

· 研究报告 ·

## 模拟酸雨对3种菊科入侵植物光合特性的影响

宋莉英<sup>1</sup>, 柯展鸿<sup>2</sup>, 孙兰兰<sup>2</sup>, 彭长连<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>广州大学生命科学学院, 广州 510006; <sup>2</sup>华南师范大学生命科学学院, 广州 510631

**摘要** 研究了模拟酸雨(pH值分别为2.5、4.5和5.6)对3种菊科入侵植物——三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)和飞机草(*Chromolaena odoratum*)光合生理生态特性的影响。结果表明, 重度酸雨(pH值2.5)对3种入侵植物叶片均造成可见伤害, 其中飞机草受害最严重, 薇甘菊次之, 三裂叶蟛蜞菊受害最轻。同时, 3种入侵植物对酸雨胁迫表现出不同的光合响应, 随着酸雨pH值的降低, 飞机草和薇甘菊叶片叶绿素含量均有所下降, 其净光合速率( $P_n$ )受到抑制, 而三裂叶蟛蜞菊叶片叶绿素含量变化不大, 其 $P_n$ 值呈上升趋势。酸雨处理下, 3种入侵植物的细胞膜透性、丙二醛含量(MDA)及超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性均有不同程度的增加, 表明它们受到酸雨的胁迫并具有一定的抵抗力。其中, 经pH值2.5酸雨处理后的三裂叶蟛蜞菊叶片SOD活性增幅最大, 其对酸雨胁迫的反应最为迅速。上述研究结果表明, 三裂叶蟛蜞菊对酸雨胁迫的耐受性和适应性均高于飞机草和薇甘菊。在酸雨污染日趋严重的今天, 应对其危害予以高度重视。

**关键词** 适应性, 入侵植物, 气体交换, 模拟酸雨, 耐受性

宋莉英, 柯展鸿, 孙兰兰, 彭长连 (2013). 模拟酸雨对3种菊科入侵植物光合特性的影响. 植物学报 48, 160–167.

酸雨是指pH值小于5.6的大气降雨, 包括各种酸性的雨、雪和霜等(陈立民等, 2003)。随着社会经济的发展, 化石燃料的使用不断增加, 酸雨发生的面积不断扩大, 且危害也越来越严重, 酸雨已成为一个全球性的环境问题。我国华南地区是酸雨污染较严重的地区之一(樊琦等, 2008), 降水年均pH值为4.5–5.0, 酸雨频率达60%–90%(黄辉和黄朝法, 2008)。目前, 对酸雨的研究, 大多涉及酸雨成因、时空分布和治理对策, 对农作物、经济作物和针叶树种等的危害机理以及对水陆生态系统的影响等方面(樊后保, 2002; 赵艳霞等, 2006)。而关于酸雨对外来植物入侵的影响则报道较少, 且多集中于酸雨对入侵植物种子萌发和幼苗生长的影响(蔡燕徽等, 2007; 曹欣等, 2010; 王瑞龙等, 2010)。关于酸雨对外来入侵植物光合生理生态特性的影响尚未见报道。

三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)和飞机草(*Chromolaena odoratum*)同属菊科(Compositae), 为华南地区常见的危害严重的入侵植物。菊科植物是入侵种类最多的类群之

一(郝建华等, 2009)。王芳等(2009)调查分析了广东省外来入侵植物27科93种, 其中菊科种类最多, 有21种。曾宪锋(2003)对粤东外来入侵植物的调查研究发现, 三裂叶蟛蜞菊、薇甘菊、飞机草和豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)等菊科植物是最有害的杂草, 应成为重点防除对象。

本研究通过比较3种菊科入侵植物在光合特性和抗性生理方面对酸雨胁迫响应的差异, 揭示3种入侵植物对酸雨胁迫的耐受力和适应性, 以期为进一步阐明入侵植物在酸雨地区的入侵格局及生态响应提供科学依据, 并为在酸雨地区开展入侵植物管理提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本研究所用实验材料三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata* (L.) Hitchc.)、薇甘菊(*Mikania micrantha* H.B.K.)和飞机草(*Chromolaena odoratum* (L.) R.M.King & H.

