五针松种质资源迁地保护研究. 云南农业科技, (2), 4–6.]
- Wang TX, Qi SJ, Song XQ, Meng QW, Yu XD (2018) Correlation analysis between population dynamics and reproduction strategies in *Dendrobium sinense* (Orchidaceae), an endemic orchid in Hainan Island. *Journal of Tropical Biology*, 9, 189–197. (in Chinese with English abstract) [王童欣, 戚山江, 宋希强, 孟千万, 于旭东 (2018) 华石斛种群动态与繁殖策略的相关性分析. 热带生物学报, 9, 189–197.]
- Wang X, Deng HP, Huang Q, Zhang SQ, Rao DS (2017) Flora analysis and vertical structure optimization of the community of *Thuja sutchuenensis* Franch. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 37, 181–190. (in Chinese with English abstract) [王鑫, 邓洪平, 黄琴, 张世强, 饶东升 (2017) 崖柏群落植物区系分析及其最优垂直结构搭配探究. 西北植物学报, 37, 181–190.]
- Wang XH, Li J, Zhang LM, He ZW, Mei QM, Gong X, Jian SG (2019) Population differentiation and demographic history of the *Cycas taiwaniana* complex (Cycadaceae) endemic to South China as indicated by DNA sequences and Microsatellite markers. *Frontiers in Genetics*, 10, 1238.
- Wang XM, Lai YL, Xu XM, Ying ZM, Su YJ, Li YB, Liao WB (2006) Genetic variation in the endemic plant *Cycas fairylakea* (Cycadaceae) from Meilin Forest Park in Shenzhen on the basis of ISSR analysis. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 45(3), 82–85. (in Chinese) [王晓明, 赖燕玲, 徐向明, 应站明, 苏应娟, 李月波, 廖文波 (2006) 深圳梅林仙湖苏铁野生种群遗传多样性ISSR分析. 中山大学学报(自然科学版), 45(3), 82–85.]
- Wang XQ, Ma LY, Guo BX, Fan SH, Tan JX (2005) Analysis on the change of the original *Metasequoia glyptostroboides* population and its environment in Lichuan Hubei from 1948 to 2003. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 972–977. (in Chinese with English abstract) [王希群, 马履一, 郭保香, 范深厚, 谭鉴锡 (2005) 湖北利川水杉原生种群及其生境1948~2003年间变化分析. 生态学报, 25, 972–977.]
- Wang XQ, Zou YP, Zhang DM, Hong DY, Liu ZY (1996) RAPD analysis of genetic diversity of *Cathaya argyrophylla*. *Science in China (Series C)*, 26, 436–441. (in Chinese) [汪小全, 邹喻苹, 张大明, 洪德元, 刘正宇 (1996) 银杉遗传多样性的RAPD分析. 中国科学C辑: 生命科学, 26, 436–441.]
- Wang Y, Tang SQ, Li XK (2004) The genetic diversity of the endangered plant *Abies yuanbaoshanensis*. *Biodiversity Science*, 12, 269–273. (in Chinese with English abstract) [王燕, 唐绍清, 李先琨 (2004) 濒危植物元宝山冷杉的遗传多样性研究. 生物多样性, 12, 269–273.]
- Wang YH, Li N, Chen T, Gong YQ (2018) Generation and characterization of expressed sequence tags (ESTs) from coralloid root cDNA library of *Cycas debaensis*. *Plant Diversity*, 40, 245–252.
- Wang YB, Liang HW, Chen FJ, Qin KP, Mo NB (2008) The endangered causes and protecting strategies for *Dayaoshania cotinifolia*, an endemic plant in Guangxi. *Ecology and Environment*, 17, 1956–1960. (in Chinese with English abstract) [王玉兵, 梁宏伟, 陈发菊, 覃康平, 莫耐波 (2008) 广西特有植物瑶山苣苔的濒危原因及保护对策. 生态环境, 17, 1956–1960.]
- Wang Z, Hu ZY, Huang L (2015) Development and characterization of genomic microsatellite markers in *Apterosperma oblata* (Theaceae) and cross-amplification in *Euryodendron excelsum* (Ternstroemiaceae). *Conservation Genetics Resources*, 7, 119–120.
- Wang ZL, Ding LX, Zhao MS, Cheng XY, Shen Q (2008) Genetic diversity of *Ostrya rehderiana* revealed by RAPD markers. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 25, 304–308. (in Chinese with English abstract) [王祖良, 丁丽霞, 赵明水, 程晓渊, 沈乾 (2008) 濒危植物天目铁木遗传多样性的RAPD分析. 浙江林学院学报, 25, 304–308.]
- Wei R, Zhang XC (2014) Rediscovery of *Cystoathyrium chinense* Ching (Cystopteridaceae): Phylogenetic placement of the critically endangered fern species endemic to China. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 450–457.
- Wen ZY, Yu LF, Chen HL, Yang HZ, He R (2016) Investigation and niche analysis of natural *Cystoathyrium chinense* population in the Erlang Mountain. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 37(5), 51–54, 88. (in Chinese with English abstract) [文智猷, 余凌帆, 陈洪连, 杨洪忠, 何让 (2016) 二郎山濒危植物光叶蕨群落学调查及生态位分析. 四川林业科技, 37(5), 51–54, 88.]
- Wu ML, Yao L, Ai XR, Zhu J, Zhu Q, Wang J, Huang X, Hong JF (2020) The reproductive characteristics of core germplasm in a native *Metasequoia glyptostroboides* population. *Biodiversity Science*, 28, 303–313. (in Chinese with English abstract) [吴漫玲, 姚兰, 艾训儒, 朱江, 朱强, 王进, 黄小, 洪建峰 (2020) 水杉原生种群核心种质资源的繁殖特性. 生物多样性, 28, 303–313.]
- Wu P, Zhang KP (2008) Status of *Cycas* spp. plants in Yunnan and measures for their protection. *Forest Inventory and Planning*, 33(4), 116–119. (in Chinese with English abstract)

- [吴萍, 张开平 (2008) 云南苏铁植物的现状及保护对策. 林业调查规划, 33(4), 116–119.]
- Wu YG, Rao LB, Chen DL, Zhou RF, Ye ZL (2010) Artificial seedling-raising of *Abies beshanzuensis* seed. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 38, 12038–12039, 12098. (in Chinese with English abstract) [吴友贵, 饶龙兵, 陈德良, 周荣飞, 叶珍林 (2010) 百山祖冷杉种子的人工育苗试验. 安徽农业科学, 38, 12038–12039, 12098.]
- Wu YP, Hou ZQ, Chen ZH, Xiao SY, Ma CC, Du F (2015) The resources and distribution of *Nyssa yunnanensis*. Journal of West China Forestry Science, 44(6), 26–30. (in Chinese with English abstract) [吴娅萍, 侯昭强, 陈中华, 肖思焯, 马晨晨, 杜凡 (2015) 云南蓝果树的种群资源及分布现状. 西部林业科学, 44(6), 26–30.]
- Xiao ZC, Gao HD (2008) Study on seed dormancy and germination properties of *Acer buergerianum* Miq. Journal of Southwest Forestry College, 28(5), 35–38. (in Chinese with English abstract) [肖志成, 高捍东 (2008) 三角槭种子休眠与萌发特性研究. 西南林学院学报, 28(5), 35–38.]
- Xie ZQ (1999) Gap-regeneration of *Cathaya argyrophylla* forests. Acta Ecologica Sinica, 19, 775–779. (in Chinese with English abstract) [谢宗强 (1999) 银杉(*Cathaya argyrophylla*) 林窗更新的研究. 生态学报, 19, 775–779.]
- Xie ZQ, Chen WL (1994) The present status and the future of *Cathaya argyrophylla* forest. Chinese Biodiversity, 2, 11–15. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 陈伟烈 (1994) 中国特有植物银杉林的现状和未来. 生物多样性, 2, 11–15.]
- Xie ZQ, Chen WL (1999a) Characteristics and succession of the communities of *Cathaya argyrophylla*, an endangered plant. Acta Phytocologica Sinica, 23, 48–55. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 陈伟烈 (1999a) 濒危植物银杉的群落特征及其演替趋势. 植物生态学报, 23, 48–55.]
- Xie ZQ, Chen WL (1999b) The endangering causes and preserving strategies for *Cathaya argyrophylla*, a plant endemic to China. Acta Phytocologica Sinica, 23, 1–7. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 陈伟烈 (1999b) 中国特有植物银杉的濒危原因及保护对策. 植物生态学报, 23, 1–7.]
- Xie ZQ, Chen WL, Hu D, Zhu RG (1998) The fruiting characteristics of an endangered plant, *Cathaya argyrophylla* and the impact of animals on fruits. Acta Phytocologica Sinica, 22, 319–326. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 陈伟烈, 胡东, 朱日光 (1998) 濒危植物银杉的结实特性及动物对果实的危害性. 植物生态学报, 22, 319–326.]
- Xie ZQ, Chen WL, Liu ZY, Jiang MX, Huang HD (1999a) Spatial distribution pattern of *Cathaya argyrophylla* population. Acta Botanica Sinica, 41, 95–101. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 陈伟烈, 刘正宇, 江明喜, 黄汉东 (1999a) 银杉种群的空间分布格局. 植物学报, 41, 95–101.]
- Xie ZQ, Chen WL, Lu P, Hu D (1999b) The demography and age structure of the endangered plant population of *Cathaya argyrophylla*. Acta Ecologica Sinica, 19, 523–528. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 陈伟烈, 路鹏, 胡东 (1999b) 濒危植物银杉的种群统计与年龄结构. 生态学报, 19, 523–528.]
- Xie ZQ, Li QM (2000) Seed characteristics of endangered plant *Cathaya argyrophylla*. Acta Phytocologica Sinica, 24, 82–86. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 李庆梅 (2000) 濒危植物银杉种子特性的研究. 植物生态学报, 24, 82–86.]
- Xiong B, Ai XR, Wang BQ, Yi YM, Yao L, Fan SH (2010) Study on the population of the primary *Metasequoia glyptostroboides* mother trees. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 28, 282–285. (in Chinese with English abstract) [熊彪, 艾训儒, 王柏泉, 易咏梅, 姚兰, 范深厚 (2010) 水杉原生母树种群研究. 湖北民族学院学报(自然科学版), 28, 282–285.]
- Xu G, Tang W, Skelley P, Liu N, Rich S (2015) *Cycadophila*, a new genus (Coleoptera: Erotylidae: Pharonothinae) inhabiting *Cycas debaoensis* (Cycadaceae) in Asia. Zootaxa, 3986, 251–278.
- Xu XL, Jin HX, Chen XB, Jiang SL, Wang DL, Guo YF (2012) Biological characteristics of the seed in *Acer yanjuechi*, an endangered species. Journal of Forestry Engineering, 26, 46–49. (in Chinese with English abstract) [许小连, 金荷仙, 陈香波, 江胜利, 王东良, 郭要福 (2012) 濒危树种羊角槭种子基本生物学特征. 林业科技开发, 26, 46–49.]
- Yang J, Ding T, Jiang RH, Wang YR, Xiang QP (2019) The complete chloroplast genome of the *Abies yuanbaoshanensis*, an endangered Pinaceae species in Southern China. Mitochondrial DNA Part B, 4, 3386–3387.
- Yang J, Cai L, Liu DT, Chen G, Gratzfeld J, Sun WB (2020) China's conservation program on Plant Species with Extremely Small Populations (PESP): Progress and perspectives. Biological Conservation, 244, 108535.
- Yang QP, Xiao ZY, Hu XD, Ouyang M, Chen X, Lin GJ, Xu JW, Yang GY (2017) Endangered mechanisms of *Sinomanglietia glauca*: Exploring and prospect. Guihaia, 37, 653–660. (in Chinese with English abstract) [杨清培, 肖智勇, 胡晓东, 欧阳明, 陈昕, 林国江, 徐佳文, 杨光耀 (2017) 珍稀植物华木莲的现代濒危机制: 探析与展望. 广西植物, 37, 653–660.]
- Yang XC, Yang YT, Kang MH, Guo XY, Ma T, Xi ZX (2019) The complete plastome of *Nyssa yunnanensis*, a critically endangered tree species. Conservation Genetics Resources, 11, 313–315.
- Ye SC (2019) Establishment and protection of *Shaniodendron subaequalis* germplasm bank in Wanfo Mountain. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 47, 120–122. (in Chinese with English abstract) [叶少川 (2019) 万佛山银缕梅种质资源库建设及保护. 安徽农业科学, 47, 120–122.]
- Yang YZ, Ma T, Wang ZF, Lu ZQ, Li Y, Fu CX, Chen XY,

