

## 毛竹快速生长期的叶绿素荧光参数特征

周哲宇<sup>1</sup>, 徐超<sup>1</sup>, 胡策<sup>1</sup>, 王海湘<sup>1</sup>, 梁谢恩<sup>1</sup>, 张汝民<sup>1,2</sup>, 温国胜<sup>1,2</sup>

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 为了探讨毛竹 *Phyllostachys edulis* 在快速生长期(前期、中期、后期)叶片的叶绿素荧光特征, 在浙江农林大学毛竹生理生态监测定位站利用 PAM-2100 型叶绿素荧光仪, 在毛竹快速生长期测定叶片的叶绿素荧光参数并对其荧光特性进行综合评价。结果表明: 毛竹叶片的叶绿素荧光参数在毛竹快速生长的前期、中期、后期变化显著。在不同生长期中, 同一年龄的毛竹的光系统 II (PS II) 实际光化学量子产量( $Y_{\text{ield}}$ ), PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ ), PS II 潜在光化学效率( $F_v/F_0$ )均表现为前期 < 中期 < 后期, 差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。其中  $F_v/F_m$  变化范围为 0.672~0.773,  $F_v/F_0$  变化范围为 2.068~3.231。在毛竹快速生长的前期和中期低于正常水平。非光化学猝灭系数( $q_{\text{NP}}$ )表现为中期 < 后期 < 前期, 差异达显著水平( $P < 0.05$ )。在毛竹快速生长的不同时期, 毛竹叶片  $q_{\text{NP}}$  均呈现明显的日变化。综合比较表明, 随着毛竹的快速生长, 毛竹叶片光合作用能力呈上升趋势。表 4 参 21

**关键词:** 植物学; 毛竹; 快速生长期; 叶绿素荧光

**中图分类号:** S718.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2018)01-0075-06

## Chlorophyll fluorescence characteristics of *Phyllostachys edulis* during its fast growth period

ZHOU Zheyu<sup>1</sup>, XU Chao<sup>1</sup>, HU Ce<sup>1</sup>, WANG Haixiang<sup>1</sup>, LIANG Xieen<sup>1</sup>, ZHANG Rumin<sup>1,2</sup>, WEN Guosheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To explore chlorophyll fluorescence characteristics of a *Phyllostachys edulis* blade during its fast growth period (early, middle, and late phases), parameters concerning chlorophyll fluorescence of a *Ph. edulis* blade were measured using PAM-2100 chlorophyll fluorescence spectrometer during its fast growth period of the Bamboo Physiological and Ecological Monitoring Station of Zhejiang A&F University, also comprehensive evaluation of its fluorescence characteristics was then conducted. The results showed that the actual photochemical quantum yield of Photosystem II (PS-II), the maximal photochemical efficiency of PS-II ( $F_v/F_m$ ), and the potential PS-II activity for same-aged *Ph. edulis* samples had significant differences within different stages of the rapid growth period ( $P < 0.05$ ) going from a lower level to a higher level for the early phase, the middle phase, and the latter phase. Variation in the  $F_v/F_m$  ratio was 0.672–0.773 and in the  $F_v/F_0$  ratio was 2.068–3.231. During the fast growth period, the value of Non-photochemical Quenching ( $q_{\text{NP}}$ ) in the order: middle phase < late phase < early phase. The  $q_{\text{NP}}$  value also showed strong daily variation during different phases of the fast growth period. Chlorophyll fluorescence parameters of bamboo blade show significant changes during its fast growth period. Thus, as indicated by the comprehensive comparison, photosynthesis of the *Ph. edulis* blade showed an increasing tendency during its rapid growth. [Ch, 4 tab. 21 ref.]

