

毛竹光合作用对环境因子的季节响应

施建敏^{1,2,3}, 郭起荣², 杨光耀^{2*}, 杜天真²

(1. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361003; 2. 江西农业大学 江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 江西 南昌 330045; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用 Li-6400 测定毛竹光合作用对光照强度、CO₂ 浓度、温度和湿度等环境因子响应的季节变化, 结果表明: 毛竹最大净光合速率、光补偿点、光饱和点、光合量子效率的年均值分别为 7.30、19.15、1.075 mmol · m⁻² · s⁻¹, 0.032; 最大净光合速率夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季; 春季的光补偿点最高, 夏季次之, 而秋季和冬季均较小; 光饱和点与光合量子效率的季节变化均为秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季。毛竹 CO₂ 补偿点、CO₂ 饱和点、羧化效率的年均值分别为 73.52、1500 μmol · mol⁻¹, 0.033。CO₂ 补偿点春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季; CO₂ 饱和点春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季; 羧化效率夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季。毛竹光合最适温度均在 20~30 °C, 光合最适温度在春、秋季与实验前 3 天最高气温的平均值十分接近, 而夏、冬季与测定前 10 天的最高气温平均值较为接近, 光合最适温度在春、秋两季相当, 夏季稍高, 冬季最低。光合最适湿度为 40%~65%, 季节变化趋势: 秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季。总体而言, 毛竹光合作用对环境因子的季节响应与环境因子的季节变化、叶片的生理活性密切相关。

关键词: 毛竹; 光合作用; 环境因子; 季节响应

中图分类号: Q945.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2007)06-0923-06

Seasonal photosynthetic responses of *Phyllostachys edulis* to environmental factors

SHI Jian-Min^{1,2,3}, GUO Qi-Rong², YANG Guang-Yao^{2*}, DU Tian-Zhen²

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361003, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By using Li-6400, the seasonal photosynthetic response of *Phyllostachys edulis* to light intensity, CO₂ concentration, temperature and humidity were determined. The main results are as follows: the annual average of maximal net photosynthetic rate (P_{max}), light compensate point (LCP), light saturate point (LSP), and apparent quantum yield (AQY) for *P. edulis* are respectively 7.30, 19.15, 1.075 mmol · m⁻² · s⁻¹ and 0.032. The seasonal photosynthetic variation tendency of *P. edulis* to light intensity were summer > autumn > winter > spring for P_{max} , spring > summer > winter > autumn for LCP, and autumn > summer > winter > spring for LSP and AQY. The annual average of CO₂ compensate point (CCP), CO₂ saturate point (CSP) and carboxylase efficiency (CE) for *P. edulis* are respectively 73.52, 1500 μmol · mol⁻¹ and 0.033. The seasonal photosynthetic variation tendency of *P. edulis* to CO₂ concentration were spring > winter > autumn > summer for LCP, spring > autumn > summer > winter for CCP, and summer > autumn > winter > spring for CE. The optimal temperature for photosynthesis of *P. edulis* ranges from 20 to 30 °C, equivalent in spring and autumn, higher in summer and lowest in winter. It is close to the average of three day's highest temperature before test in spring and autumn, and close to the average of ten day's highest temperature before

收稿日期: 2006-05-15 修回日期: 2006-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(30460111); 国家林业局科技项目([2002]254); 江西省自然科学基金(0530029)[Supported by the National Natural Science Foundation of China(30460111); Research Foundation for State Forestry Administration([2002]254); Natural Science Foundation of Jiangxi Province(0530029)]

作者简介: 施建敏(1978-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事植物学教学与科研工作。

* 通讯作者 (Author for correspondence, E-mail: yanggy2004@126.com)

test in summer and winter. The optimal humidity for photosynthesis of *P. edulis* ranges from 40% to 65%, its seasonal variation tendency is autumn>summer>winter>spring. On the whole, the seasonal photosynthetic responses of *P. edulis* to environmental factors were closely related with seasonal change of the environment and the physiological activity of leaves.

