

不同竹龄青皮竹光合作用与荧光特性的比较

吴志庄^{1,2}, 李伟成^{1*}, 熊德礼³, 王树东¹, 周妍¹

(1. 国家林业局竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012; 2. 北京林业大学 生物科学与技术学院, 北京 100083;
3. 湖北省林业科学研究所, 湖北 武汉 430079)

摘要:对不同竹龄青皮竹的光合与荧光特征研究表明:不同竹龄的青皮竹净光合速率(P_n)差异显著,1龄竹的净光合速率大于 $8\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,明显高于3龄竹,说明随着竹龄增加,青皮竹光合固碳能力有所下降。气孔导度($Cond$)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r) 3 个性状都表现为 1 龄竹>2 龄竹>3 龄竹。水分利用效率(WUE)表现相反,为 3 龄竹>2 龄竹>1 龄竹。光响应曲线表明,当光强始增强时,各竹龄间差异较小,但随着光强的继续增加,不同竹龄出现很大的差异,其中,1 龄竹光补偿点和光饱和点相对较高,其潜在净光合速率也高于其它竹龄的青皮竹。青皮竹最大荧光效率(F_v/F_m)平均为 0.590 5,光系统II活性(F_v/F_o)平均为 1.442 0,各叶绿素荧光参数都随着年龄增加而降低,但差异不显著。

关键词:青皮竹;净光合速率;光响应;荧光特性

中图分类号:S795.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2013)06-0033-04

A Comparative Study on Photosynthetic and Fluorescence Characteristics among Different Aged *Bambusa textilis*

WU Zhi-zhuang^{1,2}, LI Wei-chen^{1*}, XIONG De-li³, WANG Shu-dong¹, ZHOU Yan¹

(1. China National Bamboo Research Center, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;
2. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Hubei Forestry Institute, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: A study on the photosynthetic and fluorescence characteristics of *Bambusa textilis* was conducted. The results showed significant differences in net photosynthetic rate (P_n) among different aged *Bambusa textilis*. The net photosynthetic rate of 1 age bamboos exceeded $8\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, much higher than that of 3 age ones, which indicated a decreasing trend of photosynthetic carbon sequestration capacity of *B. textilis* with its age increased. All of the 3 characters of stomatic conductance ($Cond$), CO_2 intercellular concentration (C_i) and transpiration rate (T_r) showed a same trend of 1 age bamboo > 2 age bamboo > 3 age bamboo. Contrarily, water use efficiency (WUE) showed an opposite rule of 3 age bamboo > 2 age bamboo > 1 age bamboo. And for light response curve, the differences among various aged bamboos were small at the initial stage of light increase, but apparent differences among them were observed with further light increase. It was relatively higher for 1 age bamboo on its light compensation point and light saturation point, same as its potential net photosynthetic rate (P_{max}). The average maximum fluorescence efficiency (F_v/F_m) and activity of photosystem II (F_v/F_o) of *B. textilis* were 0.590 5 and 1.442 0, respectively, and the fluorescence parameters tended to decrease with increasing age, but having not significant difference.

Key words: *Bambusa textilis*; net photosynthetic rate; light response curve; fluorescence characteristic

收稿日期:2013-04-09 修回日期:2013-06-21

基金项目:公益性林业行业科研专项(201004001);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2012025);浙江省科技厅计划项目(2011F20008)。

作者简介:吴志庄,男,博士,研究方向:林木遗传育种和能源植物开发利用。E-mail:wzzcaf@126.com

* 通信作者:李伟成,男,博士,研究方向:森林生态学和系统生态学。E-mail:leewis-1978@163.com

青皮竹(*Bambusa textilis*)为竹亚科、簕竹属合轴丛生型竹种,主要分布在我国 25°N 以南,包括广东、广西、台湾、湖南、福建、云南等华南地区,主产于广东广宁^[1]。青皮竹竿形优美、秆材坚韧、笋味鲜美,为优质箴用、笋用、造纸及绿化竹种,在华南地区受到了广大竹农的欢迎^[2]。对于青皮竹的生物学特性、栽培技术已有不少研究^[3-5],但有关青皮竹的光合生理特性研究未见报道。光合作用是制约植物生长发育最重要的生理过程,是植物干物质积累和产量的基础^[6]。大力发展青皮竹,提高青皮竹的丰产经营水平,需要在生理生态方面加强研究。本研究对不同竹龄青皮竹的光合作用与荧光特性进行测定,以期对青皮竹的丰产栽培、竹林经营管理、开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地及材料

