

模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响

鲁美娟¹, 江 洪^{1,2,3,*}, 李 巍⁴, 余树全³, 曾 波¹, 蒋馥蔚¹, 李 佳³, 金 清³

(1. 西南大学生命科学学院三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;
3. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 杭州 311300; 4. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要:研究了模拟酸雨对亚热带典型用材树种和经济树种刨花楠(*Machilus pauhoi*)幼苗生长和光合生理的影响, 以期对浙江省引种刨花楠提供科学依据。结果表明, pH4.0 的模拟酸雨对刨花楠株高、地径和叶绿素含量无明显影响, 而 pH2.5 的模拟酸雨使株高显著降低; pH 为 4.0 的模拟酸雨对刨花楠的光合参数无显著影响, 而 pH 为 2.5 的酸雨处理则能明显提高刨花楠的胞间 CO₂ 浓度、暗呼吸速率以及光补偿点、增加气孔导度和蒸腾速率, 显著降低最大净光合速率; 相关分析和回归分析表明, 酸雨增加了刨花楠对环境的敏感性。

关键词:模拟酸雨; 刨花楠; 生长; 光合生理

文章编号: 1000-0933(2009)11-5986-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Effect of simulated acid rain on growth and photosynthetic Physiology of *Machilus pauhoi*

LU Mei-Juan¹, JIANG Hong^{1,2,3,*}, LI Wei⁴, YU Shu-Quan³, ZENG Bo¹, JIANG Fu-Wei¹, LI Jia³, JIN Qing³

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3 International Research Center of Spatial-Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China

4 College of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5986 ~ 5994.

Abstract: *Machilus pauhoi* is a typical subtropical precious timber and economical tree species. In order to provide scientific basis for the introduce of *Machilus pauhoi* in Zhejiang province, the effects of simulated acid rain (SAR) on its growth and photosynthesis were measured. The results showed that plant height distinctly reduced by pH2.5, but no significant impact on height, ground diameter and chlorophyll at pH4.0. SAR (pH 4.0) has no significant effect on photosynthetic indexes, while SAR (pH 2.5) improved the intercellular CO₂ concentration (*C_i*), the dark respiration rates (*R_d*) and light compensation point (*LCP*), increased stomatal conductance (*G_s*) and transpiration rate (*Tr*), resulting in that the maximum net photosynthesis (*A_{max}*) of *Machilus pauhoi* was significant lower. The result revealed the sensitivity of *Machilus pauhoi* to acid rain enhanced environment through correlation and regression analysis.

Key Words: simulated acid rain; *Machilus pauhoi*; growth; photosynthetic physiology

近年来, 酸雨已成为威胁人类生存的三大环境问题之一^[1], 对植物的伤害也受到国内外学者的广泛关注^[2-4]。目前的研究指出, 酸雨会影响植物的株高和地径^[5-7], 破坏叶片的上皮细胞^[4], 增加细胞膜的透

基金项目: 国家科技部 973 资助项目(2005CB422207 & 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目(40671132); 国家科技部数据共享平台建设资助项目(2005DKA32306 和 2006DKA32308); 国家科技部国际合作资助项目(20073819); 国家科技部重大科技基础资助项目(2007FY110300); 浙江省重大科技专项资助项目(2008C13G2100010)

收稿日期: 2008-12-22; 修订日期: 2009-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongjiang.china@gmail.com

性^[8, 9], 改变叶肉细胞中细胞器的结构^[10], 导致植物叶片产生可见伤害^[4, 11~14], 还可以改变植物体内酶的活性, 从而影响植物正常的光合生理功能^[8, 12, 15, 16]。光合作用是植物生长的基础, 大量研究表明酸雨影响了与植物光合作用相关的指标, 例如, 模拟酸雨可以降低拟单性木兰 (*Paramecia lotungensis*) 和杨梅 (*Myrica rubra*) 的叶绿素含量^[8, 12], 改变樟树 (*Cinnamomum camphora*) 的光饱和点 (light saturation point, *LSP*)、光补偿点 (light compensation point, *LCP*)、最大净光合速率 (maximum net photosynthetic rate, *Amax*)、表观量子效率 (apparent quantum efficiency, *AQE*)、暗呼吸速率 (dark respiration rates, *Rd*) 以及气孔导度 (stomatal conductance, *Gs*)^[17, 18]。

虽然模拟酸雨对植物影响的研究国内外有大量报道, 但对珍贵用材树种和经济树种——刨花楠 (*Machilus pauhoi*) 的研究较少, 且主要集中在生长特性、木材特性以及空间分布上^[19~21], 而刨花楠在酸雨环境中生长特性及光合生理的变化尚未见报道。刨花楠为樟科的常绿阔叶大乔木, 出材率 72.2%, 高于针叶及其它树种, 树皮率 7.28% 低于针叶树^[22]。浙江是全国木业大省, 70% 以上的木材原料依赖于省外市场, 原材料尤其是珍贵木材原料紧缺, 将制约浙江木材工业尤其是高档木制品制造业的可持续发展^[23], 所以在浙江省发展刨花楠无疑具有一定的优势, 但浙江省又是一个酸雨污染严重的省份^[24], 刨花楠能否在酸雨污染严重的地区生长的研究具有较大的理论和实践意义。本文以刨花楠幼苗为实验材料, 以受控实验来模拟酸雨对其生长和光合特性的影响, 旨在为浙江省引种刨花楠提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料及处理