Key words: *Phyllostachys edulis*; photosynthesis; environmental factors; seasonal response

中国现有竹林面积 421 万 hm^2 , 占全国森林面积的 3%, 而产值却占全国营林总产值的 18%, 全国毛竹林面积 270 万 hm^2 , 占竹林总面积的 64.1% (江泽慧, 2000)。20 世纪 50 年代以来, 我国竹类工作者围绕一些具有重要经济价值的竹种, 特别是毛竹的引种栽培和丰产培育开展了大量的研究工作 (马乃训, 1989; 夏有根等, 2000; 郭起荣等, 2001), 但对毛竹生理生态的研究则相对较少。1983 年世界光合作用研究小组提出, 在中国一定要研究竹子的光合作用, 即光能转换效率与净初级生产力之间的关系 (黄启民等, 1989)。1984 年, 在联合国环境署 (UNEP) 的资助下, 国内研究者以毛竹为研究对象, 先后开展了温度、湿度、光照强度和水分胁迫对毛竹光合作用气孔限制的研究; 不同冠层竹叶光合日进程; 竹龄与光合速率的关系; 毛竹光合速率季节变化; 毛竹实生苗生物量及光合速率的研究等 (黄启民等, 1989a, b; 许大全等, 1987; 杨迪蝶等, 1990)。此后, 黄承才等 (2000) 对中亚热带东部毛竹叶片光合进行了研究, 陈存及等 (2001) 测定了 9 个毛竹种源新竹的光合性状。施建敏等 (2005) 对毛竹的光合生理动态进行了较为系统的研究。为系统了解毛竹光合作用对环境因子的季节响应, 本文应用 Li-6400 测定了不同季节光照、 CO_2 浓度、温度和湿度等因子对毛竹光合作用的响应, 为毛竹林的经营管理提供理论依据。

1 试验地概况

供试植物毛竹栽培于江西农业大学, $115^{\circ}49'11'' \sim 115^{\circ}49'23'' \text{ E}$, $28^{\circ}46'00'' \sim 28^{\circ}46'30'' \text{ N}$, 海拔 49.5 m。地处江西省中部偏北, 属中亚热带湿润季风气候, 年平均气温 17.5°C , 极端最高气温 40.6°C , 极端最低气温 -9.3°C , 全年平均降水量 1 754.9 mm, 平均无霜期 294 d, 日照率 43%。试验地为红壤。

2 研究方法

在自然条件下, 选择长势中等的当年生毛竹, 取位于中部冠层的第 12~14 轮枝上, 向南伸展的枝条

上部第 2 或第 3 片成熟叶进行测定。光合作用对环境因子的响应分夏、秋、冬、春四季, 分别在 2003 年 7 月、10 月和 2004 年 1 月、4 月中旬, 选择典型天气日子于上午 9:00~10:00 采用 Li-6400 便携式光合测定仪进行测定, 并作 3 次重复。

2.1 光响应

光照强度设定梯度为 0、50、100、200、300、500、700、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000、2 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 样品室 CO_2 浓度 $360 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 叶温和样品室相对湿度 (RH_S) 控制在当季度光合作用的最佳适宜范围内。根据低光照强度测得的光合速率值建立直线回归方程 (许大全等, 1987), 直线与横坐标轴的交点即为光补偿点 (LCP), 直线的斜率即为光合量子效率 (AQY)。

2.2 CO_2 响应

参比室 CO_2 浓度梯度为 400、200、50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000、2 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 光照强度为 $1 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 叶温和样品室相对湿度控制在当季度光合作用的最佳适宜范围内。根据低 CO_2 浓度测得的光合速率值建立直线回归方程 (蔡时青等, 2000), 直线与横坐标轴的交点即为 CO_2 补偿点 (CCP), 直线的斜率即为羧化效率 (CE)。

