

模拟酸雨胁迫对樟树幼苗光合作用和水分利用特性的影响

赵巍巍¹, 江洪^{1,2}, 马元丹¹

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地/浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要: 选择亚热带地区重要特种经济树种樟树 *Cinnamomum camphora* 为研究对象。通过盆栽试验, 研究了不同梯度下的酸雨在不同季节对 3 年生樟树幼苗的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、水分利用率(E_{WU})等生理参数的影响。结果显示, 樟树幼苗的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用率随酸雨强度、季节和年份的不同均产生显著变化。酸雨处理的初期, 中等强度的酸雨(pH 4.0)提高了樟树幼苗的净光合速率与气孔导度。在 2008 和 2009 年秋季的处理中, 净光合速率和蒸腾速率在不同强度酸雨影响下表现为 pH 4.0>pH 5.6>pH 2.5。樟树幼苗的水分利用率在夏季随酸雨强度的增加而变大, 但在秋季无明显变化。酸雨、季节和年份的单独作用、两两交互作用, 酸雨+季节+年份三者的交互作用对樟树幼苗的光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率均有影响。其中酸雨+季节对樟树幼苗的气孔导度影响不显著($P>0.05$), 但对净光合速率、蒸腾速率和水分利用率的影响显著($P<0.05$)。图 4 表 1 参 27

关键词: 森林生态学; 酸雨胁迫; 樟树; 幼苗; 光合作用; 水分利用

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)02-0179-08

Photosynthesis and water use characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings with simulated acid rain

ZHAO Weiwei¹, JIANG Hong^{1,2}, MA Yuandan¹

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture & Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract: To study the physiological characteristics of water in *Cinnamomum camphora* seedlings with acid rain treatments, a three-year pot experiment was conducted on photosynthetic rate (P_n), stomata conductance (G_s), transpiration rate (T_r), and water use efficiency (W_{UE}) for simulated acid rain treatments of pH 2.5 (severe) and pH 4.0 (moderate) with water (pH 5.6) as the control. Results showed that acid rain significantly affected P_n , G_s , T_r and W_{UE} . In the initial stage of treatment, acid rain of pH 4.0 positively affected the photosynthetic rate P_n and G_s . In the autumn of year two, P_n and T_r were greatest with acid rain treatments in the order of pH 4.0 > pH 5.6 > pH 2.5. W_{UE} in summer increased as pH increased, but not in autumn. Season, year, acid rain, interactions of season and year, and interactions of the three factors were significant for P_n , G_s , T_r and W_{UE} . The interaction of acid rain and season on stomata conductance (G_s) was not significant ($P > 0.05$) but was significant ($P < 0.01$) for T_r , P_n and W_{UE} . [Ch, 4 fig. 1 tab. 27 ref.]

收稿日期: 2012-04-05; 修回日期: 2012-05-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2005CB422207)

作者简介: 赵巍巍, 从事植物生理生态研究。E-mail: zhaowei2636@126.com。通信作者: 江洪, 教授, 博士, 从事生态系统碳—氮—水循环、全球变化、植物生理生态等研究。E-mail: jianghong_china@hotmail.com

Key words: forest ecology; imulated acid rain; *Cinnamomum camphora*; seedlings; photosynthesis; water use efficiency

自工业革命以来，人类在生产、生活等活动中，使用了大量化石燃料(如石油和煤等)，产生了大量硫和氮的氧化物，在大气中反应生成硫酸和硝酸，并随着降雨和降雪形成酸雨。国际上统一将pH值低于5.6的降雨称为酸雨^[1]。目前，中国受酸雨危害的重灾区主要分布在以江苏、浙江、福建、四川等省为首的沿海和内陆区域^[2-3]。已有研究^[4-6]表明，酸雨胁迫会对植物产生严重的危害，表现为破坏叶片结构，增加膜透性，加快呼吸速率，降低蒸腾速率，降低酶活性，降低叶绿素含量等，但是不同种类的植物对酸雨胁迫的响应不同。目前，酸雨对植物的伤害研究主要集中在树木和农作物方面。作为中国亚热带地区的植被恢复和城市绿化的主要树种之一^[7]——樟树 *Cinnamomum camphora* 是包括杭州在内的多个城市的市树，是亚热带常绿阔叶林的代表树种，国家二级重点保护植物。樟树对温度的适应性较强，在最低气温-7.0℃或年均温度16.0℃以上的地区均可正常生长。目前，对酸雨胁迫下的樟树生理特性的研究主要集中在光合作用^[8-10]与叶绿素荧光特性^[11]等方面，但对樟树幼苗水分利用特性的研究还鲜有报道。本研究以3年生樟树幼苗为研究材料，模拟酸雨条件下樟树幼苗的光合作用与水分生理特性，目的是要了解不同时期的不同强度酸雨对樟树幼苗光合作用和水分利用特性的影响，以期为在酸雨频发地区樟树的引种和栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地设在浙江省临安市的浙江农林大学(30°16'N, 119°44'E)的酸雨大棚内。临安地处浙江省西北部，属中亚热带季风气候区，年平均气温为16.4℃，极端最高气温41.9℃，极端最低气温-9.2℃，全年日照时数为1 847.3 h，年平均降水量为1 628.6 mm，无霜期237 d。土壤为红黄壤。