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270497, 31570686); 浙江省与中国林业科学研究院省院合作项目(2014SY16)

作者简介: 周哲宇, 从事竹林生态学研究。E-mail: 241496752@qq.com。通信作者: 温国胜, 教授, 博士, 博士生导师, 从事生态学研究。E-mail: wgs@zafu.edu.cn

**Key words:** botany; *Phyllostachys edulis*; fast growth period; chlorophyll fluorescence

叶绿素荧光与光合作用中各个反应过程密切相关,植物体内的叶绿素荧光信号能够快速灵敏地反映植物光合生理状况。与“表现性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具“内在性”的特点<sup>[1-3]</sup>。目前,植物叶片叶绿素荧光特性已经被广泛应用到植物光合机制和逆境生理等研究领域<sup>[4-5]</sup>。毛竹 *Phyllostachys edulis* 属禾本科 Gramineae 植物,广泛分布于中国南方亚热带地区。中国毛竹林面积已达 270 万  $\text{hm}^2$ ,是中国竹类植物中分布最广、面积最大的竹种<sup>[6]</sup>。毛竹有着与其他树种不同的生长方式即“爆发式生长”<sup>[7]</sup>。“爆发式生长”又称快速生长,指毛竹出笋后的伸长生长,从3月底开始约 60 d 内,从笋长成 10 m 以上的竹秆。为探讨毛竹快速生长的机制,从毛竹不同生长期的蒸腾速率、气孔导度、水分利用关系、器官变化、水势变化及液流特征和环境因子的关系等方面进行了研究<sup>[8-11]</sup>,但是针对毛竹快速生长期的叶片叶绿素荧光参数的研究较为匮乏。本研究测定了毛竹快速生长不同时期叶片叶绿素荧光参数,分析其变化规律,试图探究毛竹快速生长与毛竹叶片叶绿素荧光参数之间的关系,为揭示毛竹快速生长机制提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验地概况与实验材料

实验地位于浙江省杭州市临安区东部的青山镇研里村(30°14'N, 119°42'E)的浙江农林大学毛竹生理生态监测定位站。实验地地处低山丘陵区,海拔为 48~50 m。属中亚热带季风气候,光照充足,雨水充沛。年平均气温为 15.9 °C,全年降水量为 1 427.0 mm,全年日照时数为 1 920.0 h。选取实验地竹林向阳方向,长势良好的 1 年生和 2 年生毛竹各 2 株,搭建观测塔,选取林冠中层健康完好的叶片测定叶绿素荧光参数。

### 1.2 实验方法

1.2.1 毛竹年龄的确定 通过对毛竹外部特征(枝痕个数、基部笋箨、皮色、白粉环和附着物等)的观察,并结合当地竹农的意见,确定毛竹年龄进行,作标记。

1.2.2 叶绿素荧光的测定 从 2016 年 3 月底开始,每月选择天气晴朗,光照较好的一天,利用 PAM-2100 型荧光仪对选取的实验地毛竹叶片进行叶绿素荧光测定。在 8:30-16:30, 2 h 测定 1 次,重复 4 次·株<sup>-1</sup>。叶片经过 30 min 暗适应后测定初始荧光产量( $F_0$ ),最大荧光产量( $F_m$ ),最大光化学量子产量光系统 II (PS II) 的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )。在自然光下适应 30 min,当荧光基本稳定时测定实际光化学量子产量( $Y_{\text{add}}$ ),光下最大荧光( $F_m'$ )。计算出可变荧光( $F_v$ ),PS II 潜在光化学效率( $F_v/F_0$ ),非光化学猝灭系数( $q_{\text{NP}}$ )。

### 1.3 数据处理

取 2016 年 3 月 25 日,4 月 18 日,5 月 11 日的毛竹叶片叶绿素荧光数据分别作为毛竹快速生长前期、中期、后期的叶片叶绿素荧光数据。利用 SPSS 19.0 对不同生长期不同竹龄的毛竹叶绿素荧光参数进行单因素方差分析(one-way ANOVA),使用最小显著性差异(LSD)法进行多重比较。用 Excel 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生长期不同竹龄毛竹叶片 $F_v/F_m$ 日变化

$F_v/F_m$  指最大光化学效率,是用来研究植物逆境响应的重要参数,主要用于判断植物是否受到了光抑制。 $F_v/F_m$  在非胁迫下变化极小,且不受物种和生长条件影响,在受到胁迫的情况下  $F_v/F_m$  显著降低<sup>[7]</sup>。正常情况下植物叶片  $F_v/F_m$  的数值为 0.75~0.85<sup>[12]</sup>。