2.3 温度响应

温度范围为环境温度 $\pm 7^{\circ}\text{C}$, 每 2°C 为一梯度。光照强度为 $1 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 参比室 CO_2 浓度 $360 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 样品室相对湿度控制在当季度光合作用的最佳适宜范围内。

2.4 湿度响应

设定样品室相对湿度跨度为 80%、75%、70%、65%、60%、55%、50%、40%、30%, 光照强度 $1 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 参比室 CO_2 浓度 $360 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 叶温控制在当季度光合作用的最佳适宜范围内。

3 结果与分析

3.1 光合作用对光照强度的季节响应

不同季节毛竹光合作用对光照强度的响应见图

1. 在 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强范围内, 光合速率几乎呈线性增长, 随着光照强度的继续增加, 光合速率的增长幅度减小, 当光照强度达到光饱和点后, 光合速率就处于一个相对稳定的水平, 此后, 光强进一步升高将导致光合速率下降, 而 C_i 值逐渐上升, 据许大全(1997)提出的判据, 此时 P_n 的下降主要由非气孔因素引起。

表 1 不同季节毛竹光响应曲线特征参数

Table 1 Characteristic parameters for light response curve of *P. edulis* in four seasons

季节 Season	P_{\max} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	AQY
夏季 Summer	12.90	20.63	$\approx 1\ 200$	0.033
秋季 Autumn	9.25	15.38	$\approx 1\ 600$	0.038
冬季 Winter	4.19	15.70	$\approx 1\ 000$	0.030
春季 Spring	2.86	24.90	≈ 500	0.025
年平均 Average	7.30	19.15	$\approx 1\ 075$	0.032

从表 1 可看出: 毛竹的最大净光合速率(P_{\max})季节变化趋势为: 夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季, 春季的最

大净光合速率仅为 $2.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而夏季则高达 $12.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 是春季的 4.51 倍。毛竹光补偿点介于 $15.38 \sim 24.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 年平均值为 $19.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 总体的变化趋势为: 春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季。毛竹的光饱和点一年中秋季最高, 约为 $1\ 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 春季最低, 约 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。毛竹的光合量子效率夏、冬两季相差不多, 但以秋季最高(0.038), 春季最低(0.025)。

由上可知, 毛竹光合作用光响应的季节变化同叶片的生理活性关系十分密切, P_{\max} 、AQY、LSP 总体上随叶片的成熟到衰老而逐渐降低, 而 LCP 恰好相反, 它随叶片的逐渐衰老而呈上升趋势。

3.2 光合作用对 CO_2 浓度的季节响应

不同季节, 毛竹对 CO_2 响应态势基本一致(图 2)。在 CO_2 浓度 $< 400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 范围内, 光合速率与 CO_2 浓度呈线性关系; 随 CO_2 浓度的持续升高, 光合速率增幅减小; 当 CO_2 浓度超过饱和点时, 光合速率趋于饱和; CO_2 浓度大于饱和点时, 光合速率增幅很