试验地设在福建省华安竹种园,位于华安县城关龟子窠,117°30'E, 25°00'N, 海拔 150~200 m, 属南亚热带气候,年平均降水量 1 800~2 023 mm, 年平均温度 17.5℃, 极端最高气温达 39℃, 极端最低气温为-3.8℃, 土壤为山地红壤, 土层厚度一般大于 100 cm, 坡度 23°, 植被以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)和蕨类(*Pteridium*)为主。所测定的青皮竹林分长势良好,面积约 0.5 hm², 现存立竹年龄为 1~4 a, 每丛平均有立竹 6~8 株, 胸径平均为 4.19 cm, 竹高平均 10.32 m, 主要抚育管理根据青皮竹的发笋期和孕笋期,采用环形沟法,每年施用有机肥 2 次,每丛 2~5 kg, 及时进行除草、灌溉、间伐等措施。

1.2 试验方法与参数测定

1.2.1 光合生理指标测定 2012 年 8 月,选择晴朗无风天,选取生长良好,无病虫害的青皮竹,将青皮竹分成 1 龄竹(当年生)、2 龄竹(1~2 年生)、3 龄竹(3~4 年生)进行测定,每龄竹测定 3 株,以竹秆冠层中部东南方向的一级枝顶端充分伸展,且生长状况较为一致的当年生竹叶作为测试样本,于 9:00~11:00,用 Li-6400 光合测定仪,活体测定不同年龄青皮竹的净光合速率(P_n)、气孔导度($Cond$)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)以及蒸腾速率(T_r)。用净光合速率(P_n)蒸腾速率(T_r)之比计算水分利用效率(WUE),各重复 5 次。光响应特征测定选用仪器 Auto Lightcurve 程序,以各龄竹健康的竹叶为样本,从高到低设置光强为 2 000、1 600、1 200、1 000、

800、600、400、200、150、100、60、40、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 14 个梯度,最大和最小等待时间设置为 280 s 和 150 s,温度设置为 28℃,参比室的 CO₂ 浓度稳定在 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

1.2.2 叶绿素荧光参数测定 采用美国产 OS-30p 型便携式荧光分析仪测定青皮竹各竹龄叶绿素荧光参数。选择竹子中部向阳当年生顶端竹叶,经暗适应 15 min 后,测定其初始荧光(F_o)、最大荧光参数(F_m)以及可变荧光强度(F_v)。分别计算光系统 II($Ps\ II$)的活性(F_v/F_o)、最大荧光效率(F_v/F_m),每处理重复测定 10 次。

1.3 数据分析方法

根据 Bassman 和 Zwier 的方程 $P_n = P_{max} \times (1 - C_0 \times e^{-\alpha \times Par/P_{max}})$ 来拟合光响应曲线^[7,8],并计算主要光响应特征参数。其中: P_n 为净光合速率; Par 为光照强度; α 为表观量子效率(A_{QY}); P_{max} 为最大净光合速率; C_0 为度量弱光下 P_n 趋近于零的指标。如适合性检验方程拟合效果良好,则用 $LCP = P_{max} \ln(C_0) / \alpha$ 计算光补偿点(LCP),光饱和点则以达到 99% 最大净光合速率时的光强, $LSP = P_{max} \ln(100C_0) / \alpha$ 。数据处理用 SPSS 15.0 完成,采用单因素随机区组进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 青皮竹不同竹龄光合性状的比较与分析

