

模拟酸雨对柚木幼苗生长、光合与水分利用的影响

郑飞翔^{1,2}, 温达志^{1*}, 旷远文^{1,2}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:模拟 pH 6.5 (对照)、4.5 和 2.5 三个酸雨梯度, 研究其对 1 a 生组培柚木(*Tectona grandis* L. f.) 幼苗生长、光合与水分利用的影响。结果表明, 尽管不同处理间的各项生理指标差异不明显, 但模拟酸雨对柚木形态构件参数造成较严重的影响。pH4.5 和 pH2.5 处理组柚木基径(D)和树高(H)增长明显下降, 使得 D²H 下降更加显著; 不同处理下柚木叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(E)日变化趋于一致, 气孔导度(g_s)日变化与对应的叶片净光合速率日变化十分相似, 同时, 对照与两个处理的 P_n 与 g_s 之间都表现正相关 (p<0.01), 且在 pH4.5 处理表现更为显著, 但是对照和两个处理的 E 与 g_s 的线性关系不显著; pH4.5 和 2.5 处理的水分利用效率(WUE)日变化趋于一致; 对照胞间 CO₂ 浓度与大气 CO₂ 浓度比(C_i/C_a)均值最低, 表明对照柚木对 CO₂ 利用最有效。

关键词:模拟酸雨; 柚木; 净光合速率; 气孔导度; 蒸腾速率; 水分利用效率

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2006)02-0093-07

Effects of Simulated Acid Rain on the Growth, Photosynthesis and Water Use Efficiency in *Tectona grandis*

ZHENG Fei-xiang^{1,2}, WEN Da-zhi^{1*}, KUANG Yuan-wen^{1,2}

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: One-year-old seedlings of teak (*Tectona grandis* L. f., Verbenaceae) from tissue culture were potted for simulated acid rain experiments in Guangzhou. Acid solution was prepared with H₂SO₄ and HNO₃ adjusting to pH2.5, pH4.5 and pH6.5 for control. Seedlings were applied with acid solution once with 3 days after potting for 4 weeks from 10 June to 20 October, 2000, to study the effects of stimulated acid rain on the growth, photosynthesis and water use efficiency in teak. The results showed that the morphological parameters of the investigated seedlings were influenced significantly by acid application although no statistical difference in physiological parameters were found among treatments. The basal diameter (D) and plant height(H) of teak, particularly their combination (D²H) declined under pH4.5 and pH2.5. There were no difference in net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (E) and stomatal conductance (g_s) between different treatments. For all treatments, P_n was positively correlated with g_s, especially under pH4.5, but the relation of E with g_s was relatively low. Diurnal changes in water use efficiency (WUE) of the plants treated with pH4.5 and pH2.5 solutions were quite similar with the exception of those treated with pH6.5. The average ratio of intracellular CO₂ concentration and ambient CO₂ concentration (C_i/C_a) was lowest in control (pH6.5), compared with other two acid treatments, implying that teak in the control was most effective in CO₂ utilization.

收稿日期: 2005-09-01 接受日期: 2005-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(30370283), 广东省自然科学基金项目(04002306) 和佛山市科技发展专项基金(03020091)联合资助

* 通讯作者 Corresponding author

Key word: Simulated acid rain; *Tectona grandis*; Net photosynthetic rate; Stomatal conductance; Transpiration rate; Water use efficiency

柚木 (*Tectona grandis* L. f.) 又称胭脂树、紫柚木、血树, 属马鞭草科柚木属, 是一种落叶或半落叶大乔木, 树高达 40–50 m, 胸径 2–2.5 m, 干通直。柚木原产缅甸、泰国、印度和印度尼西亚、老挝等, 是东南亚的主要造林树种, 也是名贵庭园风景树种。我国自 20 世纪 60 年代开始引种栽培柚木, 至今在云南、海南、福建、广西、广东南部和台湾省均有较大面积的柚木林生产和经营^[1,2]。随着栽培面积的不断扩大, 柚木栽培和育种技术逐步受到重视。但是, 相对于杉木、马尾松等传统用材树种而言, 柚木的实验研究资料比较缺乏, 而且, 已有的研究多侧重其育苗造林技术、遗传品质、生长性状质量评价, 很少涉及它的生理生态特性, 尤其是污染环境胁迫下的响应与调节机理^[3,4]。