1.2 研究方法

1.2.1 试验材料 供试苗木选用健康的长势一致的3年生樟树幼苗45株，苗高60~90 cm，地径1.572~1.756 cm。将幼苗栽于内径22 cm，深26 cm的花盆中，置于浙江农林大学实验基地的酸雨大棚中。栽培土为当地土壤即红黄壤，常规管理。试验设3个处理，15盆·处理⁻¹，将植株随机分成3组进行模拟酸雨处理。

1.2.2 试验处理 在2008年春季(4月初)至2009年秋季(10月末)，根据浙江省酸雨的平均离子组成以及常用的模拟酸雨试验中的配比^[12-13]，按硫酸:硝酸为8:1的体积比比例配制母液，加水稀释成3种不同梯度的酸溶液：pH 2.5(重度酸雨)、pH 4.0(中度酸雨)和pH 5.6(对照)的酸雨溶液。根据当地的多年的每月平均降水量确定喷淋量，约喷淋酸雨130 mL·盆⁻¹·d⁻¹，这与当地总降水量基本一致，夏季适当补水，喷淋期间用塑料薄膜遮蔽防止自然降水的干扰。

1.2.3 叶片水分生理指标的测定 利用便携式红外气体分析仪(Licor, 美国)于2008和2009年的4、7和10月测定叶片光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)，气孔导度(G_s , $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)，蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。Li-6400的开路系统测定光响应曲线设置由高光强至低光强开始测定，梯度为：2 000, 1 500, 1 000, 600, 300, 200, 100, 80, 50, 20, 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (用光合有效辐射表示光强)。在各个酸雨处理组中各随机选择5株樟树幼苗，共15盆，挑选幼苗上当年成熟的中上部叶片在晴天上午9:00~11:00进行测定。

1.3 数据处理

首先利用Excel 2003对实验数据进行整理，再使用SPSS 18.0对数据进行正态性和齐性检验，最后采用一般线性模型(GLM)多因素方差分析来分析酸雨、年份、季节因素对樟树幼苗水分生理的影响，并用最小显著差异法(LSD)比较不同酸雨梯度下所获数据组间的差异显著性，最终利用Sigma Plot 10.0软件成图^[14]。

2 结果分析

2.1 光强对樟树叶片净光合速率的影响

当光强为0~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，不同季节和年份各处理的樟树幼苗净光合速率 P_n 均与光强均呈