本实验以刨花楠 (*Machilus pauhoi*) 幼苗为研究对象, 实验在浙江林学院的通风遮雨的大棚中进行。2006 年春季将生长基本一致的两年生刨花楠幼苗种植于 22cm × 27cm 的塑料盆中, 取当地的黄红壤 (微酸性, 肥力中等偏上) 做为栽培土壤, 盆内的土层厚度约为 24cm, 每盆 1 株, 生长期间保证充足的水分供应。经 4 个月的恢复生长, 于 2006 年 7 月开始进行模拟酸雨的喷淋实验, 根据浙江省常年降水中酸性离子的比例以及前人配制酸雨的方法^[25, 26], 将硫酸与硝酸按 8:1 (体积比) 配制成母液, 然后用水将其稀释成 pH 值为 5.6 (CK)、4.0、2.5 三个酸雨梯度, 每个梯度 10 个重复, 根据临安市多年的月均降水量, 平均每株植物每天喷淋的酸雨量约为 130ml (与当地总的降雨量基本持平), 期间适当补水, 对植物进行常规管理。实验进行至 2008 年 7 月时, 进行各项相关指标的测定。

1.2 测定方法

1.2.1 生长量

株高测定 从幼苗的基部到主茎顶部, 精确到 0.1cm

地径测定 用游标卡尺测定幼苗主茎基部的直径, 精确到 0.001cm

1.2.2 主要光合参数

从每个梯度中随机选取 5 株植物, 在每株植物的中上部选择一片当年生的成熟叶片 (顶端往下数第 5 至 7 片叶), 于天气晴朗的上午用 Li-6400 (LI-COR, Inc, USA) 开路系统对刨花楠进行光响应曲线的测定, 每个叶片记录一条 *Pn-PAR* 曲线。测定过程中气体流速控制在 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度控制在 37℃, 采用 Li-6400 红蓝光光源做内置光源, 设定光合有效辐射 (*PAR*) 为: 2 000, 1 500, 1 000, 600, 300, 200, 100, 80, 50, 20, 0, 测定时由高光强向低光强进行手动打点, 测定指标包括净光合速率 *Pn* ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度 *Gs* ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间二氧化碳浓度 *Ci* ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)、蒸腾速率 *Tr* ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、叶温下蒸汽压亏损 *VpdL* (kPa)、样本室温度 *T_{air}* (℃)、叶面温度 *T_{leaf}* (℃)、冷却器温度 *TBLK* (℃)、参比室 CO_2 浓度 $\text{CO}_2 \text{ R}$ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)、样本室 CO_2 浓度 $\text{CO}_2 \text{ S}$ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)、参比室水浓度 $\text{H}_2\text{O R}$ ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{mol}^{-1}$)、样本室水浓度 $\text{H}_2\text{O S}$ ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{mol}^{-1}$)、参比室相对湿度 *RH_R* (%) 以及样本室相对湿度 *RH_S* (%)。

1.2.3 叶绿素相对含量

用便携式叶绿素含量测定仪 SPAD-502 (SPAD, Japan) 在光合测定的相同叶片上同时进行叶绿素相对含

量的测定,每个梯度 5 个叶片,在每个叶片中脉两侧均匀选取 5 个点,这 10 个点的平均值为该叶片的 SPAD 值。

1.3 数据处理

以光合有效辐射(*PAR*)为横坐标,净光合速率(*Pn*)、胞间二氧化碳浓度(*Ci*)、气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)为纵坐标绘制光响应曲线,并利用 Photosyn Assistant 软件对 *Pn-PAR* 光响应曲线进行拟合,得到最大净光合速率(*Amax*)、暗呼吸速率(*Rd*)、光饱和点(*LSP*)、光补偿点(*LCP*)、表观量子效率(*AQE*),然后用 SPSS13.0 (SPSS Inc. USA)对实验数据进行处理和分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)分析不同酸雨梯度对刨花楠株高、地径、叶绿素含量、气体交换参数、光响应曲线参数的影响,用 LSD 多重比较检验不同酸雨处理间的差异显著性,相关分析采用 Pearson 相关分析,回归分析采用多元逐步回归分析。进行方差分析前对所有数据进行了正态性及方差齐性检验。

Photosyn Assistant 软件中进行光响应曲线拟合的方程为:

$$A = \frac{\phi \cdot Q + A_{\max} - \sqrt{(\phi \cdot Q + A_{\max})^2 - 4\phi \cdot Q \cdot K \cdot Q \cdot A_{\max}}}{2K} - R_{\text{day}}$$

式中,*A* 为净光合速率;*Q* 为光照强度; ϕ 为表观量子效率;*K* 为光合曲线的曲率,大小介于 0~1

2 结果与分析

2.1 不同酸雨梯度对刨花楠生长的影响

株高和地径是植物生长最终也是最直观的表现形式,由表 1 可以看出,随着 pH 值的降低,刨花楠的株高呈逐步下降的趋势,并存在着明显的正相关性($r=0.556, p=0.031$),pH 为 2.5 的酸雨处理使株高显著降低 24.94%;地径在不同的酸雨梯度之间则无显著差异,说明模拟酸雨对刨花楠的株高产生了负面影响,但对地径影响不太显著。两年的酸雨处理,pH2.5 的酸雨胁迫对刨花楠生长的影响较显著,但 pH4.0 的酸雨影响还不太明显,可能随着处理时间的延长,影响会逐渐加强。同时说明刨花楠对于一般的酸雨危害具有一定的抗性。

2.2 不同酸雨强度对叶绿素含量的影响

本实验中叶绿素的相对含量用叶片的 SPAD 值表示,它与叶绿素的含量呈正相关^[27, 28],可以用刨花楠的 SPAD 值代表叶绿素的含量^①,结果表明,pH 为 4.0 和 2.5 的模拟酸雨处理后,叶绿素的相对含量与对照(pH5.6)相比没有显著差异,说明酸雨对刨花楠叶绿素含量的影响不明显(图 1)。