随着工业和经济的快速发展, 煤、石油和天然气的消耗大量增加, 使近地高空的大气 SO_x 、HF、 NO_x 和夹杂在悬浮颗粒物中重金属的浓度不断升高, 导致华南地区出现大面积的酸性降水, 成为我国酸雨危害最严重的中心区域之一^[5,6]。大量研究表明, 酸雨可以从多个方面对植物造成危害。酸雨对植物叶片具有淋洗作用, 其中钾、钙、镁的淋洗量最大, 造成植物叶片营养元素的大量损失^[7]。酸雨可以导致土壤酸化, 土壤中的营养元素钾、钙、钠、镁会被释放出来并被雨水淋溶, 引起土壤中营养元素不足, 使土壤变得贫瘠, 从而影响植物生长, 造成土壤的生产力下降^[8,9]。此外, 酸雨能够使某些重金属如铝的活化, 伤害植物根系^[10], 抑制某些土壤微生物的繁殖, 降低土壤中酶以及固氮菌、细菌和放线菌等的活性, 从而使植物吸收营养受到影响^[11]。酸雨对植物的伤害程度与酸雨的酸性程度成正比^[12]。许多研究人员通过模拟酸雨来研究酸雨与植物之间的相互作用^[13,14]。本文通过模拟酸雨实验研究酸雨对柚木幼苗生长、光合与水分利用的影响, 以期了解酸雨胁迫下柚木的生理生态特性, 为柚木栽培和育种提供参考。

1 材料和方法

1.1 植物材料

供试验的柚木 (*Tectona grandis* L. f.) 为 1 a 生

组培、带土袋苗, 取自广州市龙洞苗木培育场, 单株基茎、高度基本一致, 叶片数相等。苗木于 2000 年 5 月中旬盆栽于泥炭土和粘土 (体积比 2:1) 混合的基质中, 种植于广州市中国科学院华南植物园内, 在半遮荫环境下经过 4 周的生长适应后进行施酸处理, 每个处理共 5 盆苗作为重复。

1.2 试验设计

酸溶液的配制 由于天然降雨成分、浓度和发生频率的复杂性和降雨的不连续性给准确模拟现实酸雨带来极大困难。本试验以自来水为母液作对照, 在实验期内平均 pH 值为 6.5, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度分别为 72.5、44.5、53、128、0.9、26 和 $35 \mu\text{mol L}^{-1}$ 。根据广州地区 1997 年酸雨中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 摩尔比为 2.74^[15], 计算所需要的给定浓度的 H_2SO_4 和 HNO_3 的体积, 然后用自来水调成 pH 值为 4.5 和 2.5 的酸溶液。

试验过程 于 2000 年 6 月 10 日开始模拟酸雨处理, 隔 3 d 进行 1 次, 持续至 10 月 20 日结束, 之后树苗在自然状态下生长一个月。每次分别进行喷洒和表土浇灌。具体做法是喷雾器中盛预先配置好的对应 pH 值的酸溶液, 均匀喷洒幼苗, 每个处理每次持续 3 min, 之后用玻璃烧杯将对应酸度的溶液直接施入根际周围, 每次每盆苗 50 ml。

1.2 测定指标

生长参数 用千分尺测量基茎, 有效读数为 0.01 cm, 取东西、南北测定的平均值; 常用钢尺测量苗高, 有效数保留至 0.1 cm。

气体交换参数 用便携式 LCA-4 光合 - 蒸腾仪开放气路系统 (ADC, England) 测定, 叶室入气口与离地 3 m 的气杆连接。在模拟酸雨处理结束前一个星期, 选择顶部完全展开的成熟叶进行测定, 每个处理 5 个样本重复后取平均值, 分别在 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00 进行。每次测定需 1–2 min, 待读数稳定后按下存贮键。获得的参数包括净光合速率 P_n 、蒸腾速率 E 、气孔导度 g_s 、胞间 CO_2 浓度 C_i , 以及叶室、叶面光强 Q_{ch} 、 Q_{leaf} , 叶室、叶面温度 T_{ch} 、 T_{leaf} , 大气 CO_2 浓度 C_a 等环境参数。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel2003 和 SPSS13.0 数据分析软件对所得数据进行处理。

