

# 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长 与光合作用的影响

金 清<sup>1</sup>, 江 洪<sup>1,2,\*</sup>, 余树全<sup>1,\*</sup>, 金 静<sup>2</sup>, 王艳红<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093).

**摘要:**通过对酸雨胁迫下中国亚热带典型针叶树和阔叶树, 马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、甜槠 (*Castanopsis eyrei* (Champ.) Tutch.)、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schott.) 幼苗的光合生理研究, 试图判断日益严重的酸雨是否会对中国亚热带森林产生影响, 以便更好地对已退化的森林进行恢复。试验结果表明: 在酸雨胁迫下, 甜槠和杉木幼苗的高生长受到的影响不显著, 而对马尾松幼苗的高生长有一定的促进作用; 在 pH4.0 时, 酸雨胁迫对甜槠、杉木和马尾松幼苗的地径生长有一定的促进; 在不同酸雨处理下, 苦槠、甜槠和马尾松幼苗的最大净光合速率随着酸雨浓度的增加而下降, 说明这 3 种植物幼苗的光合能力受到影响, 特别是阔叶树幼苗, 苦槠和甜槠幼苗的最大净光合速率分别下降了 30% 和 25%。

**关键词:**酸雨胁迫; 生长量; 光合生理; 针叶树幼苗; 阔叶树幼苗

文章编号: 1000-0933 (2009)06-3322-06 中图分类号: Q142, Q945, Q948, S718.5 文献标识码: A

## Research on the growth and photosynthesis of typical seedlings in subtropical regions under acid rain stress

JIN Qing<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2,\*</sup>, YU Shu-Quan<sup>1,\*</sup>, JIN Jing<sup>2</sup>, WANG Yan-Hong<sup>1</sup>

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

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

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3322 ~ 3327.

**Abstract:** This paper researches the effects of acid rain stress on photosynthetic and physiological characters of typical seedlings (*Pinus massoniana* Lamb., *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook., *Castanopsis eyrei* (Champ.) Tutch., *Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schott.) in subtropical regions of China. Judging increasingly serious acid rain would affect forest in subtropical regions of China, in order to restoring degenerate forest better. The results show that under acid rain stress, the height growth of *C. eyrei*, *P. Massoniana* is influenced slightly, while it will promote the height growth of *P. Massoniana*. In the treatments with pH4.0, the diameter growth of *C. eyrei*, *P. Massoniana*, *C. lanceolata* have been increased. With increased of acid rain concentration, the photosynthetic rate ( $A_{max}$ ) of *C. sclerophylla*, *C. eyrei*, *P. Massoniana* is decreased under different acid rain treatments, it shows that photosynthetic capacity of this three seedlings have been affected already, especially the broad-leaved species, the highest maximum photosynthetic rate ( $A_{max}$ ) of *C. sclerophylla*, *C. eyrei* reduced by 30% and 25% under acid rain stress respectively.

**Key Words:** acid rain stress; growth; photosynthetic physiology; conifer species seedlings; broad-leaved species seedlings

**基金项目:** 国家得到科技部 973 资助项目项目 (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 (2006DKA32300-08); 国家科技部国际合作资助项目 (200073819); 国家科技基础性工作专项资助项目 (2007FY110300-08); 浙江省重大科技专项资助项目 (2006C12060)

收稿日期: 2008-06-21; 修订日期: 2008-12-08

致谢: 蒋馥蔚、李佳、鲁美娟和胡剑等参加有关试验工作, 特致致谢。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yushq@zjfc.edu.cn

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的雨水,也包括雪、雾、雹等其它形式的酸性降水,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(如二氧化硫、氮氧化物、氯氧化物)等气体酸性物<sup>[1]</sup>。酸雨是世界十大环境问题之一,我国是继欧洲、北美之后出现的世界第三大酸雨区<sup>[2,3]</sup>。在北美及欧洲,酸雨已使森林生物量大量减少<sup>[4]</sup>。浙江省属中国酸雨频率最高的 3 个地区之一<sup>[5]</sup>,其酸雨频率高达 80% 以上。随着工业化的加速发展,酸雨的危害可能进一步加剧。

