

模拟酸雨对山核桃叶绿素荧光参数、 叶绿素和生长的影响

刘 昊, 余树全, 江 洪, 方江保

(浙江林学院 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为探明酸雨对山核桃 *Carya cathayensis* 叶绿素荧光特性的影响, 设置 pH 2.5, 3.5, 4.5 和 5.6 (ck) 共 4 个模拟酸雨处理, 于 2006 年 10 月, 2007 年 4 月、7 月、10 月, 利用叶绿素荧光技术测定了模拟酸雨胁迫后的山核桃的叶绿素荧光参数。结果表明: PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m), PS II 的潜在活性 (F_v/F_0), PS II 实际光化学量子产量 (Φ_{PSII}) 和叶绿素的变化都随着模拟酸雨 pH 值的降低而降低, pH 2.5 的处理下降幅度比较大, 说明模拟酸雨对这个处理的山核桃有一定的伤害, 其他处理之间变化不大。各个月表现基本一致, 尤其 2007 年 10 月差异明显, 说明模拟酸雨处理的山核桃更容易受到低温胁迫, 造成伤害。研究还表明, F_v/F_m , F_v/F_0 , Φ_{PSII} 可作为植物受到酸雨影响的重要指标。图 2 表 2 参 25

关键词: 植物学; 模拟酸雨; 山核桃; 叶绿素荧光; 叶绿素; 生长

中图分类号: S718.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2009)01-0032-06

Chlorophyll fluorescence of *Carya cathayensis* with simulated acid rain

LIU Hao, YU Shu-quan, JIANG Hong, FANG Jiang-bao

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: What's the effect of acid rain on *Carya cathayensis*, an excellent dry fruit tree plant which mainly produced in Zhejiang. The chlorophyll fluorescence analysis was used to determine the effects of acid rain stress with *C. cathayensis*. The experiment was set up with four groups of simulated acid rain treatments, including pH 2.5, pH 3.5, pH 4.5, and pH 5.6 (as the control) in Oct. 2006, Apr. 2007, July 2007, and Oct. 2007 with 10 pots of one-year-old *C. cathayensis* for each treatment. Results showed that as pH of the simulated acid rain decreased, maximal photochemical efficiency of Photosystem II (PS II) (F_v/F_m), potential activity of PS II (F_v/F_0), actual photochemical efficiency of PS II (Φ_{PSII}), and chlorophyll content were all decreased and they were not obviously different except in Oct. 2007 ($P < 0.01$). All test parameters could be used as the physiological indexes for assessment parameters of acid rain resistance. *C. cathayensis* was more susceptible to low temperature. [Ch, 2 fig. 2 tab. 25 ref.]

Key words: botany; simulated acid rain; *Carya cathayensis*; chlorophyll fluorescence; chlorophyll; growth

酸雨是当今世界面临的重大环境问题。中国酸雨正呈蔓延之势, 继欧洲、北美之后成为世界第三大酸雨区。目前, 中国国土总面积的 40% 受到酸雨的危害。浙江省的酸雨形势也非常严峻, 已成为中国酸雨污染最严重的地区之一^[1-2]。植物作为陆地生态系统的主体, 是酸雨污染的主要受体。许多学者从植物生理生态等方面对酸雨危害植物做了大量的研究, 取得了显著的成果^[3]。研究表明, pH 2.0 的模拟酸雨严重抑制了闽粤栲 *Castanopsis fissa* 和樟树 *Cinnamomum camphora* 种子的萌发, pH 3.5

收稿日期: 2008-04-03; 修回日期: 2008-05-16

基金项目: 浙江省重大科技攻关项目(2006C12060)

作者简介: 刘昊, 从事植物生理生态和生态规划等研究。E-mail: xiaoxia1945@163.com。通信作者: 余树全, 教授, 博士, 从事生态系统生态、群落生态和生态规划等研究。E-mail: yushq@zjfc.edu.cn