2 实验结果

2.1 基径(D)、株高(H)和 D²H 生长动态

如图 1A 所示,在 6 月 10 日酸处理开始时,对照、pH4.5 和 pH2.5 处理下的基茎分别为 0.80、0.83 和 0.83 cm,处理间不存在显著差异。经过 135 d (10 月 20 日)酸处理后,基茎分别为 2.66、2.27 和 2.14 cm。如果设定对照为 100%,那么经 pH4.5 和

pH2.5 处理后,基径比对照分别下降了 14.7% 和 19.5%。酸处理停止后的 1 个月内,基茎生长有所恢复,绝对增量为 0.30、0.37 和 0.55 cm。

同样,在 6 月 10 日酸处理开始时,对照、pH4.5 和 pH2.5 处理的柚木高度分别为 22.0、23.8 和 22.8 cm (图 1B)。经过 135 d 处理后,10 月 20 日柚木高度分别为 75.5、70.3 和 55.8 cm,后二者分别比前者下降了 13.9% 和 28.7%。酸处理停止后的大约 30 d 内,株高绝对增量分别为 -0.2、-0.5 和 0.2 cm,表明柚木株高生长在 10 月底几乎停止,停止酸处理也未见有恢复的迹象。

基径(D)和株高(H)是树木测度的重要指标,选用组合变量 D²H 更能真实反映植物茎干的生长状况。图 1C 可见,在处理之前(6 月 10 日),对照、pH4.5 和 pH2.5 处理下柚木 D²H 分别为 14.1、16.4 和 15.7 cm³,酸处理 135 d 后(10 月 21 日)分别为 342.5、248.5 和 176.8 cm³。如果将对照的增长设定为 100%,那么 pH4.5 和 pH2.5 处理下分别为 72.6% 和 51.6%,即分别减少了 27.4% 和 48.4%。酸处理结束后,D²H 分别为 444.6、353.4 和 304.4 cm³,后二者分别是对照的 79.5% 和 68.5%,与处理期间相比有所恢复。停止酸处理期间 D²H 绝对增量分别为 102.1、104.9 和 127.2 cm³。

2.2 叶面温度的日变化

如图 2A 所示,对照和两个处理的叶面温度 T_{leaf} 在中午前后最大,12:00 和 14:00 最高,分别为 38.9–42.5°C 和 36.5–39.8°C,其次是 16:00,在 32.7–35.9°C 之间,上午 8:00、10:00 和日落前 18:00 较低,维持在 30°C 左右。此外,不同处理间柚木的 T_{leaf} 存在一定差异,对照与 pH4.5 处理的相对一致,pH2.5 处理柚木 T_{leaf} 在 12:00–16:00 时间段比对照和 pH4.5 处理的低约 3.2–3.6°C。

2.3 叶片净光合速率 P_n 与气孔导度 g_s 的日变化

如图 3A 所示,不同处理的柚木叶片净光合速率 P_n 日变化趋势一致,呈双峰型,最大值出现在上午 8:00,分别为 9.44(对照)、9.69 (pH=4.5) 和 8.45 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (pH2.5),在午间 12:00 分别降至 3.68、3.59 和 2.93 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,随后开始回升,16:00 前后形成另一个最高值,分别为 6.78、6.73 和 5.91 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,18:00 前后降为一天之最低点,分别为 2.96、2.60 和 2.86 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。 P_n 日均值分别为