收稿日期: 2012-08-27; 接受日期: 2013-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(No.31030015)、国家自然科学基金青年基金(No.3100018)和羊城学者学术骨干项目(No.10A040G)

\* 通讯作者。E-mail: pengchl@scib.ac.cn

Robinson.)均采自广州市大学城分布的自然种群。

3种入侵植物的栽培与酸雨处理实验在华南师范大学生物园进行。分别剪取5 cm长带芽茎段, 进行扦插繁殖。经2~4周预培养后, 选取生长健壮且长势一致的再生小苗移栽至小花盆(直径10 cm, 高5 cm, 容积250 mL)中。基质采用营养土、河沙和塘泥(体积比为1:1:1)的混合物。设置3个酸雨浓度梯度, 每个梯度6盆, 每盆移栽1株小苗。

## 1.2 方法

### 1.2.1 酸雨配置

根据广州地区酸雨监测分析资料(刘大为和夏昊, 2007), 按照硫酸根与硝酸根离子含量的摩尔比( $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^- = 1.55:1$ )配置母液, 用蒸馏水稀释, 配置pH值为5.6(对照)、4.5(中度)和2.5(重度)3个酸雨梯度。根据广州地区多年月均降水量, 每天每盆植株喷淋约90 mL酸雨(与当地总的降水量基本持平), 期间适当补水。

### 1.2.2 光响应曲线

酸雨处理30天后, 每个处理选取4株, 测定叶片光响应曲线。测定时, 叶室中 $\text{CO}_2$ 浓度(Ca)设为380  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 从最高光强开始测定。光量子通量密度(photosynthetic photon quanta flux density, PPFD)分别为1 500、1 200、800、600、300、150、100、80、50、20和0  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。依据Bassman和Zwier(1991)的方法拟合 $P_n$ -PPFD曲线方程, 并计算最大光合速率(the maximum net photosynthetic rate,  $P_{max}$ )、光饱和点(light saturation point, LSP)、光补偿点(light compensation point, LCP)、表观量子效率(apparent quantum yield, AQY)和暗呼吸速率(dark respiration rate,  $R_d$ )。

### 1.2.3 生理生化指标

酸雨处理结束后, 取新鲜叶片进行生理指标的测定。叶绿素含量参照Arnon(1949)的方法测定。细胞质膜相对透性参照李锦树等(1983)的方法测定。丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性参照李合生(2000)的方法测定。过氧化物酶(peroxidase, POD)活性参照张志良和翟伟菁(2003)的方法测定。

### 1.2.4 数据统计

使用SPSS11.5软件进行One Way ANOVA方差分析, 差异显著性检测采用LSD法进行多重比较。

## 2 结果与讨论

### 2.1 酸雨胁迫对3种入侵植物叶片的伤害

在pH值5.6酸雨处理条件下, 3种入侵植物的叶片均未出现可见伤害, 但随着酸雨强度的增加, 3种入侵植物叶片的伤斑面积随之扩大(表1)。pH值4.5酸雨处理后, 飞机草和薇甘菊叶片分别呈现出中度和轻度的伤害。pH值2.5酸雨处理后, 3种入侵植物的叶片均出现明显伤斑, 其中飞机草80%的叶片表现出受害症状, 薇甘菊有半数以上叶片受害, 三裂叶蟛蜞菊受害最轻, 表明三裂叶蟛蜞菊叶片对酸雨的耐受性强于飞机草和薇甘菊。

### 2.2 3种入侵植物对酸雨胁迫的光合响应

图1显示了3种入侵植物对酸雨胁迫的光响应情况。当光合有效辐射大于200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 飞机草(图1B)和薇甘菊(图1C)的净光合速率随着酸雨pH值的下