不同竹龄的青皮竹净光合速率的差异显著(表 1),其中 1 龄竹的净光合速率最高,达 8.120 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 2 龄竹与之差异不大, 3 龄竹最低,仅 6.176 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 因此,竹龄增加青皮竹光合能力有下降的趋势。气孔导度平均为 0.128 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 胞间 CO₂ 浓度平均为 265.786 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 蒸腾速率平均为 4.06 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 个性状都表现出相同的规律,即 1 龄竹>2 龄竹>3 龄竹,其中 1 龄竹蒸腾速率达到 5 $\mu\text{molm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,是 3 龄竹的近 2 倍,耗水潜力最大。而水分利用效率平均为 1.883 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 处于较低水平,其中以 3 龄竹最高, 1 龄竹最低,分别为 2.078、1.691 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 1 龄竹仅为 3 龄竹的 81.4%。总体上,青皮竹表现为蒸腾速率高,水分利用效率低,说明其调节自身水分损耗能力及适应干旱环境的能力较差,但随竹龄增加青皮竹抗旱能力增强,而光合作用能力有所下降。方差分析结果表明,青皮竹不同竹龄间净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均达极显著($p<0.01$),而胞间 CO₂ 浓度和水分利用效率差异达显著水平($p<0.05$)。

表 1 青皮竹不同竹龄光合性状测定值

竹龄	光合速率/	气孔导度/	胞间 CO ₂ 浓度/	蒸腾速率/	水分利用效率
	($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
1	8.120±0.694A	0.174±0.054A	283.600±29.588A	5.062±1.176A	1.691±0.423a
2	7.742±1.047A	0.127±0.015B	267.476±17.374aB	4.150±0.413B	1.880±0.289ab
3	6.176±1.270B	0.081±0.013C	246.282±21.021B	2.968±0.400C	2.078±0.333b
平均	7.346±1.004	0.128±0.027	265.786±22.661	4.060±0.663	1.883±0.344

2.2 不同竹龄光合响应特征比较

不同竹龄青皮竹光响应具较大差异(图 1),光强在 0~400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,各竹龄青皮竹净光合速率均出现快速上升,差异较小。但随着光强的继续增加, P_n 值不断增大,但增加速度减缓,不同竹龄出现明显的差异,其中 2、3 龄青皮竹较早达到光饱和,且净光合速率相对更低,而 1 龄竹光补偿点和光饱和点相对较高,其净光合速率也高于其它年龄的青皮竹。

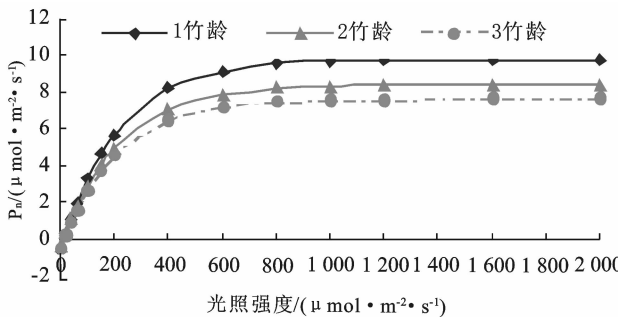


图 1 青皮竹不同竹龄光响应曲线比较
Fig 1 Light response curve of *B. textilis* at different ages

表 2 青皮竹不同竹龄光响应特征参数

竹龄	P_{max} /	C_0 /	A_{QY}	LCP /	LSP /	R
	($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	
1	9.814 5	1.069 5	0.041 5	15.907 8	1 106.049 1	0.993 6
2	8.355 8	1.053 3	0.038 8	11.181 8	1 003.187 0	0.994 4
3	7.382 9	1.084 7	0.039 7	15.123 6	871.752 6	0.985 6
平均	8.517 7	1.069 2	0.041 0	14.071 1	993.662 9	

注: R 为光响应曲线方程光照强度与净光合速率的相关系数。

2.3 不同竹龄青皮竹叶绿素荧光特性

最大荧光效率 F_v/F_m 的变化可以反映出光化学转化速率,并能推测是否有光抑制产生。由图 2 可知,青皮竹最大荧光效率各年龄之间差异不大,其中 1 龄竹最大,仅 0.628 8,略高于 2、3 龄竹。青皮竹 Ps II 的活性(F_v/F_o)平均 1.442 0,随着竹龄的增加而降低,即 1 龄竹>2 龄竹>3 龄竹,说明随着年龄增加,PsII 的活性及光化学转化速率有降低的趋势。青皮竹初始荧光参数(F_o)平均为 171.76,最大荧光参数(F_m)平均为 419.44,可变荧光(F_v)平均 247.68,表现一致的规律,都随着年龄的增加而降低,方差分析可知,青皮竹不同竹龄的各荧光参数的差异并不显著($p>0.05$),各龄竹光合适应现象明显。