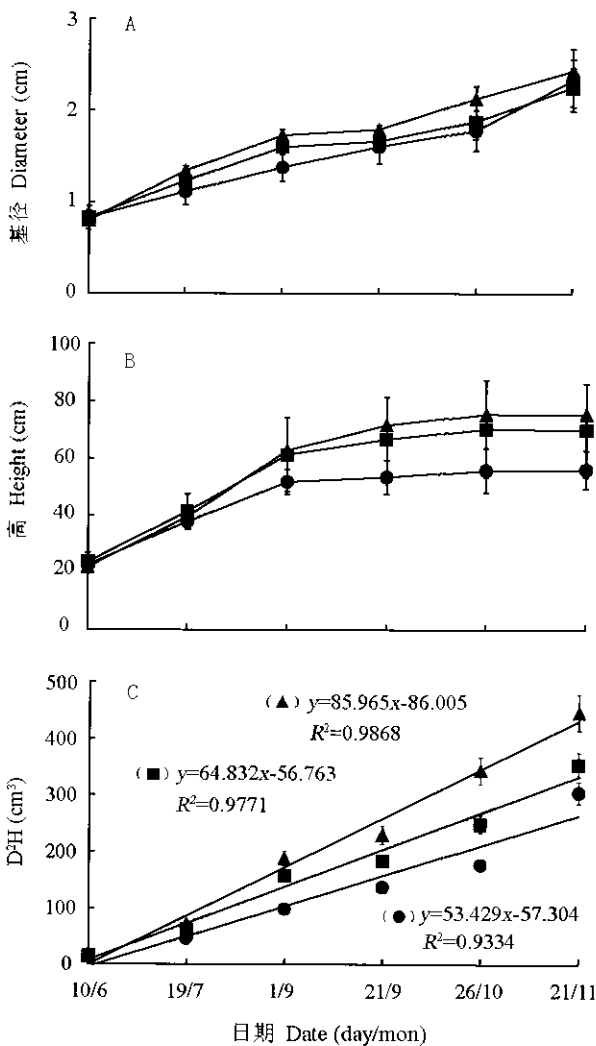


图 1 pH6.5(▲)、pH4.5(■)和 pH2.5(●)处理下柚木基径(A)、株高(B)和 D²H(C)生长变化

Fig. 1 Growth development changes in basal diameter (A), height (B) and D²H (C) in *Tectona grandis* treated with acid solution at pH6.5(▲), pH4.5(■) and pH2.5(●)

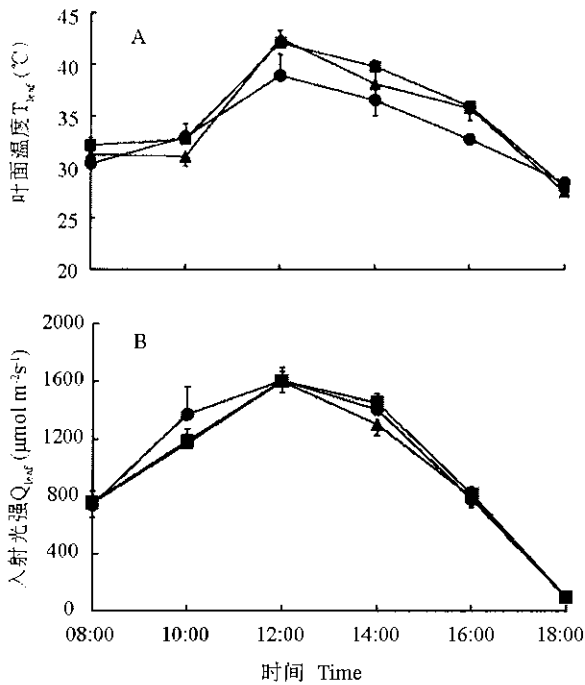


图 2 pH6.5(▲), pH4.5(■)和 pH2.5(●)处理下柚木叶面温度 (A)和叶面光强(B)的日变化

Fig. 2 Diurnal changes in leaf temperature (A), leaf incident light intensity (B) in *Tectona grandis* treated with acid solution at pH6.5(▲), pH4.5(■) and pH2.5(●)

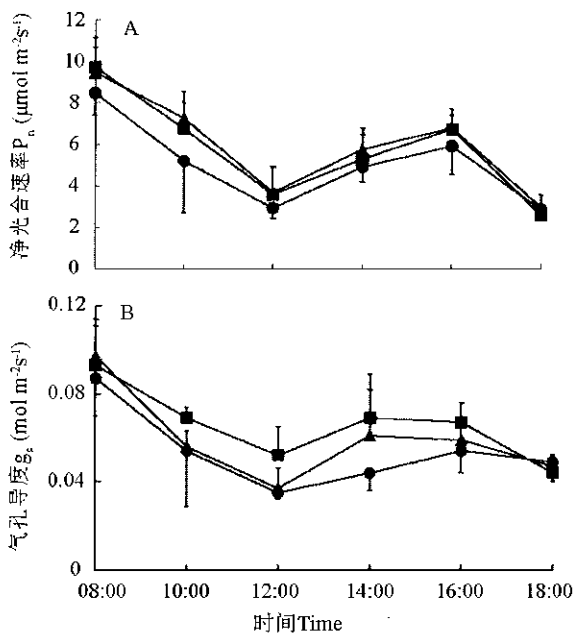


图 3 pH6.5(▲)、pH4.5(■)和 pH2.5(●)处理下柚木叶片净光合速率(A)与气孔导度(B)的日变化

Fig. 3 Diurnal changes in net photosynthetic rate (A) and stomatal conductance (B) in leaves of *Tectona grandis* treated with acid solution at pH6.5(▲), pH4.5(■) and pH2.5(●)