- Zhao MS, Olson MS, Liu JQ (2018) Genomic effects of population collapse in a critically endangered ironwood tree *Ostrya rehderiana*. *Nature Communications*, 9, 5449.
- Yuan BR (2005) Endangered mechanism and protection measures of *Manglietia decidua*. *Jiangxi Forestry Science and Technology*, 33(3), 45, 61. (in Chinese with English abstract) [袁斌荣 (2005) 落叶木莲的濒危机理与保护对策. *江西林业科技*, 33(3), 45, 61.]
- Yuan YJ (2009) Wooden canopy to protect the survival of the status quo and its countermeasures. *Modern Agricultural Sciences*, 16, 132–133. (in Chinese with English abstract) [袁永俊 (2009) 华盖木生存现状及其保护对策. *现代农业科学*, 16, 132–133.]
- Yu DP, Li CH, Ding J, Xie KP, Zhang GZ, Li SL (2011) Preliminary report on character of seed and seed culture in virtue of *Parakmeria omeiensis* Cheng. *Resource Development & Market*, 27, 197–198, 290. (in Chinese with English abstract) [余道平, 李策宏, 丁健, 谢孔平, 张国珍, 李世丽 (2011) 峨眉拟单性木兰种子特性及离体培养初报. *资源开发与市场*, 27, 197–198, 290.]
- Yu DP, Li CH, Wen XY, Li XJ, Peng QX, Xie KP (2019) Flowering biological characteristics and breeding system of *Parakmeria omeiensis*. *Guihaia*, 39, 600–607. (in Chinese with English abstract) [余道平, 李策宏, 文香英, 李小杰, 彭启新, 谢孔平 (2019) 峨眉拟单性木兰的开花生物学特性与繁育系统. *广西植物*, 39, 600–607.]
- Yu LF, Gao J, He R, Du JJ, You JY, Deng DZ (2015) Discussion on investigations of the present status of *Cystoathyrium chinensis* resources in Tianquan and protection measures. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 36(3), 120–124, 17. (in Chinese with English abstract) [余凌帆, 高健, 何让, 杜俊杰, 尤继勇, 邓东周 (2015) 天全县光叶蕨资源现状调查与保护对策研讨. *四川林业科技*, 36(3), 120–124, 17.]
- Yu ZX, Liao J, Lin XC, Zheng QY, Zhang JP, Qiu LH, Li ZQ, Xiao GM (1999) Ecological study on communities of *Manglietia decidua*. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 21(2), 73–77. (in Chinese with English abstract) [俞志雄, 廖军, 林新春, 郑庆衍, 张津平, 裘利洪, 李志强, 肖国民 (1999) 华木莲植物群落的生态学研究. *江西农业大学学报*, 21(2), 73–77.]
- Zang RG, Dong M, Li JQ, Chen XY, Zeng SJ, Jiang MX, Li ZQ, Huang JH (2016) Conservation and restoration for typical critically endangered Wild Plants with Extremely Small Population. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 7130–7135. (in Chinese with English abstract) [臧润国, 董鸣, 李俊清, 陈小勇, 曾宋君, 江明喜, 李镇清, 黄继红 (2016) 典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究. *生态学报*, 36, 7130–7135.]
- Zhan P, Xu WJ, Chen JN, Zhang L, Tan YW, Shi W (2013) Analysis of growth and genetic diversity of *Manglietia deciduas* in Xiaoxi National Nature Reserve. *Hunan Forestry Science & Technology*, 40, 57–60. (in Chinese with English abstract) [詹鹏, 徐万吉, 陈介南, 张林, 谭亦文, 石旺 (2013) 小溪国家级自然保护区落叶木莲生长与遗传多样性分析. *湖南林业科技*, 40, 57–60.]
- Zhan QQ, Wang JF, Gong X, Peng H (2011) Patterns of chloroplast DNA variation in *Cycas debaoensis* (Cycadaceae): Conservation implications. *Conservation Genetics*, 12, 959–970.
- Zhang GF, Yao R, Jiang YQ, Chen FC, Zhang WY (2016) Intraspecific and interspecific competition intensity of *Parrotia subaequalis* in different habitats from Wanfoshan Nature Reserve, Anhui Province. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 1744–1750. (in Chinese with English abstract) [张光富, 姚锐, 蒋悦茜, 陈福程, 张文燕 (2016) 安徽万佛山不同生境下银缕梅的种内与种间竞争强度. *生态学杂志*, 35, 1744–1750.]
- Zhang RB, Dou QL, He P, Deng HP (2007) Analysis of genetic diversity in *Thuja sutchuenensis* populations as revealed by morphological and molecular data. *Guihaia*, 27, 687–691. (in Chinese with English abstract) [张仁波, 窦全丽, 何平, 邓洪平 (2007) 濒危植物崖柏遗传多样性研究. *广西植物*, 27, 687–691.]
- Zhang SS, Kang HM, Yang WZ (2019) Population genetic analysis of *Nyssa yunnanensis* by reduced-representation sequencing technique. *Bulletin of Botanical Research*, 39, 899–907. (in Chinese with English abstract) [张珊珊, 康洪梅, 杨文忠 (2019) 基于简化基因组技术的云南蓝果树群体遗传分析. *植物研究*, 39, 899–907.]
- Zhang SS, Xiang ZY, Kang HM, Yang WZ (2014) Autotoxicity of *Nyssa yunnanensis* on seed germination and seedling growth. *Forest Research*, 27, 502–507. (in Chinese with English abstract) [张珊珊, 向振勇, 康洪梅, 杨文忠 (2014) 云南蓝果树对种子萌发及幼苗生长的自毒效应. *林业科学研究*, 27, 502–507.]
- Zhang WH, Zu YG, Liu GB (2002) Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1512–1520. (in Chinese with English abstract) [张文辉, 祖元刚, 刘国彬 (2002) 十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析. *生态学报*, 22, 1512–1520.]
- Zhang XH, Li XP, Yu CY, Miao LX, Chen YP (2011a) Current preservation situation and countermeasures on germplasm resources of endangered plant *Carpinus putoensis* Cheng. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 30, 163–167. (in Chinese with English abstract) [张晓华, 李修鹏, 俞慈英, 缪玲霞, 陈叶平 (2011a) 濒危植物普陀鹅耳枥种质资源保存现状与对策. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 30, 163–167.]
- Zhang XH, Wang ZJ, Li XP, Yu CY, Chen YP (2011b) RAPD analysis of genetic diversity of different progenies from endangered plant *Carpinus putoensis*. *Shandong Forestry Science and Technology*, 41(1), 1–5, 22. (in Chinese with English abstract) [张晓华, 王正加, 李修鹏, 俞慈英, 陈叶平 (2011b) 濒危植物普陀鹅耳枥亲予代遗传多样性的

RAPD分析. 山东林业科技, 41(1), 1–5, 22.]