目前世界上的研究主要集中在酸雨对植物生长及生理生化方面的影响,如:在酸雨胁迫下,植物的株高及地径的生长将会受到抑制;同时植株的净光合速率也有下降的趋势<sup>[6-11]</sup>,此外,随着 pH 的降低,叶片受害面积增大,幼叶比成熟叶更易受酸雨的危害<sup>[12,13]</sup>;付晓萍等人<sup>[14]</sup>的研究表明,酸雨对植物的形态结构及生理生化方面的影响明显。但是在酸雨条件下,将植物的光合生理与群落演替相结合的研究相对较少,多数研究是在自然条件下群落的演替规律<sup>[15-17]</sup>,本次试验分别选取了群落演替的先锋种及建群种,试图了解在不同酸雨梯度胁迫下不同演替阶段的树种的光合生理情况,从而为更好的进行植被恢复打下坚实基础。

## 1 研究材料与方法

### 1.1 研究地概括

试验地在浙江省临安市(119°42'E,30°14'N)境内的浙江林学院野外试验大棚,该地属中纬度北亚热带季风气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,年降水量为 1400mm,年平均气温为 15.8℃。

### 1.2 研究材料

试验材料为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、甜槠(*Castanopsis eyrei* (Champ.) Tutch.)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schott.)的幼苗。

### 1.3 研究材料处理

选择长势一致的 2 年生幼苗于 2006 年 6 月移栽于塑料花盆中(花盆高 27cm、内径 22cm),每个酸雨梯度每种植物种植 15 盆植株,用黄壤土进行栽培,在缓苗期间,用自来水浇灌。2006 年 7 月开始喷洒酸雨,本次试验测定为 2007 年 7 月。所配制的酸雨中 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:HNO<sub>3</sub> 8:1<sup>[18,19]</sup>,用 98% 的浓硫酸和 100% 的浓硝酸配置成酸原液,再用蒸馏水稀释成 pH 值为 5.6、4.0、2.5 的 3 个梯度的酸雨喷洒液。每月酸雨喷淋量根据浙江省临安市月均降雨量确定,每周平均喷淋 3 次。酸雨喷施期间用塑料大棚遮挡自然降雨,但不影响植物的正常生长。

### 1.4 研究方法

#### 1.4.1 生长量指标测定

生长量指标包括株高及地径,测量工具为游标卡尺和卷尺,测定时间为 2007 年 7 月初。

#### 1.4.2 光合生理指标测定

本试验利用便携式红外气体分析仪 LI-6400(LI-COR, USA)开路系统测定光响应曲线,光强梯度设置为 2000,1500,1000,600,300,200,100,80,50,20,0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,测定时使用分析仪自带的红蓝光源,设定叶室温度为 25℃,流量为 500 μmol·s<sup>-1</sup>,相对湿度 60%。

试验时间为 2007 年 7 月,选择晴好天气进行光响应曲线的测定,时间为每天 7:00~11:00,每种植物每个梯度随机选取 3~5 片当年生成熟叶片进行测定。

#### 1.4.3 数据分析

本文数据通过 Photosyn Assistant 软件进行最大净光合速率( $A_{max}$ )、光饱和点( $LSP$ )、光补偿点( $LCP$ )、表观量子效率( $AQY$ )和暗呼吸速率( $R_d$ )的拟合,此软件中计算采用的曲线拟合方程为:

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

式中, $A$  代表光合速率; $Q$  代表的是光照强度; $\phi$  代表表观量子效率; $K$  代表的是光合曲线的曲率其大小介于(0,1)之间。

数据分析利用 Spss13.0 软件,采用单因素方差分析,分析在不同酸雨梯度处理下光合生理相关指标差异的显著性,在数据分析前,对所有数据进行正态性与齐性检验。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 针叶树和阔叶树幼苗在不同酸雨梯度下的生长量