表观量子效率反映叶片在低光照强度下光合作用的光化学效率,可以表明植物利用弱光能力的强弱。光响应特征参数拟合可知(表 2),青皮竹平均 LCP 和 LSP 分别为 14.071 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 993.662 9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明青皮竹光适应能力的幅度较小,利用强光的能力较弱。表观量子效率平均为 0.041 0,最大光合速率(P_{max})为 8.517 7 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,均反映出青皮竹利用弱光能力较强。青皮竹 1 龄竹潜在最大净光合速率最高, P_n 值达到 9.814 5 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,依次为 1 龄竹>2 龄竹(8.355 8 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)>3 龄竹(7.382 9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。1 龄竹的光补偿点和光饱和点最高, LCP 和 LSP 分别为 15.907 8 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1 106.049 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,2 龄竹的补偿点最低,为 11.181 8 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光饱和点则以 3 龄竹最低,仅 871.752 6 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明 2 龄竹利用弱光能力最强,而 1 龄竹利用强光能力最强,3 龄竹利用强光能力最弱。

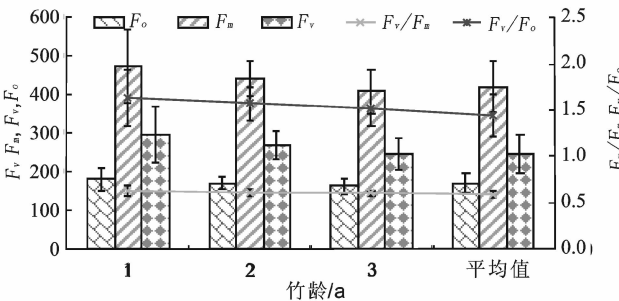


图 2 青皮竹不同竹龄荧光参数的变化
Fig 2 Variation in fluorescence parameters of *B. textilis* at different ages

3 结论与讨论

光合作用是植物生长和物质积累的基础,对植

物生长发育具有重要意义,由于光合作用与植物生长环境条件密切相关,光补偿点、光饱和点和表观量子效率是指示植物光合反应的重要指标,一般而言,光补偿点越低,表示植物对弱光利用能力强,光饱和点则反映植物对强光的需求,高则说明光合过程中可更有效的利用强光^[9]。光合作用的某些生理参数已成为植物速生丰产以及制定栽培措施的科学依据^[10-11]。本研究通过对青皮竹不同竹龄的光合性状的测量,发现青皮竹净光合速率平均达 $7.35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,蒸腾速率平均为 $4.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光合固碳能力与毛竹、刚竹等竹种相比处于中等水平^[9-12]。青皮竹的蒸腾速率高,水分利用效率低,其调节自身水分损耗能力及适应干旱环境的能力较差。但随竹龄增加其抗旱能力增强,而光合作用能力下降。一般阳生草本植物的 LSP 为 $1\,000 \sim 1\,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 LCP 为 $10 \sim 40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, P_{max} 为 $15 \sim 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13]。青皮竹平均 LCP 和 LSP 分别为 $14.071 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $993.662 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明青皮竹光适应能力的幅度较小,利用强光的能力较弱,但能够在较弱的光照环境下充分利用光能。植物光合作用潜力与其本身的遗传特性、生存资源环境,以及光合羧化酶的活性等内外因素有关^[14]。青皮竹潜在光合速率(P_{max}) 仅为 $8.517 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而表观量子效率 A_{QY} 为 0.041 ,介于自然条件下一般植物的 A_{QY} $0.03 \sim 0.05$ 之间^[14],反映出青皮竹光合能力较低,利用弱光能力较强,这可能是因为测定时期生长旺盛,养分和水分损耗较大,无法满足光合运转,因而在栽培中应加强肥水管理,保证叶片旺盛的生理功能,才能使光合能力得以维持在较高水平。而 1 龄竹净光合速率、光补偿点和光饱和点都是最高的,且随着竹龄增加光合固碳能力有所下降,生产经营中,应逐渐提高 1~2 龄竹,降低 3 龄以上青皮竹在竹林中的比例,以改善林分结构,提高竹林生产力。