不同生长期不同竹龄毛竹的  $F_v/F_m$  如表 1 所示。在同一生长期内,毛竹叶片的  $F_v/F_m$  测定值无明显日变化。毛竹叶片在快速生长的前期和中期  $F_v/F_m$  测定值均低于 0.75,表明在这一阶段毛竹叶片受到了环境胁迫。在同一生长期内,不同竹龄毛竹叶片的  $F_v/F_m$  测定值差异显著。不同生长期毛竹叶片的  $F_v/F_m$  测定值均为 1 年生毛竹 < 2 年生毛竹。表明 2 年生毛竹叶片在快速生长期内有更高的光能利用率。不同生长期内,同一竹龄毛竹叶片的  $F_v/F_m$  测定值均为前期 < 中期 < 后期。不同生长期对同一竹龄毛竹叶片

$F_v/F_m$  影响达到了显著水平 ( $P < 0.05$ )。反映在整个生长期中, 毛竹叶片光能利用率后期最强, 中期居中, 前期最弱, 2 年生毛竹大于 1 年生毛竹。

表 1 不同生长期毛竹叶绿素参数  $F_v/F_m$  日变化

Table 1 Diurnal changes of  $F_v/F_m$  of *Phyllostachys edulis* in different growth stages

测定时间	前期		中期		后期	
	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生
8: 30	0.675 ± 0.011 bc	0.691 ± 0.008 ac	0.693 ± 0.017 bb	0.722 ± 0.044 ab	0.740 ± 0.015 ba	0.759 ± 0.014 aa
10: 30	0.678 ± 0.027 bc	0.684 ± 0.013 ac	0.711 ± 0.022 bb	0.739 ± 0.028 ab	0.743 ± 0.017 ba	0.761 ± 0.005 aa
12: 30	0.679 ± 0.006 bc	0.695 ± 0.039 ac	0.703 ± 0.030 bb	0.726 ± 0.010 ab	0.756 ± 0.003 ba	0.773 ± 0.009 aa
14: 30	0.672 ± 0.010 bc	0.684 ± 0.005 ac	0.708 ± 0.017 bb	0.732 ± 0.013 ab	0.760 ± 0.013 ba	0.771 ± 0.021 aa
16: 30	0.676 ± 0.016 bc	0.693 ± 0.008 ac	0.707 ± 0.026 bb	0.729 ± 0.021 ab	0.750 ± 0.008 ba	0.768 ± 0.016 aa

说明: 数字后第 1 个小写字母不相同代表同一生长期不同竹龄之间差异显著, 第 2 个小写字母不相同代表不同生长期同一竹龄之间差异显著。

## 2.2 不同生长期不同竹龄毛竹叶片 $F_v/F_o$ 日变化

$F_o$  表示 PS II 反应中心全部开放式即原初电子受体全部氧化时的荧光水平, 理论上用来指反应中心未能发生光化学反应时的叶绿素荧光。 $F_v/F_o$  常用来度量 PS II 的潜在光化学效率, 它对环境引起的变化比  $F_v/F_m$  更加敏感。毛竹快速生长期不同时期的  $F_v/F_o$  测定值见表 2。在毛竹快速生长期的不同时期, 毛竹叶片  $F_v/F_o$  值无明显日变化, 表明在同一时期实验区的环境较为稳定无明显变化。

在不同生长期中, 毛竹叶片的  $F_v/F_o$  的差异均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 呈现为前期 < 中期 < 后期。在同一生长期中, 不同竹龄毛竹叶片  $F_v/F_o$  差异显著。在毛竹快速生长的前期、中期、后期, 2 年生毛竹叶片  $F_v/F_o$  均大于 1 年生毛竹。表明 2 年生毛竹叶片对环境胁迫有着更强的适应性。

表 2 不同生长期毛竹叶绿素参数  $F_v/F_o$  日变化

Table 2 Diurnal changes of  $F_v/F_o$  of *Phyllostachys edulis* in different growth stages