5.98、5.77 和 5.04 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。pH4.5 和 pH2.5 处理的分别是对照的 96.5%和 84.3%。

柚木叶片气孔导度 g_s 的日变化与对应 P_n 的变化十分类似(图 3B),即上午 8:00 最大,为 0.097 (对照)、0.093 (pH4.5) 和 0.087 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (pH2.5),随后气孔渐渐关闭,12:00 降至最低,分别为 0.037、0.052 和 0.035 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,之后开始有所恢复。 g_s 日均值分别为 0.06、0.066 和 0.054 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

2.4 叶片蒸腾速率 E 与水分利用效率 WUE 的日变化

如图 4A 所示,不同处理叶片蒸腾速率 E 值日变化趋势也趋于一致,最大值出现在 14:00 前后,分别为 2.32 (对照)、2.23 (pH4.5) 和 1.97 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (pH2.5)。8:00 前后不同处理的 E 值不存在显著差异;10:00 分别降至 1.27、1.62 和 1.35 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,其中对照 E 值下降幅度最大,pH4.5 处理下降幅度最小;随后各个处理的 E 值开始上升,在中午 14:00 左右达到最大值,其中对照 E 值上升幅度最大(相对于 10:00,上升了 82.7%),pH4.5 处理上升幅度最小(相对于 10:00,上升了 35.8%);14:00 以后各个处

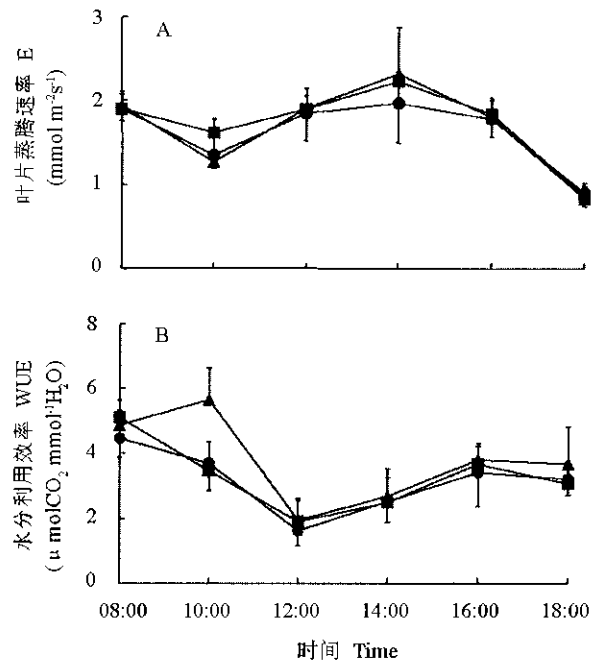


图 4 pH6.5(▲)、pH4.5(■)和 pH2.5(●)处理下柚木叶片蒸腾速率(A)和水分利用效率(B)的日变化

Fig. 4 Diurnal changes in transpiration rate (A), water use efficiency (B) in leaves of *Tectona grandis* treated with acid solution at pH6.5(▲), pH4.5(■) and pH2.5(●)

理 E 值急剧下降, 在 18:00 前后降至最低值, 分别为 0.83、0.86 和 0.90 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。在整个叶片蒸腾速率日变化进程中, 对照变化最大, pH=2.5 处理变化最小。

水分利用效率 (WUE) 为瞬时 P_n/E 的比值^[6]。与叶片蒸腾速率日变化进程相比, 除对照外, 两个处理的水分利用效率日变化趋于一致 (图 4B)。8:00 前后各个处理 WUE 值分别为 4.87 (对照)、5.10 (pH4.5) 和 4.46 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$; 对照 WUE 值 10:00 为最大值 (5.65 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$); 然后开始下降, 在 12:00 降至最低值 (1.94 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$); 之后开始缓慢上升, 在 16:00 前后又开始下降, 18:00 降至 3.67 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$; 而两个处理 8:00 以后就开始下降, 在 12:00 降至最低值, 分别为 1.90 (pH4.5) 和 1.62 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ (pH2.5), 而后的日变化进程与对照大致一样, 18:00 前后分别达到 3.28 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ (pH4.5) 和 3.15 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ (pH2.5)。