2.3 不同酸雨强度对气体交换参数光响应曲线的影响

光是植物进行光合作用的能量来源,酸雨胁迫会使植物对光的反应发生变化^[17, 18]。刨花楠的净光合

速率在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 内随着 *PAR* 的升高呈线性增加,酸雨梯度间差异不大,其后缓慢上升,且各梯度间差异明显(图 2A)。*Ci* 则随着 *PAR* 的升高而降低, $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最低,大于 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时有所回升(图 2B)。*Gs* 和 *Tr* 的变化趋势相同,均随着 *PAR* 的升高而升高(图 2C、D)。

在同一 *PAR* 下,pH 为 2.5 的酸雨处理使刨花楠的 *Ci*、*Gs*、*Tr* 明显高于对照(图 2B、2C 和 2D),说明模拟酸雨降低了刨花楠对 CO_2 的固定^[29],增大了气孔导度,使蒸腾速率加快,水分损失加重, CO_2 的利用率降低,导致净光合速率下降(图 2A)。结果表明只有在酸雨中的氢离子达到一定浓度时,才会对叶片的气体交换参数

表 1 不同酸雨处理下株高和地径的变化

Table 1 Variety of plant height and ground diameter exposed to different simulated acid rain treatments

项目 Item	pH		
	5.6	4.0	2.5
株高 Plant Height (cm)	86.6 ± 8.6a	67.4 ± 3.9ab	65.0 ± 5.4 b
地径 Ground diameter (cm)	1.500 ± 0.107a	1.365 ± 0.094a	1.301 ± 0.059a

表中数据为平均数 ± 标准误,同一行标记不同字母表示 3 个酸雨处理间差异显著(显著性水平 $p=0.05$) Each value in the table represents mean ± standard error, in the same line different litters are significantly different among three treatments of acid rain ($p=0.05$)

① 宋晓东. 2008. 酸雨对浙江省森林生态系统危害的高光谱响应研究. 南京大学博士学位论文, 37~52

产生影响,进而影响其光合作用,最终影响刨花楠的生长。

2.4 不同酸雨强度对光响应曲线部分参数的影响

刨花楠在受到酸雨胁迫时,光响应曲线发生了变化(图2A),由光响应曲线得出的一些光合参数也可能会发生变化。与对照相比,pH4.0的酸雨胁迫,没有明显影响到 A_{max} 、 R_d 、 LSP 、 LCP 、 AQE 的值(图3);而 pH 为 2.5 的酸雨处理使 A_{max} 、 AQE 显著降低(图3A,3E), R_d 和 LCP 则显著升高(图3B和3D)。

由图3还可以看出,随着 pH 的降低,它的 A_{max} 、 AQE 逐步降低, R_d 、 LCP 逐渐升高, LSP 先升高后降低。这一结果表明,pH 为 4.0 的酸雨对光合参数的影响不明显,而 pH 为 2.5 的酸雨则对光合参数影响较显著,说明对刨花楠的光响应产生显著影响的酸雨阈值存在于 pH4.0 与 pH2.5 之间。pH2.5 的模拟酸雨提高了刨花楠的 R_d 和 LCP ,增加了有机物的消耗,降低了对弱光的利用能力,缩短了植物进行光合作用的时间,使光合作用有机物的积累量减少,影响刨花楠的生长。

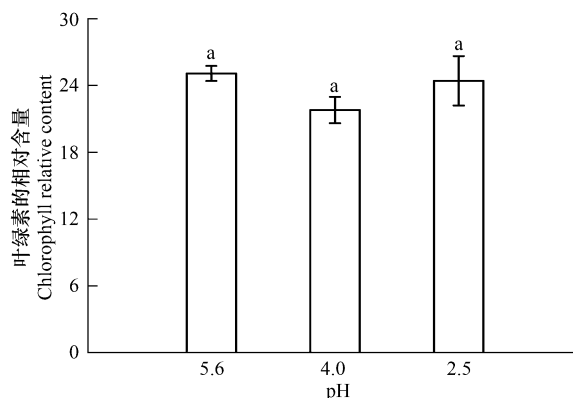


图1 不同酸雨梯度下叶绿素相对含量的变化

Fig. 1 Variety in chlorophyll relative content under different simulated acid rain treatments

图中数据为平均数 ± 标准误,不同字母表示3个酸雨梯度间差异显著(显著性水平 $p = 0.05$);下同 Each value in the figure represents mean ± standard error. Different letters indicate significantly different among three treatments of acid rain ($p = 0.05$); the same below