线性关系, 不同酸雨处理条件下樟树幼苗净光合速率值都随着光强的升高而增加, 在达到光饱和点后逐渐变缓(图1)。

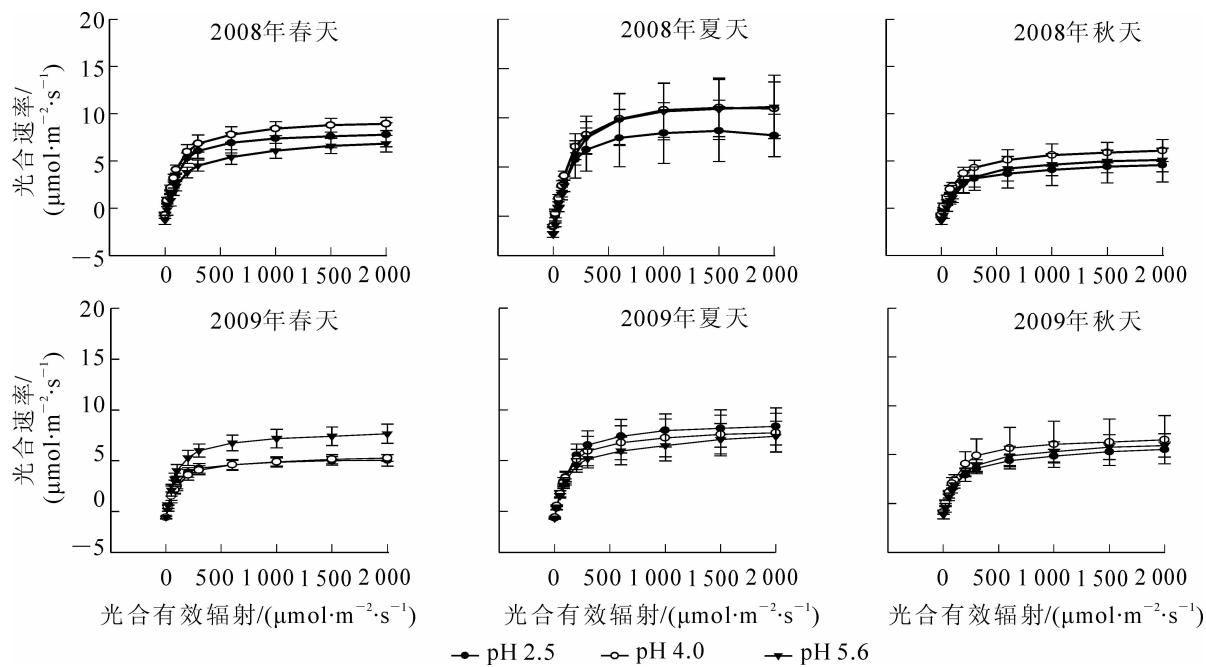


图1 不同年份、季节和酸雨处理下樟树幼苗光合速率变化

Figure 1 Variation of P_n of *Cinnamomum camphora* seedlings in different treatments

研究发现: 当光强为 $1\ 500\sim2\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 只有2008年夏季pH 2.5处理下的樟树幼苗净光合速率呈现下降的趋势, 其余处理和其他时期中均未出现下降的趋势, 所以樟树幼苗在整体上是能适应高光强的。2008年的中度酸雨(pH 4.0)处理下幼苗的净光合速率高于重度处理组和对照组, 表示樟树幼苗在受到酸雨胁迫的初期, 中度酸雨增强了它利用 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上光强的能力。在2008的夏、秋两季和2009年的春、秋两季的重度酸雨处理下, 樟树幼苗的净光合速率最低, 说明重度酸雨对樟树幼苗的净光合速率影响较大; 但在对2009年夏季处理的分析中发现净光合速率表现为pH 2.5>pH 4.0>pH 5.6。

樟树幼苗的净光合速率随季节、年份和酸雨强度的不同而变化, 三者的单独作用及交互作用对樟树幼苗的 P_n 有显著影响(表1)。

表1 季节、年份、酸雨及其交互作用对樟树幼苗水分生理特性影响的多元方差分析

Table 1 Multivariate analysis of variance for the effects of season, year, acid rain, and their interactions on water physiological characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings

项目	光合速率 P_n		气孔导度 G_s		蒸腾速率 T_r		水分利用率 E_{WU}	
	F	P	F	P	F	P	F	P
季节	155.772	0.000***	67.065	0.000***	72.246	0.000***	171.710	0.000***
年份	51.789	0.000**	21.188	0.000***	3.435	0.068	32.149	0.000***
酸雨	18.678	0.000***	13.173	0.000***	22.122	0.000***	13.828	0.000***
季节×年份	13.593	0.001**	16.890	0.000***	17.240	0.000***	1.019	0.366
季节×酸雨	5.524	0.001**	1.785	0.141	6.396	0.000***	5.501	0.001**
年份×酸雨	30.279	0.000***	9.167	0.000***	6.793	0.002*	28.746	0.000***
季节×年份×酸雨	15.900	0.000*	11.871	0.000***	4.468	0.003*	20.669	0.000***