在不同酸雨浓度处理下,甜槠和杉木幼苗的生长高度受到的影响不显著,而酸雨胁迫对马尾松幼苗的高生长在一定时间内有一定的促进作用(图 1),并且各酸雨梯度间存在显著性差异( $P = 0.05$ )。

除苦槠幼苗外,在 pH2.5 的酸雨处理下,其余 3 种植株幼苗的地径生长均受到抑制;而 pH4.0 的酸雨处理在一定程度上促进了地径的生长(图 2)。

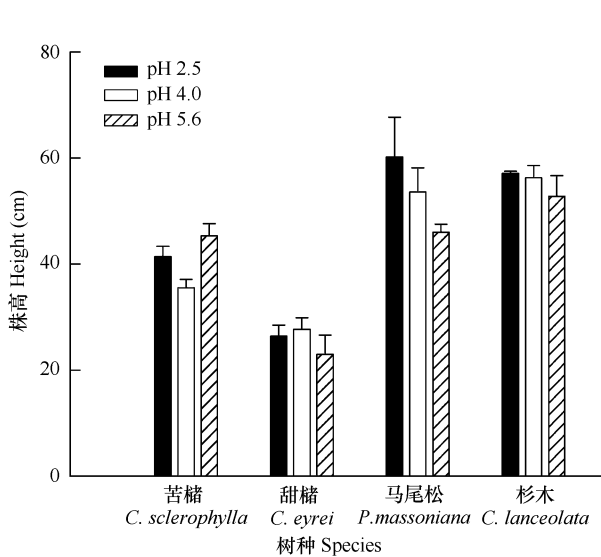


图 1 4 种树种幼苗在不同酸雨梯度处理下的株高(均值  $\pm$  标准误差)

Fig. 1 The height of seedlings of (*C. sclerophylla*, *C. eyrei*, *P. Massoniana*, *C. lanceolata*) under different acid rain treatments (mean  $\pm$  standard error)

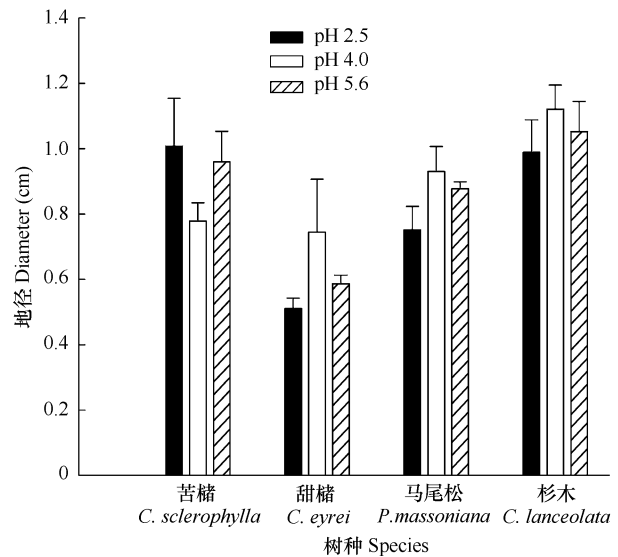


图 2 4 种树种幼苗在不同酸雨梯度处理下的地径(均值  $\pm$  标准误差)

Fig. 2 The diameter of seedlings of (*C. sclerophylla*, *C. eyrei*, *P. Massoniana*, *C. lanceolata*) under different acid rain treatments (mean  $\pm$  standard error)

### 2.2 针叶树和阔叶树幼苗在不同酸雨梯度下的光合作用-光响应曲线

当光合有效辐射大于  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,苦槠幼苗的净光合速率随着酸雨浓度的增加有下降的趋势(图 3);甜槠幼苗在光合有效辐射大于  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,净光合速率随着酸雨浓度的增加逐渐下降(图 4)。

马尾松和杉木幼苗在光合有效辐射大于  $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各酸雨梯度间的净光合速率存在差异(图 5,图 6)。马尾松幼苗的净光合速率随着酸雨浓度的增加逐渐下降,而杉木幼苗的净光合速率在 pH2.5 的处理下最高。