的处理降低了幼苗叶片的叶绿素含量,但增加了幼苗的生物量^[4]; pH 2.5 的模拟酸雨明显降低芒果 *Mangifera indica* 光合速率^[5]。山核桃 *Carya cathayensis* 属胡桃科 Juglandaceae 山核桃属 *Carya* 落叶乔木,主产中国天目山区和大别山区,是中国特有的名优干果和木本油料作物,具有营养、保健、美容及药用价值^[6-7]。山核桃的研究主要集中在繁育技术、高产稳产、产品加工、病虫害防治以及生态学和生物学特性^[8]。但是,迄今为止,有关酸雨胁迫条件下山核桃光合响应和生长状况却未见研究报道。临安位于天目山区,作为酸雨重灾区,2002 年酸雨频率高达 97.5%,降水 pH 4.04^[9]。叶绿素荧光分析是近年发展起来的用于光合作用机制研究和光合生理状况检测的一种新技术,该技术在植物光合机制^[10]、植物抗逆生理^[11]和林木培育^[12]等方面的研究已取得一定进展。基于此,笔者采用叶绿素荧光分析方法,测定山核桃在模拟酸雨条件下的叶绿素荧光参数,研究酸雨对山核桃叶绿素荧光特性的影响,探讨酸雨对山核桃光合系统影响的机制,为山核桃在自然条件下选择良好的生境提供理论参考,同时为其他植物模拟酸雨条件下的叶绿素荧光测定提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究地的自然状况

实验地设在浙江林学院苗圃,位于 29°56', 118°51'。属中亚热带季风气候区,温暖湿润,四季分明。全年日照时数为 1 847.3 h,全年降水量为 1 628.6 mm,全年平均气温为 16.4 °C,1 月份平均气温为 3.8 °C,7 月份平均气温为 28.6 °C,极端最高气温为 40.4 °C,极端最低气温为 -9.2 °C,年无霜期 250 d 左右。土壤为黄壤。

1.2 植物材料

本实验选择自然条件下 1 年生山核桃健康树苗,地径为 (55.167 ± 3.320) cm,苗高 (0.814 ± 0.041) cm 盆栽于控根育苗容器中。

1.3 实验方法

根据齐泽民等^[13]的酸雨配置方法,借助 pH SH-2C 型精密酸度计测定而配制 pH 2.5, 3.5, 4.5 等 3 个模拟酸雨处理和 1 个 pH 5.6 的对照处理。每个处理 10 盆健康植株,放置在塑料大棚中。同时根据临安市月平均降水量喷施酸雨。酸雨于 2006 年 7 月 8 日开始喷施,实验期间不施肥,仅去除一些杂草,喷施期间用塑料薄膜遮挡自然降雨。

叶绿素荧光各参数用便携式调制叶绿素荧光仪(PAM-2100, Walz, Germany)进行测定。测定时间为 2006 年 10 月,2007 年 4 月、7 月和 10 月。每次测定都选在晴天的 9:00 - 10:00 在大棚里进行,在每个处理随机选取 6 片主梢上的功能叶测定。获取的主要参数为: F_0 (初始荧光), F_m (最大荧光), $F_v = F_m - F_0$ (可变荧光), F_v/F_m (PS II 最大光化学效率), F_v/F_0 (PS II 的潜在活性), F_0' (作用光关闭时的原初荧光产量), F_m' (作用光打开时的最大荧光产量), F_v'/F_m' (PS II 有效光化学量子产量), Φ_{PSII} (PS II 实际光化学量子产量)。其中, F_0 , F_m , F_v/F_m 测定前,叶片经过 20 min 的暗适应。另于 2007 年 11 月份在每个处理组随机选取 6 片主梢上的功能叶(标记叶片)测定叶绿素荧光参数的日变化情况,测定时间为 7:00, 9:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00。

相对叶绿素含量(SPADR)用便携式叶绿素含量测定仪(SPAD-502, Japan)测定。测定时,不同 pH 值模拟酸雨处理随机选取 6 片完好的功能叶,在每个叶片中脉两侧,均匀选取 3 个点读取叶色值,平均值作为该叶片的相对叶绿素含量。测定时间为 2006 年 10 月、2007 年 4 月、7 月和 10 月。