Zhang YR (2009) Studies on Endangered Mechanism and Population Conservation of *Abies ziyuanensis*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [张玉荣 (2009) 资源冷杉的濒危机制与种群保育研究. 博士学位论文. 北京林业大学, 北京.]

Zhang YR, Luo JC, Yu JX (2007) Genetic diversity of the endangered plant *Abies ziyuanensis* detected by ISSR markers. Journal of Beijing Forestry University, 29(6), 41–46. (in Chinese with English abstract) [张玉荣, 罗菊春, 喻锦秀 (2007) 资源冷杉遗传多样性的ISSR分析. 北京林业大学学报, 29(6), 41–46.]

Zhang ZJ, Guo YP, He JS, Tang ZY (2018) Conservation status of wild plant species with extremely small populations in China. Biodiversity Science, 26, 572–577. (in Chinese with English abstract) [张则瑾, 郭焱培, 贺金生, 唐志尧 (2018) 中国极小种群野生植物的保护现状评估. 生物多样性, 26, 572–577.]

Zhang ZY, Chen YY, Li DZ (2005) Detection of low genetic variation in a critically endangered Chinese pine, *Pinus squamata*, using RAPD and ISSR markers. Biochemical Genetics, 43, 239–249.

Zhao Y (2018) Reproduction and afforestation techniques of *Metasequoia glyptostroboides*. Xiandai Nongcun Keji, (6), 39–40. (in Chinese) [赵燕 (2018) 水杉繁殖及造林技术. 现代农村科技, (6), 39–40.]

Zheng Y, Liu J, Feng XY, Gong X (2017) The distribution, diversity, and conservation status of *Cycas* in China. Ecology and Evolution, 7, 3212–3224.

Zheng YL, Sun WB, Zhao XF (2008) Seed dormancy and germination of *Manglietiastrum sinicum* Law, a globally critical endangered plant in China. Plant Physiology Communications, 44(1), 100–102. (in Chinese with English abstract) [郑艳玲, 孙卫邦, 赵兴峰 (2008) 极度濒危植物华盖木的种子休眠与萌发. 植物生理学通讯, 44(1), 100–102.]

Zhu L, Guo QS, Zhu NN, Qin AL, Xu GX, Xing JC (2014) Study on the cones and seeds biological characteristic of a critically endangered species, *Thuja sutchuenensis*, in the world. Seed, 33(7), 56–59, 63. (in Chinese) [朱莉, 郭泉水, 朱妮妮, 秦爱丽, 许格希, 邢继畴 (2014) 世界级极危物种——崖柏的球果和种子性状研究. 种子, 33(7), 56–59, 63.]

Zhu YX, Peng C, Yu S, Hu JF, Li JY (2019) Aflatoxins from the endophytic fungus *Aspergillus* sp. Y-2 isolated from the critically endangered conifer *Abies beshanzuensis*. Natural Product Research, doi: 10.1080/14786419.2019.1696328.

Zhu YY, Xu XT (2019) Effects of climate change on the distribution of wild population of *Metasequoia glyptostroboides*, an endangered and endemic species in China. Chinese Journal of Ecology, 38, 1629–1636. (in Chinese with English abstract) [朱莹莹, 徐晓婷 (2019) 气候变化对我国特有濒危物种水杉野生种群分布的影响. 生态学杂志, 38, 1629–1636.]

(责任编辑: 臧润国 责任编辑: 黄祥忠)



•论坛•

路径依赖下的物种形成机制

李敏岚^{1,2#}, 王超^{1#*}, 王瑞武^{1*}

1. 西北工业大学生态环境学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学数学与统计学院, 西安 710072

摘要: 生物科学几乎所有研究都需要物种概念作为基础, 生物多样性研究亦需要可操作的物种概念, 但现有物种概念存在不同程度的人为因素或难操作性, 对物种划分造成不利影响。本文引入“进化路径”这一概念, 说明适合度景观时刻变化着, 物种在每个进化时间点上依据瞬时适合度选择下一时刻的进化状态, 且总是沿着动态适合度景观中适合度增加的方向进化。基于演化博弈的方法, 以随机过程为例模拟物种的进化过程。进而提出路径依赖下的物种形成机制, 并在此基础上给出可操作的物种定义, 即: 针对基因、性状、生态过程等任一状态下两个群体内个体的多个变量做统计分析, 若群体之间同时在两个或多个维度状态下呈现出的不连续性 d 大于群体内变量呈现出的差异性 σ , 则拥有相应变量的个体属于不同物种。

关键词: 物种; 物种形成; 演化博弈; 随机过程; 路径依赖

李敏岚, 王超, 王瑞武 (2021) 路径依赖下的物种形成机制. 生物多样性, 29, 409–418. doi: 10.17520/biods.2020276.

Li ML, Wang C, Wang RW (2021) Path-dependent speciation in the process of evolution. Biodiversity Science, 29, 409–418. doi: 10.17520/biods.2020276.

Path-dependent speciation in the process of evolution

Minlan Li^{1,2#}, Chao Wang^{1#*}, Ruiwu Wang^{1*}

1 School of Ecology and Environment, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

2 School of Mathematics and Statistics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

ABSTRACT

Aim: Almost all the research in biology relies on a species concept as the basis for biodiversity. However, all of the existing species definitions are imprinted with artificial factors or difficult to observe in practical applications, which brings negative impacts on the species classification. Here, we introduce an “evolutionary path” using a path integral to provide a rule for species classification. We aim to show the speciation process and define the species concept with a mathematical form.

Methods: In this species definition, we assumed that uncertain environmental changes and random drift in the population might simultaneously lead to a change in the fitness expectation. Therefore, a constant fitness expectation for any biological characteristic might not be reliable when considering how characteristics vary through time and space. We introduce the concept of “evolutionary path” which is formed by repeating a short-time transfer process. In this process, a species evolves to different states at different probabilities over time based on the instantaneous fitness landscape at any current moment. In this framework, evolution moves in the direction of increased fitness on the varying fitness landscape, and speciation will be of path dependence on the varying fitness landscape. Different individuals with the same or different biological characteristics (e.g. phenotype, genotype, etc.) will interact with another one at random, similar to the process of gambling among them. In a simulation, under the framework of evolutionary game theory, species differentiation will be similar to the evolution of the peaks on a mountain. Every peak after differentiation may represent a species, a cryptic species, or a sympatric species. The picture of species peaks within a mountain is determined by the relationship between the distance and the width of two adjacent peaks and by the dimensionality that characteristics differentiation satisfied.

Results: We found a more practicable concept to define species, i.e, based on statistical analysis applicable for multiple types of traits like genetics, morphological characteristics, or ecological process between two populations. Once the

收稿日期: 2020-07-11; 接受日期: 2021-01-04

基金项目: NSFC-云南联合基金(U1302267)、国家杰出青年科学基金(31325005)和西北工业大学研究生创新团队建设项目

共同第一作者 Co-first authors

* 通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: chaowang@nwpu.edu.cn; wangrw@nwpu.edu.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

respective discontinuities of two or more dimensional variables between populations are all greater than the difference of variables within the population, the individuals with corresponding variables belong to different species.

Conclusions: The path-dependent evolutionary mechanism in this model demonstrated that species can coexist with different probabilities when environmental pressures are limited. A new species, cryptic species, sympatric species may occur in a path-dependent evolution process. This model also showed that species survival in an ecosystem is not determined by its fitness directly, but dependent on the probability of its evolutionary path.