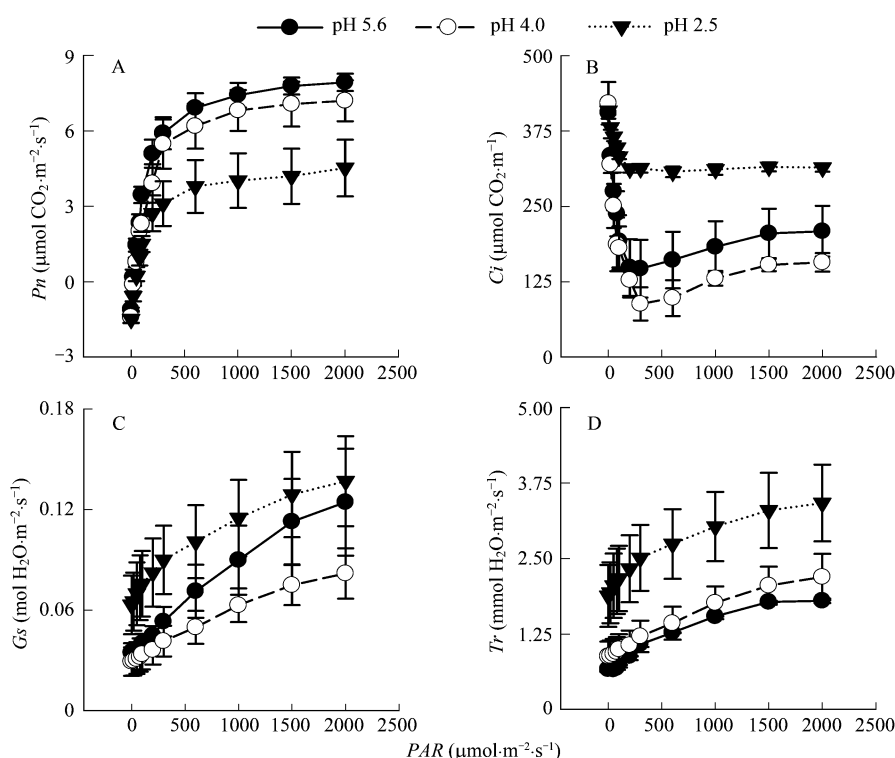


图2 不同酸雨梯度下的光响应曲线(平均值 ± 标准误)

Fig. 2 Light response curve under control and different gradients of simulated acid rain (mean ± SE)

A: 净光合速率 P_n , B: 胞间 CO_2 浓度 C_i , C: 气孔导度 G_s , D: 蒸腾速率 Tr A: net photosynthesis (P_n), B: intercellular CO_2 concentration (C_i), C: stomatal conductance (G_s), D: transpiration rate (Tr)

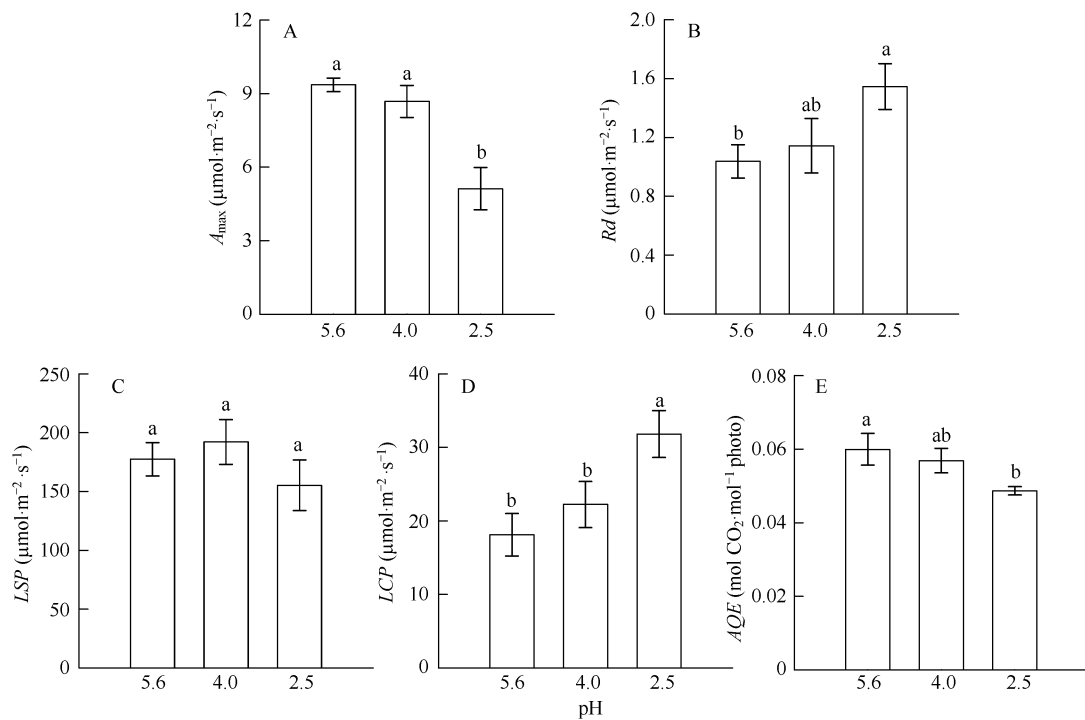


图3 不同酸雨梯度下刨花楠光合指标的变化(平均值±标准误)

Fig. 3 Changes of Photosynthetic indexes in *Machilus pauhoi* under control and different gradients of simulated acid rain (mean ± SE)

A:最大净光合速率(A_{max}) B:暗呼吸速率(R_d) C:光饱和点(LSP) D:光补偿点(LCP) E:表观量子效率(AQE) A: maximum net photosynthesis(A_{max}), B: dark respiration rates(R_d), C: light saturation point(LSP), D: light compensation point (LCP), E: apparent quantum efficiency (AQE)

2.5 在不同酸雨条件下,净光合速率 P_n 与各影响因子之间的相关性分析

植物的光合作用会受到各种因素的影响,将不同 pH 下影响 P_n 的因子进行了 pearson 相关性分析(表 2)显示,刨花楠的 P_n 在 pH5.6 时与 G_s 、 C_i 、 Tr 、 PAR 高度相关($P < 0.01$),与 CO_2S 相关($P < 0.05$),在 pH4.0 时与 G_s 、 C_i 、 Tr 、 V_{pdl} 、 CO_2S 、 RH_S 、 PAR 高度相关($P < 0.01$),与 H_2OS 相关($P < 0.05$),pH2.5 时与 G_s 、 C_i 、 Tr 、 CO_2S 、 H_2OS 、 RH_S 、 PAR 高度相关($P < 0.01$),与 V_{pdl} 、 H_2OR 相关($P < 0.05$)。

