

文章编号:1000-8551(2011)03-0588-06

酸雨对木芙蓉幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响

王应军¹ 邓仕槐¹ 姜静¹ 尚鹤² 林波^{2,3} 孙亚琴¹ 胡晓梅¹

(1. 四川农业大学资源环境学院农业环境工程重点实验室,四川雅安 625014;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,北京 100091;3. 北京林业大学林学院,北京 100083)

摘要:以 pH 5.6 为对照,采用 pH 4.0、pH 3.0、pH 2.0 强度的酸雨对 2 年生木芙蓉进行人工模拟胁迫,研究酸雨胁迫对木芙蓉叶片可见伤害、质膜透性(Membrane Permeability,MP)、叶绿素(Chlorophyll,Chl)含量、抗氧化酶系统及气体交换参数的影响。研究表明,pH 2.0 和 pH 3.0 的酸雨处理使叶片出现可见伤害;木芙蓉细胞膜透性在酸雨胁迫处理下均明显增加,并与 pH 值呈极显著负相关($r = -0.961^{**}$);超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase,SOD)活性在 pH 3.0 处理下最高($216.80\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$),过氧化氢酶(Catalase,CAT)和过氧化物酶(Peroxidase,POD)活性在 pH 2.0 处理下最强(分别为 $48.75\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$ 和 $77.69\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$);叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、叶绿素 a/b、净光合速率(Net Photosynthetic Rate,Pn)、气孔导度(Stomatal Conductivity,Gs)和蒸腾速率(Transpiration Rate,Tr)均随 pH 值的降低而降低,胞间 CO₂ 浓度(Intercellular CO₂ Concentration,Ci)呈先降后升的趋势,而水分利用效率(Water Use Efficiency,WUE)先升高后降低。模拟酸雨对木芙蓉的可见伤害阈值小于 pH 2.0,对木芙蓉生理活动影响阈值大致在 pH 2.0~3.0,表明木芙蓉对酸雨具有较强的耐受性。本研究为木芙蓉栽培管理、抗性筛选,以及为南方城市绿化树种的选择提供理论依据。

关键词:木芙蓉;模拟酸雨;光合作用;抗氧化酶活性

EFFECTS OF ACID RAIN ON PHOTOSYNTHESIS AND ANTIOXIDANT ENZYME ACTIVITY OF *H. mitabilis* L. SEEDLINGS

WANG Ying-jun¹ DENG Shi-huai¹ JIANG Jing¹ SHANG He² LIN Bo^{2,3} SUN Ya-qin¹ HU Xiao-mei¹

(1. Sichuan Province Key Laboratory of Agricultural Environmental Engineering, College of Resource and Environment,

Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014;

2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;

3. Department of Forest Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of simulated acid rain on foliar damage, chlorophyll (Chl) content, membrane permeability (MP), antioxidant enzyme activity and gas exchange parameters in leaves of 2-year *H. mitabilis* seedlings. Four gradients of simulated acid rain solutions of pH 5.6 (CK), 4.0, 3.0 and 2.0 were used. Results showed that the leaves treated by pH 2.0 and 3.0 showed visible injury spots to various extent. The membrane permeability (MP) increased significantly after acid rain stress with an extremely significant negative correlation to pH value ($r = -0.961^{**}$). The maximum catalase (CAT) activity and peroxidase (POD) activity were observed at pH 2.0 ($48.75\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$ and $77.69\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$, respectively), while that of

收稿日期:2010-11-02 接受日期:2011-03-08

基金项目:国家“十一五”计划攻关项目(2006BAD03A0104-2),四川省教育厅重点项目(10ZA059)

作者简介:王应军(1972-),男,贵州沿河人,副教授,硕士生导师,主要从事环境水利、环境生物工程等方面的研究。E-mail:wwyjj1972@163.com

通讯作者:邓仕槐(1968-),男,四川达州人,教授,主要从事环境生态工程、废弃物处理与资源化利用等研究等方面的研究。E-mail:shdeng888@163.com

superoxide dismutase (SOD) activity were observed at the pH 3.0 ($216.80 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}$). Chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), total chlorophyll content, Chl a/b, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductivity (G_s) and transpiration rate (Tr) decreased with decreasing pH value of pH, and intercellular CO_2 concentration (C_i) showed a trend of decreasing first and then increasing, while water use efficiency (WUE) was opposite. The visible damage threshold of *H. mitabilis* by simulated acid rain was less than pH 2.0, and the threshold on the physiological activity was among pH 2.0 to 3.0, which indicated that *H. mitabilis* had higher tolerance to acid rain stress. This study could provide theoretical reference for cultivation management and resistance screening of *H. mitabilis*, and offer basic theory to choose the greening tree species in Southern cities.