Key words: species; speciation; evolutionary game; stochastic process; path dependence

物种是生物有机体分类和进化的最基本单元(卢宝荣和王哲, 2016), 正确划分物种对生物多样性的保护至关重要。但因思考的角度不同和基于的进化时间不同, 现有各个物种概念只能反映进化路上物种的一个侧面(刘建全, 2016)。从单个方面认识物种的方式如同“盲人摸象”, 并不全面, 给物种分类和生物多样性的保护工作造成了极大的困难。目前已有接近30个(Wilkins, 2009)甚至更多(周长发和杨光, 2001; 洪德元, 2016)关于物种的定义。其中最常用的物种概念分别强调了生殖隔离、基因差别、进化、系统发生或支序分类理论、生态以及外部形态(洪德元, 2016)。

运用这些概念对物种进行划分时均有一定的局限性: 要么必须进行实验来确认它们是否存在生殖隔离, 而这一过程往往难以操作且不能适用于所有生物; 要么过于抽象, 如生态学物种概念; 还有的虽然较为客观但却因过于简单而无法操作, 如Hedberg (1958)提到的形态学物种概念。形态学物种概念认为: 当两个种群仅在一个性状上呈现完全不连续变异时(常伴有其他性状上的部分不连续)就区分为亚种, 而当它们之间的不连续差异表现在两个或多个独立性状上时就一律区分为不同的物种(Hedberg, 1958)。这虽然明确了可以依据形态上的差异来区分物种, 但依然没有回答表型在种内的连续差异和在种间的不连续程度具体为多少时才是不同物种这一问题, 因此不具备较强的可操作性。基于这些物种概念现状, 洪德元(2016)提出了可操作的形态-生物学物种概念, 即: “物种是由一个或多个自然居群组成的生物类群, 种内呈现形态性状的多态性和变异的连续性, 而种间则有两个或多个独立的形态性状显现变异的间断或统计上的间断”。使用该定义对形态性状进行统计聚类分析时, 展示了变异的连续性与间断性, 但是仍然难以对处于中间状态或偏离聚合群的多数物种作出判断。因

此, 必须有一个可以量化的指标来对物种进行合理划分。

为解决上述问题, 正确认识物种的形成过程并在此基础上给出物种的定义是关键点。我们引入“进化路径”这一概念, 认为物种进化依赖一定的路径。假设选择压力有限, 物种在追求高收益的过程中将沿着概率最大或者稍低的路径分化得到不同的物种。需要明确的是, 物种一直处于分化路上, 分化到后期的“好种”在基因型、性状、生态过程等状态上都分化完全, 但实际上大多数物种处于分化的前期和中期, 只满足一种或两种状态的分化, 且在达到分化后期之前又进行新一轮的分化(刘建全, 2016)。结合实际情况, 本文在给出物种定义时考虑两点: 一是明确不同物种不能同时满足“好种”所需满足的所有物种概念条件。各条件存在分化的先后(刘建全, 2016), 因此在某时刻只需考虑至少两种状态, 使其满足完全分化独立的要求。二是明确大多数物种处于分化的前中期而非后期, 很难满足各状态(基因特征、形态特征、生态过程等)的完全隔离。因此需要对“完全隔离”这一条件加以放松, 设定出更加符合实际中分化独立的状态隔离条件。为简化叙述, 本文统一从形态(表型)的角度出发去考虑物种进化这一问题, 从基因层面或者生态过程的角度讨论物种进化其机制也是类似的。

物种的存在状况可以由其适合度刻画, 因此其进化结果反映在适合度景观(fitness landscape)上。适合度景观是由被研究群体的表型分布形成的。从表型角度出发的进化路径是一段时间内个体表型在进化过程中所经历的所有状态。与Frank (2011)考虑的静态适合度景观不同, 我们认为适合度景观随着种群结构的变化也在时刻改变着。经典适合度景观类似爬山的过程: 如果山峰峰值位置确定, 爬上峰顶的预期就确定; 而当山峰形态和峰值是不断变化着的时候(从地质的尺度来看, 山峰形态和峰

值确实是变化着的), 个体爬山的过程就没有确定的预期值, 我们只能描述个体爬山过程某一瞬时情况的预期值(王瑞武, 2021)。在适合度景观上的物种进化同样如此。

物种进化受到选择压力的影响。选择压力指的是外界自然环境和来自周围个体的压力, 在每个时刻都有所不同。在一个群体中, 假设所有个体的初始表型相同, 但演化过程中受到选择压力的作用可能会根据其适合度随机保持当前表型或突变为其他表型。每个表型的适合度与拥有该表型的个体在群体中的数量相关, 每个表型都对应着一个适合度, 所有表型及其适合度组成一个适合度景观。不同表型在不同时刻的适合度不同, 即每个时刻存在瞬时适合度景观, 因此在一段时间内形成动态适合度景观。表型在这样的景观上游走而产生多条可能的进化路径, 每条路径对应一个概率值, 在一条路径上一个时间点内两个表型之间的转移概率与其适合度有关。显然, 选择压力一定时, 不只是最大概率的路径被选择, 而是选择允许多条路径存在。沿着这些进化路径在不同时刻可以看到相同或不同的物种, 取决于不同表型之间的(不)连续性差异程度。

假设群体内个体的表型服从正态分布, 最优表型可以看作是该群体的平均表型。自然选择将允许多条进化路径存在, 因此一段时间内进化路径与进化结果存在几种情形: (1)选择压力始终较大时, 群体的初始平均表型沿概率最大的路径从一个表型进化到其他表型; (2)当每个时刻选择压力有限时, 每个时刻有多个表型被选择, 其进化路径也不再只是概率最大的路径; (3)当前 $n-1$ 时刻的选择压力有限, 第 n 时刻的选择压力很大时, 此时初始表型沿多条路径进化到另一个表型值, 即单态群体沿不同路径进化得到另一个单态群体。在某个特定时间点观测时, 若沿不同路径进化出的不同表型之间满足一定的数量关系, 且至少另有一个其他生物学特征也满足类似关系, 便可将它们对应的个体定义为不同物种。进化路径反映了自然选择的方向, 突变、漂变等因素会对路径的选择造成随机扰动。引入“进化路径”这一概念, 便很容易理解某一表型进化过程中分化出有不同适合度表型的现象, 也因此对由表型分化导致的物种形成有了更清晰的认识。

本文将从物种形成机制的基本模式出发, 基于选择压力有限时所有个体的表型沿多路径分化且

其进化过程是“路径依赖”的, 以Moran过程为例模拟给出个体表型进化路径的直观展示。在随机因素和选择作用的影响下, 状态频率的演化路径对应为群体表型的分化路径, 沿不同路径的演化可能会进化得到不同表型。通过讨论物种在动态适合度景观上的适应性演化, 分析表型在 t_0-t_n 时间段内从 x_0 到 x_n 的进化路径, 认识物种从分化到形成新物种这一过程。在此基础上通过数学形式给出可量化的物种概念, 期望更好地界定物种。

1 路径依赖下的物种进化

物种是进化着的。拉马克最先提出进化思想, 认为物种随时间演替逐渐发生变化, 新的物种不断产生(李启剑和李越, 2010), 但并未给出物种演变机制。达尔文提出“物竞天择, 适者生存”, 认为变异是生物的核心特征。适应环境的变异在自然选择的作用下得到保存, 不适应的则被淘汰。即使他并未在《物种起源》中给出具体的物种定义, 但其进化与选择的思想对人们认识物种产生了深刻影响。达尔文认为物种是变化着的, 不同物种可以由同一物种演化而来(Darwin, 1929)。

但是物种演化的机制和路径却并不清楚。实际上, 物种在进化过程中受到自然选择的压力和周围个体的影响, 在每个时刻通过突变的方式以不同概率选择下一时刻的进化状态, 一段时间内物种基于动态适合度景观产生多条进化路径。物种依赖一定的路径产生或灭绝, 体现了生命的连续性; 但从某一时空瞬间对物种演化进行横向观测, 则会发现物种的间断性, 体现在表型、基因型、生态过程等状态的不连续差异。那么, 物种出现这种进化结果的原则是什么? 以表型为例, 实际上是拥有不同表型的个体在自然选择下追求较高的收益, 整个进化过程即为表型在适合度景观上的游走。因此, 下面首先对适合度景观作以说明。

1.1 适合度景观悖论

已有研究大都建立在静态适合度景观的基础上(Maynard Smith, 1982; Frank, 2011), 认为在一段进化时间内适合度景观是确定的。进化可以看作是一个生物体在有高峰和低谷的适合度景观上的旅程。个体总是能够感受到适合度景观山脉上的峰值, 它试图向山上攀爬并努力达到局部或者全局的最高峰, 适应意味着表型能够找到适合度景观的峰值

并停留在那里(Nowak, 2006)。自然选择沿着适合度增加的表型方向进化, 因此在有着多峰的适合度景观(图1)中, 表型很容易被困在某一更低的局部峰值上。Frank (2011)提出“反应规范”的概念来解决这一困境。反应规范指的是拥有某表型的基因型对应的(由发育等因素形成的)表型分布。单个基因型可以对应多个表型值, 表型发育以适应不同的环境, 但由于内在的发育波动以及外在的环境扰动使得表型空间得以扩展。在一个有着多峰多谷的适合度景观中, 发育变异性可以通过平滑函数将该景观处理为有单峰的适合度景观, 这样可以加快表型的进化速率。

但问题在于, 实际上适合度景观并不是在每个时刻都保持一致。表型受到环境的影响在适合度景观上游走的过程中也同时影响适合度景观, 因此每个时刻存在一个瞬时适合度景观, 表型在每一个进化时间点上处于与上一时刻不同的适合度景观中。在静态适合度景观中每个时刻个体依据博弈矩阵选择的所谓最优表型(收益最大)并不能在长时间后使得该条进化路径被选择的概率最高。这一点可以参考重复囚徒困境中TFT (tit-for-tat) 和ALLD (all defection)策略的博弈情况。TFT策略又称“以牙还

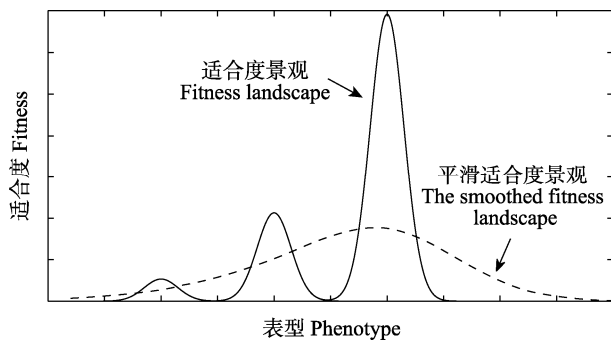


图1 表型的适合度景观图。实线表示真实的适合度景观, 当生物体在这样有高峰有山谷的适合度景观上进化时, 很容易被困在某一更低的局部峰值上。虚线是在Frank提出的反应规范作用下的表型适合度景观, 即由某基因控制的表型的适合度景观, 该景观只有一个单峰, 使得表型更容易进化到适合度更高的表型。

Fig. 1 Fitness landscape of phenotypes. The solid line shows the fitness landscape observed. When an organism evolves on such a multipeak fitness landscape, it's easy to be trapped at a lower local peak. The dashed line displays the phenotypic fitness landscape smoothed by reaction norm, i.e., the expect fitness for a genotype with a certain average phenotype. This fitness landscape just has one single peak, which makes it easier for any phenotype to evolve to another one with higher fitness.