为进一步研究在不同酸雨梯度下对 P_n 的影响因素,本研究对不同酸雨梯度下影响 P_n 的因子进行了多元逐步回归分析,回归方程如表 3,对 P_n 影响较大的因子在 pH5.6 时为 Tr 、 C_i ,pH4.0 时为 PAR 、 C_i 、 G_s , pH2.5 时为 C_i 、 G_s 、 PAR 、 CO_2S 、 H_2OS 、 RH_S 。相关分析和回归分析的结果表明,在酸雨胁迫条件下, G_s 、 C_i 和 PAR 成为刨花楠进行光合作用的限制因子,且气孔导度对 P_n 的影响大于胞间二氧化碳浓度和光强。酸雨可以通过改变它的气孔导度和光强的利用范围而对净光合速率产生影响,与前面数据的分析相符合

表 2 不同酸雨处理下刨花楠净光合速率与其影响因子的相关分析
Table 2 Correlation analysis between net photosynthetic rate of *Machilus pauhoi* and it's impact factors under different acid rain treatments

	pH		
	5.6	4.0	2.5
G_s	0.556 **	0.737 **	0.757 **
C_i	-0.682 **	-0.638 **	-0.864 **
Tr	0.821 **	0.705 **	0.669 **
V_{pdl}	-0.006	-0.576 **	-0.282 *
T_{air}	-0.092	-0.138	0.175
T_{leaf}	-0.165	-0.209	0.099
T_{blk}	-0.118	-0.179	0.145
CO_2R	-0.160	0.176	-0.262
CO_2S	-0.281 *	-0.668 **	-0.648 **
H_2OR	-0.159	-0.181	0.299 *
H_2OS	-0.047	0.316 *	0.825 **
RH_R	-0.127	-0.037	-0.068
RH_S	-0.027	0.736 **	0.493 **
PAR	0.761 **	0.747 **	0.650 **

* ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

(图 2C、图 2B、图 3C 和图 3D)。另外,随着 pH 值的降低,刨花楠对净光合速率的影响因素也逐渐增多(表 2, 表 3),说明酸雨胁迫增加了它对环境的敏感性。

表 3 不同酸雨处理下刨花楠净光合速率与其影响因子的回归方程

Table 3 Regression equation between net photosynthetic rate of *Machilus pauhoi* and it's impact factors under different acid rain treatments

处理 Treatments	回归方程 Regression equation	R^2
pH5.6	$P_n = 2.59 + 4.501Tr - 0.014Ci$	0.89
pH4.0	$P_n = 2.863 + 0.001PAR - 0.014Ci + 69.284G_s$	0.888
pH2.5	$P_n = 25.84 - 0.015Ci + 7.46G_s + 0.001PAR - 0.126CO_2S + 0.307H_2OS + 0.322RH_S$	0.904

3 讨论

酸雨对植物的影响最终反映到植物的生长上,植物株高和地径是植物生长的重要指标,不同的酸雨梯度对同一植物生长量的影响不同^[30,31],同一酸雨梯度对不同植物也会产生不同的影响^[6],本研究发现,刨花楠的株高随着 pH 的降低而降低,但与对照相比,只有 pH2.5 的酸雨处理使株高明显降低(表 1),这与许泽宏的研究结果相一致^[14],但与模拟酸雨促进一些植物高生长^[30,32]的结论相反。而酸雨对刨花楠的地径没有产生显著影响,Fan Houbac^[5]对阔叶树的研究发现,pH3.5 的模拟酸雨促进了樟树(*Cinnamomum camphora*),楝树(*Melia azedarach*),复羽叶栎树(*Koelreuteria bipinnata*)地径的生长,而樊后保^[33]发现 pH2.0 的模拟酸雨严重抑制了女贞(*Ligustrum lucidum*)幼苗地径的生长。不同树种对酸雨敏感性的差异、酸雨处理时间的差异以及植物对酸雨的伤害所表现出形态差异的时间不同是造成实验结果不同的原因。

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,其含量受各种胁迫条件的影响。据研究报道,模拟酸雨可以使一些农作物^[34,35]和树木幼苗叶绿素含量降低^[5,33,36,37]。本研究发现 pH4.0 和 2.5 的酸雨处理后,叶绿素的含量与对照相比无显著差异,这与前人的研究结果有所不同。杜仲(*Eucommia ulmoides*)的叶绿素含量随酸雨 pH 值降低而降低^[26],而赤松(*Pinus densiflora*)的叶绿素含量随酸雨 pH 值的降低而升高^[38],胁迫对植物叶绿素的影响可能有两方面,一方面是叶绿素的合成受阻,另一方面是叶绿素的降解加速,但是酸雨胁迫下叶绿素含量的变化究竟是影响叶绿素的合成还是降解还未见报道。另外,本研究测定的是叶绿素的相对含量,而并非是叶绿素的真正含量,相对含量与真正含量之间可能会存在着一定的误差,这也是本研究结果与前人研究结果不同的一个原因。

光合作用是植物进行生长的基础,对龙眼(*Dimorcarpus longana*)的研究结果表明,酸雨胁迫抑制了其光合作用,使光补偿点上升,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率下降^[39]。本研究结果表明,刨花楠的 P_n 随着 pH 的降低而降低(图 2A),而 Tr 则随着 pH 的降低而升高(图 2D), Tr 的增加可能会引起水分亏缺加重而导致 P_n 的下降。 C_i 的变化可以表征植物对 CO_2 利用率的高低^[29],而 G_s 可以反映气孔的开放程度^[40],在本实验中,pH2.5 的酸雨胁迫使刨花楠的 C_i 和 G_s 上升(图 2B、2C),而 pH4.0 则使其降低。有研究表明当硫的浓度超过一定量时会对植物叶片产生伤害^[41],引起 P_n 下降^[42],最终影响植物的生长。酸雨对刨花楠气孔导度的影响可能会改变酸雨的主要成分硫进入叶片中的量,而使刨花楠的 P_n 降低。