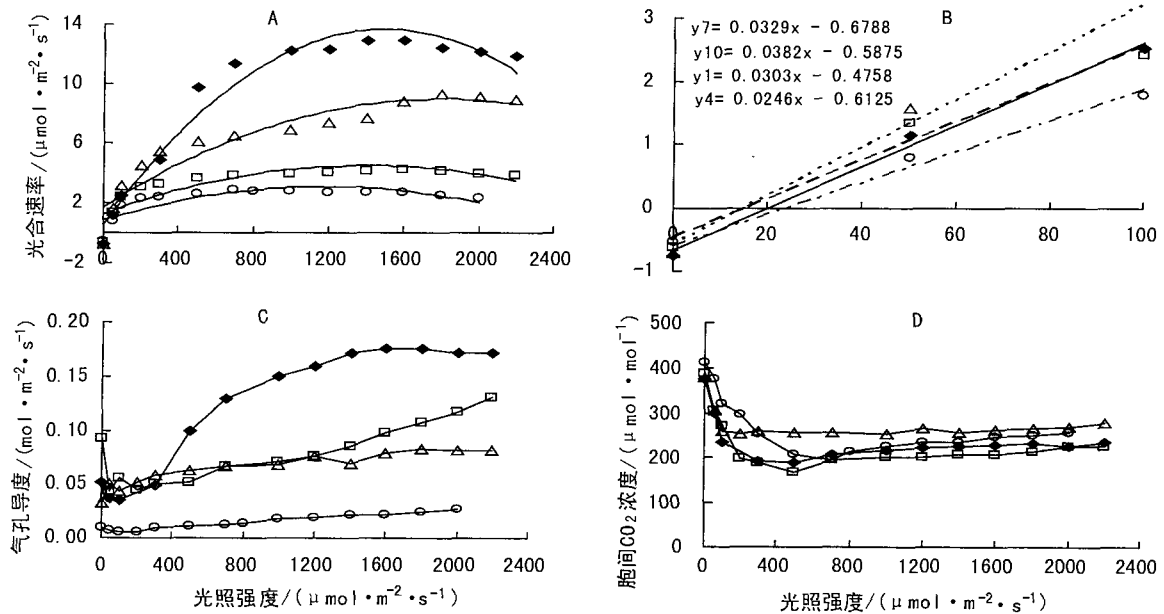


图 1 不同季节毛竹光响应曲线及相关参数

Fig. 1 Response curve of *P. edulis* to light and its related parameters in four seasons

--◆--2003 年 7 月; --△--2003 年 10 月; --□--2004 年 1 月; --○--2004 年 4 月。下同。

小甚至下降。毛竹光合作用 CO_2 响应特征参数见表 2。 CO_2 补偿点介于 $62.61 \sim 84.29 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 间, 且春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季, 年均值 $73.52 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

毛竹的羧化效率季节变化趋势与 CO_2 补偿点的恰好相反, 为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季, 随着叶片的逐渐衰老而减小。四季中, 毛竹的 CO_2 饱和点较为相近, 春季最高, 约为 $1\ 800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 冬季最

小, 约为 $1\ 200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 年平均值在 $1\ 500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右。由此可看出其同叶片的生理活性关系十分密切, 随着叶片的衰老, CE、CSP 逐渐降低, 而 CCP 上升。

3.3 光合作用对温度的响应及季节变化

除夏季外, 其它季节的毛竹光合作用的温度响应曲线均呈抛物线型, 当气温上升达到光合最适温

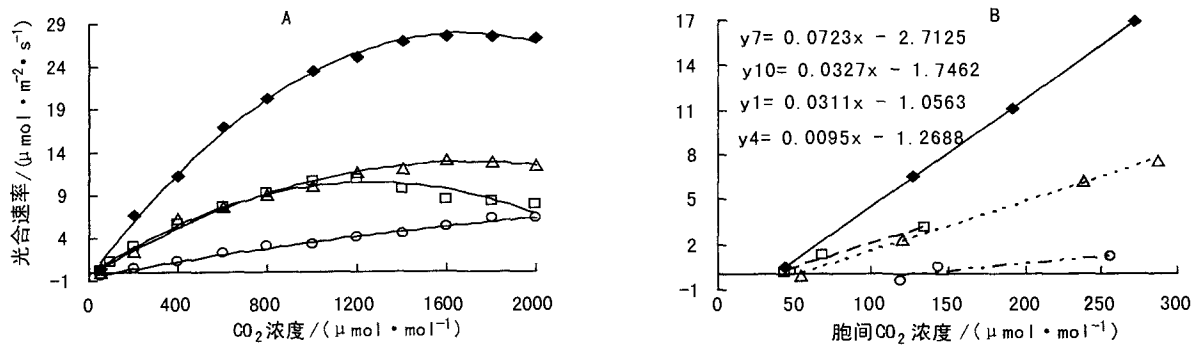


图 2 不同季节毛竹 CO₂ 响应曲线

Fig. 2 Response curve of *P. edulis* to CO₂ concentration and its related parameters in four seasons