说明: 表中原始计算值取光强为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。

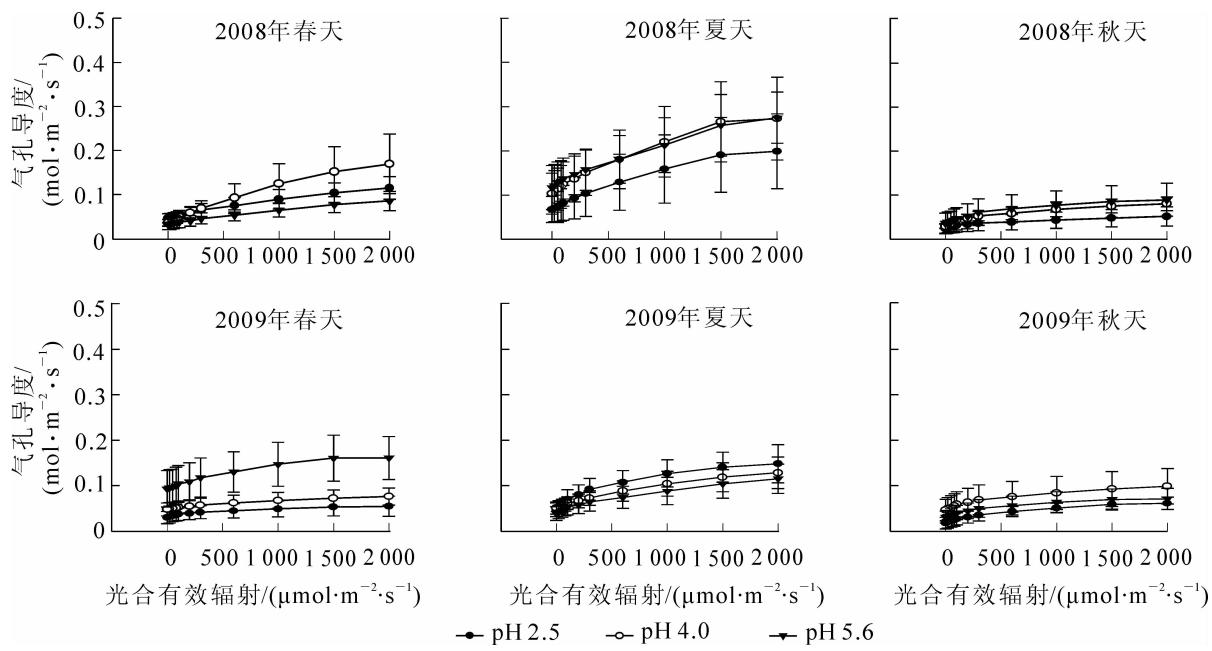


图2 不同年份、季节和酸雨处理下樟树幼苗的气孔导度变化

Figure 2 Variation of G_s of *Cinnamomum camphora* seedlings in different treatments of years, seasons and acid rain

2.2 光强对叶片气孔导度的影响

如图2所示：不同酸雨梯度处理下的樟树幼苗气孔导度 G_s 的变化不同。在各季节、年份、梯度酸雨的处理下发现，当光强低于 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，气孔导度随光强的上升速度最快，当光强达到 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时出现转折，气孔导度上升速度变慢。

在同一光强下，2008年的春、夏和2009年的秋季的中度酸雨(pH 4.0)处理对樟树幼苗的气孔导度促进作用最强。在2008年的秋季和2009年的春季，则是pH 5.6>pH 4.0>pH 2.5，说明随酸雨强度的升高樟树幼苗的气孔导度下降，而在2009年的夏季则是pH 2.5>pH 4.0>pH 5.6，表示夏季的蒸腾速率增强，对重度酸雨的胁迫具有一定的抗性。

季节、年份、酸雨强度单独和交互作用中，季节和酸雨的交互作用对气孔导度没有显著影响(表1)，其余均对樟树幼苗的气孔导度有显著影响。

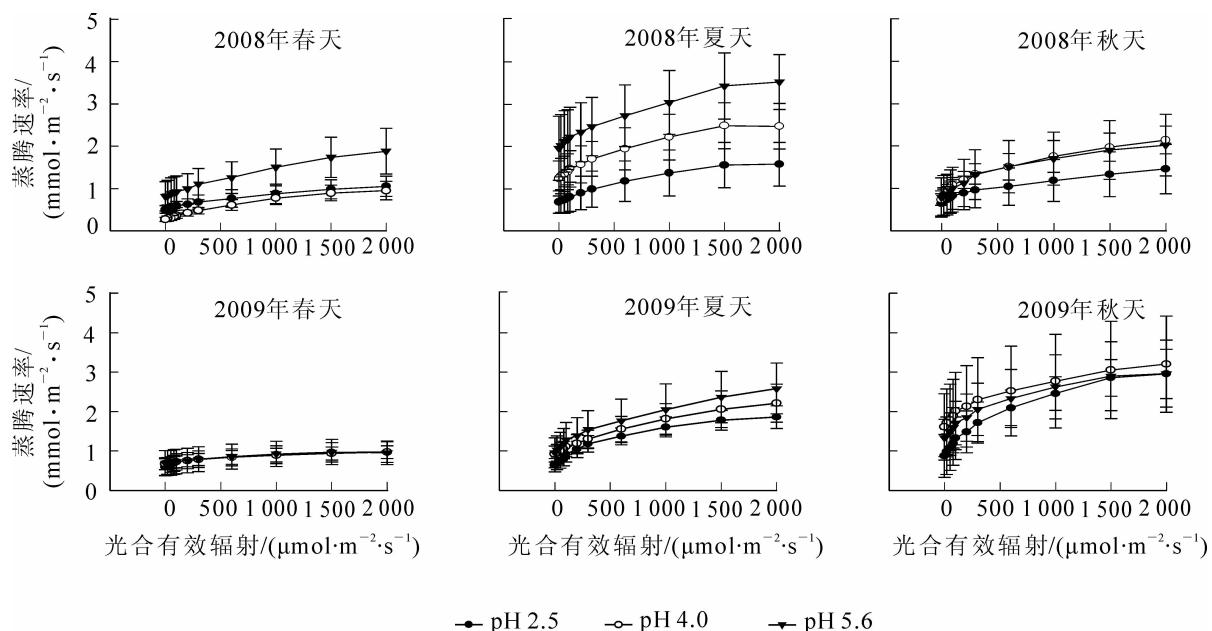


图3 不同年份、季节和酸雨处理下樟树幼苗的蒸腾速率的变化

Figure 3 Variation of T_r of *Cinnamomum camphora* seedlings in different treatments of years, seasons and acid rain