地径和株高用游标卡尺和卷尺于 2007 年 11 月测量。

2 结果和分析

2.1 模拟酸雨对山核桃 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响

F_v/F_m 是 PS II 最大光化学效率,反映的是 PS II 原初光能转化效率。非环境胁迫条件下,该参数极少变化,不受物种和生长条件的影响,但是植物在受到一定胁迫的情况下 F_v/F_m 会发生明显变化,是反映环境胁迫程度的良好指标和探针。 F_v/F_0 代表 PS II 的潜在活性^[14]。由图 1 知, F_v/F_m 随着 pH 值的

增加而增加, F_v/F_0 的变化趋势与 F_v/F_m 基本一致。在 pH 2.5 酸雨条件下, F_v/F_m 和 F_v/F_0 一般都是最小值, 说明这种酸雨处理使山核桃的 PS II 原初光能转化效率和 PS II 的潜在活性都显著降低, 差异性显著。盆栽控根处理下植物生长受到一定的限制, 又经过 1 a 多的模拟酸雨实验处理, 植物更容易受到低温的伤害。分别比较 2007 年 10 月与 2006 年 10 月的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 可知, 各个处理均有不同程度的降低, pH 2.5 降幅最大, 随着 pH 增加, 下降幅度逐渐减小, 各处理之间的差异也就越小。

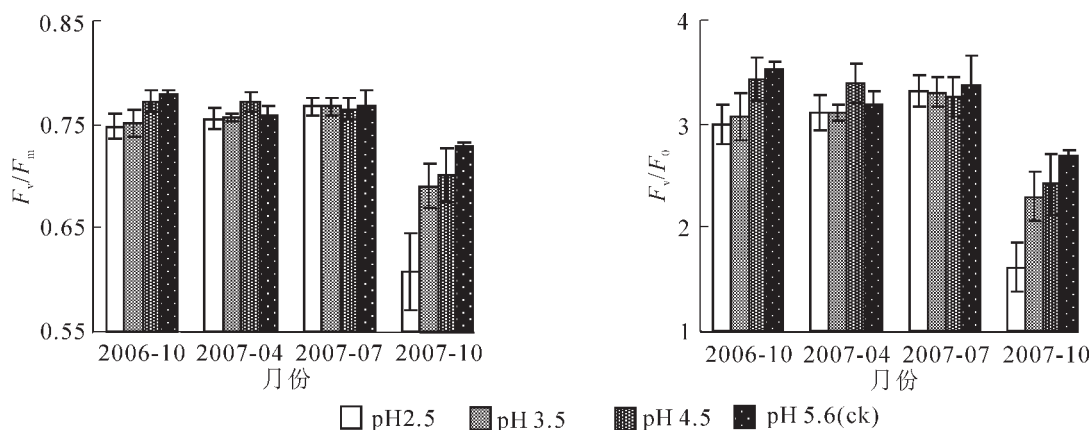


图 1 模拟酸雨对山核桃 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响

Figure 1 Effects of simulated acid rain on F_v/F_m and F_v/F_0 of *Carya cathayensis*

2.2 模拟酸雨对山核桃 Φ_{PSII} 的影响

Φ_{PSII} 表示作用光存在时 PS II 的实际光化学量子产量, 反映了 PS II 反应中心在环境胁迫中有部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率, 也是实际的 PS II 反应中心进行光化学反应的效率^[15]。图 2 显示, 经过酸雨处理后山核桃的 PS II 的实际光化学量子产量随着 pH 减小而减小, 基本保持一致性。其中 pH 2.5 处理变化最大, 特别是 2007 年 10 月最为显著, 说明山核桃对 pH 2.5 模拟酸雨处理最为敏感, 受害也最为严重, 其他 3 个处理之间差异不大。在晴天自然光下, Φ_{PSII} 在早上即开始下降, 11:00 之后, 山核桃的 Φ_{PSII} 处于最低的水平, PS II 活性下调, 特别是 pH 2.5 处理变化更为明显。表明在强光下, 叶片吸收的光能只有极少量用于光化学电子传递和参与二氧化碳固定。可见, 山核桃叶片在经过强光的照射后, 叶片的光合机构受到严重的光抑制, 部分 PS II 反应中心可能受到光破坏, 特别是 pH 2.5 处理又受到强酸的处理下降的比例更加大。下午随着光强的减弱 Φ_{PSII} 逐渐回升, 慢慢恢复并超过早上的水平。这是由于 11 月植物受到一夜的低温胁迫, 导致早晨数值比较低, 所以 17:00 恢复的数值高于 7:00 时的数值。田海涛等^[16]在对 7 种箬竹 *Indocalamns tessellatus* 抗寒特性比较中也是 Φ_{PSII}