牙”策略, 是指在第一回合选择合作, 而后每一回合采用对手在上一回合中使用的策略; ALLD又称“永远背叛”策略。在单次囚徒困境博弈中, 背叛永远是最优策略。但是在多次博弈中, 当博弈次数大于某一值时, TFT策略能够抵制ALLD策略的入侵(Nowak, 2006)。

1.2 进化路径

基于静态适合度景观, Frank (2011)认为表型沿最短的路径快速进化到高适合度表型; Traulsen等(2007)认为表型沿时间最短的路径进化。而当表型不再沿着固定适合度景观的山脊进化追求此种情况下的最大适合度时, 表型进化应该选择怎样的路径呢? 我们认为当选择压力始终很大时, 表型在进化过程中几乎会一直沿着某条路径, 该路径是概率最大的路径。然而, 实际上选择压力是有限的。一个很自然的情形是, 群体内的表型在进化的过程中产生多条进化路径, 此时自然选择不再只是倾向于概率最大的路径, 其他概率稍低的路径也会被选择。表型沿着这些路径进化得到可以被用来区分物种的多个表型。为了明确“进化路径”这一概念, 我们需要定义进化路径并观察表型在进化过程中所有可能的路径分布。在每个时刻选择压力都是有限的情形下, 概率最高的一条路径会被大部分个体在进化过程中所选择。其他概率较高的路径也会被选择使得该表型进化到其他表型。另一种情形是, 前 $n-1$ 时刻的选择压力有限, 第 n 时刻的选择压力无穷, 此时沿多条路径进化到一个表型(图2)。

我们探究 t_1-t_2 时间段内表型从 x_0 进化到 x_n 的进化路径, 个体在每一时刻都会根据其瞬时适合度以一定概率去选择自己在下一时刻应该进化到的表型状态, 因此表型沿着一定的路径进化。考虑进化过程中 n 个离散时间区间, 则每个时刻对应表型的出现概率为 $P[x_i(t_i)]$, x_i 表示该时刻的表型。受随机漂变和突变的影响, x_i 不止一种。假设路径 a 上的表型为 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, 则该路径出现的概率为 $P[x_0(t_0), x_1(t_1), x_2(t_2), \dots, x_n(t_n)]$, 也记为 $P[x(t)]$ 。假设此概率是所有路径中概率最大的路径, 则当选择压力很大时, 只有路径 a 被选择; 而当选择概率有限时, 路径 b 也会被选择。至此, 表型进化路径的说明已阐述清楚。

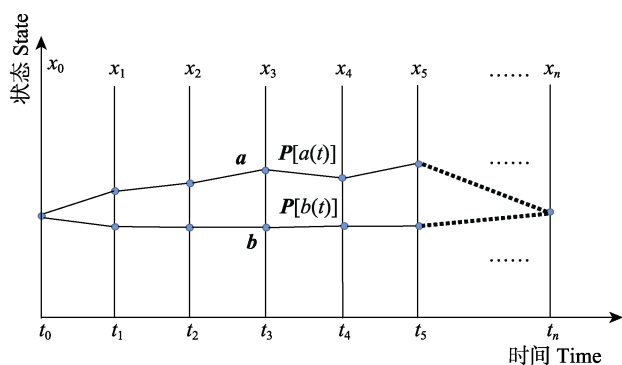


图2 群体内表型从 x_0 进化到 x_n 过程的示意图。个体在每一时刻都会根据瞬时适合度以一定概率去选择自己下一时刻期望进化到的表型, 因此群体内的表型从 t_0 到 t_n 的进化过程中可能产生多条路径, a, b 即为其中的两条。假设路径 a 上的表型为 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, 该路径出现的概率为 $P[(t_0, x_1(t_1), x_2(t_2), \dots, x_n(t_n))]$ 。

Fig. 2 An evolutionary process for phenotype in a population from x_0 to x_n . An individual selects the next phenotype to evolve with a certain probability according to its instantaneous fitness at each time step, thus many possible paths of phenotype in a population occur including paths a and b . Suppose that trajectory a consists of phenotype $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, then the possibility is $P[x_0(t_0), x_1(t_1), x_2(t_2), \dots, x_n(t_n)]$ 。

2 基于路径的物种进化机制

物种定义中的状态可以指基因、性状, 或者生态过程, 为方便理解物种定义的确切过程和路径依赖下的物种形成过程, 下面将继续使用性状(表型)这一状态加以叙述。在有限的选择压力下, 群体内的表型从 x_0 进化到 x_n 有多条可能的路径。在所有个体的表型都为 x_0 的群体中, 个体在每个时刻依据其瞬时适合度以一定概率选择下一时刻的表型状态, 进化到每一个状态的概率理论上是不同的。个体的瞬时适合度依赖于其表型在群体中的频率分布, 此时演化博弈论就成为从表型这个角度思考生物演化问题的一种方法(Maynard Smith, 1982)。

不失一般性, 我们以最简单囚徒困境为例利用 Moran 过程说明个体表型的进化过程。在 Moran 过程中, 某一个体有策略 A 和策略 B。在有限群体中, 随机漂变和频率制约选择的交互作用决定了进化博弈的结果。假定在一个大小为 N 的均匀混合的有限群体中, 任意拥有不同表型的两个个体之间进行博弈, 其支付矩阵如下:

	A	B
A	a	b
B	c	d

如果有 i 个个体采取 A 策略, $N-i$ 个个体采取 B 策略, 则采取 A 策略的个体平均收益为: $f_i = \frac{a(i-1) + b(N-i)}{N-1}$, 采取 B 策略的个体期望收

益为: $g_i = \frac{ic + d(N-i-1)}{N-1}$ 。在每一时间步, 一个个体

以正比于其适合度的概率被随机选择并进行繁殖, 同时在群体中随机挑选一个个体死亡, 前者后代代替后者, 保证群体总体数量保持不变。因此, 在每个时间步时, A 的频率 i 最多改变一个: i 至 $i+1$, i 至 $i-1$, i 至 i , 其转移概率分别为:

$$P_{i,i+1} = \frac{if_i}{if_i + (N-i)g_i} \frac{N-i}{N} \quad (1)$$

$$P_{i,i-1} = \frac{(N-i)g_i}{if_i + (N-i)g_i} \frac{i}{N} \quad (2)$$

$$P_{i,i} = 1 - P_{i,i+1} - P_{i,i-1} \quad (3)$$

对应于群体内有有限个离散策略的表型空间, 该模型中的频率状态也可指代具体表型, 此时频率的转移概率即为两个离散表型之间的转移概率。只是这样的转化规则尚不清楚, 因此仅以该模型的模拟结果作为表型进化的示意图, 二者演化原理类似。

通过模拟, 我们得到群体内表型进化过程的示意图(图3, 4)。图3显示了随着时间的演化个体表型在进化过程中形成的不同路径, 即表型的进化路径空间。沿着概率较高的几条路径进化便会产生新物种。图4描述了表型沿路径连续演化的频率分布图。可以看到, 群体内初始表型值为50, 其频率分布曲线是单峰, 最高频率为90%, 意味着群体内几乎所有个体都拥有同样的表型。随着时间的演化, 初始表型逐渐沿特定路径分化, 在 $t=600$ 时出现明显的分化, 其频率分布曲线显示为双峰分布, 意味着群体内个体的表型出现了分化, 此时群体内的表型均值分别为25和28, 可以结合其他的生物学特征进一步判断相应的个体是否为不同物种。不同时刻的频率分布曲线分别显示为类似于一维或多维正态分布的曲线, 不同表型均值体现了种间表型的不连续差异, 方差体现了种内表型的连续差异。其他状态量在进化过程中也遵循同样的机制。

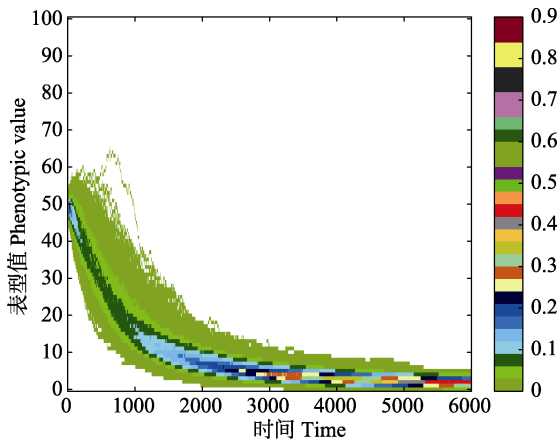


图3 进化路径的分布。不同颜色表示路径的频率。随着时间的演化, 表型从最初的状态分化出其他表型, 在此过程中, 表型只能向相邻的表型进化, 因此进化是连续的。若在 $t = 1,000$ 这一时刻观察演化结果, 则可以看到明显不连续的物种分化(两个蓝色区域)。

Fig. 3 The distribution of evolutionary paths. Different colors represent different distribution probability of paths. As time goes by, one phenotype differentiates to other phenotypes with different probabilities. The evolutionary path is continuous in this process because that phenotypes can only evolve to adjacent phenotypes. If the evolutionary results are observed at the moment of $t = 1,000$, significant discontinuous phenotypic differentiation (blue regions) can be seen.