2.3 光强对叶片蒸腾速率的影响

当光强为 $0\sim200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时(图3), 在不同季节、年份、不同强度酸雨处理下, 樟树幼苗的蒸腾速率 T_i 均与光强呈线性关系, 且蒸腾速率随光强的升高而上升较快, 当光强大于 $300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 蒸腾速率的开始上升速度渐缓。

2008和2009年的夏季, 同一光强下, 樟树幼苗的蒸腾速率随酸雨强度的变化为 $\text{pH } 5.6 > \text{pH } 4.0 > \text{pH } 2.5$, 表明在夏季酸雨强度越高对樟树的蒸腾速率抑制作用越大; 2008和2009年的秋季的变化是一致的, 为 $\text{pH } 4.0 > \text{pH } 5.6 > \text{pH } 2.5$, 说明秋季 $\text{pH } 4.0$ 的酸雨促进了植物的蒸腾速率。在2009年的春季处理中, 不同梯度酸雨胁迫下的蒸腾速率均未有明显变化。由表1可见: 樟树幼苗的蒸腾速率在年份的单独作用下无显著影响。

2.4 光强对叶片水分利用效率的影响

樟树幼苗的水分利用效率 E_{WU} 在光强增加的起始阶段随光强度变强呈增高趋势, 当达到某一光强值, 水分利用效率达到最大值, 然后随着光强的继续增强而呈现下降趋势(2009年春季 $\text{pH } 5.6$ 处理除外, 图4)。酸雨环境下的樟树幼苗在不同年份、不同季节处于水分利用效率最大值的光强不同。春季的水分利用效率值较夏秋两季高, 夏季其次, 秋季水分利用效率值最低。

在处理的初期, 即2008年春季, 水分利用效率随 pH 值变化为 $\text{pH } 4.0 > \text{pH } 2.5 > \text{pH } 5.6$, 表示酸雨增强了樟树幼苗的水分利用效率且中度酸雨的增强作用最大; 2009年的春季, 水分利用效率则是对照组大于处理组。在2年的夏季处理中, 相同光合有效辐射强度下, 水分利用效率变化为 $\text{pH } 2.5 > \text{pH } 4.0 > \text{pH } 5.6$, 说明酸雨越强, 水分利用效率越大, 2年的秋季处理时, 水分利用效率的变化趋势在3个梯度酸雨影响下基本一致, 其中2009年秋季的水分利用效率在3个梯度酸雨下未出现差异。