光是植物进行光合作用的能量来源,不同植物在不同的胁迫条件下,对光的利用所产生的变化也不相同,对樟树的研究发现,pH4.0 的模拟酸雨使 A_{max} 、 R_d 、 LCP 、 LSP 、 AQE 增高^[17],而齐泽民发现 pH4.0 ~ 5.6 的模拟酸雨对杜仲的 LCP 、 LSP 和 A_{max} 无显著影响,pH3.5 ~ 2.5 的模拟酸雨使杜仲的 LCP 、 LSP 、 A_{max} 显著下降^[26]。具有较高 A_{max} 的植物可以较多的利用叶片吸收的光能,减少对光合结构的光破坏^[43],在本研究中,pH2.5 的酸雨胁迫使刨花楠的 A_{max} 显著降低,说明酸雨胁迫可能增加了其光合结构的光破坏。有研究发现模拟酸雨还可以使马尾松和杉木的呼吸速率提高^[44],本研究也得到了相似的结果,可能是酸雨破坏了叶片线粒体的结果^[45]。 LSP 、 LCP 的大小反映植物对光强的利用范围,pH2.5 的酸雨使 LSP 降低而使 LCP 显著增加,降低了植物可利用光强的范围,进而影响植物同化 CO_2 的能力。

综合来看,酸雨对刨花楠生长与光合方面的影响不是通过影响叶绿素的含量起作用的,而是通过影响一

些内在的生理生化过程如蒸腾、呼吸以及对光的利用而起作用的,但究竟哪种因素占主导作用还需要进一步的研究。同时研究表明影响刨花楠的酸雨阈值在 pH4.0 与 pH2.5 之间,随着酸雨胁迫的加重,对 P_n 的影响因子逐渐增多(表 2,表 3),酸雨增加了刨花楠对环境的敏感性。这种敏感性可能会引起刨花楠在酸雨条件对环境的适应性降低,而给这种珍贵用材树种和经济树种带来灾难。虽然高强度的酸雨(pH2.5)对刨花楠具有一定的消极影响,但自然界中的酸雨没有模拟的酸雨强度大,浙江省在 2007 年的酸雨平均值为 4.32^①,因此根据本研究的结果,刨花楠就其株高、地径和部分光合生理指标而言,能够耐受一定程度的酸雨胁迫,pH 大于 4.0 的酸雨对其无显著影响,可以考虑在浙江省进行引种。但是本实验是在受控条件下对刨花楠幼苗进行的研究,随着刨花楠树龄的增大,在自然条件下,它对酸雨的反应模式会不会发生变化,究竟在浙江省哪些区域进行大面积种植最合适还需要做进一步研究。

References:

- [1] Zhuang J, Chen F F, Chen Y S, Wu R J. Review on study of acid rain injury to forest trees. *Journal of West China Forestry Science*, 2006, 35 (1): 129—133.
- [2] Chen X L, He D J, Hong W, Liu R S, Bian L L, Wang Y T. Research advance in acid rain injury mechanism to garden plants. *Subtropical Agriculture Research*, 2007, 2(2): 99—103.
- [3] Meng C F, Jiang P K, Cao Z H, Xu Q F, Zhou G M. Progress on mechanism of acid rain harming plants and its controlling countermeasure. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(3): 208—212.
- [4] Francisco Sant'Anna-Santos B, Campos da Silva L, Alves Azevedo A, Marcos de Araujo J, Figueiredo Alves E, Antonio Monteiro da Silva E, Aguiar R. Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1-3): 158—168.
- [5] Fan H B, Wang Y H. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China. *Forest Ecology and Management*, 2000, 126(3): 321—329.
- [6] Dixon M J, Kuja A L. Effects of simulated acid rain on the growth, nutrition, foliar pigments and photosynthetic rates of sugar maple and white spruce seedlings. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1995, 83(3): 219—236.
- [7] Liu K H, Yu F M, Peng S L, Fang Y T, Li F R. Effects of simulated acid on saplings of *Taxus* species. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 309—312.
- [8] Li Z G, Weng M L, Jiang W, Jiang W B. Effects of simulated acid rain on some physiological indices of *Parakmeria lotungensis* seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 31—34.
- [9] Huang J C, Xiao Y, Zhang Y X, Li J N. Effects of simulated acid rain on the growth and physiological reaction of Mango. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2003, 24(1): 28—30.
- [10] Bellani L M, Rinallo C, Muccifora S, Gori P. Effects of simulated acid rain on pollen physiology and ultrastructure in the apple. *Environmental Pollution*, 1997, 95(3): 357—362.
- [11] Jacobson J, Osmeloski J O E, Yamada K, Heller L. The influence of simulated acidic rain on vegetative and reproductive tissues of cucumber (*Cucumis sativus*). *New Phytologist*, 1987, 105(1): 139—147.
- [12] Liu J F. Stress effects of simulated acid rain on *Myrica rubra*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(10): 110—113.
- [13] Hogan G D. Effect of simulated acid rain on physiology, growth and foliar nutrient concentrations of sugar maple. *Chemosphere*, 1998, 36(4-5): 633—638.
- [14] Xu Z H, Luo Y, Wang Y, Han S H. Effect of simulated acid rain on bean plant growth. *Chinese Journal of Microecology*, 2001, 13(1): 26—29.
- [15] Li Z G, Jiang W B, Weng M L, Jiang W. Effects of simulated acid rain on membrane lipid peroxidation and antioxidant system of *Magnoliaceae* tree species. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 779—784.
- [16] Zhang J P, Wang J J, Zhao Z M, Chen Y, Dou W. Effects of simulated acid rain on physiological and biochemical characters of eggplant, the host plant of *Tetranychus cinnabarinus*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 450—454.
- [17] Tian D L, Fu X P, Fang X, Xiang W H. Effect of simulated acid rain on photosynthetic characteristics in *Cinnamomum camphora* seedlings. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(8): 29—35.
- [18] Fu X P, Tian D L, Yan W D. The effects of simulated acid rain on the diurnal changes of *Cinnamomum camphora* photosynthesis. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, 26(6): 38—43.