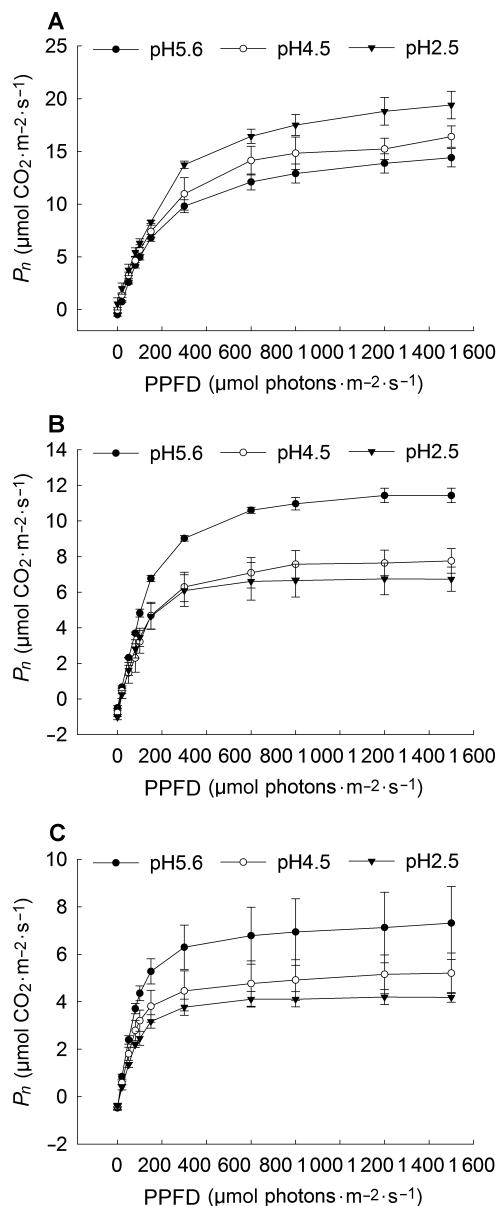
**表1** 酸雨胁迫下3种入侵植物叶片的伤害程度

**Table 1** The leaf injury degree of three invasive plants treated with simulated acid rain at various pH values

Simulated acid rain (pH)	<i>Chromolaena odoratum</i>	<i>Mikania micrantha</i>	<i>Wedelia trilobata</i>
pH5.6	N	N	N
pH4.5	II	I	N
pH2.5	IV	III	I

表中受害分级如下: N: 叶片没有可见伤害出现; I: 叶片受害轻微, 受害叶面积<5%; II: 叶片受害较明显, 其中受害较重的叶片受害面积约为5%~10%; III: 叶片受害明显, 半数以上叶片有伤斑出现, 其中受害较重的叶片受害面积约为10%左右; IV: 叶片受害较重, 80%以上叶片有伤斑出现, 其中受害较重的叶片受害面积约为10%~20%。

Leaf damage is graded as follows: N: Without damage; I: Mild damage, leaves are damaged slightly and leaf damage area is lower than 5%; II: Moderate damage, leaves are damaged obviously and leaf damage area is between 5% and 10%; III: Severe damage, above half of leaves are damaged and leaf damage area is about 10%; IV: Very severe damage, 80% of leaves are damaged and leaf damage area is between 10% and 20%.



**图1** 不同酸雨处理下三裂叶蟛蜞菊(**A**)、飞机草(**B**)和薇甘菊(**C**)的光响应曲线(平均值±标准误,  $n=4$ )

$P_n$ : 净光合速率; PPFD: 光量子通量密度

**Figure 1** The light response curves of *Wedelia trilobata* (**A**)、*Chromolaena odoratum* (**B**) and *Mikania micrantha* (**C**) under different treatments of acid rain (means  $\pm$  SE,  $n=4$ )  
 $P_n$ : Net photosynthetic rate; PPFD: Photosynthetic photon quanta flux density

降而降低, 说明酸雨胁迫抑制了两者的光合作用; 与此相反, 三裂叶蟛蜞菊的净光合速率随着酸雨pH值的下降有升高的趋势(图1A)。

从表2可以看出, 在相同酸雨浓度处理下, 3种入侵植物的 $P_{max}$ 有显著差异。三裂叶蟛蜞菊的 $P_{max}$ 在各酸雨浓度处理下均高于飞机草和薇甘菊, 且重度酸雨处理后其 $P_{max}$ 高于对照酸雨处理, 说明三裂叶蟛蜞菊的光合结构对酸雨的耐受能力较强, 酸雨胁迫下仍能维持较高的光合作用。随着酸雨浓度的升高, 飞机草的光饱和点(LSP)逐渐降低、而光补偿点(LCP)逐渐升高, 说明酸雨胁迫降低了飞机草的光适应范围。而三裂叶蟛蜞菊的LSP和LCP随着酸雨浓度的升高呈现出先降低后升高的趋势, 但总的说来, 其光适应范围仍大于飞机草和薇甘菊。在酸雨对照处理(pH值5.6)下, 3种入侵植物的表观量子效率(AQY)不存在显著差异。pH值2.5酸雨处理则扩大了三者间的差异, 其中三裂叶蟛蜞菊的AQY与对照相比差异不显著, 而飞机草和薇甘菊的AQY均有所下降( $P<0.05$ ), 表明飞机草和薇甘菊受胁迫比较明显。此外, 重度酸雨还显著增加了飞机草的暗呼吸速率( $P<0.05$ )。