叶绿素荧光常用于评价光合机构的功能和环境胁迫对其的影响^[15]。可变荧光与最大荧光参数的比值(F_v/F_m)代表了最大光化学效率,即原初光能转化效率,被认为是反映光抑制的可靠指标^[16],青皮竹最大荧光效率(F_v/F_m)平均为 0.5905 ,并且随着年龄增加而降低,说明青皮竹随着年龄增加其发生光抑制的程度增高。 (F_v/F_o) 代表光系统II的活性,同样是 1 龄竹最高,并随着年龄增加而降低,其它荧光参数表现出相同的规律,都随着年龄的增加而降低,但差异不显著,说明青皮竹各年龄光化学转化速率变化不大,

光适应现象明显,因此,趋于稳定的光合速率较瞬时光合速率在生产中更有实际意义。

光合作用的一个突出特点是对植物自身生理状态和外界环境条件的变化高度敏感^[17],实验方法、实验仪器、外界温度、立地条件等均可能影响所得结论^[18]。为尽量缩小测定误差,本试验严格控制测定时间和测定条件,以避免环境因素变化和“午休”等现象对测定结果的影响。在外部条件基本一致的情况下测定,尽量使各光合参数能够较好的符合青皮竹实际的生理变化。

参考文献:

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第九卷第一分册[M]. 科学出版社. 1996:124-126 .

[2] 杨淑敏,江泽慧,任海青. 青皮竹研究进展及展望[J]. 竹子研究汇刊,2007,26(1):15-19.
YANG S M,JIANG Z H,REN H Q. Advances in the study of *Bambusa textilis*[J]. Journal of Bamboo Research, 2007,26 (1):15-19. (in Chinese)

[3] 黎溪. 广宁县青皮竹的开发利用与发展[J]. 竹子研究汇刊, 2000,19(3):76-78.
LI X. Exploitation, utilization and development of *Bambusa textilis* in Guangnin County[J]. Journal of Bamboo Research, 2000,19(3):76-78. (in Chinese)

[4] 李桥明,疗宏柏. 青皮竹粉单竹引种栽培试验总结[J]. 竹子研究汇刊,1995,14(3):54-60.
LI Q M, LIAO H B. Report and introduction of *B. textilis* and *Lingnania chungil* [J]. Journal of Bamboo Research, 1995,14(3):54-60. (in Chinese)

[5] 钟承广,彭贤文,黄长勇. ABT 生根粉应用于青皮竹引种育苗实验报告[J]. 竹子研究汇刊,1996. 15(3):53-57.
ZHONG C G, PENG X W, HUANG C Y. Experimental report on introduction and seedling cultivation of *Bambusa textilis* with ABT[J]. Journal of Bamboo Research, 1996. 15 (3):53-57 . (in Chinese)

[6] 彭邵锋,王瑞,陈永忠,等. 油茶无性系果实长期光合特性研究[J]. 西北林学院学报, 2012,27(1):28-34.
PENG S F, WANG R, CHEN Y Z. *et al.* Photosynthetic characteristics in fruit-growing stage of *Camellia oleifera* clones[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1):28-34. (in Chinese)

[7] BASSMAN J H,ZWIER J C. Gas exchang characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus dehoids* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoids clone* [J]. Tree Physiol. 1991, 8(2): 145-149.

[8] 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[J]. 生态学报,2005,25(1):23-29.
WANG B Y,FENG Y L. Effects of growth light intensities of photosynthesis in seedlings of two tropical rain forest species [J]. Acta Ecological Sinica,2005,25(1):23-29. (in Chinese)

(下转第 41 页)

[8]肖长城,张绍铃,胡红菊,等.套袋和外源 5-氨基乙酰丙酸处理对“云红梨 2 号”果皮着色的影响[J].南京农业大学学报,2012,35(6):25-29.
XIAO C C, ZHANG S L, HU H J, *et al.* Effects of bagging and exogenous 5-aminolevulinic acid treatment on coloration of ‘Yunhongli 2’ [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012,35(6):25-29. (in Chinese)

[9]李文华,刘建军,康博文.叶面喷施 ALA 对几种苗木根系形态的影响[J].西北林学院学报,2010,25(1):90-94.
LI W H, LIU J J, KANG B W. Effects of foliar spraying ALA on root morphology of seedlings of several species[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010,25(1):90-94. (in Chinese)