① 《2007 年浙江省环境状况公报》

- [19] Zhong Q L, Hu S Z, Huang Z Q, Cheng J H, Xiao S Q. Growth characters and effects of ecological factors on *Machilus pauhoi*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(2): 165—168.
- [20] Zhong Q L, Zhang Z Y, Zhang C H, Zhou H L, Huang Z Q. The dynamic analysis of the biomass and the structure of *Machilus pauhoi*. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensi*, 2001, 23(4): 533—536.
- [21] Zhong Z Q, Tan Z F, Yang Z L, Xia J Q, Yang W R. The prospect development of analysis and characteristic of growth on *Machilus pauhoi*. *Journal of Hunan Forestry Science & Technology*, 1997, 24(2): 50—52.
- [22] Wang D C. Concern on precious evergreen hardwood species: *Machilus pauhoi*. *Forestry Economics*, 2002, (3): 65.
- [23] Bao B F, Weng F J, Ma L F. The sustainable development of the wood industry in Zhejiang Province. *China Wood Industry*, 2006, 20(2): 80—82.
- [24] Mou Y M, Zhu G L. The study of acid rain distribution of Zhejiang province based on GIS. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, 21(3): 356—360.
- [25] Xu D C. Pollution and prevention of acid rain-control measures and trend in Zhejiang province. *Energy Environmental Protection*, 1995, 9(4): 25—28.
- [26] Qi Z M, Zhong Z C. Effect of simulated acid rain on photosynthesis and growth of *Eucommia ulmoides* Oliv. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2006, 31(2): 151—156.
- [27] Jiang L F, Shi F C, Wang H T, Zu Y G. Application tryout of chlorophyll meter SPAD-502 in forestry. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1543—1548.
- [28] Lei Z X, Ai T C, Li F M, Dong W. The relationships between SPAD readings and the contents of chlorophyll and nitrogen in strawberry leaves. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2001, 21(2): 138—140.
- [29] Liu Q Z, Dong H M, Liu P, Zhang L S, Wang F C. Studies on the photosynthetic characteristics of chestnut trees. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(4): 335—338.
- [30] Liang J, Mai B R, Zheng Y F, Li L, Tang X Y, Wu R J. Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 274—283.
- [31] Zheng F X, Wen D Z, Kuang Y W. Effects of simulated acid rain on the growth, photosynthesis and water use efficiency in *tectona grandis*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2006, 14(2): 93—99.
- [32] Liao G S, Xu J X, Xu H, Zhuang X Y. Effects of simulated acid rain on growth of *Cassia surattensis* seedlings. *Guangdong Landscape Architecture*, 2005, 31(5): 37—41.
- [33] Fan H B, Zang R G, Kosuke W. Responses of seeds and seedlings of *Ligustrum lucidum* to simulated acid rain. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(6): 90—94.
- [34] Yang M X, Zheng H M, Zhang W F, Huang L A, Xu H Z. Effects of artificial acid rain on growth and physiological indexes of flowering chinese cabbage. *Journal of ZhongkaiAgrotechnical College*, 2001, 14(3): 38—42.
- [35] Muthuchelian K, Nedunchezian N, Kulandaivelu G. Acid rain: Acidic mist-induced response in growth and photosynthetic activities on crop plants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1994, 26(4): 521—526.
- [36] Qiu D L, Liu X H. Effects of simulated acid rain on chloroplast activity in *Dimorcarpus longana* Lour. cv. *wulongling* leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1559—1562.
- [37] Yu C Z, Wen D Z, Peng C L. Sensitivity and resistance of three woody species to acid rain pollution. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 86—90.
- [38] Shan Y. Effects of simulated acid rain on *Pinus densiflora*: Inhibition of net photosynthesis by the pheophytization of chlorophyll. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 103(1-4): 121—127.
- [39] Qiu D L, Liu X H, Guo S Z. Effects of simulated acid rain and Chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of longan. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 441—446.
- [40] Xie T L, Shen Y Y, Shao X Q, Gao C Y. Differences in photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency between four legume species on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1679—1686.
- [41] Chao H F, Taylor O. C. Dose-injury relationship to SO₂ in plants. *Acta Ecologica Sinica*, 1986, 6(2): 114—119.
- [42] Zhu Y H, Tu N M, Xiao H Q, Guan G S, Wang H, Cai Q, Deng L C, Wei Y, Yi D, Huang Z C, Li H L. Effects of sulfurnutrition on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of tobacco leaves. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1000—1005.
- [43] Wang B Y, Feng Y L. Effects of growth light intensities on photosynthesis in seedlings of two tropical rain forest species. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 23—30.
- [44] Shan Y F, Feng Z W. Effects of acid rain on youngling of *pinus massoniana* and *cunninghamia lanceolata*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1988, 8(3): 307—315.
- [45] Wang W. Study of submicroscopic structure, microscope structure and part physiological indexes in brassica chinensis under simulated acid rain treatment. *Environmental Science*, 1988, 9(3): 12—17.