2.5 胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度比 C_i/C_a

图 5 为柚木叶片胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度之比 (C_i/C_a) 的日变化。8:00 各个处理的 C_i/C_a 不存在显著差异, 分别为 0.46 (对照)、0.43 (pH4.5) 和 0.47 (pH2.5); 从 8:00 到 10:00, pH4.5 和 pH2.5 处理的变化进程相似, 均缓慢上升, 而对照则明显下降; 从 10:00 到 12:00, 各个处理均成上升趋势, 其中 pH4.5 处理上升幅度最大 (30.4%), pH2.5 处理上升幅度最小 (3.9%); 随后对照和两个处理的 C_i/C_a 都开始下降, 其中 pH2.5 处理组在 14:00 降至最低值

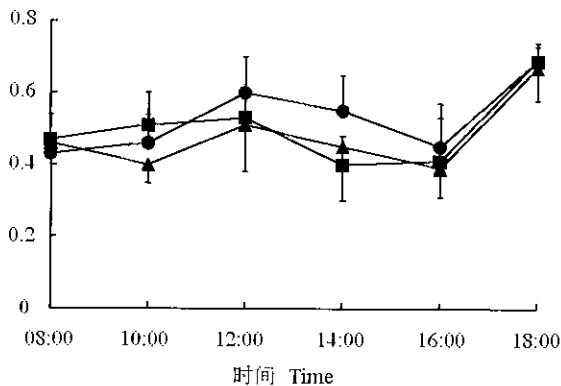


图 5 pH6.5(▲)、pH4.5(■) 和 pH2.5(●) 处理下柚木叶片胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度比 C_i/C_a 的日变化

Fig. 5 Diurnal changes in the ratio between intercellular CO_2 concentration and ambient air CO_2 concentration in leaves of *Tectona grandis* treated with acid solution at pH6.5(▲), pH4.5(■) and pH2.5(●)

(0.40), 之后开始缓慢上升, 而对照和 pH4.5 处理在 16:00 前后降至最低值, 分别为 0.39 和 0.45; 从 16:00 到 18:00, 3 个处理的 C_i/C_a 均急速上升, 在 18:00 达到一天的最大值, 分别为 0.67 (对照)、0.69 (pH4.5) 和 0.69 (pH2.5)。3 个处理 C_i/C_a 均值分别为 0.48 (对照)、0.53 (pH4.5) 和 0.50 (pH2.5), 显示对照柚木幼苗对 CO_2 利用最有效。

2.6 P_n 、E 与 g_s 的协同性

如图 6A 所示, 对照和两个处理的 P_n 与 g_s 线性关系显著, R^2 分别为 0.646 (对照, $p < 0.01$)、0.665 (pH4.5, $p < 0.01$) 和 0.633 (pH2.5, $p < 0.01$), 表现出 P_n 与 g_s 之间的协同变化。对照和两个处理的 P_n 与 g_s 之间都表现正相关, 且在 pH=4.5 处理表现更为显著。这些结果表明, 气孔导度可能成为柚木在 pH4.5 处理条件下限制光合速率的主要因子。此外, pH4.5 处理的 P_n 与 g_s 方程有较大的斜率, 表明 pH=4.5 处理能够同化更多的 CO_2 。

相比之下, 对照和两个处理的 E 与 g_s 线性关系不是很显著 (图 6B), R^2 分别为 0.210 (对照,

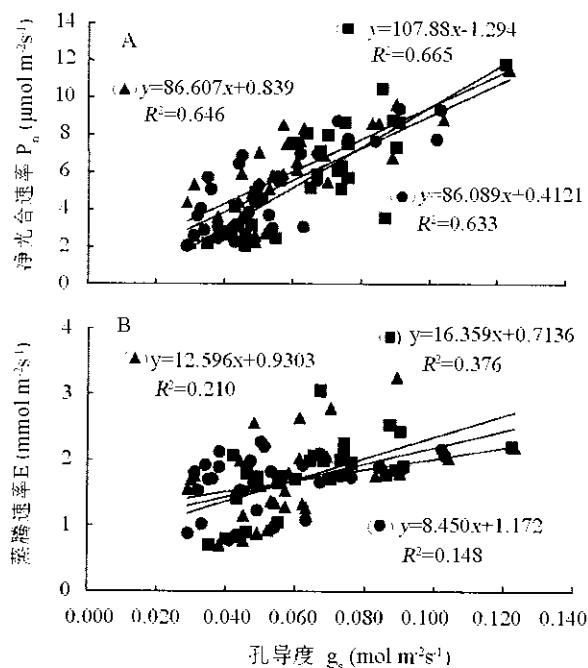


图 6 pH6.5(▲)、pH4.5(■) 和 pH2.5(●) 处理下柚木叶片净光合速率与气孔导度的相关关系 (A) 和蒸腾速率与气孔导度的相关关系 (B)