### 2.3 酸雨胁迫对3种入侵植物叶片叶绿素含量的影响

由表3可知, 随着模拟酸雨pH值的下降, 飞机草和薇甘菊叶片叶绿素含量(**a+b**)有不同程度的减少; 而三裂叶蟛蜞菊叶片叶绿素含量在各酸雨浓度处理下变化不大。

### 2.4 酸雨胁迫对3种入侵植物叶片电导率、MDA含量及SOD和POD活性的影响

从图2A可以看出, 随着酸雨pH值的降低, 3种入侵植物叶片细胞外渗电导率呈现上升趋势。在重度酸雨(pH值2.5)处理下, 飞机草和薇甘菊叶片电导率与对照相比均有极显著差异( $P<0.01$ ); 三裂叶蟛蜞菊有显著差异( $P<0.05$ )。

图2B和C显示了酸雨胁迫使3种入侵植物叶片MDA含量及SOD活性均有所上升。从图2B可以看出, 在重度酸雨胁迫下, 飞机草、薇甘菊和三裂叶蟛蜞菊叶片MDA含量分别比对照上升了20.7%、34.5%和27.8%, 表明3种植物叶片膜系统均受到不同程度的伤害。从图2C可以看出, 飞机草、薇甘菊和三裂叶蟛蜞菊叶片经pH值2.5酸雨处理后, SOD活性比对照(pH值5.6)分别上升了57.9%、121.4%和127.4%, 均达到极显著水平( $P<0.01$ ), 说明酸雨胁迫可能引起了3种植物叶片细胞内活性氧(reactive oxygen species,

**表2** 不同酸雨处理下3种入侵植物的光合特性比较(平均值±标准误, n=4)

**Table 2** Comparison of main photosynthetic parameters of three invasive plants under different treatments of acid rain (means±SE, n=4)

Photosynthetic parameters	Species	Contrast (pH5.6)	Moderate acid rain (pH4.5)	Severe acid rain (pH2.5)
$P_{max}$ ( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	<i>Chromolaena odoratum</i>	11.23±0.21 b	7.59±0.42 b	6.70±0.52 b
	<i>Mikania micrantha</i>	7.01±0.82 c	4.96±0.51 c	4.13±0.17 c
	<i>Wedelia trilobata</i>	15.34±0.46 a	14.32±0.24 a	17.57±0.73 a
LSP ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	<i>Chromolaena odoratum</i>	784.00±37.81 b	749.59±40.40 b	550.87±13.64 b
	<i>Mikania micrantha</i>	468.31±61.35 c	435.50±9.16 c	471.20±25.58 b
	<i>Wedelia trilobata</i>	1 052.63±69.01 a	985.80±47.94 a	1 051.82±67.55 a
LCP ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	<i>Chromolaena odoratum</i>	8.48±1.01 a	14.69±3.02 a	16.75±2.09 a
	<i>Mikania micrantha</i>	6.53±0.60 a	7.34±1.35 b	9.11±1.48 b
	<i>Wedelia trilobata</i>	4.63±1.68 a	2.19±1.53 b	4.96±1.77 b
AQY ( $\text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ )	<i>Chromolaena odoratum</i>	0.067±0.002 a	0.048±0.005 b	0.058±0.005 b
	<i>Mikania micrantha</i>	0.070±0.002 a	0.053±0.004 b	0.041±0.003 c
	<i>Wedelia trilobata</i>	0.068±0.004 a	0.067±0.002 a	0.078±0.005 a
$Rd$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	<i>Chromolaena odoratum</i>	0.59±0.09 a	0.71±0.12 a	1.02±0.07 a
	<i>Mikania micrantha</i>	0.47±0.04 a	0.41±0.09 ab	0.40±0.09 b
	<i>Wedelia trilobata</i>	0.33±0.14 a	0.16±0.11 b	0.39±0.14 b

表中同一参数同列数据相同字母表示在P=0.05水平上经LSD检验差异不显著。 $P_{max}$ : 最大光合速率; LSP: 光饱和点; LCP: 光补偿点; AQY: 表观量子效率; Rd: 暗呼吸速率

For the same parameter, values with the same letter within the same column are not significantly different according to LSD post hoc analysis at P=0.05 level.  $P_{max}$ : The maximum net photosynthetic rate; LSP: Light saturation point; LCP: Light compensation point; AQY: Apparent quantum yield; Rd: Dark respiration rate