### 2.3 针叶树和阔叶树幼苗在不同酸雨梯度下的光合作用——光响应特征参数

除杉木幼苗外,随着酸雨浓度的增加,各树种幼苗的最大净光合速率  $A_{\text{max}}$  都有下降的趋势(表 1),尤其是阔叶树幼苗,苦槠的最大净光合速率  $A_{\text{max}}$  下降了 30%,甜槠下降了 25%。但是,苦槠和甜槠的  $A_{\text{max}}$  值在各酸雨梯度下无显著差异;同样,两物种的光补偿点  $LCP$  在不同酸雨梯度下差异也不显著。另外,4 物种幼苗的表观光合量子效率  $AQY$  和暗呼吸速率  $R_d$  在不同的酸雨梯度处理下无显著差异。除苦槠幼苗外,各个物种在不同的酸雨梯度下光饱和点  $LSP$  无显著差异。

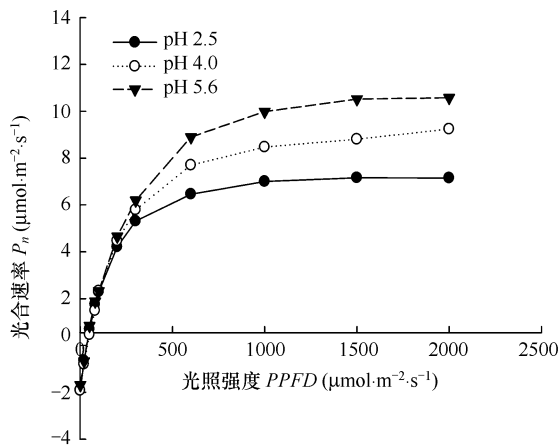


图3 苦楮幼苗光响应曲线图  
Fig. 3 The light curve of *C. sclerophylla*

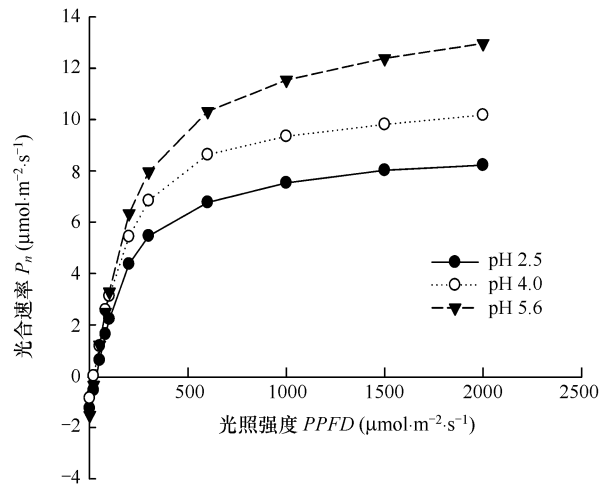


图4 甜楮幼苗光响应曲线图  
Fig. 4 The light curve of *C. eyrei*

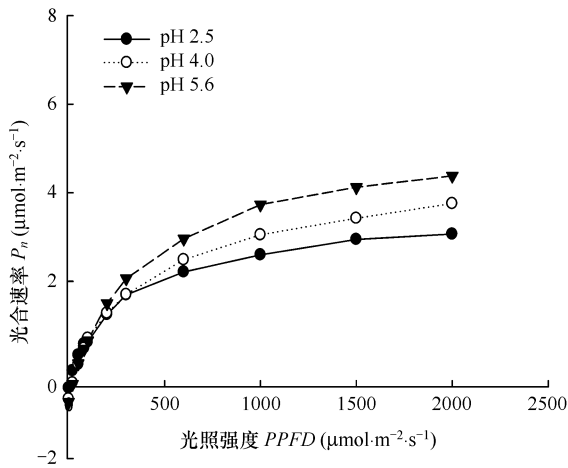


图5 马尾松幼苗光响应曲线  
Fig. 5 The light curve of *P. massoniana*

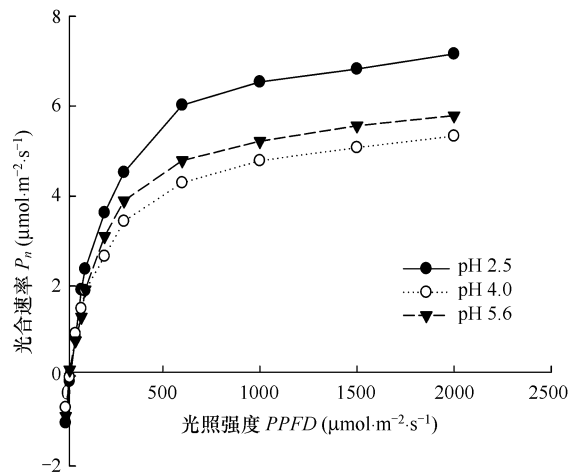


图6 杉木幼苗光响应曲线  
Fig. 6 The light curve of *C. lanceolata*