Key words: *H. mitabilis* L.; simulated acid rain; photosynthesis; antioxidant enzyme activity

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的降水,也包括雨、雪、雾、雹等其他形式的酸性降水,科学上称作酸沉降,包括湿沉降(如酸雨、酸雪、酸雾、酸雹)和干沉降(如含硫氧化物、氮氧化物的降尘、颗粒物等)^[1]。近年来,我国酸雨问题日益严重,已成为世界第三大酸雨区,酸雨区已占我国国土面积的 40%,且有扩大之势,酸雨区酸雨出现的频率也逐年上升。酸雨对植物的直接伤害主要发生在叶片上^[2],可导致植物叶片出现可见伤斑^[3]、引起细胞超微结构的变化^[4]、加速营养元素的淋失^[5]、抑制酶活性^[6]、诱导产生自由基、引起细胞过氧化损伤^[7]、破坏光系统 II 和影响光合作用^[8]等。城市区域是酸雨的频发区,而酸雨胁迫对园林植物的生长发育会产生不利的影响^[9]。目前酸雨胁迫对园林植物的影响多限于形态学伤害,因此,研究酸雨对园林植物生长和生理的伤害机制,筛选抗酸雨的优质品种,对于改善城市环境、维护生态平衡具有重要的意义。

木芙蓉(*H. mitabilis* L.)为锦葵科木槿属植物,属落叶灌木或小乔木。木芙蓉花是成都市的市花^[10],也是我国南方城市重要的绿化树种之一,具有重要的生态、经济和观赏价值^[11-12]。目前国内在酸雨对木芙蓉影响方面的研究鲜见报道。本研究以地处亚热带并且酸雨污染严重的成都市主要绿化树种木芙蓉幼苗为研究对象,采用模拟酸雨胁迫方法,研究酸雨对盆栽木芙蓉幼苗生理生化的影响,旨在为城市绿化植物的选择和抗酸雨研究提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于四川农业大学教学科研园区的人工智能大棚,棚内具备控光、控温、控湿、通风等设施。试验地地处东经 $103^{\circ}14'$,北纬 $30^{\circ}08'$,当地年平均气温 16.1°C ,海拔 610m,极端最高气温 37.7°C ,最低气温 -3.4°C ,年平均降雨 1732mm,相对湿度 79%,无霜期

为 298d,日照时数年均 1019h,属典型的亚热带湿润季风气候。

1.2 试验材料

试验材料为人工培育的 2 年生盆栽木芙蓉幼苗,选取株高 130 ~ 150cm 的幼苗,种植在内径 25cm、深 27cm 的陶土花盆中,随机分成 4 组,每组 5 盆,供试土壤为紫色土。

1.3 模拟酸雨的配置及喷淋方法

模拟酸雨的离子成份根据四川自然降雨的主要化学成份配制^[13],用分析纯 H_2SO_4 、 HNO_3 和 HCl 按 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 的摩尔比为 5:1:0.36 配制成 pH 值为 1.0 的酸雨母液,并在 1L 母液中分别加入 KNO_3 1.0g、 CaSO_4 1.7g。在每次喷淋前,用 pHS-2C 型酸度计测定酸雨母液的 pH 值,并在母液中加入适量去离子水分别配置 pH 值为 2.0、3.0、4.0 和 5.6 共 4 个梯度的模拟酸雨溶液处理,其中, pH 5.6 为对照。

模拟酸雨的喷洒采用喷雾法,用喷雾器向幼苗喷洒不同 pH 值的模拟酸雨。喷洒周期采用肖艳等^[14,15]对园林绿化植物的研究方法,喷洒频率为每隔 10d 喷 1 次,共 6 次,每次喷淋时间为 18:00 - 19:00 进行,以叶片滴液为度,每次喷洒酸雨时,用塑料薄膜覆在花盆上以防土壤酸化。

1.4 测定指标及其方法

叶片伤害用目测法,叶片伤害程度采用受害叶面积的百分数来表示^[3]。每次喷洒模拟酸雨后观察木芙蓉叶片的伤害反应,每天至少观察 1 次并记载受害症状。第 6 次喷淋酸雨后的第 10 天上午,采集植物中上部生长一致、成熟完好的叶片(自上而下第 3 ~ 4 片),对各项生理指标进行测定,每处理 3 次重复。质膜透性(Membrane Permeability, MP)用电导法测定^[16];叶绿素含量采用丙酮-乙醇提取法^[17];超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑(Nitro Blue Tetrazolium, NBT)法测定^[18];过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性采用紫外吸收法测定^[19];过

氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性采用愈创木酚法测定^[19]。应用 Li-6400 便携式光合仪 (LiCOR, USA) 测定叶片净光合速率 (Net Photosynthetic Rate, P_n)、气孔导度 (Stomatal Conductivity, G_s)、胞间 CO_2 浓度 (Intercellular CO_2 Concentration, C_i)、蒸腾速率 (Transpiration Rate, T_r) 等。叶室 ($2\text{cm} \times 3\text{cm}$) 内设定温度 26°C , 光强为 $1200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。选取植株由上至下第 3 片叶片进行测量, 每个处理选 3 株, 每株读数 5 次。水分利用率 (Water Use Efficiency, WUE) 通过公式 $WUE = P_n / T_r$ ^[20] 计算。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS13.0 分析统计软件的单因素方差分析法 (One way ANOVA) 分析各酸雨处理试验数据的差异显著性, 如果差异显著, 以 LSD 法进行多重比较; Pearson 进行相关分析; 采用 Microsoft office Excel 2003 绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 酸雨对木芙蓉叶片可见性的伤害

外部特征的变化是环境胁迫对植物影响的最明显表现。不同 pH 的模拟酸雨对木芙蓉叶片产生了不同程度的伤害, pH 4.0 处理时叶片无可见伤害, pH 3.0 和 pH 2.0 处理下叶片出现明显受害症状。第 1 次喷淋后第 2 天, 木芙蓉叶片开始出现伤斑, pH 2.0 模拟酸雨处理引起的伤害最为严重, 叶尖、叶缘出现不规则铁锈色伤斑及直径 10mm 左右的失绿斑点, 受害率在 2% 左右; pH 3.0 处理的受害程度相对较轻, 仅个别叶片出现直径约为 5mm 的失绿斑点, 受害率在 0.8% 左右。喷淋酸雨后第 3 天, pH 3.0 和 pH 2.0 处理的木芙蓉伤害症状未见加重; 第 6~8d, pH 3.0 和 pH 2.0 处理的失绿斑点相继消失。通过观察发现, 出现可见伤害的大部分为新叶, 说明木芙蓉的新叶较老叶更易受到酸雨的危害, 但叶片能通过积极的自我修复而很快恢复正常。在随后的 5 次喷淋酸雨试验中各处理植物均未出现明显伤害症状, 可见木芙蓉的抗酸雨能力较强。

2.2 酸雨对木芙蓉质膜透性的影响

细胞膜是细胞与环境发生物质交换的主要通道, 在一定因子胁迫下, 膜透性的增大、电解质的大量泄漏是膜伤害或变性的重要标志。因此, 质膜透性常用以表征植物在逆境胁迫下的伤害程度。从图 1 可以看出, 木芙蓉幼苗叶片的质膜透性随着 pH 值的降低显著增加, pH 4.0、pH 3.0、pH 2.0 酸雨处理分别比对照

增加了 7.29%、12.07%、17.45%, 其中, pH 2.0 处理与对照差异显著。可见模拟酸雨对其叶片细胞膜造成了伤害, 且伤害程度随 pH 值的降低而加大。相关分析表明, 细胞膜透性的变化与酸雨的 pH 值呈极显著负相关 ($r = -0.961^{**}$)。

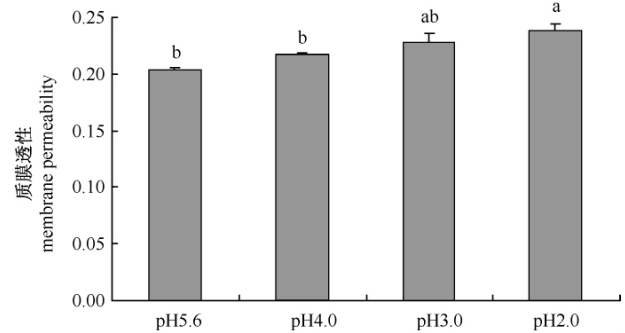


图 1 模拟酸雨对木芙蓉质膜透性的影响

Fig. 1 Effects of simulated acid rain on membrane permeability in *H. mitabilis* L.

图中不同字母表示处理间差异呈显著水平 ($P < 0.05$), 下同。

Different letters mean those were significant difference

between different treatments at 0.05 level.

The same as following figure.