**表3** 酸雨胁迫对3种入侵植物叶片叶绿素含量的影响(平均值±标准误, n=5)

**Table 3** Effects of simulated acid rain on chlorophyll content of three invasive plants leaves (means±SE, n=5)

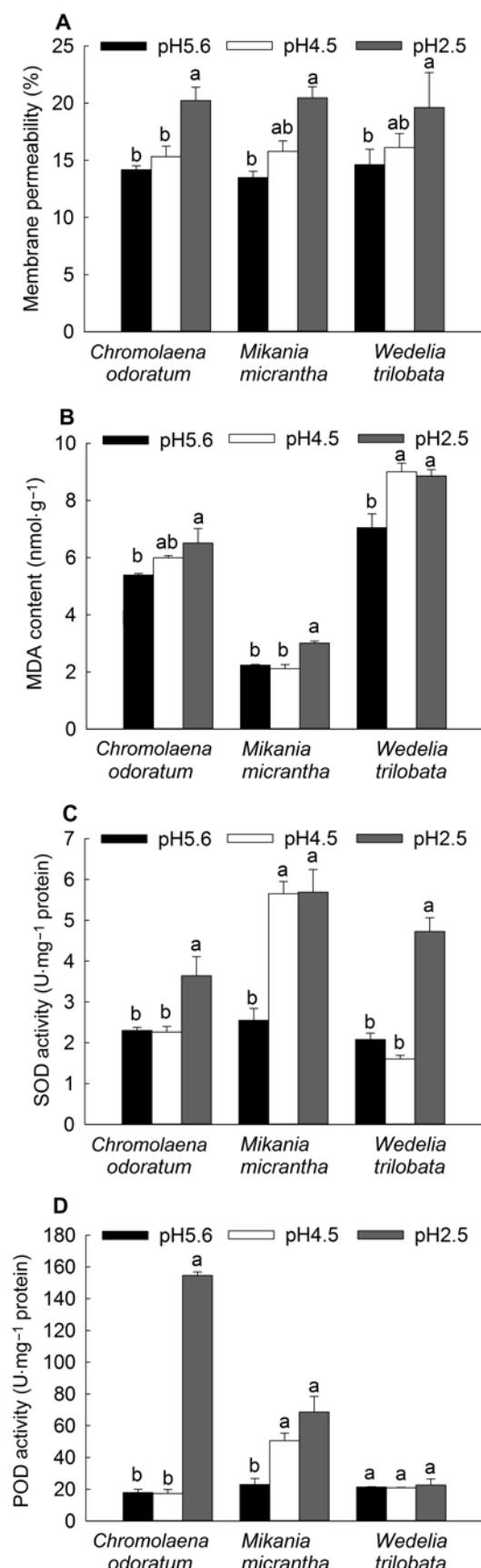
Species	Simulated acid rain (pH)	Chlorophyll a ( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Chlorophyll b ( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Chlorophyll a+b ( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Chlorophyll a/b
<i>Chromolaena odoratum</i>	pH5.6	26.55±4.92 a	9.92±1.74 a	37.87±6.88 a	2.65±0.04 b
	pH4.5	19.32±3.20 ab	6.01±1.10 b	25.97±4.39 ab	3.21±0.07 a
	pH2.5	11.28±0.90 b	3.50±0.26 b	15.32±1.20 b	3.22±0.05 a
<i>Mikania micrantha</i>	pH5.6	12.78±0.88 a	3.84±0.27 a	17.23±1.19 a	3.33±0.03 a
	pH4.5	9.08±1.93 ab	2.83±0.64 ab	12.43±2.69 ab	3.24±0.08 a
	pH2.5	5.61±1.19 b	1.68±0.39 b	7.49±1.66 b	3.44±0.19 a
<i>Wedelia trilobata</i>	pH5.6	30.59±3.57 a	10.14±1.24 a	42.26±5.03 a	3.03±0.04 a
	pH4.5	31.38±1.33 a	10.02±0.51 a	42.85±1.96 a	3.14±0.04 a
	pH2.5	34.35±2.93 a	11.15±0.95 a	46.87±4.06 a	3.08±0.02 a

表中同一参数同一物种相同字母表示在P=0.05水平上经LSD检验差异不显著。

For the same parameter, values with the same letter within the same species are not significantly different according to LSD post hoc analysis at P=0.05 level.