在正常雨水条件下,针叶树和阔叶树幼苗之间的最大净光合速率  $A_{max}$  存在显著性差异 ( $P = 0.05$ ),随着酸雨浓度的增加,阔叶树幼苗的最大净光合速率  $A_{max}$  下降明显,在 pH2.5 时,杉木幼苗与阔叶树幼苗之间差异不显著,暗呼吸速率  $R_d$  同样如此。除 pH4.0 时的杉木幼苗,针叶树和阔叶树幼苗之间的光补偿点  $LCP$  差异不显著。在各个酸雨梯度下,马尾松幼苗的表观光合量子效率  $AQY$  均明显低于阔叶树幼苗,与其存在显著性差异 ( $P = 0.05$ )。

### 3 讨论

在酸雨胁迫下,杉木幼苗的生长高度受到的影响不大,而马尾松和杉木的地径生长在 pH2.5 时受到一定的抑制,这与樊后保及单运峰等人的研究结果相似。酸雨对幼苗生长的影响随树种及处理水平的不同而异<sup>[20]</sup>,随着酸雨浓度的增加,树种的生长量都受到一定程度的抑制,但苦楮和甜楮幼苗在酸胁迫下,高度生长受到的抑制不大,甜楮、杉木及马尾松幼苗在 pH4.0 时对地径的生长有一定的促进作用。

在正常雨水下,阔叶树种的最大净光合速率明显高于针叶树种,试验中杉木幼苗的最大净光合速率与张小全等<sup>[21]</sup>的试验数据基本相似,苦楮幼苗的最大净光合速率与张昊民的试验数据类似。在酸雨胁迫下,阔叶树幼苗及马尾松幼苗的最大净光合速率都有下降的趋势,阔叶树幼苗的最大净光合速率下降明显,但在各酸

表 1 同一树种幼苗在不同酸雨梯度处理下光合作用-光响应曲线的特征参数值(平均值 ± 标准误)

Table 1 Photosynthesis-response curves characteristic parameter values of the same species seedling under the different density of acid rain (mean ± standard error)