当所有个体的表型沿不同路径进化到不同表型状态时, 出现多表型共存的情形, 同时存在洪德元(2016)定义的形态-生物学概念中所提到的种内呈现的形态性状的多态性和变异的连续性。我们关注分布密度较高的表型, 若它们之间满足统计数量关系(体现在密度差异较小, 表型差异性较大), 则可以认为这样的表型是分化成功的表型, 可以作为物种判定的依据。

任意时刻在自然选择的作用下都存在群体内表型的分布(如图5a-c)。以表型 x_1 的进化过程为例, 图5a展示了该表型分化初期某时刻的分布, 当该表型在之后的某一时刻出现图5b所示的分布, 则表型 x_1 分化成两个表型 x_{11} 和 x_{12} 。方便起见, 同时考虑对应物种的另一状态量——基因型 x_2 。在同样的演化机制下, 群体内的基因型 x_2 分化成两组不同基因型 x_{21} 和 x_{22} (图5c)。此时若两群体的个体同时在表型和遗传层面拥有分化后的特征则可进一步判断它们是否为同一物种。显然, 除了表型和遗传层面, 在其他任意至少两个状态量上表现出类似的分化过程, 均可作为物种判定的条件。

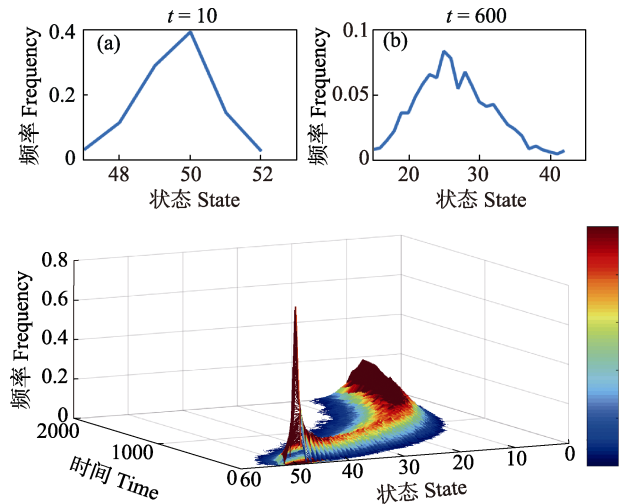


图4 路径依赖下的状态进化。(a)状态量随时间演化的频率分布。状态量可以指基因型、性状特征、生态过程。(b) $t = 10$ 时的表型频率分布。(c) $t = 600$ 时的表型频率分布。若以表型作为状态量, 分化初期显示为单峰的频率分布, 在时间 $t = 600$ 处时出现明显的分化且显示为双峰的频率分布。这意味着群体内个体从初始的单一表型(50)逐渐分化成两种表型(25和28), 可以进一步判断对应的个体是否为不同物种。

Fig. 4 Path-dependent evolutionary process of states. (a) The frequency distribution curve of states over time. The states represent genotype, phenotype or ecological process. (b) The frequency distribution curve of phenotypes at $t = 10$, (c) The frequency distribution curve of phenotypes at $t = 600$. From the perspective of phenotype, the distribution curve changes from unimodal in the early phase to bimodal at $t = 600$, which means the phenotype differentiates into two phenotypes (25 and 28) at $t = 600$ from one phenotype (50) in the initial stage. Then we can judge if the species with phenotype 25 and 28 are different species.

表型等状态量出现明显分化是新物种的形成条件之一, 一个直观的问题是: 分化界限是什么? 即分化程度为多少时, 可以作为新物种形成的判断条件? 下面我们将对此展开讨论。

3 物种的界定

3.1 路径依赖下的物种形成过程

基于对路径依赖下物种形成机制的理解, 我们给出物种定义的数学形式, 从而为判断两相似物种是否为同一物种提供量化指标。对于一个处于分化路上的物种A, 考虑其两个状态量 x_1 , x_2 , 那么在不同进化时间物种的存在状况亦有所不同(图6)。

依据观测时间 t 的不同, 物种存在以下情形:

$$\begin{cases} \text{一个物种, } t \leq t_1 \\ \text{一个物种, } t_1 < t \leq t_2 \\ \text{两个物种, } t > t_2 \end{cases} \quad (4)$$

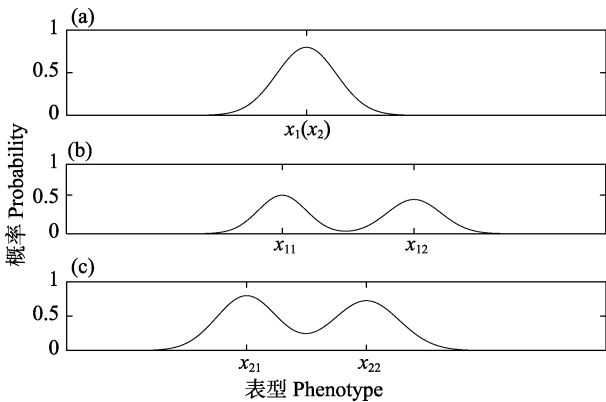


图5 不同时刻下表型和基因型的频率分布。(a)表示状态量 $x_1(x_2)$ 未分化初期某时刻的频率分布; (b)表示群体内的表型 x_1 在分化之后某时刻的频率分布; (c)表示群体内的基因型 x_2 在分化之后相同时刻的频率分布。假设对于原始物种 A, 其任意在两个状态 x_1 和 x_2 随着时间的演化受到基因突变和随机漂变的影响, 在相同或不同时刻出现不同程度的分化。当我们处于物种进化的一个“切面”去观察时, 表型 x_1 分化成 x_{11} 和 x_{12} , 并且进化依赖于特定的路径。若此时分化出的表型和基因型在数量统计上满足一定的条件, 同时在表型和基因型两个状态下同时具有特征 x_{11} , x_{21} (x_{11} , x_{22} 或 x_{12} , x_{21} 或 x_{12} , x_{22}) 的个体为新物种。

Fig. 5 Frequency distribution of phenotypes and genotypes at different time. (a) showing the frequency distribution curve of the state $x_1(x_2)$ in the early differentiation. (b) demonstrating the frequency distribution curve of the phenotype x_1 at a certain moment after differentiation. (c) indicating the frequency distribution curve of the genotype x_2 at the same moment after differentiation. Suppose that any two states x_1 and x_2 of the original species A evolved influenced by random mutation and drift, then different degree of differentiation occurs in the same or different time. When observing in a “cutting plane” of a species evolution, we notice that $x_1(x_2)$ differentiates into $x_{11}(x_{21})$ and $x_{12}(x_{22})$, and the evolution are path-dependent. Meanwhile, if the differentiated phenotypes and the genotypes in a quantity statistics satisfy certain conditions, the individuals with $x_{11}, x_{21}(x_{11}, x_{22}, o x_{12}, x_{21}, o x_{12}, x_{22})$ are new species, respectively.

物种一直处于分化路上, 完全分化独立的“好种”满足充分的生殖隔离、形态隔离、生态位隔离等现有不同物种概念所强调的不同侧面的条件(刘建全, 2016)。但实际上完全充分的隔离鲜有存在, 并且绝大多数物种处于分化的早期和中期, 在尚未达到物种分化的最后期时便又进行新一轮的分化, 只满足部分物种概念(刘建全, 2016)。因此, 一方面不能要求物种判定的条件满足所有物种概念, 另一方面也需要考虑对隔离条件稍加放松, 比如将条件改为“种间生殖隔离程度远大于种内群体间生殖隔

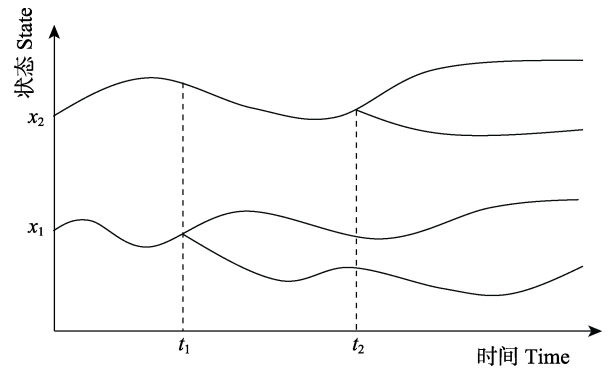


图6 随时间演替的物种界定示意图。状态量 $x_1(x_2)$ 在 $t_1(t_2)$ 时刻出现分化, 在不同的时间点上根据分化情况判定物种是否属于新物种。

Fig. 6 schematic diagram of the species delimitation over time. The state $x_1(x_2)$ differentiates at $t_1(t_2)$. It can be determined whether a specie at different moments is a new species.