ROS)的积累, 其中三裂叶蟛蜞菊叶片SOD活性增加幅度最大, 表现出对酸雨胁迫的快速反应, 以及时清除过量的活性氧。

图2D显示了酸雨胁迫对3种入侵植物POD活性的影响。从图2D可以看出, 经pH值2.5酸雨处理后, 飞机草和薇甘菊叶片的POD活性分别上升了333.5%



和199.4%，与对照相比均差异极显著( $P<0.01$ )；而三裂叶蟛蜞菊叶片的POD活性在不同酸雨浓度处理下差异不显著。

## 2.5 讨论

### 2.5.1 酸雨胁迫对3种入侵植物叶片的伤害

酸雨对植物的伤害作用，首先表现在破坏植物叶表面的蜡质和角质层，损害植物的表皮结构，使叶片出现伤斑和坏死。Silva等(2005)对2种树木*Eugenia uniflora*和*Clusia hilariana*的研究发现，其幼苗经过40天的模拟酸雨(pH值3.0)处理后均出现了可见伤害。本研究结果显示，pH值4.5酸雨处理仅对薇甘菊和飞机草造成轻微的伤害，三裂叶蟛蜞菊则未见明显伤害，表明3种入侵植物对酸雨均有一定的耐受性。但随着酸雨浓度的增加，酸雨(pH值2.5)处理对3种入侵植物叶片均造成了可见伤害，其受害程度由高到低依次为：飞机草>薇甘菊>三裂叶蟛蜞菊(表1)，表明三裂叶蟛蜞菊对酸雨胁迫的耐受性强于飞机草和薇甘菊。其原因之一可能是，三裂叶蟛蜞菊叶片和茎秆表面密生刚硬短毛(吴彦琼等，2005)，可使酸雨雨滴附着其上，进而降低了酸雨通过叶表面气孔直接进入叶肉组织造成的伤害。

### 2.5.2 3种入侵植物对酸雨胁迫的光响应

光合作用是植物生长的基础，大多数植物在遭受酸雨胁迫时表现出光合速率受到抑制。周青等(1997)报道了模拟酸雨(pH值2.5)胁迫明显降低了芒果(*Mangifera indica*)的光合速率。本实验中，飞机草和薇甘菊

**图2** 酸雨胁迫对3种入侵植物叶片电导率(A)、MDA含量(B)及SOD(C)和POD(D)活性的影响(平均值±标准误,  $n=5$ )  
柱体上的不同字母表示同一物种不同酸雨处理在0.05水平上经LSD检验存在显著差异( $P=0.05$ )。MDA: 丙二醛; SOD: 超氧化物歧化酶; POD: 过氧化物酶

**Figure 2** Effects of simulated acid on membrane permeability (A), the content of MDA (B) and activities of SOD (C) and POD (D) of three invasive plants leaves (means±SE,  $n=5$ )  
Bars with the different letters are significantly different according to LSD post hoc analysis at  $P=0.05$  level. MDA: Malondialdehyde; SOD: Superoxide dismutase; POD: Peroxidase

的光合速率也表现出随酸雨浓度的增加而降低的趋势(图1B, C), 表明酸雨胁迫抑制了二者的光合作用。但也有关于一些对酸雨耐受性较强的植物种类在受到胁迫时, 光合速率增加的报道。例如, Ferenbaugh (1976)的研究发现, 模拟酸雨提高了菜豆(*Phaseolus vulgaris*)的净光合速率。本实验中, 三裂叶蟛蜞菊在遭受酸雨胁迫时其光合速率表现出随酸雨浓度的增加而升高(图1A)。

另外, 本研究中3种入侵植物对酸雨胁迫表现出不同的光响应, 这与它们光合色素含量的变化及光合结构的稳定性有关。随着酸雨浓度的增加, 飞机草和薇甘菊叶片叶绿素含量均有不同程度的降低, 而三裂叶蟛蜞菊叶片叶绿素的含量变化不大(表3), 因此, 使其在酸雨胁迫下仍能维持较高的光捕获能力。同时, 三裂叶蟛蜞菊在重度酸雨处理下, 仍能表现出较高的AQY(表2), 说明它能够将捕获的光能高效地转化为化学能, 从而提高了CO<sub>2</sub>的同化能力。与此相反, 薇甘菊随着酸雨浓度的增加, 其AQY表现出下降的趋势(表2), 表明其对光能的转换效率因酸雨胁迫而受到抑制, 导致了光合速率下降。对于飞机草而言, 酸雨胁迫使其LCP显著增加, 而LSP显著降低(表2), 致使它对光强的可利用范围下降, 进而影响对CO<sub>2</sub>的同化能力。此外, 酸雨中氮素的增加也可能会对土壤起到部分增肥的作用(黄辉和黄朝法, 2008), 这可能也与三裂叶蟛蜞菊在酸雨胁迫时光合速率增加有关。