Fig. 6 The correlation of net photosynthetic rate and stomatal conductance (A) and the correlation of transpiration rate and stomatal conductance (B) in leaves of *Tectona grandis* treated with acid solution at pH6.5(▲), pH4.5(■) and pH2.5(●)

$p < 0.05$)、0.376 (pH4.5, $p < 0.05$) 和 0.148 (pH2.5, $p < 0.05$)，数据点表现出较大程度的离散性。这表明 E 的变化除受气孔导度的影响外，可能还受到其他因素的影响，如温度、空气湿度、灌溉用水的电导率^[17]、土壤的物理特性^[18]等。此外，pH4.5 处理的 R^2 较大且 E 与 g_s 方程有较大的斜率，表明在相对于对照和 pH2.5 处理而言，当 pH 值为 4.5 时蒸腾速率受气孔导度影响最大。

3 分析和讨论

基径和树高是树木基本的生长特征之一，树木高度主要受营养资源、环境压力、光照等因素的影响^[19]。本实验中，在营养资源、光照等因素趋于一致的情况下，模拟酸雨对柚木生长产生了巨大的环境压力，模拟酸雨处理下柚木基径和树高增长均明显下降，从而导致 D²H 的急剧减少，同时，模拟酸雨的酸度越高，D²H 下降越多，这说明模拟酸雨对柚木生长有明显的抑制作用，且抑制强度与模拟酸雨的酸度正相关。

叶面入射光强是影响叶面温度的一个因子，只是随时间和光照射部位的改变而改变。在叶面入射光强保持不变的情况下，不同处理叶面温度的差异说明酸雨对柚木幼苗叶面温度造成影响，而 pH2.5 处理叶面温度的降低可能是植物对于逆境的一种适应性反应。

与对照相比，酸雨处理下叶面净光合速率有一定程度的下降，模拟酸雨酸度越高，下降幅度越大，而气孔导度的变化则有一点不同，pH4.5 处理的气孔导度变化比对照明显。理论上，在环境良好的情况下植物必须最大限度地开放气孔，以最大程度的通过光合作用固定最大数量的 CO_2 ^[20,21]。但是在污染胁迫状况下气孔开放程度大，除了导致水分过度蒸腾使植物失水过多外，也会有更多的污染物通过气孔进入植物体。因此，植物通过感应环境和调节气孔至适当的开度，来避免水分过度蒸腾和减少吸入污染物的同时，维持 CO_2 的吸收和固定，从而适应胁迫生境。对照和处理的叶片净光合速率和气孔导度之间均存在高度的线性相关，表明气孔对环境变化的协同响应是酸雨胁迫条件下柚木叶片净光合速率变化的主导因子。

在整个叶片蒸腾速率日变化进程中，对照变化

最大，pH=2.5 处理变化最小；各个时间点两个处理的柚木水分利用效率明显低于对照组；说明酸雨胁迫下柚木的生理活动减缓，从而对柚木生长造成伤害。同时，对照叶片胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度比 C_i/C_a 与两个处理相比，最低值和最高值均相差无几，但是对照 C_i/C_a 均值明显小于两个处理，表明酸雨胁迫下柚木对 CO_2 的利用效率降低，使通过光合作用固定的 CO_2 量减少，从而影响叶生物量以及光合产物供应到其它组织器官的速率和数量。

综合实验结果表明，模拟酸雨对柚木形态构件参数造成较严重的影响，尽管不同处理间的各项生理指标差异不明显。我们推测柚木可能对酸雨不是很敏感，这必须进一步加以验证。考虑到柚木幼苗基径和株高的下降，在柚木栽培和育种过程中，我们还是必须充分考虑到酸雨的影响，从而达到最佳的栽培和育种效果。