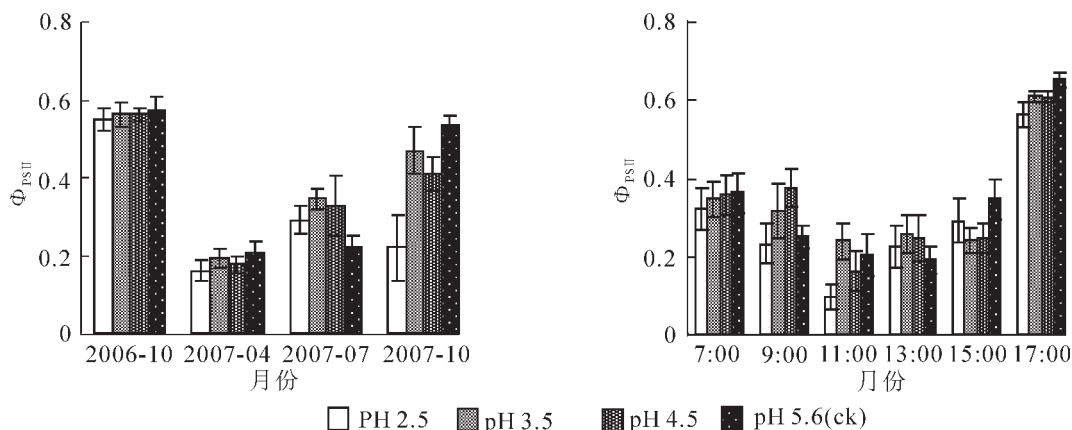


图 2 模拟酸雨对山核桃 Φ_{PSII} 的影响

Figure 2 Effects of simulated acid rain on Φ_{PSII} of *Carya cathayensis*

在 17:00 的数值高于 7:00 时的数值,表现出一定的低温胁迫。

2.3 模拟酸雨对山核桃相对叶绿素含量的影响

相对叶绿素含量(SPADR)也称绿色度,通过数值的大小来定量描述叶片的绿色度。艾天成等^[17]、宋绪忠等^[18]、姜丽芬等^[19]的研究结果表明,SPADR 与叶绿素含量具有显著的相关性,能较好地反映植物叶绿素含量的变化。从表 1 可以看出,2007 年 4 月和 7 月各处理组之间差异不大,2006 年 10 月与 2007 年 10 月各处理之间差异较显著,而且随着模拟酸雨 pH 值的减小而减小,说明植物在模拟酸雨的条件下,pH 值低的处理更容易受到低温的伤害。与 2007 年 7 月相比,随着模拟酸雨 pH 值的增加,2007 年 10 月的 SPADR 值分别下降了 11.1%,10.3%,3.0%,−8.0%。

表 1 模拟酸雨对山核桃相对叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of simulated acid rain on SPADR of *Carya cathayensis* ($x \pm s$)

处理 pH	不同处理对 SPADR 的影响			
	2006-10	2007-04	2007-07	2007-10
2.5	28.983 ± 1.189 bB	19.450 ± 0.808 aA	32.433 ± 1.633 aA	28.817 ± 1.176 cB
3.5	32.200 ± 0.255 bB	20.600 ± 2.250 aA	32.475 ± 0.933 aA	29.133 ± 0.459 bcB
4.5	31.300 ± 1.227 bAB	19.050 ± 1.298 aA	32.600 ± 0.579 aA	31.633 ± 0.922 bB
5.6(ck)	36.080 ± 0.920 aA	20.533 ± 0.670 aA	33.283 ± 0.990 aA	35.967 ± 1.173 aA