测定时间	前期		中期		后期	
	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生
8: 30	2.068 ± 0.128 bc	2.312 ± 0.105 ac	2.254 ± 0.148 bb	2.489 ± 0.351 ab	2.671 ± 0.142 ba	2.984 ± 0.140 aa
10: 30	2.121 ± 0.166 bc	2.178 ± 0.136 ac	2.377 ± 0.186 bb	2.701 ± 0.314 ab	2.788 ± 0.189 ba	3.019 ± 0.073 aa
12: 30	2.144 ± 0.085 bc	2.349 ± 0.249 ac	2.301 ± 0.225 bb	2.533 ± 0.123 ab	3.121 ± 0.056 ba	3.231 ± 0.105 aa
14: 30	2.099 ± 0.119 bc	2.181 ± 0.071 ac	2.378 ± 0.142 bb	2.657 ± 0.141 ab	3.044 ± 0.135 ba	3.205 ± 0.246 aa
16: 30	2.146 ± 0.144 bc	2.357 ± 0.114 ac	2.356 ± 0.229 bb	2.588 ± 0.246 ab	2.916 ± 0.107 ba	3.144 ± 0.151 aa

说明: 数字后第 1 个小写字母不相同代表同一生长期不同竹龄之间差异显著, 第 2 个小写字母不相同代表不同生长期同一竹龄之间差异显著。

## 2.3 不同生长期不同竹龄毛竹叶片 $Y_{ield}$ 日变化

实际光化学量子产量 ( $Y_{ield}$ ) 是指植物光合作用下 PS II 总的光化学量子产量, 它一定程度上反映了 PS II 反应中心在部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率<sup>[10-11]</sup>。较高的  $Y_{ield}$  值代表了更高的光能转换效率, 能够为植物暗反应的光合碳同化积累更多的能量, 促进碳同化的高效运转和有机物的积累<sup>[13]</sup>。

从表 3 可以看出: 不同生长期毛竹叶片的  $Y_{ield}$  值, 从 8: 30 开始随着时间推移不断降低, 在 14: 30 达到最低点并开始回升。多重比较表明, 2 种竹龄的毛竹叶片在毛竹快速生长的不同时期, 其实际光化学量子产量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。在同一生长期中, 2 年生毛竹的  $Y_{ield}$  值均大于 1 年生毛竹, 表明 2 年生毛竹的光合转化率要优于 1 年生的毛竹。在毛竹快速生长的不同阶段, 不同竹龄毛竹的  $Y_{ield}$  值均为前期 < 中期 < 后期, 反映了毛竹叶片光能利用率随着毛竹的快速生长而提高。这变化规律与毛竹  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  基本保持一致。

## 2.4 不同生长期不同竹龄毛竹叶片 $q_{NP}$ 日变化

非光化学猝灭系数 ( $q_{NP}$ ) 反映 PS II 吸收的光能中不能用于光合电子传递而是以热的形式耗散掉的光能部分, 是表示热耗散多少的指标<sup>[14]</sup>。

表3 不同生长期毛竹叶叶绿素参数  $Y_{ield}$  日变化Table 3 Diurnal changes of  $Y_{ield}$  of *Phyllostachys edulis* in different growth stages

测定时间	前期		中期		后期	
	1年生	2年生	1年生	2年生	1年生	2年生
8: 30	0.416 ± 0.021 bc	0.433 ± 0.008 ac	0.565 ± 0.023 bb	0.585 ± 0.017 ab	0.598 ± 0.019 ba	0.617 ± 0.023 aa
10: 30	0.402 ± 0.011 bc	0.426 ± 0.016 ac	0.524 ± 0.017 bb	0.557 ± 0.013 ab	0.567 ± 0.029 ba	0.591 ± 0.013 aa
12: 30	0.371 ± 0.013 bc	0.393 ± 0.012 ac	0.484 ± 0.011 bb	0.500 ± 0.012 ab	0.535 ± 0.017 ba	0.551 ± 0.016 aa
14: 30	0.357 ± 0.009 bc	0.375 ± 0.015 ac	0.469 ± 0.014 bb	0.479 ± 0.015 ab	0.513 ± 0.008 ba	0.538 ± 0.015 aa
16: 30	0.389 ± 0.015 bc	0.428 ± 0.005 ac	0.485 ± 0.012 bb	0.508 ± 0.020 ab	0.525 ± 0.013 ba	0.558 ± 0.007 aa