2.3 酸雨对木芙蓉抗氧化酶活性的影响

植物为适应环境正常生长, 形成了不同的活性氧清除机制, 包括酶清除系统和非酶清除系统, 其中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 是酶清除系统中重要的组成部分, 在活性氧清除中起着关键的作用。

SOD 是植物体内清除活性氧系统的第一道防线。由图 2 可知, 木芙蓉幼苗叶片内 SOD 酶活性在 pH3.0 时达到最大, 与对照相比增加了 6.91%, 说明在低浓度酸雨胁迫下, 叶片细胞内产生较多的 O_2^- , 诱导了 SOD 酶活性的急剧增加, 提高了其自身清除 O_2^- 的能力, 以维持正常的生命活动。但 pH 2.0 处理下 SOD 酶活性较对照降低 4.29%, 与对照差异显著, 可能是由于 pH 2.0 处理下植株受到不可逆的伤害, 植株体内积累大量活性氧自由基 (Reactive Oxygen Species, ROS), 已超出了 SOD 的清除能力, 且低 pH 值下 SOD 活性也受到强烈抑制。

CAT 主要存在于植物过氧化物酶体与乙醛酸循环体中, 可清除在光呼吸及脂肪酸 β -氧化过程中产生的 H_2O_2 , 也可在过氧化物体中将 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 ^[21]。由图 3 可见, 各酸雨处理下 CAT 酶活性均显著高于对照, pH 4.0、pH 3.0、pH 2.0 酸雨处理分别比对照增加了 64.01%、34.67%、108.24%。

POD 代表了细胞中另一类 H_2O_2 降解酶,参与植物细胞木质素合成,吡啉乙酸降解以及植物对生物和非生物的胁迫反应。POD 活性上升一方面表明其清除 H_2O_2 的能力增强,另一方面提示细胞遭受氧化损伤的程度加剧^[22]。pH 4.0、pH 3.0、pH 2.0 酸雨处理

分别比对照增加了 67.51%、129.66%、251.30%,可见 POD 活性随酸雨 pH 值的降低而显著升高,与质膜透性呈现相同的变化规律,说明 POD 在木芙蓉抗氧化代谢方面起主要的作用。

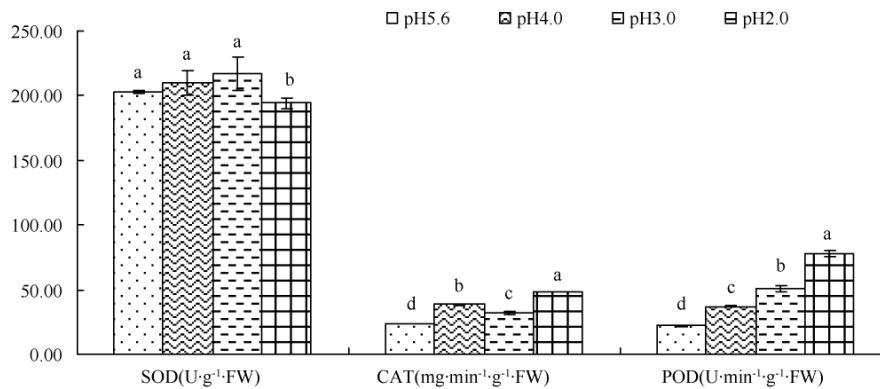


图 2 模拟酸雨对木芙蓉 SOD、CAT、POD 活性酶的影响

Fig. 2 Effects of simulated acid rain on SOD, CAT and POD activities in *H. mitabilis* L.

2.4 酸雨对木芙蓉叶绿素含量的影响

叶绿素在植物进行光合作用的过程中起着非常重要的作用,它可以将捕获的光能转化为化学能。由表 1 可知,随着模拟酸雨 pH 值的下降,木芙蓉叶片 Chl a、Chl (a + b)、Chl a/b 总体呈下降趋势,pH 4.0、pH

3.0 酸雨处理对 Chl b 影响较小,但 pH 2.0 处理下各指标值急剧下降,表明此时酸雨抑制了木芙蓉叶片中叶绿素的合成,并加速其分解,且 Chl a 的分解速度大于 Chl b。

表 1 模拟酸雨对木芙蓉叶片叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of simulated acid rain on chlorophyll contents in leaves of *H. mitabilis* L. (mg/g)

pH	Chl a	Chl b	Chl a + b	Chl a/b
5.6	1.670 ± 0.011 ^a	0.665 ± 0.016 ^a	2.335 ± 0.027 ^a	2.512 ± 0.042 ^a
4.0	1.626 ± 0.016 ^b	0.661 ± 0.015 ^a	2.287 ± 0.028 ^a	2.463 ± 0.078 ^a
3.0	1.515 ± 0.006 ^c	0.683 ± 0.007 ^a	2.198 ± 0.001 ^b	2.218 ± 0.031 ^b
2.0	1.230 ± 0.006 ^d	0.580 ± 0.013 ^b	1.809 ± 0.034 ^c	2.122 ± 0.038 ^b

注:表中数值为平均值 ± 标准差,同列不同字母表示差异呈显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Numbers are represented by mean ± standard error. Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same as following table.