说明:大小写字母分别表示 1%和 5%的显著水平。

2.4 模拟酸雨对山核桃地径和株高生长的影响

经过 1 年 4 个月的酸雨喷施后的山核桃地径和株高生长调查表明,对比 pH 5.6(ck),2.5,3.5,4.5 模拟酸雨处理对植物影响差异性不显著(表 2)。冯宗炜等^[20]的研究表明,短期内(7 个月)模拟酸雨对马尾松和杉木茎生物量没有明显影响。但是酸雨的长期作用,最终会导致植物地上部分的生长受抑制,这种潜在的影响不容忽视。

表 2 模拟酸雨对山核桃地径和株高生长的影响

Table 2 Effects of simulated acid rain on the growth of plant diameter and height of *Carya cathayensis* ($x \pm s$)

项目	不同处理 pH 对地径和株高生长的影响			
	2.5	3.5	4.5	5.6(ck)
地径/cm	75.929 ± 2.716 aA	80.522 ± 4.916 aA	75.188 ± 1.197 aA	83.75 ± 4.379 aA
株高/cm	1.041 ± 0.032 aA	1.009 ± 0.039 aA	1.036 ± 0.03 aA	0.94 ± 0.018 aA

说明:大小写字母分别表示 1%和 5%的显著水平。

3 讨论与结论

模拟酸雨处理使山核桃的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 下降,揭示山核桃叶绿体的 PS II 反应中心受到伤害,电子从 PS II 反应中心到质体醌 A(QA)、质体醌 B(QB)和质醌(PQ)的运输受到一定的阻碍,这也影响了反应中心色素的激发能向 PS II 转运; Φ_{PSII} 的下降亦表明了光合电子传递受阻。说明酸雨胁迫处理可以引起众多参数值的减小,降低 PS II 反应中心开放部分的比例,减小光合速率,减缓光合产物的运输和积累。在众多荧光参数中,高的 F_v/F_m , F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 值已基本被公认为叶片高光合效率的重要依据,且不少研究指出 F_v/F_m , F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 有很好的—致性^[21]。有研究表明: F_v/F_o 对酸雨的反应最敏感,可作为一项生理指标来检测酸雨对龙眼 *Dimorcarpus longan* 的危害情况^[22]。本研究发现 Φ_{PSII} , F_v/F_m , F_v/F_o 表现也基本一致, F_v/F_m , F_v/F_o , Φ_{PSII} 可作为植物受到酸雨胁迫的重要指标。

叶绿素是绿色植物光合作用的基础物质,叶绿素的多少及消长规律是反映叶片生理活性变化的重

要指标^[23]。研究表明杜仲 *Eucommia ulmoides* 的叶绿素和叶绿素 a / b 值随酸雨 pH 值降低而降低, 呈显著正相关^[12]; 13 种南方果树和 12 种园林植物叶片叶绿素随模拟酸雨的 pH 值降低而降低, 降幅越来越大^[24-25]。叶色值的变化很直观地反映出叶绿素的变化, 本研究发现山核桃叶片的叶绿素也是随着模拟酸雨 pH 值的降低而降低, 和上述结果表现基本一致。