说明：数字后第1个小写字母不相同代表同一生长期不同竹龄之间差异显著，第2个小写字母不相同代表不同生长期同一竹龄之间差异显著。

不同生长期不同竹龄毛竹叶片  $q_{NP}$  日变化见表4。毛竹不同生长期内，叶片  $q_{NP}$  从 8: 30 开始随着时间推移不断升高，峰值出现在 12: 30 至 14: 30，之后逐渐下降。这主要是因为随着光照强度的增加，叶片把吸收的光能较多地转化到热耗散，用于光化学反应上的能量随之减少。

在同一生长期内，不同竹龄的毛竹  $q_{NP}$  差异不显著。在毛竹快速生长的前期、中期、后期，毛竹叶片  $q_{NP}$  呈现出先下降后上升的规律，不同竹龄毛竹叶片  $q_{NP}$  均为中期 < 后期 < 前期。这说明在毛竹快速生长的中期，毛竹叶片能更充分地利用吸收的光能进行光合作用，光合利用率更高。

表4 不同生长期毛竹叶叶绿素参数  $q_{NP}$  日变化Table 4 Diurnal changes of  $q_{NP}$  of *Phyllostachys edulis* in different growth stages

测定时间	前期		中期		后期	
	1年生	2年生	1年生	2年生	1年生	2年生
8: 30	1.769 ± 0.102 c	1.745 ± 0.088 c	1.492 ± 0.069 a	1.514 ± 0.055 a	1.693 ± 0.101 b	1.705 ± 0.073 b
10: 30	1.835 ± 0.099 c	1.833 ± 0.096 c	1.594 ± 0.058 a	1.602 ± 0.056 a	1.833 ± 0.059 b	1.845 ± 0.076 b
12: 30	2.011 ± 0.083 c	1.997 ± 0.112 c	1.728 ± 0.081 a	1.745 ± 0.062 a	1.887 ± 0.067 b	1.916 ± 0.081 b
14: 30	2.015 ± 0.097 c	1.991 ± 0.056 c	1.766 ± 0.078 a	1.779 ± 0.073 a	1.893 ± 0.092 b	1.922 ± 0.084 b
16: 30	1.879 ± 0.075 c	1.871 ± 0.081 c	1.630 ± 0.042 a	1.641 ± 0.050 a	1.750 ± 0.063 b	1.801 ± 0.091 b

说明：数字后小写字母不相同代表不同生长期同一竹龄之间差异显著。

### 3 结论与讨论

通过叶绿素荧光参数可以了解毛竹光合作用的内在特征， $F_v/F_m$ ， $F_v/F_o$ ， $Y_{ield}$  这3个参数一般被认为是判断植物光合作用大小的重要依据。张其德等<sup>[15]</sup>研究表明：这3个参数之间具有很好的一致性。本研究表明：在毛竹快速生长的不同时期，毛竹叶片叶绿素荧光参数变化明显，随着毛竹的快速生长，不同竹龄的毛竹叶片  $F_v/F_m$ ， $F_v/F_o$ ， $Y_{ield}$  均显著上升，显示毛竹 PS II 反应中心的开放程度、PS II 潜在光化学效率和最大光化学效率均得到了提升。由此可以判断：毛竹快速生长的不同时期，毛竹叶片的光合作用能力为前期 < 中期 < 后期。毛竹快速生长前期，由于气温较低，毛竹叶片易受到环境胁迫，低温对毛竹叶片 PS II 反应中心内禀光能转化效率产生了可逆性的胁迫影响，使毛竹叶片  $F_v/F_m$  低于正常值，光化学效率降低<sup>[16]</sup>。毛竹快速生长的中期，后期，气温回升，低温胁迫消失，毛竹叶片 PS II 反应中心内禀光能转化效率得到了显著的提升，毛竹的光合作用能力增强。实验结果显示：PS II 潜在活性( $F_v/F_o$ )和  $F_v/F_m$  的变化规律基本一致，推测环境因素在这一阶段对毛竹的光合作用能力有着显著影响。