2.5 酸雨对木芙蓉气体交换参数的影响

光合作用是植物进行生长的基础,光合气体交换参数是用来表示植物光合能力的常用指标。从表 2 可以看出,木芙蓉叶片 P_n 随酸雨 pH 值的降低而降低,其影响程度因酸雨 pH 值的不同而有所差异。pH 4.0 处理时 P_n 与对照差异不显著,而 pH 2.0 和 pH 3.0 处理的 P_n 显著低于 pH 4.0 和 pH 5.6。表明酸雨胁迫降低了植株叶片碳同化速率,减少了光合产物的积累。 G_s 可以反映气孔的开放程度^[23], T_r 表征蒸腾作用的大小,蒸腾作用是植物吸收水分和转运水分的主要动力^[24],木芙蓉叶片 T_r 因 G_s 的减小而降低,且酸雨胁

迫处理下的 G_s 、 T_r 均显著低于对照,二者呈显著正相关 ($r = 0.958^{**}$)。 C_i 的变化可以表征植物对 CO_2 利用率的高低^[25], C_i 随酸雨 pH 值的降低而呈先降低后升高的趋势,pH 3.0 处理下 C_i 最低,pH 2.0 处理下 C_i 开始升高。 WUE 随酸雨 pH 值的降低呈先升高后降低的趋势,pH 3.0 处理下 WUE 最高。这可能是由于适度酸雨胁迫下酸雨对木芙蓉叶片 P_n 的抑制作用小于其对 T_r 的限制;而严重酸雨胁迫下,酸雨中的 H^+ 浓度过高,木芙蓉叶片难以维持其正常的光合碳同化代谢,导致 WUE 明显下降。

表 2 模拟酸雨胁迫对木芙蓉叶片气体交换参数的影响

Table 2 Effects of simulated acid rain stress on gas exchange parameters in leaves of *H. mitabilis* L.

pH	P_n ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	G_s ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	T_r ($\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	WUE ($\text{mmolCO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$)
5.6	17.33 ± 1.91 ^a	1.04 ± 0.23 ^a	301.85 ± 10.65 ^a	8.29 ± 0.62 ^a	2.11 ± 0.34 ^c
4.0	16.62 ± 1.08 ^a	0.40 ± 0.33 ^b	274.40 ± 9.83 ^a	7.99 ± 0.28 ^b	3.33 ± 0.78 ^b
3.0	15.11 ± 0.06 ^b	0.33 ± 0.02 ^b	205.20 ± 7.41 ^c	3.32 ± 0.17 ^c	4.55 ± 0.22 ^a
2.0	13.07 ± 2.61 ^c	0.33 ± 0.23 ^b	254.67 ± 13.74 ^b	4.35 ± 1.63 ^c	3.20 ± 0.69 ^b

3 讨论

植物在生长过程中,其生长发育的物质和能量均来源于光合作用及根系对营养元素的吸收与同化。在酸雨胁迫下,其地上部分器官会直接受到影响。酸雨中过多的 H^+ 与叶表面角质及其内部的阳离子进行交换而侵蚀破坏叶组织结构与细胞结构^[26]。新叶表皮的角质层相对较薄、刚刚长出的新保卫组织未充分形成,且气孔开放最多,生理活动最旺盛^[27],因此,新叶较之老叶更易受到伤害。本试验中,第 1 次模拟酸雨处理下,模拟酸雨对木芙蓉叶片的伤害程度主要取决于 pH 大小,但叶片表现出较强的自我修复能力。在随后的酸雨处理下,各处理植物叶片均未再出现可见伤害,表明木芙蓉在受到酸雨胁迫后,积极启动抗氧化酶系统,通过渗透调节等代谢反应阻止、降低、修复由酸雨造成的损伤,使机体免受伤害,保持正常的生理活动^[28, 29]。

细胞质膜是控制细胞内外物质交换的屏障,其透性状况关系到细胞内离子平衡(营养离子平衡、电化学平衡等)、胞液 pH 值稳定、能量代谢及酶化学反应等能否正常进行^[30]。在一定因子胁迫下,膜透性的增大、电解质的大量泄漏都是膜伤害或变性的重要标志。pH 2.0 酸雨处理下植物的质膜透性与对照差异显著,说明此时细胞膜的结构遭到破坏。试验证明^[31]环境引起自由基的累积与膜伤害有密切的关系,自由基伤害植物的机理之一,就在于它能够启动膜脂过氧化或膜脂脱脂作用,从而破坏膜结构。本试验中,在酸雨作用下, H^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 进入植物体内诱发 ROS 生成,SOD、CAT、POD 活性升高是相应于 ROS 的一种应急解毒措施,从而使细胞免受酸雨的毒害作用。POD 和 CAT 具有同工酶的特点,它们分别以不同的途径清除植物体内的 H_2O_2 。CAT 酶活性出现波动性变化,POD 酶活性仍在上升,这可能是机体内补偿因 CAT 酶活力下降引起的 H_2O_2 不断累积的一种协调性反应。