参考文献

- [1] Ma H M (马华明), Liang K N (梁坤南), Zhou Z Z (周再知). Research and development of teak in China [J]. For Res (林业科学研究), 2003, 16 (6):768-773. (in Chinese)
- [2] Wu Q H (吴琼辉), Gu D Q (古定球), Zeng Q S (曾庆圣). A discussion on the development of teak plantation in Guangdong Province [J]. Guangdong For Sci Techn (广东林业科技), 2004, 20 (2):60-62. (in Chinese)
- [3] Pan Y F (潘一峰), Kuang B C (邝炳朝), Liu W M (刘文明). Test of acid and aluminum tolerance of teak clones [J]. For Res (林业科学研究), 1999, 12(2):152-159. (in Chinese)
- [4] Weng Q J (翁启杰), Zheng H S (郑海水), Huang J C (黄金城), et al. Growth performance of teak young plantations [J]. Guangdong For Sci Techn (广东林业科技), 2002, 18(2):27-30. (in Chinese)
- [5] Ding G A (丁国安), Xu X B (徐晓斌), Fang X M (房秀梅), et al. The present condition and development trend of acid rain in China [J]. Chin Sci Bull (科学通报), 1997, 42(2):169-173. (in Chinese)
- [6] Feng Y Q (冯砚青). Summary of acid rain's status, causes of natural formation and counter measures research in China [J]. Yunnan Geo Environ Res (云南地理环境研究), 2004, 16(1):25-28. (in Chinese)
- [7] Huang J S (黄继山), Wen W B (温文保), Lin W H (蔺万焯), et al. Damage of simulated acid rain to tree's mesophyll cell [J]. For Res (林业科学研究), 2002, 15(2):219-224. (in Chinese)
- [8] Kong F X (孔繁翔), Sang W L (桑伟莲), Jiang X (蒋新). Aluminum toxicity and tolerance in plants [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2000, 20(5):855-862. (in Chinese)
- [9] Driscoll C T, Lawrence G B, Bulger A J, et al. Acidic deposition in the northeastern United States: sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies [J]. BioScience, 2001, 51(3):180-198.

- [10] Lawrence G B, David M B, Shortle W C. A new mechanism for calcium loss in forest-floor soils [J]. *Nature*, 1995, 378:162-164.
- [11] Wang H X (王焕校). *Pollution Ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002, 52, 171-179. (in Chinese)
- [12] Zhang Y M (张耀民), Wu L Y (吴丽英), Wang X X (王晓霞). The damage by acid rain in crop leaves and the influencing physiological characteristics [J]. *Agro-Environ Protec (农业环境保护)*, 1996, 15(5):197-208, 227. (in Chinese)
- [13] Chen S Y (陈树元), Xu H B (徐和宝), Shi J W (史建文). Response of 110 species trees to simulated acid rain and sulfuric dioxide exposure alone and in combination [J]. *Chin J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报)*, 1997, 3(3):199-203. (in Chinese)
- [14] Qiu D L (邱栋梁), Liu X H (刘星辉), Guo S Z (郭素枝). Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of Longgan [J]. *Acta Phytoecol Sin (植物生态学报)*. 2002, 26(4): 441-446. (in Chinese)
- [15] Huang Q F (黄清风), Chen Y H (陈煜辉). Variation of acid rain pollution in Guangzhou area [J]. *Guangzhou Environ Sci (广州环境科学)*, 1999, 14(2):19-22. (in Chinese)
- [16] Eamus D. The interaction of rising CO₂ and temperatures with water use efficiency [J]. *Plant Cell Environ*, 1991, 14:843-852
- [17] Chatrath A, Mandal P K, Anuradha M. Effect of secondary salinization on photosynthesis in fodder oat (*Avena sativa* L.) genotypes [J]. *J Agron Crop Sci*, 2000, 184(1):13-16.
- [18] Bonal D, Barigah T S, Granier A, et al. Late-stage canopy tree species with extremely low $\delta^{13}\text{C}$ and high stomatal sensitivity to seasonal soil drought in the tropical rainforest of French Guiana [J]. *Plant Cell Environ*, 2000, 23(5):445-459.
- [19] Koch G W, Sillett S C, Jennings G M, et al. The limits to tree height [J]. *Nature*, 2004, 428(22):851-854.
- [20] Farquhar G, Schulze E D, Koppers M. Responses to humidity by stomata of *Nicotiana glauca* and *Corylus avellana* are consistent with the optimization of carbon dioxide uptake with respect to water loss [J]. *Aust J Plant Physiol*, 1980, 7:315-327.
- [21] Buckley T N, Farquhar G D, Mott K A. Carbon-water balance and patchy stomatal conductance [J]. *Oecologia*, 1999, 118:132-143.