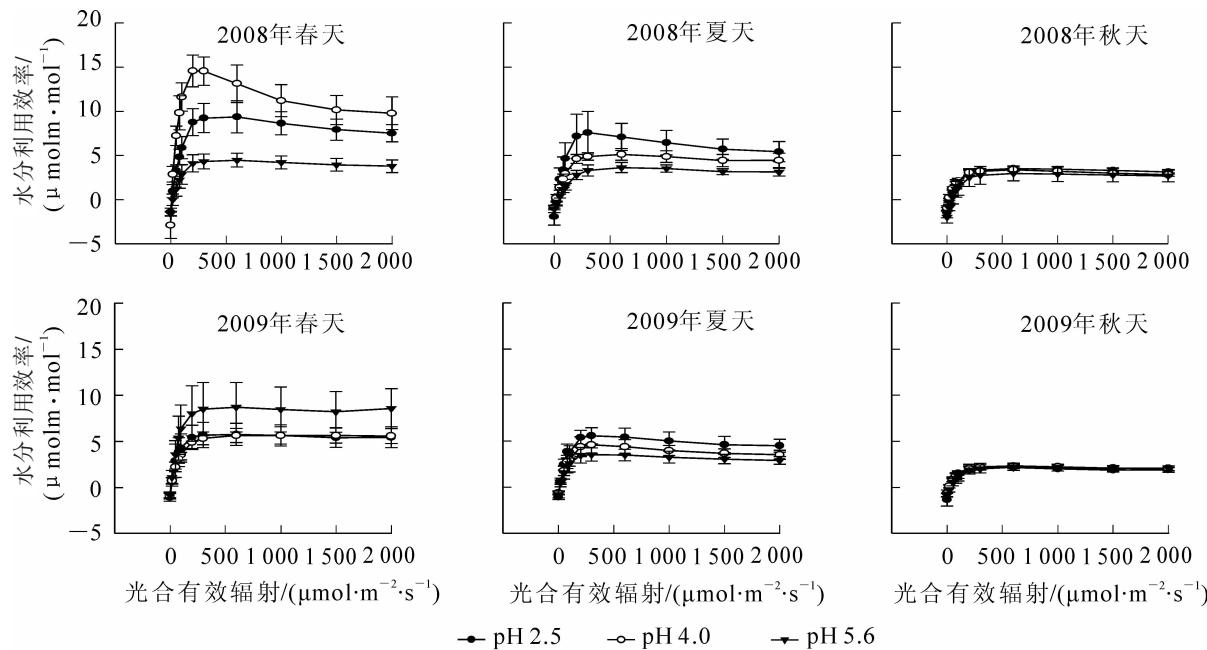


图4 不同年份、季节、酸雨处理下樟树幼苗的水分利用率变化

Figure 4 Variation of E_{WU} of *Cinnamomum camphora* seedlings in different treatments of years, seasons and acid rain

如表1所示: 季节、年份、酸雨单独和交互作用中除季节和年份作用外, 其余均对水分利用效率产生了显著的影响。

3 讨论和结论

3.1 酸雨对光合速率的影响

酸雨对光合速率的影响会因研究对象的不同或酸雨 pH 值的差异而得到不一样的结果, 即随着酸雨酸性的增强, 植物光合作用明显降低^[15], 或影响不明显, 或其光合作用明显增加^[25,30]。研究发现: 不同

年份、季节以及不同 pH 值的酸雨对樟树的光合速率产生不同影响。pH 2.5 的酸雨处理下樟树幼苗的光合速率最低, 这与对山核桃 *Carya cathayensis*^[13] 和黑壳楠 *Lindera megaphylla*^[16] 的研究结果一致。pH 4.0 的酸雨使得樟树幼苗的最大净光合速率增强, 与已有对樟树的研究^[9-11]结论一致, 但与对山核桃^[13], 苦槠 *Castanopsis sclerophylla*^[17], 甜槠 *Castanopsis eyrei*^[17] 和马尾松 *Pinus massoniana*^[17] 幼苗在 pH 4.0 下的研究结果不同, 这可能是由于植物对酸雨抗性因其种类不同而有差异所导致的^[18]。

3.2 酸雨对气孔导度的影响

当叶片接触酸雨时, 植物叶表面的蜡质和角质层首先被破坏, 随之植物的表皮受到伤害, 酸性物质会通过气孔破坏植物生理生化代谢。作为自身的一种保护反应, 气孔导度会降低或者是气孔直接关闭, 因此, 影响植物与外界的气体、水分的交换, 并直接影响植物的光合作用和蒸腾作用。本实验发现 pH 4.0 的酸雨在处理的前期阶段增强了樟树幼苗的气孔导度, 这与陈睿等^[19]的研究结果相似。实验中期随着酸雨酸度的增加气孔导度降低。而 pH 2.5 的酸雨使得樟树幼苗的气孔导度降低, 但并未出现因保卫细胞的渗透压下降导致气孔关闭的现象^[20]。引起植物气孔导度降低的原因可能有 3 种: 由于质壁分离引起保卫细胞膨胀导致气孔关闭^[21-23]; 酸雨中大量的氢离子破坏了保卫细胞的离子平衡, 导致气孔功能紊乱^[24-25]; 钾离子的出入影响着气孔的开关, 由于酸雨的使得钾离子的减少, 直接影响气孔的开口大小。

3.3 酸雨对蒸腾速率的影响

蒸腾速率在夏季对酸雨的反应明显强于春、秋两季。说明夏季植物生长较快, 而春秋因气温降低植物的生理活动趋于平缓。随着时间的推移, 植物的蒸腾速率对酸雨的反应差异变小, 说明樟树幼苗对酸雨的抗性逐渐加强, 对酸雨胁迫的适应性较强。也有研究表明中、强度酸雨降低了植物的蒸腾速率^[26]并使气孔阻抗增高。这与本研究 pH 2.5 处理下的结果相同, 樟树幼苗的蒸腾速率降低、生理活动受到抑制, 但未出现气孔关闭现象, 表明樟树对酸雨具有一定的抗性。

3.4 酸雨对水分利用效率的影响

2 a 的处理中, 不同强度酸雨胁迫下的樟树幼苗水分利用效率随时间变化, 其差异逐渐变小; 另外, 在 2 a 的夏季中酸雨处理下的水分利用效率均高于对照组, 说明樟树幼苗对酸雨具有较强的适应性。有研究^[27]表明: 植物的形态特性与对酸雨的抗性有关, 樟树的叶表面光滑且具有蜡质层, 且有研究认为酸雨促进了樟树幼苗的根系生长^[9]。