参考文献:

- [1] 庄捷,陈奋飞,陈岩松,吴若菁. 酸雨对林木伤害的研究. 西部林业科学, 2006, 35(1): 129~133.
- [2] 陈笑玲,何东进,洪伟,刘勇生,卞莉莉,王彦涛. 酸雨胁迫对园林植物伤害机理的研究进展. 亚热带农业研究, 2007, 2(2): 99~103.
- [3] 孟赐福,姜培坤,曹志洪,徐秋芳,周国模. 酸雨对植物的危害机理及其防治对策研究进展. 浙江农业学报, 2008, 20(3): 208~212.
- [7] 刘可慧,于方明,彭少麟,方运霆,李富荣. 模拟酸雨对珍稀濒危植物红豆杉幼苗的影响研究. 生态环境, 2007, 16(2): 309~312.
- [8] 李志国,翁忙玲,姜武,姜卫兵. 模拟酸雨对乐东拟单性木兰幼苗部分生理指标的影响. 生态学杂志, 2007, 26(1): 31~34.
- [9] 黄建昌,肖艳,张运新,李娟浓. 模拟酸雨对芒果的生理伤害和生长的影响. 热带作物学报, 2003, 24(1): 28~30.
- [12] 刘建福. 模拟酸雨对杨梅生理生化特征的影响. 中国农学通报, 2007, 23(10): 110~113.
- [14] 许泽宏,罗英,王煜,韩善华. 模拟酸雨对蚕豆植物生长的影响. 中国微生物学杂志, 2001, 13(1): 26~29.
- [15] 李志国,姜卫兵,翁忙玲,姜武. 模拟酸雨对木兰科树种叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响. 生态环境, 2007, 16(3): 779~784.
- [16] 张建萍,王进军,赵志模,陈洋,豆威. 模拟酸雨对朱砂叶螨寄主植物三月早茄生理生化的影响. 应用生态学报, 2005, 16(3): 450~454.
- [17] 田大伦,付晓萍,方晰,项文化. 模拟酸雨对樟树幼苗光合特性的影响. 林业科学, 2007, 43(8): 29~35.
- [18] 付晓萍,田大伦,闫文德. 模拟酸雨对樟树光合日变化的影响. 中南林学院学报, 2006, 26(6): 38~43.
- [19] 钟全林,胡松竹,黄志强,程建华,肖水清. 刨花楠生长特性及其生态因子影响分析. 林业科学, 2002, 38(2): 165~168.
- [20] 钟全林,张振瀛,张春华,周海林,黄志强. 刨花楠生物量及其结构动态分析. 江西农业大学学报, 2001, 23(4): 533~536.
- [21] 钟智群,谭梓峰,杨志玲,夏景青,杨文嵘. 刨花楠生长发育特点及开发前景分析. 湖南林业科技, 1997, 24(2): 50~52.
- [22] 王德昌. 关注珍贵常绿阔叶用材树——刨花楠. 林业经济, 2002, (3): 65.
- [23] 鲍滨福,翁甫金,马灵飞. 浙江木材工业的可持续发展. 木材工业, 2006, 20(2): 80~82.
- [24] 牟永铭,朱光良. 基于 GIS 技术的浙江省酸雨区分布研究. 科技通报, 2005, 21(3): 356~360.
- [25] 徐德才. 酸雨污染与防治——浙江区域酸雨趋势与防治对策. 能源环境保护, 1995, 9(4): 25~28.
- [26] 齐泽民,钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响. 西南师范大学学报(自然科学版), 2006, 31(2): 151~156.
- [27] 姜丽芬,石福臣,王化田,祖元刚. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1543~1548.
- [28] 雷泽湘,艾天成,李方敏,董维. 草莓叶片叶绿素含量、含氮量与 SPAD 值间的关系. 湖北农学院学报, 2001, 21(2): 138~140.
- [29] 刘庆忠,董合敏,刘鹏,张力思,王凤才. 板栗的光合特性研究. 果树学报, 2005, 22(4): 335~338.
- [30] 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. 生态学报, 2008, 28(1): 274~283.
- [31] 郑飞翔,温达志,旷远文. 模拟酸雨对柚木幼苗生长、光合与水分利用的影响. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(2): 93~99.
- [32] 廖广社,许建新,许涵,庄雪影. 模拟酸雨对黄槐幼苗生长的影响. 广东园林, 2005, 31(5): 37~41.
- [33] 樊后保,臧润国, Kosuke W. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应. 林业科学, 2000, 36(6): 90~94.
- [34] 杨妙贤,郑慧明,张伟峰,黄良爱,许汉珍. 模拟酸雨对菜心生长与部分生理指标的影响. 仲恺农业技术学院学报, 2001, 14(3): 38~42.
- [36] 邱栋梁,刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶绿体活性的影响. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1559~1562.
- [37] 余春珠,温达志,彭长连. 三种木本植物对酸雨的敏感性和抗性. 生态环境, 2005, 14(1): 86~90.
- [39] 邱栋梁,刘星辉,郭素枝. 模拟酸雨对龙眼叶片气体交换和叶绿素 a 荧光参数的影响(英文). 植物生态学报, 2002, 26(4): 441~446.
- [40] 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. 生态学报, 2004, 24(8): 1679~1686.
- [41] 曹洪法, O C 泰. 二氧化硫剂量与植物急性伤害关系. 生态学报, 1986, 6(2): 114~119.
- [42] 朱英华,屠乃美,肖汉乾,关广晟,王辉,蔡奇,邓力超,危跃,易迪,黄泽春,李海林. 硫对烟草叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1000~1005.
- [43] 王博轶,冯玉龙. 生长环境光强对两种热带雨林树种幼苗光合作用的影响. 生态学报, 2005, 25(1): 23~30.
- [44] 单运峰,冯宗炜. 模拟酸雨对马尾松和杉木幼树的影响. 环境科学学报, 1988, 8(3): 307~315.
- [45] 王玮. 模拟酸雨处理的青菜显微和亚显微结构观察及部分生理指标测定. 环境科学, 1988, 9(3): 12~17.