离程度”(刘建全, 2016)、“种间形态隔离程度远大于种内群体间形态隔离程度”。那么, 从形态学角度出发, 这些种内和种间的差异应满足什么条件? 这里给出数学形式上的直观显示。需要说明的是, 在分析基因或者生态过程等其他生物学特征时, 只需满足类似于表型差异中提到的关系即可。

以一个物种的表型状态量 x_0 为例, 当进化沿着特定的路径达到 t 时刻时, 表型的适合度景观为 $f(x)$, 假设:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (3|1 + x_i|^2 + 1)N(x_i, \sigma^2) \quad (5)$$

在当前进化时间点处, 适合度景观稳定, 那么使得 $f(x) = 0$ 的平衡点 x_i 即为此时群体内表型 x_0 的进化结果, 记平衡点的个数为 n , 则若 $n > 1$, 说明表型分化。同时记分化后任意两个均值表型之间的距离为 d , 那么当分化后的表型满足公式:

$$\frac{d}{\sigma_k} > 1 (k = i, j) \quad (6)$$

其中 $d = |x_i - x_j|$, 便可认为表型分化达到了形态学物种概念中强调的形态上的隔离条件(图7)。这里, σ_k 衡量了种内均值为 x_k 的表型在形态上的连续变异范围, d 衡量了种间任意两个均值表型之间的不连续差异, 公式(6)满足形态学概念下的物种判定条件: 种间形态隔离程度远大于种内群体间形态隔离程度。

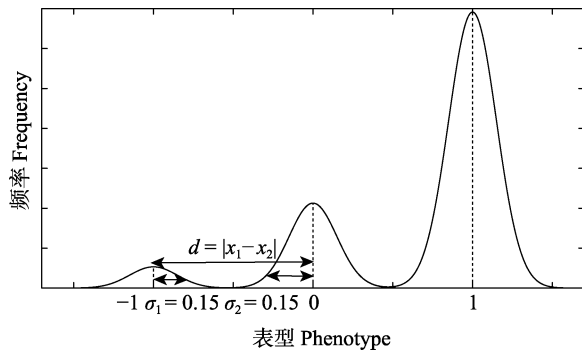


图7 一表型在某一时刻分化出三个独立表型的示意图。该图作为判定表型分化成功的一个特例，此时种内均值为-1的表型存在连续且程度较低差异(差异范围是 ± 0.15)，均值为0的亦然。而这两个种间表型的不连续性达到了1，其不连续差异程度远高于种内连续差异程度，因此可以认为该表型达到了形态学物种概念中对于形态的要求。同时考虑原始物种的其他状态上的分化，若满足同样条件的差异，即可将相应个体确定为新物种。

Fig. 7 Differentiation of three independent phenotypes from one phenotype of a species at a moment. The figure is a special case of judging whether the phenotypic differentiates completely. There is a continuous and a little difference for the phenotype -1 within the species (the difference range is ± 0.15), and the phenotype 0 versa. The discontinuity of these two interspecies phenotypes is 1, and the discontinuity is much higher than the intraspecies continuous difference. Therefore, it can be considered that the phenotype meets the requirements for phenotype in the concept of morphological species. Taking into account the differentiation of another state of this species, if the difference satisfies the same conditions, the corresponding individuals can be determined as a new species.

3.2 物种的定义

针对基因、性状、生态过程等任一状态下两个群体内个体的多个变量做统计分析，若群体之间同时在两个或多个维度状态下呈现出的不连续性 d 与群体内变量呈现出的差异性 σ_k 满足 $\frac{d}{\sigma_k} > 1 (k = i, j)$ ，其中 $d = |x_i - x_j|$ ，则拥有相应变量的个体属于不同物种。

3.3 物种的判定

事实上，基因型、表型以及物种都是在各自层面的适合度景观上游走，因此上述界定物种的形式可以抽象为一个共同范式，应用于这三个方面。下面我们仍然从形态这一角度出发，利用上述定义判断一些更一般的情形：(1)种间形态的不连续差异明显大于种内形态的连续差异(图8a)；(2)种间形态的不连续差异不大于种内形态的连续差异(等于其中一个种内的连续差异)(图8b)；(3)种间形态的不连续差异明显小于种内形态的连续差异(图8c)；在图

8(a)中，两个相似群体间的表型均值之间的距离是 $d = |x_1 - x_2| = |(-6) - 6| = 12$ ，而群体内表型差异分别是 $\sigma_1 = 3.0$ ， $\sigma_2 = 3.5$ ，显然有 $12 > 3.0$ 且 $12 > 3.5$ ，满足公式(6)所定义的物种定义，因此若另有一生物学特征也符合上述定义，那么对应的个体属于不同的物种。在图8b中，我们考虑一种看起来似乎难以判断的情形，图中这两个相似物种是同一物种吗？

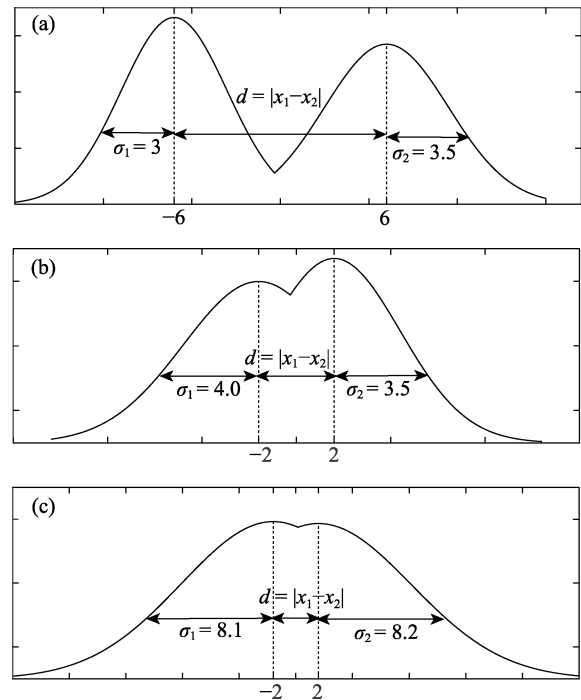


图8 不同的表型分化情形。如果已有一个生物学特征满足定义中的差异性关系，再考虑性状这一特征。图(a)中， $d = |x_1 - x_2| = |(-6) - 6| = 12$ ， $\sigma_1 = 3$ ， $\sigma_2 = 3.5$ ， $d > \sigma_1$ 且 $d > \sigma_2$ ，若有表型分化满足此条件，则对应个体属于不同物种；图(b)中， $d = |x_1 - x_2| = |(-2) - 2| = 4$ ， $\sigma_1 = 4$ ， $\sigma_2 = 3.5$ ， $d = \sigma_1$ 且 $d > \sigma_2$ ，若有表型分化满足此条件，则对应个体属于同一物种；图(c)中， $d = |x_1 - x_2| = |(-2) - 2| = 4$ ， $\sigma_1 = 8.1$ ， $\sigma_2 = 8.2$ ， $d < \sigma_1$ 且 $d < \sigma_2$ ，若有表型分化满足此条件，则对应个体属于同一物种。

Fig. 8 Different case of phenotype differentiation. Imagine the relation of difference has been satisfied for one biological character. Then we consider phenotypes. In figure 8(a), $d = |x_1 - x_2| = |(-6) - 6| = 12$, $\sigma_1 = 3$, $\sigma_2 = 3.5$, $d > \sigma_1$ and $d > \sigma_2$. If individuals in two populations satisfy these conditions, they are different species. In figure 8(b), $d = |x_1 - x_2| = |(-2) - 2| = 4$, $\sigma_1 = 4$, $\sigma_2 = 3.5$, $d = \sigma_1$ and $d > \sigma_2$. If those individuals satisfy these conditions, they are the same species. In figure 8(c), $d = |x_1 - x_2| = |(-2) - 2| = 4$, $\sigma_1 = 8.1$, $\sigma_2 = 8.2$, $d < \sigma_1$ and $d < \sigma_2$. If those individuals satisfy these conditions, they are the same species.