对不同竹龄毛竹的叶绿素荧光参数研究发现，2年生竹比1年生竹有着更强的光合作用能力。这是因为2年生竹需要为幼竹的生长提供大量的有机物质。叶淑贤等<sup>[17]</sup>和施建敏等<sup>[18]</sup>对毛竹光合作用季节变化规律进行了研究，证明在快速生长过程中老竹会为新竹提供一部分生长所需的营养物质。说明2年生竹为了满足新竹的需要，加强了其光合作用效率。

在毛竹快速生长期的不同时期，非光化学猝灭系数( $q_{NP}$ )先降低后升高。植物叶片在吸收光能之后一般有3种利用途径：一种是以热量耗散的部分，一种是用于光化学反应的部分，还有一种是反应中心由非光化学反应耗散的能量<sup>[19]</sup>，光合作用和热耗散的变化会引起相应的荧光变化<sup>[20]</sup>。在毛竹快速生长初

期, 毛竹光合作用能力较弱, 吸收的光能更多被用于热耗散, 因此  $q_{NP}$  较高。随着毛竹的快速生长, 毛竹光合作用能力增强, 光能转化效率提升,  $q_{NP}$  也因此降低。在毛竹快速生长的后期, 因为气温升高, 光照强度增强, 植物通过增加对吸收光能的利用和耗散避免过量光对光合机构造成伤害<sup>[21]</sup>, 因此毛竹的  $q_{NP}$  上升。

结合张守仁<sup>[2]</sup>和温国胜等<sup>[3]</sup>对叶绿素荧光参数的研究, 证明叶绿素荧光参数反映了植物的光合作用能力。毛竹的快速生长和其本身的光合作用能力有着密切的关系, 这种关系在毛竹快速生长的中后期尤为明显。毛竹快速生长的中后期是毛竹生长最快的时期, 可以认为毛竹光合作用能力的增强是毛竹快速生长的重要因素。

本研究仅对 1~2 年生毛竹的叶绿素荧光参数进行了研究。今后可以进一步从环境因素、毛竹竹龄等影响因素来探求它们和毛竹叶绿素荧光参数之间的深层联系, 进一步深入分析毛竹快速生长的生理机制。

#### 4 参考文献

- [1] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo [J]. *Ann Rev Plant Biol*, 2007, **59**(1): 89 – 113.
- [2] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学报*, 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.
- [3] 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.
- [4] SHIRKE P A, PATHRE U V. Diurnal and seasonal changes in photosynthesis and photosystem 2 photochemical efficiency in *Prosopis juliflora* leaves subjected to natural environmental stress [J]. *Photosynthetica*, 2003, **41**(1): 83 – 89.
- [5] 尤鑫, 龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析[J]. *西部林业科学*, 2012, **41**(5): 90 – 94.  
YOU Xin, GONG Jirui. Significance and application of chlorophyll fluorescence dynamics process parameters [J]. *J West China For Sci*, 2012, **41**(5): 90 – 94.
- [6] 李雪涛, 金爱武, 李国栋, 等. 毛竹低产低效林的经营策略研究[J]. *竹子研究汇刊*, 2012, **31**(2): 47 – 51.  
LI Xuetao, JIN Aiwu, LI Guodong, *et al.* Management strategies to transform the low-yield or low-efficiency moso bamboo forests [J]. *J Bamboo Res*, 2012, **31**(2): 47 – 51.
- [7] 陈辰, 何小定, 秦金舟, 等. 4 种含笑叶片叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  特性的比较[J]. *安徽农业大学学报*, 2013, **40**(1): 32 – 37.  
CHEN Chen, HE Xiaoding, QIN Jinzhou, *et al.* Comparison of chlorophyll fluorescence  $F_v/F_m$  characteristics of four michelia trees [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2013, **40**(1): 32 – 37.
- [8] 姚兆斌, 江洪, 曹全. 不同高生长阶段毛竹器官含水率的测定[J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(5): 2778 – 2780.  
YAO Zhaobin, JIANG Hong, CAO Quan. Measurement of water content in different organs of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2011, **39**(5): 2778 – 2780.
- [9] 林琼影, 陈建新, 杨淑贞, 等. 毛竹气体交换特征[J]. *浙江林学院学报*, 2008, **25**(4): 522 – 526.  
LIN Qiongying, CHEN Jianxin, YANG Shuzhen, *et al.* Gas exchange with *Phyllostachys pubescens* on Mount Tianmu, Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25**(4): 522 – 526.
- [10] 袁佳丽, 温国胜, 张明如, 等. 毛竹快速生长期的水势变化特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, **32**(5): 722 – 728.  
YUAN Jiali, WEN Guosheng, ZHANG Mingru, *et al.* Water potential with *Phyllostachys edulis* in its fast-growth periods [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(5): 722 – 728.
- [11] 侯小金, 谢锦忠, 格日勒图, 等. 毛竹液流特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(7): 1263 – 1269.  
HOU Xiaojin, XIE Jinzhong, Geriletu, *et al.* *Phyllostachys pubescens* sap flow and its relationships with environmental factors [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29**(7): 1263 – 1269.