综上所述: 对樟树幼苗 3 个季节的光合作用与水分生理特性测定发现, 随着时间的推移, 樟树在长期酸雨胁迫下对酸雨逐渐产生了一定程度的抗性。其中中等强度的酸雨(pH 4.0)增强了樟树幼苗的光合速率与气孔导度, 说明樟树幼苗本身具备一定的抗酸性。实验后期的蒸腾速率和水分利用效率对酸雨的反应差异较实验前期小, 表明樟树幼苗在酸雨的长期胁迫下抗酸性逐渐加强。因此, 樟树可以在酸雨区引种栽培。

致谢: 感谢西南大学的蒋馥蔚和浙江农林大学的李佳对本研究实验数据测定的帮助。

参考文献:

- [1] 郑玲哲, 张金鑫, 周克元, 等. 酸雨与环境影响研究[J]. 环境科学与技术, 1983, 6 (2): 11 – 16.
ZHENG Lingzhe, ZHANG Jinxin, ZHOU Keyuan, et al. Research of the acid rain and environmental impact [J]. *Environ Sci & Technol*, 1983, 6 (2): 11 – 16.
- [2] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006 年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, 66 (6): 1032 – 1042.
ZHAO Yanxia, HOU Qing. An analysis on spatial temporal evolution of acid rain in China (1993–2006) and its causes [J]. *J Meteorology*, 2008, 66 (6): 1032 – 1042.
- [3] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23 (5): 527 – 532.
ZHANG Xinmin, CAI Fahe, WANG Shulan, et al. Research progress of acid precipitation in China [J]. *Res Environ Sci*, 2010, 23 (5): 527 – 532.
- [4] 龙云, 刘芸, 钟章成, 等. 酸雨和 UV-B 对玉米幼苗光合速率和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29 (9): 4957 – 4966.
LONG Yun, LIU Yun, ZHONG Zhangcheng, et al. Effects of UV-B irradiation and acid rain on photosynthetic rate

- and antioxidant enzyme activities of maize seedlings [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **29** (9): 4957 – 4966.
- [5] 李佳, 江洪, 余树全, 等. 模拟酸雨胁迫对青冈幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20** (9): 2092 – 2096.
LI Jia, JANG Hong, YU Shuquan, et al. Effects of simulated acid rain on *Quercus glauca* seedlings photosynthesis and chlorophyll fluorescence [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20** (9): 2092 – 2096.
- [6] 齐泽民, 钟章成, 邓君, 等. 模拟酸雨对杜仲叶膜脂过氧化及氮代谢的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2001, **26** (1): 151 – 156.
QI Zemin, ZHONG Zhangcheng, DENG Jun, et al. Effect of simulated acid rain on photosynthesis and growth of *Eucalyptus ulmoides* Oliv. [J] *J Southwest China Norm Univ Nat Sci*, 2001, **26** (1): 151 – 156.
- [7] 郝日明, 魏宏图. 紫金山森林植被性质与常绿落叶阔叶混交林重建可能性的探讨[J]. 植物生态学报, 1999, **23** (2): 108 – 115.
HAO Riming, WEI Hongtu. Succession tendency of Zhongshan vegetation and discussion of possibility of reconstructing evergreen and deciduous broad leaved mixed forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1999, **23** (2): 108 – 115.
- [8] 樊后保, 藏润国. 模拟酸雨对樟树种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 浙江林学院学报, 1996, **13** (4): 412 – 417.
FAN Houbao, ZHANG Runguo. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growthgand of *Cinnamomum camphora* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1996 , **13** (4): 412 – 417.
- [9] 付晓萍, 田大伦, 闫文德. 模拟酸雨对樟树光合日变化的影响[J]. 中南林学院学报, 2006, **26** (6): 38 – 43.
FU Xiaoping, TIAN Dalun, YAN Wende. The effects of simulated acid rain on the diurnal changes of *Cinnamomum camphora* photosynthesis [J]. *J Cent South For Univ*, 2006, **26** (6): 38 – 43.
- [10] 田大伦, 付晓萍, 方晰, 等. 模拟酸雨对樟树幼苗光合特性的影响[J]. 林业科学, 2007, **43** (8): 29 – 35.
TIAN Dalun, FU Xiaoping, FANG Xi, et al. Effects of simulated acid rain on mineral elements content in leaves of *Cinnamomum camphora* seedling in artificial potted environment [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (8): 29 – 35.
- [11] 余小龙, 伊力塔, 余树全, 等. 酸雨胁迫对樟树幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 浙江林业科技, 2011, **31** (2): 19 – 24.
YU Xiaolong, YI Lita, YU Shuquan, et al. Effects of acid rain stress on chlorophyll fluorescencce properties of leaves of *Cinnamomum camphora* seedlings [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2011, **31** (2): 19 – 24.
- [12] 王丽红, 蔡丽单, 曾庆玲, 等. 酸雨对3类不同抗性种子萌发过程的影响 (VI)酸雨胁迫对3类种子萌发POD活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24** (3): 442 – 445.
WANG Lihong, CAI Lidan, ZENG Qingling, et al. Effects of acid rain on activity of peroxidase (POD) in seed germination of three plants under time stress [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2005. **24** (3): 442 – 445.
- [13] 鲁美娟, 江洪, 余树全, 等. 模拟酸雨对山核桃和杨梅光合生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2009, **28** (8): 1476 – 1481.
LU Meijuan, JIANG Hong, YU Shuquan, et al. Effects of simulated acid rain on photosynthetic physiology of *Carya cathayensis* and *Myrica rubra* [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (8): 1476 – 1481.
- [14] 姚兆斌, 江洪, 余树全, 等. 模拟酸雨胁迫对杨梅幼苗水分生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (8): 238 – 240.
YAO Zhaobin, JIANG Hong, YU Shuquan, et al. Effects of simulated acid rain on water physiological characteristics of *Myrica rubra* seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (8): 238 – 240.
- [15] 周希琴. 木麻黄幼苗对模拟酸雨胁迫的响应和Ca²⁺的调节作用[J]. 植物生理学通讯, 2005, **41** (3): 309 – 312.
ZHOU Xiqin. Response to simulated acid rain stress in *Casuarina equisetifolia* seedlingsand regulation of Ca²⁺ [J]. *Plant Physiol Commun*, 2005, **41** (3): 309 – 312.
- [16] 蒋馥蔚, 江洪, 李巍, 等. 不同起源时期的3种被子植物对酸雨胁迫响应的光合生理生态特征[J]. 植物生态学报, 2009, **33** (1): 125 – 133.
JIANG Fuwei, JIANG Hong, LI Wei, et al. Photosynthetic and physiological characteristic of three angiosperms of different evolutionary ages under acid rain stress [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33** (1): 125 – 133.
- [17] 金清, 江洪, 余树全, 等. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (6): 3322 – 3327.
JIN Qing, JIANG Hong, YU Shuquan, et al. Research on the growth and photosynthesis of typical seedlings in sub-