酸雨胁迫对植物叶绿素含量的影响结果不一,Shan Y^[32]认为酸雨处理提高了赤松(*Pinus densiflora*)

Chl 含量;鲁美娟等^[33]研究发现酸雨并未影响刨花楠(*Machilus pauhoi*)的 Chl 含量;陆晓民等^[34]则认为酸雨使植物 Chl 含量降低。本研究结果表明,酸雨对 Chl b 含量无显著影响,Chl 下降的主要原因是 Chl a 的下降。随着叶片的衰老,植物叶绿素含量逐渐下降,Chl a 比 Chl b 下降得更快,因此 Chl a/b 可以作为叶片衰老的标志,可见酸雨对植物膜系统的损伤必然会引起光合器官的伤害和功能的下降,并加速了木芙蓉叶片的衰老。

本研究结果表明,随着酸雨 pH 值的降低,植物受伤害的程度增大,植物的净光合速率也随着酸雨的 pH 值的降低而降低。一般认为,光合速率降低的因素主要有气孔和非气孔因素这 2 个方面的限制。判断光合速率下降受气孔因素制约的依据是酸雨胁迫下 P_n 和 G_s 与 C_i 的变化呈相反趋势^[35],即只有随着气孔的关闭而 C_i 也相应下降时,才可以证明光合作用的降低是由气孔关闭造成的;如果气孔关闭而 C_i 不变甚至有所提高,则证明光合作用的下降主要是由叶肉细胞或叶绿体等光合器官的光活性下降引起的。因此,pH 4.0、pH 3.0 酸雨处理下木芙蓉 P_n 主要受气孔因素影响,这是由于植物叶片受到轻度酸雨胁迫后,通过保卫细胞调节气孔至适当的开度,避免水分过度蒸腾和减少吸入污染物,从而适应胁迫生境^[36]。这是植物自身的一种保护反应,可以减轻或者避免不良环境因素对叶片的侵袭,但同时也影响叶片与外界进行气体交换活动,给植物正常的生理活动带来一定的影响。本试验中,pH 2.0 处理下非气孔因素成为限制 P_n 的主要原因,非气孔因素为 Chl 含量及 Chl a/b 的降低。由于植物体内 Chl 含量丰富,很难成为光合作用的限制因子。然而当酸雨伤害发生时,因其含量骤降,可能转化为光合作用的内在限制因子^[37]。pH 2.0 酸雨处理下木芙蓉 Chl 含量最低,与其他各处理差异极显著。Chl a/b 可反映 PS II 聚光复合体(PS II light-harvesting complex, LHC II)在所有含叶绿素结构中的比重,其值升高是 LHC II 含量减少的主要特征^[38]。

酸雨对植物生长发育的影响存在一定的阈值,园林植物在逆境胁迫下阈值的确定,除了要从外观上考

虑其生长形态指标外,还要测定其一定的生理生化指标。目前,可见伤害阈值大多采用张耀民等^[3]提出的受害叶面积百分数(一般为5%)来确定。酸雨对植物生理指标的影响阈值采用邱栋梁等^[39]的差异显著性检验结果进行评价。本试验结果表明,pH 2.0 酸雨处理对木芙蓉叶片伤害面积小于5%,pH≤3.0 时,多数生理指标出现显著性差异,因此初步确定模拟酸雨对木芙蓉的可见伤害阈值小于pH 2.0;对木芙蓉生理活动影响阈值大致在pH 2.0~3.0。

4 结论

木芙蓉叶片受到酸雨伤害后,表现出较强的自我修复能力。相对于表观症状,植物的生理生化特性对酸雨的反应更为敏感。模拟酸雨对木芙蓉的可见伤害阈值小于pH 2.0,对木芙蓉生理活动影响阈值大致在pH 2.0~3.0。木芙蓉对酸雨具有较强的耐受性,可以作为酸雨灾害严重地区园林绿化及植被构建的物种之一。

参考文献:

[1] 付晓萍,田大伦. 酸雨对植物的影响研究进展[J]. 西北林学院学报,2006,21(4):23-27

[2] 张耀民. 酸雨对农作物的叶片伤害及生理特性的影响[J]. 农业环境,1996,15(5):197-208,227

[3] 梁骏,麦博儒,郑有飞,李璐,唐信英,吴荣军. 模拟酸雨对油菜(*Brassica napus* L.) 生长、产量及品质的影响[J]. 生态学报,2008,28(1):274-283

[4] Sant' Anna-Santos B F, Silva L C, Azevedo A A, Araújo J M, Alves E F, Silva E A M, Aguiar R. Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species[J]. Environmental and Experimental Botany,2006,58(1-3):158-168