树种 Species	处理 Treatment	光补偿点 $LCP$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	光饱和点 $LSP$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	最大净光合速率 $A_{\max}$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	表观光合量子 效率 $AQY$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	暗呼吸速率 $R_d$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	pH2.5	25.5 ± 0.18a	182 ± 13.46c	9.65 ± 0.24a	0.0563 ± 0.0034a	-1.41 ± 0.11a
	pH4.0	31.9 ± 3.30a	261 ± 22.81b	12.3 ± 1.43a	0.0534 ± 0.0023a	-1.68 ± 0.25a
	pH5.6	28.7 ± 0.58a	370 ± 17.28a	13.8 ± 1.71a	0.0454 ± 0.0054a	-1.61 ± 0.26a
甜槠 <i>C. eyrei</i>	pH2.5	36.8 ± 3.30a	243 ± 33.04a	11.8 ± 2.23a	0.0481 ± 0.0074a	-1.64 ± 0.36a
	pH4.0	27.8 ± 3.63a	255 ± 28.54a	12.7 ± 0.96a	0.0529 ± 0.0061a	-1.29 ± 0.15a
	pH5.6	28.9 ± 2.84a	281 ± 38.93a	15.7 ± 0.83a	0.0656 ± 0.0080a	-1.79 ± 0.16a
杉木 <i>C. lanceolata</i>	pH2.5	23.7 ± 1.77a	182 ± 21.67a	8.72 ± 0.57a	0.0453 ± 0.0043a	-0.94 ± 0.23a
	pH4.0	16.1 ± 2.11b	190 ± 21.67a	6.75 ± 0.66b	0.0407 ± 0.0073a	-0.67 ± 0.12a
	pH5.6	24.9 ± 0.58a	195 ± 16.79a	6.98 ± 0.42ab	0.0442 ± 0.0014a	-0.81 ± 0.15a
马尾松 <i>P. massoniana</i>	pH2.5	32.6 ± 5.64a	368 ± 46.90a	4.60 ± 1.13a	0.0185 ± 0.0032a	-0.45 ± 0.06a
	pH4.0	34.9 ± 5.35a	408 ± 43.06a	4.84 ± 0.52a	0.0153 ± 0.0095a	-0.28 ± 0.02a
	pH5.6	36.8 ± 5.98a	459 ± 48.21a	5.30 ± 0.65a	0.0156 ± 0.0336a	-0.38 ± 0.10a

表 1 采用单因素方差分析比较相同树种幼苗在不同酸雨梯度处理下的差异显著性 ( $P=0.05$ ) Table 1 using One-way ANOVA to compare parameters of the same species seedling under different acid rain treatments for difference significance ( $P=0.05$ )

雨梯度下的最大净光合速率不存在显著性差异。同一树种幼苗在不同酸雨梯度下的表观光合量子效率、暗呼吸速率无显著差异,表明酸雨胁迫对植物利用光能的效率及呼吸速率影响不大;除杉木幼苗外,光补偿点皆不存在显著性差异,可见酸雨胁迫对植物幼苗利用弱光的能力影响不大。由此可见:无论是阔叶树幼苗还是针叶树幼苗对酸雨胁迫都具有一定的抵御能力,这可能是由于苦槠和甜槠作为群落演替的建群种,在群落中具有相对的稳定性,对环境的变化具有较强的抵御能力;马尾松作为群落演替的先锋种,对不良环境具有较强的适应能力。

通过本次对马尾松、杉木、苦槠和甜槠幼苗的生长量及光合生理特性的试验研究可以看出:在酸雨胁迫下,针叶树和阔叶树幼苗的反应模式具有一定的差异。阔叶树幼苗和针叶树幼苗对酸雨胁迫都具有一定的适应和缓冲能力,但介于阔叶树种在群落演替中相对稳定,因此,将阔叶树种作为亚热带酸雨控制区森林恢复重建中的主要树种,对于在区域环境污染压力下生态系统结构和功能的恢复可能具有重要的意义。

## References:

- [ 1 ] Fu X P, Tian D L. Research progress of the effect of acid rain on plant. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4): 23-27.
- [ 2 ] Feng Z W. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China. Engineering Science, 2000, 9(2): 5-12.
- [ 3 ] Yang B H. The harmfulnesses of acid rain and its prevention and control strategies in China. Journal of Hefei Union University, 2000, 10(2): 102-106.
- [ 4 ] George H. Acidic deposition, nutrient leaching and forest growth. Biogeochemistry, 2003, 65(1): 51-81.
- [ 5 ] Tan Y H. Status on acid rain in China. Journal of Liaoning Teachers College, 2004, 6(1): 95-98.
- [ 6 ] Fan H B, Huang Y Z, Li Y Y, et al. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growth of *Cunninghamia lanceolata*. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2005, 27(6): 875-879.
- [ 7 ] 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, 2006, 31(2): 151-156.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.