- [12] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(10): 2186 – 2196.  
LI Xiao, FENG Wei, ZENG Xiaochun. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2006, **26**(10): 2186 – 2196.
- [13] 吕芳德, 徐德聪, 侯红波, 等. 5种红山茶叶绿素荧光特性的比较研究[J]. 经济林研究, 2003, **21**(4): 4 – 7.  
LÜ Fangde, XU Decong, HOU Hongbo, *et al.* Comparative study on chlorophyll fluorescence character of five kinds of *Camellia* [J]. *Econ For Res*, 2003, **21**(4): 4 – 7.
- [14] 丁燕芳, 梁永超, 朱佳, 等. 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(3): 471 – 478.  
DING Yanfang, LIANG Yongchao, ZHU Jia, *et al.* Effects of silicon on plant growth, photosynthetic parameters and soluble sugar content in leaves of wheat under drought stress [J]. *Plant Nut Fert Sci*, 2007, **13**(3): 471 – 478.
- [15] 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.
- [16] 李平, 李晓萍, 陈贻竹, 等. 低温光抑制胁迫对不同抗冷性的籼稻抽穗期剑叶叶绿素荧光的影响[J]. 中国水稻科学, 2000, **14**(2): 88 – 92.  
LI Ping, LI Xiaoping, CHEN Yizhu, *et al.* Effect of chilling induced photoinhibition stress on chlorophyll fluorescence in flag leaves at heading stage in indica rice varieties with different cold tolerance [J]. *Chin J Rice Sci*, 2000, **14**(2): 88 – 92.
- [17] 叶淑贤, 陆媛媛, 朱文强, 等. 断鞭对毛竹竹笋一幼竹高生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, **28**(1): 100 – 103.  
YE Shuxian, LU Yuanyuan, ZHU Wenqiang, *et al.* Effects of cutting rhizome on the height growth of shoots and seedlings of *Phyllostachys edulis* [J]. *J Northwest For Univ*, 2013, **28**(1): 100 – 103.
- [18] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀. 毛竹光合动态研究[J]. 林业科学研究, 2005, **18**(5): 551 – 555.  
SHI Jianmin, GUO Qirong, YANG Guangyao. Study on the photosynthetic dynamic variation of *Phyllostachys edulis* [J]. *For Res*, 2005, **18**(5): 551 – 555.
- [19] 崔晓伟, 高健, 张志坚, 等. 5种地被竹叶叶绿素荧光特性研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, **33**(4): 726 – 730.  
CUI Xiaowei, GAO Jian, ZHANG Zhijian, *et al.* Chlorophyll fluorescence characteristics of five dwarf bamboos [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2011, **33**(4): 726 – 730.
- [20] 郑淑霞, 上官周平. 8种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1080 – 1087.  
ZHENG Shuxia, SHANGGUAN Zhouping. Comparison of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in eight broad-leaved tree species [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(4): 1080 – 1087.
- [21] 张顺堂, 张桂莲, 陈立云, 等. 高温胁迫对水稻剑叶净光合速率和叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, **25**(3): 335 – 338.  
ZHANG Shuntang, ZHANG Guilian, CHEN Liyun, *et al.* Effects of high temperature stress on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence parameters of flag leaf in rice [J]. *Chin J Rice Sci*, 2011, **25**(3): 335 – 338.