按照公式(6)的判断方法, 容易得到它们属于同一物种的结论。考虑其中一个状态量有差异的物种, 可以看到表型均值之间的距离是 $d = |x_1 - x_2| = |(-2) - 2| = 4$, 而两个表型均值的连续差异分别为 $\sigma_1 = 4.0$, $\sigma_2 = 3.5$, 出现 $d = \sigma_1$ 的情形, 因此即使有另一生物学特征的分化满足公式(6)条件, 这些表型对应的个体依然属于同一物种。在图8c中, 考虑物种看起来极为相似的情形, 两个相似群体间的表型均值之间的距离是 $d = |x_1 - x_2| = |(-2) - 2| = 4$, 而群体内部表型差异分别是 $\sigma_1 = 8.1$, $\sigma_2 = 8.2$, 显然 $4 < 8.1$ 且 $4 < 8.2$, 不满足公式(6)关于物种的定义。因此同样地, 即使有另一生物学特征的分化满足公式(6)条件, 该表型对应的个体依然属于同一物种。

4 结论与讨论

现有的物种概念仅反映了进化物种在分化至后期需满足的不同条件之一, 因此不够全面。同时, 大多数物种概念具有主观性和难操作性, 因而更加客观的物种概念亟待提出。基于这样的现状, 本文引入“进化是路径依赖的”这一思路, 以Moran过程为例进行模拟, 展示并说明了路径依赖下的物种形成过程, 并在此基础上给出了可量化的物种概念: 针对基因、性状、生态过程等任一状态下两个群体内个体的多个变量做统计分析, 若群体之间同时在两个或多个维度下呈现出的不连续性 d 与群体内变量呈现出的差异性 σ_k 满足: $\frac{d}{\sigma_k} > 1 (k = i, j)$, 其中 $d = |x_i - x_j|$, 则相应个体属于不同物种。

物种的定义和分类是生物学家一直以来关注的重点。达尔文认为现有物种是由别的物种进化而来的, 结合Hedberg (1958)和洪德元(2016)关于物种的定义, 我们给出上述物种定义。其优势一方面在于它的客观性, 另一方面在于它在统计表型差异时的独立性。对于不同群体的任意表型, 仅考虑它们之间的相对差异, 而不是对所有物种的不同表型采用同一套差异程度的衡量标准, 造成划分的不准确性。另外有几点需要说明:

(1) 本文虽然自始至终围绕表型的进化过程进行讨论, 但实际上基因型和生态过程的分化过程也遵循类似的机制, 在物种判定时也满足一致的差异

关系。因为物种一直处于分化路上, 对于来自同一个最近共同祖先的两个分化至后期的“好种”来说, 既有形态上的差异, 又有程度较高的生殖隔离, 还有明显的生态过程分化(刘建全, 2016)。

(2) 从路径依赖的角度看, 本文只是强调选择压力有限时物种是依赖较高概率的路径形成的, 这样的路径是个体在进化过程中于动态适合度景观中追求高收益产生的。而对于某一种内出现的个别有别于种内其他个体、近似于另一物种的个体, 从生物学角度看是出现了基因或者表型回流的情形。正如刘建全认为的: 物种是处于分化路上的, 在还未达到分化后期即尚未满足所有物种概念时, 又会进行新一轮的分化, 此时种间出现基因流, 产生了杂种(刘建全, 2016)。实际上, 这些杂交个体的进化也是依赖于各自的路径: 当其路径与选择不匹配时, 不能形成新的物种; 但是, 当杂交个体的遗传组合、遗传新变异和分布地理区域的自然选择相吻合时, 则可能形成新的杂交物种(Abbott et al, 2013)。

(3) 物种的分化时间与物种的形成无必然联系(刘建全, 2016), 越早分化成种可能性越大。物种只有某一表型最先开始分化时, 形成的可能只是变种; 但是, 变种和种在本质上没有区别(Darwin, 1929)。特定类群物种界定操作过程中, 形态、生殖隔离、生态等多方面群体水平上统计学差异的“整合物种概念”仍具有一定的实践意义(刘建全, 2016)。虽然本文给出了物种分化路上的数学动态过程和一个可量化的数学物种定义, 但其间仍有一些问题尚待进一步探究, 比如: 在表型进化的过程中, 从一个表型进化到另一个表型的进化概率应该如何确定? 这或许需要以数学和物理学为工具进一步研究。

参考文献

- Abbott R, Albach D, Ansell S, Arntzen JW, Baird SJE, Bierne N, Boughman J, Brelsford A, Buerkle CA, Buggs R, Butlin RK, Dieckmann U, Eroukhmanoff F, Grill A, Cahan SH, Hermansen JS, Hewitt G, Hudson AG, Jiggins C, Jones J, Keller B, Marczewski T, Mallet J, Martinez-Rodriguez P, Möst M, Mullen S, Nichols R, Nolte AW, Parisod C, Pfennig K, Rice AM, Ritchie MG, Seifert B, Smadja CM, Stelkens R, Szymura JM, Väinölä R, Wolf JBW, Zinner D (2013) Hybridization and speciation. *Journal of Evolutionary Biology*, 26, 229–246.
- Darwin C (1929) The origin of species by means of natural selection. *American Anthropologist*, 61, 176–177.

- Frank SA (2011) Natural selection. II. Developmental variability and evolutionary rate. *Journal of Evolutionary Biology*, 24, 2310–2320.
- Hedberg O (1958) The taxonomic treatment of vicarious taxa. *Uppsala Universitets Arsskrift*, 6, 186–195.
- Hong DY (2016) Biodiversity pursuits need a scientific and operative species concept. *Biodiversity Science*, 24, 979–999. (in Chinese with English abstract) [洪德元 (2016) 生物多样性事业需要科学、可操作的物种概念. 生物多样性, 24, 979–999.]
- Li QJ, Li Y (2010) Lamarck redux—A revisit of Darwinism. *Journal of Biology*, 27(2), 55–57. (in Chinese with English abstract) [李启剑, 李越 (2010) 拉马克的归来: 对达尔文主义的再审视. 生物学杂志, 27(2), 55–57.]
- Liu JQ (2016) “The integrative species concept” and “species on the speciation way”. *Biodiversity Science*, 24, 1004–1008. (in Chinese with English abstract) [刘建全 (2016) “整合物种概念”和“分化路上的物种”. 生物多样性, 24, 1004–1008.]
- Lu BR, Wang Z (2016) What is a species: Conflict between evolutionary continuity and taxonomic discontinuity. *Chinese Science Bulletin*, 61, 2663–2669. (in Chinese with English abstract) [卢宝荣, 王哲 (2016) 什么是物种: 进化连续性与分类间断性冲突的产物. 科学通报, 61, 2663–2669.]
- Maynard Smith J (1982) *Evolution and the theory of games*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Traulsen A, Iwasa Y, Nowak MA (2007) The fastest evolutionary trajectory. *Journal of Theoretical Biology*, 249, 617–623.
- Nowak MA (2006) *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*. Harvard University Press, Cambridge.
- Wang RW (2021) *The End of Rationality and Selfness—A Story on the Asymmetry, Uncertainty and Evolution of Cooperation*. China Commerce and Trade Press, Beijing. (in Chinese) (in press) [王瑞武 (2021) 理性与自私的终结——非对称性、不确定性与社会合作行为. 中国商务出版社, 北京.]
- Wilkins JS (2009) *Species: A History of the Idea*. University of California Press, Berkeley.
- Zhou CF, Yang G (2011) *Existence and Definition of Species*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [周长发, 杨光 (2011) 物种的存在与定义. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 王志恒 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 有关实例验证的说明

Appendix 1 Notes on no case is given to verify the definition
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020276-1.pdf>

附录1 有关实例验证的说明

Appendix 1 Notes on no case is given to verified the defination

首先, 本文中我们旨在理论层面给出一种关于物种形成的机制解释, 以及在该机制下的物种分类方法, 供大家认识和讨论。然而从理论到实际应用还需要根据真实的系统考虑很多问题, 我们正在寻找合适的实验生物学家, 讨论如何合作开展对这一理论的验证。

其次, 由于理论与实际应用之间存在很大的差距, 一个理论在发展初期也许并不能通过实验被很好地验证, 而是需要后续的很多工作进一步完善才能体现出它的优劣性。譬如, Kimura在1953年通过建立数学模型得到了“分子层面的中性选择”, 并没有给予任何实例(Kimura, 1953), 但正是这一数学理论模型的提出, 中性理论才得以发展起来, 并成为生物学中最重要的思想之一。在提出初期同样未能得到验证的还有Hamilton提出的“亲选择”理论(Hamilton, 1963; Queller, 1992), 该理论后来发展成为自达尔文以来最伟大的进化理论。反过来, 在实际物种分类中被主要应用的支序分类法, 当时也只是一种经验性的操作, 并没有理论上关于其种群遗传学或者分类系统学严格的逻辑证明。

另外, 限于作者从事理论生态研究的背景, 我们目前还没有足够的生物学和分类学背景去进行实际操作, 以验证该理论的合理性。这方面的工作需要很多从事分类工作的科学家共同完成, 这也是我们未来工作很重要的一部分。

最后, 实际上关于物种进化是依赖路径的这一想法, 四川大学教授刘建全也已经意识到并在其文章中提到(刘建全, 2016)。我们在文章中阐述了路径依赖的内在机制, 并通过模拟手段对依赖路径形成物种这一过程进行了可视化展示。而关于物种的分类方法的确定, 我们是借鉴了高能物理和核物理实验中用来鉴别不同粒子的方法。实验上观测粒子衰变过程观测到的能谱通常是多个粒子叠加起来的高高低低的峰, 实验用半高宽来鉴别不同的粒子种类。目前这一统计方法已经被广泛应用于高能物理和核物理实验, 是粒子种类鉴别和粒子分类的主要方法。我们将这一统计方法推广到物种的分类是有可行性的。

参考文献

- Kimura M (1954) Process leading to quasi-fixation of genes in natural populations due to random fluctuation of selection intensities. *Genetics*, 39, 280–295.
- Hamilton WD (1963) The evolution of altruistic behavior. *The American Naturalist*, 97, 354–356.
- Queller DC (1992) A general model for kin selection. *Evolution*, 46, 376–380.
- Liu JQ (2016) “The integrative species concept” and “species on the speciation way”. *Biodiversity Science*, 24, 1004–1008. (in Chinese with English abstract) [刘建全 (2016) “整合物种概念”和“分化路上的物种”. 生物多样性, 24, 1004–1008.]