[5] 周青,黄晓华,曾庆玲,梁娟娟,叶亚新. 植物酸致损伤机理与化控减灾研究进展[J]. 农业环境科学学报,2003,22(5):632-635

[6] 倪寿清,宋晓东,崔清洁,李建国,杨国栋. 模拟酸雨胁迫下中国北方小麦生理特性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2008,39(1):19-22

[7] 石彦军,余树全,郑健,刘玉艳. 野生花卉地榆叶片对模拟酸雨的生理响应[J]. 安徽农业科学,2009,37(21):9952-9955

[8] 谢寅峰,杨万红,陆芙蓉,蔡贤,周坚. 模拟酸雨胁迫下硅对鬃毛竹光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1179-1184

[9] 吴丹,王式功,尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. 干旱气象,2006,24(2):70-77

[10] 陈裕,梁育勤,李世全. 中国市花培育与欣赏[M]. 北京:金盾出版社,2005:152-157

[11] 刘小冬,姜卫兵,温忙玲. 中国农学通报[J]. 中国农学通报,

2008,24(8):315-320

[12] 姚莉韵,陆阳,陈泽乃. 木芙蓉叶化学成分研究[J]. 中草药,2003,34(3):201-203

[13] 魏菱. 四川省酸雨污染现状及趋势分析[J]. 四川环境,2001,20(4):63-65

[14] 肖艳,黄建昌. 13种果树对酸雨抗性的研究[J]. 果树学报,2004,21(3):191-195

[15] 肖艳,黄建昌,刘少娴,杨伟钊,郭冬升,朱凌志. 模拟酸雨对12种园林植物的伤害及敏感性反应[J]. 西南农业大学学报,2004,26(3):270-276

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:261-263

[17] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社,2006:81-84

[18] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:110-113

[19] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 北京:气象出版社,2006:40-42

[20] Penuelas J, Filella I, Llusia J, Siscart D, Pinol J. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia* [J]. Journal of Experimental Botany,1998,49(319):229-238

[21] Foyer C H, Descourvieres P, Kunert K J. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants[J]. Plant, Cell and Environment,1994,17:507-523

[22] 王海华,彭喜旭,严明理,冯涛. 模拟酸雨和镍复合污染壤壤中黄芩的生长与抗氧化反应[J]. 水土保持学报,2007,21(3):99-102

[23] 谢田玲,沈禹颖,邵新庆,高崇岳. 黄土高原4种豆科牧草的净光合速率和蒸腾速率日动态及水分利用效率[J]. 生态学报,2004,24(8):1679-1686

[24] 周玉梅,韩士杰,胡艳玲,张海森,郑俊强. 高浓度CO₂对红松(*Pinus koraiensis*) 针叶光合生理参数的影响[J]. 生态学报,2008,28(1):423-429

[25] 刘庆忠,董合敏,刘鹏,张力思,王凤才. 板栗的光合特性研究[J]. 果树学报,2005,22(4):335-338

[26] 单运锋,冯宗炜,陈楚莹. 模拟酸雨对七种森林树种生物量的影响[J]. 生态学报,1989,9(3):274-276

[27] 赵栋,潘远智,邓仕槐,尚鹤,王芳,陈睿. 模拟酸雨对茶梅生理生态特性的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(15):3191-3198

[28] 王忠. 植物生理学[M]. 北京:中国农业出版社,2002:433-436

[29] 王丽红,周青,曾庆玲. 3类抗性种子萌发过程中糖代谢对酸雨胁迫的响应[J]. 环境科学,2008,29(3):799-803

[30] 周青,黄晓华,刘小林. 酸雨对3种木本植物的胁迫效应[J]. 环境科学,2002,23(5):42-46

[31] 王江,张崇邦,柯世省,钱宝英. 模拟酸雨和铜复合污染对白花泡桐生理特性的影响及其解毒机制[J]. 应用生态学报,2010,21(3):577-582

(下转第581页)

件下所具有的伤害最轻、产量下降最少的能力^[14],不同作物或同一作物不同品种原有的背景并不相同,因此,综合考虑作物在正常条件和干旱处理下的性状表现是鉴定作物抗性强弱的最有效方法。相对指标可有效地消除不同背景差异,是目前作物抗性鉴定用得最多的方法^[7,13,15,17]。本研究发现,部分相对产量和品质指标在抗和不抗棉花品种(品系)间有显著或极显著差异,铃数则在不同抗旱性棉花品种(品系)间两两极显著差异,表明干旱胁迫下铃数是限制棉花产量的最主要产量因子。