- [10] Fan H B. Effects of simulated acid rain on seedling growth of five hardwood species. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1996, 16(4): 289—292.
- [11] 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: 121—127.
- [12] Bruce H, Marcia S, Floyd H. Acid rain: Threshold of leaf damage in eight plant species from a southern Appalachian forest succession. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1980, 14: 403—407.
- [13] Xiao Y, Huang J C, Liu S X, *et al.* Inhibitory effects of simulated acid rain on the growth of 12 garden plant species and their physiological response to it. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2004, 26(3): 270—276.
- [14] Fu X P, Tian D L, Huang Z Y. Effects of simulated acid rain on phytomorphology. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2006, 23(5): 521—526.
- [15] Ding S Y, Song Y C. The comparison of photosynthesis physioclology of evergreen broad leaved forest of Tiantong National Forest Park in Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 318—323.
- [16] Zhao P, Zeng X P, Peng S L. Ecological adaptation of leaf gas exchange of trees used for re-vegetation under different experimental light regimes. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(3): 1—8.
- [17] Zhang G P, Yang Y P. Research on ecological recovery and succession of subtropics forest and choice of tree species. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2006, 30(2): 24—26.
- [18] Xu D C. Contamination and prevention of acid rain — the current of acid rain and prevention countermeasure in Zhejiang Province. *Energy Environmental Protection*, 1995, 9(4): 25—28.
- [19] Li Z G, Weng M L, Jiang W, *etal.* Effects of simulated acid rain on some physiological indices of *Parakmeria lotungensis* seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 31—34.
- [20] Gary D. Effect of simulated acid rain on physiology, growth and foliar nutrient concentrations of Sugar Maple. *Chemosphere*, 1998, 36(4, 5): 633—638.
- [21] Zhang X Q, Xu D Y. Seasonal changes and daily courses of photosynthetic characteristics of 18 years old Chinese fir shoots in relation to shoot ages and positions within tree crown. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(3): 19—26.

#### 参考文献:

- [1] 付晓萍, 田大伦. 酸雨对植物的影响研究进展. *西北林学院学报*, 2006, 21(4): 23~27.
- [2] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策. *中国工程科学*, 2000, 9(2): 5~12.
- [3] 杨本宏. 我国酸雨危害现状及防治对策. *合肥联合大学学报*, 2000, 10(2): 102~106.
- [5] 谭燕宏. 中国酸沉降现状. *辽宁师专学报*, 2004, 6(1): 95~98.
- [6] 樊后保, 黄玉梓, 李燕燕, 等. 模拟酸雨对杉木种子萌发和幼苗生长的影响. *江西农业大学学报*, 2005, 27(6): 875~879.
- [7] 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*, 2006, 31(2): 151~156.
- [9] 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.
- [10] 樊后保. 模拟酸雨对5种阔叶树幼苗生长的影响. *福建林学院学报*, 1996, 16(4): 289~292.
- [13] 肖艳, 黄建昌, 刘少娴, 等. 模拟酸雨对12种园林植物的伤害及敏感性反应. *西南农业大学学报*, 2004, 26(3): 270~276.
- [14] 付晓萍, 田大伦, 黄智勇. 模拟酸雨对植物形态学效应的影响. *浙江林学院学报*, 2006, 23(5): 521~526.
- [15] 丁圣彦, 宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林演替系列优势种光合生理生态的比较. *生态学报*, 1999, 19(3): 318~323.
- [16] 赵平, 曾小平, 彭少麟. 植被恢复树种在不同实验光环境下叶片气体交换的生态适应特点. *生态学杂志*, 2003, 22(3): 1~8.
- [17] 张国平, 杨元萍. 亚热带坡地森林生态恢复演替及树种选择的研究. *黑龙江环境通报*, 2006, 30(2): 24~26.
- [18] 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.
- [19] 李志国, 翁忙玲, 姜武, 等. 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.
- [21] 张小全, 徐德应. 杉木中龄林不同部位和叶龄针叶光合特性的日变化和季节变化. *林业科学*, 2000, 36(3): 19~26.