### 2.5.3 酸雨胁迫对3种入侵植物抗性生理的影响

酸雨对植物的影响还表现为破坏细胞膜透性, 影响细胞正常的生理功能。本研究结果显示, 重度酸雨处理显著地增加了3种入侵植物的电导率和MDA含量(图2), 表明重度酸雨对3种入侵植物的细胞膜系统起到了破坏作用。许多实验发现, 酸雨胁迫与其它环境胁迫一样能够激活植物的抗氧化酶系统, 如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)等, 它们能够清除体内过量的活性氧(ROS), 以实现对植物的自我保护。胡晓梅等(2010)报道了各个梯度(pH值2.0, 3.0, 4.0, 5.6)的模拟酸雨胁迫均能够促使银杏(*Ginkgo biloba*)叶片的SOD和CAT活性急剧上升后稳定在一个较高水平。马剑敏等(2004)的研究表明, Hg<sup>2+</sup>胁迫会引起小麦(*Triticum aestivum*)叶片的SOD和POD活性上升。本研究中,

重度酸雨处理后, 3种入侵植物的SOD和POD活性均有不同程度的增加, 表明3种植物均具有一定的清除过量活性氧的能力, 对酸雨胁迫有一定的耐受性。曹欣等(2010)的研究显示, pH≥3.5的酸雨不影响薇甘菊种子的萌发, 表明薇甘菊对酸雨具有一定的抵抗力, 与本研究结果一致。本研究中, 经pH2.5酸雨处理后的三裂叶蟛蜞菊叶片的SOD活性与对照相比增幅最大, 为127.4%, 表现出对酸雨胁迫的快速反应。

总而言之, 3种菊科入侵植物对酸雨胁迫具有一定的抵抗能力, 其中三裂叶蟛蜞菊比飞机草和薇甘菊具有更强的耐受力和适应性。Wang等(2012)的研究结果表明, 酸雨提高了三裂叶蟛蜞菊的化感作用。作为外来植物成功入侵的“新式武器”——化感作用(Callaway and Ridenour, 2004), 无疑会促进该入侵种的进一步扩散。本研究结果暗示, 在全球酸雨污染日趋严重的今天, 入侵种——三裂叶蟛蜞菊具有潜在的扩散优势, 应该引起足够的重视。

### 参考文献

- 蔡燕徽, 江红英, 陈中义 (2007). 模拟酸雨对外来入侵植物空心莲子草的出苗及生长的影响. 长江大学学报(自然科学版)农学卷 **4**(4), 73–76.
- 曹欣, 韩诗畴, 吕欣, 李志刚, 范志伟 (2010). 模拟酸雨对薇甘菊种子萌发和幼苗生长的影响. 生态环境学报 **19**, 679–685.
- 陈立民, 吴人坚, 戴星翼 (2003). 环境学原理. 北京: 科学出版社. pp. 221–221.
- 樊后保 (2002). 世界酸雨研究概况. 福建林学院学报 **22**, 371–375.
- 樊琦, 范绍佳, 钟流举, 王安宇, 冯瑞权 (2008). 华南地区典型酸雨过程气象条件的数值模拟. 中国环境科学 **28**, 279–283.
- 郝建华, 刘倩倩, 强胜 (2009). 菊科入侵植物三叶鬼针草的繁殖特征及其与入侵性的关系. 植物学报 **44**, 656–665.
- 胡晓梅, 尚鹤, 苟殊贞, 姜静, 候麟, 孙亚琴, 邓仕槐 (2010). 模拟酸雨胁迫对银杏部分生理特性的影响. 河南农业科学 (9), 106–109.
- 黄辉, 黄朝法 (2008). 酸雨对植物生理生态特性的影响研究进展. 林业勘察设计 (1), 46–49.
- 李合生 (2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教