4 结论

棉花的相对株高、籽棉产量、铃数、铃重、纤维上半部平均长度、断裂比强度和伸长率在抗旱性强和不具抗旱性的棉花间有显著或极显著差异,反映了不同抗旱性棉花的产量和品质在正常灌水和干旱处理下的综合特征差异,可作为棉花资源的抗旱性鉴定指标。

参考文献:

[1] Quisenberry J E et al. Use of transpiration decline curves to identify drought-tolerant cotton Germplasm [J]. CropSci, 1982, 22(5): 918-922

[2] 章杰,刘江娜,邓小艳,李志博,刘菲菲,郝忠玲,魏亦农. 干旱对特早熟陆地棉光合特性与产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(7):1397-1401

[3] 牟筱玲,鲍啸. 土壤水分胁迫对棉花叶片水分状况及光合作用的影响[J]. 中国棉花, 2003, 30(9): 9-10

[4] 李志博,杨敏,张荣华. 北疆棉花品种抗旱性初步评价及鉴定方法研究[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(6): 463-466

[5] Petterson D T, Highsmith M T. Competition of spurred anoda (Anoda cristata) and Velvetleaf (Abutilon theophrasti) with cotton

(Gossypium hirsutum) during simulated drought and recovery, CAB Abstracts 1990-1991

[6] 肖俊夫,刘祖贵,孙景生,段爱旺,张寄阳. 不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水, 1999, 18(1):23-27

[7] 程林梅,张原根,阎继耀,张和. 土壤干旱对棉花生理特性与产量的影响[J]. 棉花学报, 1995, 7(4):233-237

[8] 李少昆,肖璐,黄文华,左文平,陈天茹,张旺峰,汪朝阳. 不同时期干旱对棉花生产和产量的影响[J]. 石河子大学学报, 1992, 3(4):259-264

[9] 刘全义,张裕繁,严根土,刘金定,叶武威. 我国棉花耐旱碱研究的现状及前景[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1):117-122

[10] 刘金定,叶武威,樊宝相. 我国棉花抗逆研究及其利用[J]. 中国棉花, 1998, 25(3):5-6

[11] 徐飞鹏,李云开,任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用及发展的思考[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1):25-27

[12] 孙彩霞,沈秀瑛. 作物抗旱性鉴定指标及数量分析方法的研究进展[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1):49-51

[13] 王敏,杨万明,侯燕平,岳爱琴,李贵全,杜维俊. 不同类型大豆花英期抗旱性形态指标及其综合评价[J]. 核农学报, 2010, 24(1): 0154-0159

[14] 路贵和,安海润. 作物抗旱性鉴定方法与指标研究进展[J]. 山西农业科学, 1999, 27(4):39-43

[15] 于健. 棉花品种的抗旱遗传多样性分析及抗旱性评价[D]. 乌鲁木齐,新疆农业大学, 2008

[16] 袁佐清,张怀渝,王化新,李晚忱,陈志渝. 不同玉米自交系的抗旱力与超弱发光关系的研究[J]. 核农学报, 2003, 17(1): 35-40

[17] 申慧芳,李国柱. 不同抗旱性绿豆突变体的抗旱生理特性[J]. 核农学报, 2006, 20(5): 371-374

[18] Philippus D R van Heerden, Merope Tsimilli-Michael, Gert H J Kruger, Reto J. Strasser. Dark chilling effects on soybean genotypes during vegetative development: parallel studies of CO₂ assimilation, chlorophyll a fluorescence kinetics O-J-I-P and nitrogen fixation[J]. Physiologia Plantarum, 2003, 117:476-491

(责任编辑 邱爱枝)

(上接第 593 页)

[32] Shan Y. Effects of Simulated Acid Rain on Pinus densiflora: Inhibition of net photosynthesis by pheophytization of chlorophyll [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 103(1-4): 121-127

[33] 鲁美娟,江洪,李巍,余树全,曾波,蒋馥蔚,李佳,金清. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 5986-5994

[34] 陆晓民,詹秋文,盛伟. 模拟酸雨对杂交苏丹草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 2007, 21(4): 409-412

[35] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-345

[36] 郑飞翔,温达志,旷远文. 模拟酸雨对柚木幼苗生长、光合和水分利用的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(2): 93-99

[37] 周青,黄晓华,刘小林. 酸雨对3种木本植物的胁迫效应[J]. 环境科学, 2002, 23(5): 42-46

[38] 林世青,许春晖,张其德,徐黎,毛大璋,匡廷云. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J]. 植物学通报. 1992, 9(1): 1-16

[39] 邱栋梁,刘星辉,王宝华,陈烈. 模拟酸雨对荔枝叶片细胞膜透性的影响[J]. 福建农业大学学报, 2001, 30(1): 33-35

(责任编辑 邱爱枝)