山核桃在 pH 2.5, 3.5 和 4.5 模拟酸雨和 pH 5.6(ck)处理下, 叶绿素荧光参数 F_v/F_m , F_v/F_o , Φ_{PSII} 值、SPADR 均随着模拟酸雨 pH 值的降低而减小, 在 pH 3.5 和 4.5 处理条件下没有受到明显的伤害, 但 pH 2.5 对其伤害比较大。但是有实验表明在相同 pH 条件下, 自然酸雨比模拟酸雨对植物的伤害更大^[20], 另外实验也仅仅一年多的时间, 远远少于自然界植物遭受酸雨胁迫的时间, 而且自然界还有其他多种的不利生存的因素, 本实验并不能完全反应山核桃在自然状况下的受到的酸雨胁迫情况, 酸雨对野外生存的山核桃可能会有更大的潜在威胁, 考虑到临安是酸雨重灾区, 又是山核桃的主产区, 防治酸雨是刻不容缓, 这样才可以给山核桃等植物创造更适宜的生境。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. 中国工程科学, 2000, 2 (9): 5 - 11.
FENG Zongwei. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China[J]. *Eng Sci*, 2000, 2 (9): 5 - 11.
- [2] 冯宗炜. 中国酸雨的生态影响和防治对策[J]. 云南环境科学, 2000, 8 (增刊): 1 - 6.
FENG Zongwei. Ecological effects and control strategies of acid deposition on ecosystems in China [J]. *Yunnan Environ Sci*, 2000, 8 (19): 1 - 6.
- [3] 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.
FU Xiaoping, TIAN Dalun. Research progress of the effect of acid rain on plant [J]. *J Northwest For Univ*, 2006, 21 (4): 23 - 27.
- [4] 樊后保, 臧润国. 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, ZANG Runguo. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growth of *Cinnamomum camphora*[J]. *J Zhejiang For Coll*, 1996, 13 (4): 412 - 417.
- [5] 陈美华, 欧世金, 蒋德书. 模拟酸雨对芒果生长及土壤的影响[J]. 广西农业生物科学, 1995, 14 (4): 300 - 304.
CHEN Meihua, OU Shijin, JIANG Deshu. The influence of simulated acidic rain on the growth of mango and soil [J]. *J Guangxi Agric Biol Sci*, 1995, 14 (4): 300 - 304.
- [6] 李宝华, 迟道兵, 陈红红, 等. 山核桃光合生理特性与产量的关系[J]. 林业科技开发, 2007, 21 (5): 34 - 37.
LI Baohua, CHI Daobing, CHEN Honghong, et al. Relationships between net photosynthetic characteristics and yield of the *Carya cathayensis* Sarg. [J]. *China For Sci Technol*, 2007, 21 (5): 34 - 37.
- [7] 黄坚钦, 方伟, 丁雨龙, 等. 影响山核桃嫁接成活的因子分析[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19 (3): 227 - 230.
HUANG Jianqin, FANG Wei, DING Yulong, et al. Analysis on factors effecting survival rate in *Carya cathayensis* grafting[J]. *J Zhejiang For Coll*, 2002, 19 (3): 227 - 230.
- [8] 程晓建, 黄坚钦, 郑炳松, 等. 山核桃研究进展[J]. 浙江林业科技, 2002, 22 (3): 19 - 23.
CHENG Xiaojian, HUANG Jianqin, ZHENG Binsong, et al. Advances in study of *Carya cathayensis* [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2002, 22 (3): 19 - 23.
- [9] 林丰妹, 焦荔, 盛侃. 杭州市酸雨污染现状及成因分析[J]. 环境监测管理技术, 2004, 16 (3): 17 - 20.
LIN Fengmei, JIAO Li, SHENG Kan. Acid rain pollution and its origin of Hangzhou [J]. *Adm & Tech Environ Monit*, 2004, 16 (3): 17 - 20.
- [10] 赵会杰, 邹琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34 (3): 248 - 251.
ZHAO Huijie, ZOU Qi, YU Zhenwen. Chlorophyll fluorescence analysis technique and its application to photosynthesis of plant[J]. *J Henan Agric Univ*, 2000, 34 (3): 248 - 251.
- [11] HAVAUX M, EYMERY F, PORFIROVA S, et al. Vitam in E protects against photoinhibition and photooxidative stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Cell*, 2005, 17 (12): 3451 - 3469.
- [12] 温国胜, 田海涛, 张明如, 等. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用[J]. 应用生态学报, 2006, 17 (10):