- 育出版社. pp. 167–169, 260–261.
- 李锦树, 王洪春, 王文英, 朱亚芳** (1983). 干旱对玉米叶片细胞透性及膜脂的影响. *植物生理学报* **9**, 223–228.
- 刘大为, 夏昊** (2007). 佛山市大气降水化学特征及其与广州市的比较. *环境科学与技术* **30**, 71–74.
- 马剑敏, 李今, 张改娜, 杨柯金, 王琳, 吴振斌** (2004).  $Hg^{2+}$  与POD复合处理对小麦萌发及幼苗生长的影响. *植物学通报* **21**, 531–538.
- 王芳, 王瑞江, 庄平弟, 郭强, 李振荣** (2009). 广东外来入侵植物现状和防治策略. *生态学杂志* **28**, 2088–2093.
- 王瑞龙, 翁洁, 宋圆圆, 胡林, 苏贻娟, 张晖, 曾任森** (2010). 模拟酸雨对外来入侵植物三叶鬼针草生长及化感作用的影响. *生态环境学报* **19**, 2845–2849.
- 吴彦琼, 胡玉佳, 廖富林** (2005). 从引进到潜在入侵的植物——南美蟛蜞菊. *广西植物* **25**, 413–418.
- 曾宪锋** (2003). 广东5种有害的外来入侵植物的研究. *韩山师范学院学报* **24**(3), 69–72.
- 张志良, 翟伟菁** (2003). 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社. pp. 123–126.
- 赵艳霞, 侯青, 徐晓斌, 丁国安, 王淑凤** (2006). 2005年中国酸雨时空分布特征. 气候变化研究进展 **2**, 242–245.
- 周青, 黄晓华, 王冬燕, 邵爱华, 吴波** (1997). 稀土元素La对酸雨损伤腊梅的影响. *生态学杂志* **16**(6), 59–61.
- Arnon DI** (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol* **24**, 1–15.
- Bassman JH, Zwier JC** (1991). Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* clones. *Tree Physiol* **8**, 145–149.
- Callaway RM, Ridenour WM** (2004). Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Front Ecol Environ* **2**, 436–443.
- Ferenbaugh RW** (1976). Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae). *Am J Bot* **63**, 283–288.
- Silva LC, Oliva MA, Azevedo AA, Araújo JM, Aguiar RM** (2005). Micromorphological and anatomical alterations caused by simulated acid rain in Restinga plants: *Eugenia uniflora* and *Clusia hilariana*. *Water Air Soil Poll* **168**, 129–143.
- Wang RL, Rehman SU, Liang XT, Song YY, Su YJ, Baerson SR, Zeng RS** (2012). Effects of simulated acid rain on the allelopathic potential of invasive weed *Wedelia trilobata*. *Allelopathy J* **30**, 23–32.

## Effect of Simulated Acid Rain on Gas Exchanges of Three Compositae Invasive Plants

Liying Song<sup>1</sup>, Zhanhong Ke<sup>2</sup>, Lanlan Sun<sup>2</sup>, Changlian Peng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Life Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

<sup>2</sup>School of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

**Abstract** We examined the effect of simulated acid rain (pH 2.5, 4.5, 5.6) on gas exchanges of 3 compositae invasive plants (*Wedelia trilobata*, *Mikania micrantha* and *Chromolaena odoratum*). Leaves of the 3 invasive plants showed injury under severe acid rain stress (pH 2.5). The order of the injury degree was *C. odoratum* > *M. micrantha* > *W. trilobata*. The 3 invasive plants showed different photosynthetic responses to simulated acid rain stress. The chlorophyll (Chl) content of *C. odoratum* and *M. micrantha* was reduced with decreasing pH, and thus the net photosynthetic rate ( $P_n$ ) was inhibited, with no difference for *W. trilobata*. Instead, its  $P_n$  increased, although not significantly. Under acid rain treatment, membrane permeability, malondialdehyde content and superoxide dismutase (SOD) and peroxidase activity increased for all plants to varying degrees, which showed some resistance to acid rain. *W. trilobata* showed the greatest increase in SOD activity under pH 2.5, which suggests its fast response to acid rain stress. *W. trilobata* had stronger adaptability and tolerance to acid rain than the other 2 invasive plants and could be further investigated in light of increasing acid rain pollution.

**Key words** adaptability, invasive plant, gas exchanges, simulated acid rain, tolerance

**Song LY, Ke ZH, Sun LL, Peng CL (2013).** Effect of simulated acid rain on gas exchanges of three compositae invasive plants. *Chin Bull Bot* **48**, 160–167.

---

\* Author for correspondence. E-mail: pengchl@scib.ac.cn

(责任编辑: 孙冬花)