[10]郭珍,徐福利,汪有科.5-氨基乙酰丙酸对枣树生长发育、产量和品质的影响[J].西北林学院学报,2010,25(3):93-96.
GUO Z, XU F L, WANG Y K. Effects of 5-aminolevulinic acid on the growth, the yield and quality of compact jujube in mountainous region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25(3):93-96. (in Chinese)

[11]申明,段春慧,张治平,等.外源 ALA 处理对‘丰水’梨疏花与果实品质的影响[J].园艺学报,2011,38(8):1515-1522.
SHEN M, DUAN C H, ZHANG Z P, *et al.* Effects of exogenous ALA on thinning and fruit quality in ‘Hosui’ Pear (*Pyrus pyrifolia*) [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011,38(8):1515-1522. (in Chinese)

[12]王婷,饶景萍,宋永令,等.叶面喷施 5-氨基乙酰丙酸对番茄果实采后生理指标的影响[J].西北农业学报,2009,18(1):243-247.
WANG T, RAO J P, SONG Y L, *et al.* Effects of foliar application 5-aminolevulinic acid on post harvest physiological of tomato during cold storage period[J]. Acta Agriculturae Borali-occidentalis Sinica, 2009,18(1):243-247. (in Chinese)

.....

(上接第 36 页)

[9]李迎春,杨清平,陈双林,等.龟甲竹光合生理特性及其与主要影响因子关系[J].林业科技开发,2011,(25)2:35-39.
LI Y C, YANG Q P, CHEN S L, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Phyllostachys heterocycla* and their main impact environmental factors[J]. China Forestry Science and Technology, 2011,(25)2:35-39. (in Chinese)

[10]陈存及,邱尔发,梁一池,等.毛竹不同种源光合特性研究[J].林业科学,2001,37(6):16-19.
CHEN C J, QIU E F, LIANG Y C, *et al.* Study on the photosynthetic characters of *Phyllostachy heterocycla* cv. *pubescens provenances* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001,37(6):16-19. (in Chinese)

[11]李迎春,杨清平,陈双林,等.厚壁毛竹春季光合日变化及其与主要环境因子的关系初探[J].林业科学研究,2009,22(4):608-612.
LI Y C; YANG Q P; CHEN S L, *et al.* Studies on diurnal variation of photosynthesis of *Phyllostachys edulis* cv. *pachyloen* and their relationships to environmental factors in spring [J]. Forestry Research, 2009,22(4):608-612. (in Chinese)

[12]陈建华,毛丹,朱凡,等.9 个笋用竹种的光合特性[J].中南林业科技大学学报,2008,28(6):9-13.
CHEN J H, MAO D, ZHU F, *et al.* Physiological and biochemical characteristics of leaves from 9 edible shoot bamboos [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2008,28(6):9-13. (in Chinese)

[13]翟志习,郭玉海,马永泽,等.植物生理学[M].北京:中国农业大学出版社,1997.

[14]邱国雄.植物光合作用的效率[C].//余叔文.植物生理和分子生物学.北京:科学出版社,1992:236-243.

[15]李亚藏,梁彦兰,王庆成.铅对山梨和山荆子光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].西北林学院学报,2012,27(5):21-25.
LI Y C, LIANG Y L, WANG Q C. Influence of Pb on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in *Pyrus ussuriensis* and *Malus baccata* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012,27(5):21-25. (in Chinese)

[16]王良桂,张春霞,彭方仁.干旱胁迫对几种楸树苗木叶片荧光特性的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(6):119-122.
WANG L G, ZHANG C X, PENG F R. Effects of drought stress on the fluorescence characteristics of four type of *Catalpa* spp [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008,32(6):119-122. (in Chinese)

[17]许大全.光合作用测定及研究中一些值得注意的问题[J].植物生理学通讯,2006,42(6):1163-1167.
XU D Q. Some noteworthy problems in measurement and Investigation of photosynthesis[J]. Plant physiology Communications, 2006,42(6):1163-1167. (in Chinese)

[18]杜旭华,周贤军,彭方仁,等.不同茶树品种净光合与蒸腾速率比较[J].林业科技开发,2007,21(4):21-24.