- tropical regions under acid rain stress [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **29** (6): 3322 – 3327.
- [18] 黄继山, 温文保, 蔺万煌, 等. 酸雨对树木叶细胞伤害的模拟研究[J]. 林业科学, 2002, **15** (2): 219 – 224.
HUANG Jishan, WEN Wenbao, LIN Wanhuang, et al. Damage of simulated acid rain to tree's mesophyll cells [J]. *For Res*, 2002, **15** (2): 219 – 224.
- [19] 陈睿. 模拟酸雨对鸢尾属 2 种地被植物的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
CHEN Rui. *Effect of Simulated Acid Rain on Two Ground Cover Plants of Iris genera* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [20] ADAMS C S. DENGLER M. Acid rain effect on foliar histology of *Artemisia tilesii* [J]. *Can J Bot*, 1984, **62**(3): 463 – 474.
- [21] APPLEBY R F, DAVIES W. A possible evaporation site in the guard cell wall and the influence of leaf structure on the humidity response by stomata of woody plants [J]. *Oecologia*, **56**: 30 – 40.
- [22] DYEING C D, CURRIER H. Foliar penetration by chemicals [J]. *Plant Physiol*, **36**: 169 – 174.
- [23] LEECE D R. Foliar absorption in *Prunus domestica* L. (I) Nature and development of the surface wax barrier [J]. *Aust J Plant Physiol*, **5**: 749 – 766.
- [24] RASCHKE K. Stomatal action [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1975, **26**: 309 – 340.
- [25] ZEIGER E. The biology of stomatal guard cells [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1983, **34**: 441 – 475.
- [26] 惠红, 高绪评. 水稻叶片对模拟酸雨伤害的生理反应[J]. 植物资源与环境, 1996, **5** (3): 42 – 46.
HUI Hong, GAO Xuping. The physiological responses of rice leaves to simulated acid rain [J]. *J Plant Resour Environ*, 1996, **5** (3): 42 – 46.
- [27] 杨振德, 陈锐亮, 程玉兰. 几种园林树种对酸雨抗性的研究[J]. 广西科学院学报, 1998, **14** (3): 29 – 32.
YANG Zhende, CHEN Ruiliang, CHENG Yulan. Resistance of several garden trees to acid rain [J]. *J Guangxi Acad Sci*, 1998, **14** (3): 29 – 32.