- 1973 – 1977.
- WEN Guosheng, TIAN Haitao, ZHANG Mingru, *et al.* Application of chlorophyll fluorescence analysis in forest tree cultivation[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17** (10): 1973 – 1977.
- [13] 齐泽民, 钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2006, **31** (2): 151 – 156.
- QI Zemin, ZHONG Zhangcheng. Effect of simulated acid rain on photosynthesis and growth of *Eucommia ulmoides* Oliv. [J]. *J Southwest China Normal Univ Nat Sci Ed*, 2006, **31** (2): 151 – 156.
- [14] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, **16** (4): 444 – 448.
- ZHANG Shouren. A discussion on chlorophyll fluorescence Kinetics parameters and their significance [J]. *Chin Bull Bot*, 1999, **16** (4): 444 – 448.
- [15] CARRASCO R M, RODRIGUEZ J S, PEREZ P. Changes in chlorophyll fluorescence during the course of photoperiod and in response to drought in *Casuarina equisetifolia* forest[J]. *Photosynthetica*, 2002, **40**: 363 – 368.
- [16] 田海涛, 高培军, 温国胜. 7 种箬竹抗寒特性比较[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (6): 641 – 646.
- TIAN Haitao, GAO Peijun, WEN Guosheng. Comparative study of cold resistance characteristics in seven *Indocalamus* spp.[J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (6): 641 – 646.
- [17] 艾天成, 李方敏, 周治安, 等. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J]. 湖北农学院学报, 2000, **20** (1): 6 – 8.
- AI Tiancheng, LI Fangmin, ZHOU Zhian, *et al.* Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD readings) and chlorophyll content of crop leaves[J]. *J Hubei Agric Coll*, 2000, **20** (1): 6 – 8.
- [18] 宋绪忠, 赵永军, 张金凤, 等. 茶树叶片叶绿素含量与叶色值相关性研究[J]. 山东林业科技, 2002 (6): 10 – 12.
- SONG Xuzhong, ZHAO Yongjun, ZHANG Jinfeng, *et al.* Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD readings) and chlorophyll content of tea leaves[J]. *J Shandong For Sci Technol*, 2002 (6): 10 – 12.
- [19] 姜丽芬, 石福臣, 王华田, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (12): 1543 – 1548.
- JIANG Lifen, SHI Fuchen, WANG Huatian, *et al.* Application tryout of chlorophyll meter SPAD-502 in forestry [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24** (12): 1543 – 1548.
- [20] 单运峰, 冯宗炜. 模拟酸雨对马尾松和杉木幼树的影响[J]. 环境科学学报, 1988, **8** (3): 307 – 314.
- SHAN Yunfeng, FENG Zongwei. Effects of acid rain on Youngling of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Acta Sci Circumst*, 1988, **8** (3): 307 – 314.
- [21] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 等. 12 个不同基因型冬小麦的光合能力[J]. 植物生态学报, 2001, **25** (5): 532 – 536.
- ZHANG Qide, JIANG Gaoming, ZHU Xinguang, *et al.* Photosynthetic capability of 12 genotypes of *Triticum aestivum* [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25** (5): 532 – 536.
- [22] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶片叶绿素 a 荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2000, **27** (3): 177 – 181.
- QIU Dongliang, LIU Xinghui. Effect of simulated acid rain on the chlorophyll a fluorescence characteristic of longan (*Diospyros longana* Lour.) leaves[J]. *Acta Horti Sin*, 2000, **27** (3): 176 – 181.
- [23] 黄瑞冬, 王进军, 许文娟. 玉米和高粱叶片叶绿素含量及动态的比较[J]. 杂粮作物, 2005, **25** (1): 30 – 31.
- HUANG Ruidong, WANG Jinjun, XU Wenjuan. Comparison of *Zea mays* and *Sorghum bicolor* in chlorophyll content and dynamic[J]. *Rain Fed Crops*, 2005, **25** (1): 30 – 31.
- [24] 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.
- XIAO Yan, HUANG Jianchang. Study on the resistance to acid rain of 13 fruit crops [J]. *J Fruit Sci*, 2004, **21** (3): 191 – 195.
- [25] 肖艳, 黄建昌, 刘少娴. 模拟酸雨对 12 种园林植物的伤害及敏感性反应 [J]. 西南农学报: 自然科学版, 2004, **26** (3): 270 – 276.
- XIAO Yan, HUANG Jianchang, LIU Shaoxian. Inhibitory effects of simulated acid rain on the growth of 12 garden plant species and their physiological response to it[J]. *J Southwest Agric Univ Nat Sci Ed*, 2004, **26** (3): 270 – 276.