度后,光合速率不再随着气温的升高而增大,而是随着气温的升高而减小(图 3)。由于 2003 年 7 月气温过高,而光合测定仪的控温范围有限(环境温度±7℃),不能测得更低温度梯度下毛竹的光合速率。因此,与其它季节的光合作用温度响应曲线不同,毛竹夏季的温度响应曲线呈线型,光合速率随温度的降低而逐渐升高,从图中不能确切地确定其光合最适温度,但能确知其光合的最适温度小于 30℃。

表 2 不同季节毛竹 CO₂ 响应曲线特征参数

Table 2 Characteristic parameters for CO₂ response curve of *P. edulis* in four seasons

季节 Season	CCP (μmol · mol ⁻¹)	CSP (μmol · mol ⁻¹)	CE
夏季 Summer	62.61	≈1 400	0.055
秋季 Autumn	69.31	≈1 600	0.045
冬季 Winter	77.86	≈1 200	0.017
春季 Spring	84.29	≈1 800	0.013
年平均 Average	73.52	≈1 500	0.033

毛竹不同季节光合作用的最适温度均随不同环境温度的变化而变化,从整体上看:春、秋两季相当,夏季稍高,冬季最低,全年变化幅度为 20~30℃。

将毛竹各季节的光合最适温度与当时实验测定期间的气温状况相比较(表 3), T_{opt} 为光合作用最适温度, T_{top10} 和 T_{top3} 分别为实验前 10 天和 3 天的最高气温平均值, T_{average10} 和 T_{average3} 分别为实验前 10 天和 3 天日均温的平均值, T_{average} 为季节平均气温。可以看出:毛竹光合最适温度,夏季与季节平均气温较为接近;秋季与实验前 3 天最高气温的平均值接近;冬季与各气温指标值相去甚远,但比较而言,实验前 10 天最高气温的平均值与之稍接近;春季与实验前 3 天最高气温的平均值接近。同各季节的平均气温相比,毛竹的光合最适温度除夏季低于平均气

温外,其它季节均高于季节平均气温。从整体看,毛竹春、秋季的光合最适温度与实验前 3 天最高气温的平均值十分接近,而夏、冬季的光合最适温度与实验前 10 天最高气温的平均值较为接近。

表 3 不同季节毛竹光合作用最适温度与环境温度的比较

Table 3 Comparisons between photosynthetic optimal temperature of *P. edulis* and environment temperature in four seasons

季节	T _{opt} (°C)	T _{top10} (°C)	T _{top3} (°C)	T _{average10} (°C)	T _{average3} (°C)	T _{average} (°C)
夏季 Summer	<30	36.7	37.5	31.3	32.0	29.0
秋季 Autumn	≈24	25.1	23.9	19.8	18.9	19.7
冬季 Winter	≈20	14.2	13.1	8.3	9.2	7.6
春季 Spring	≈25	23.5	24.9	17.5	21.6	17.6

3.4 光合作用对湿度的响应及季节变化

毛竹的光合速率随着空气湿度的增加而升高,当湿度达到其最适合光合作用值时光合速率不再升高,而是随湿度的增大而减小(图 3)。不同季节,由于植物生理活性和环境条件的变化,毛竹光合作用对湿度的响应态势略有不同:夏、秋两季对湿度的响应较为敏感(曲线弧度较大),尤其是夏季;冬、春季对湿度的响应不很敏感(曲线较平滑),特别是春季。从图中对比可知,毛竹光合作用的最适湿度具有较明显的季节差异,其季节变化趋势为:秋季>夏季>冬季>春季,变化幅度为 40%~65%。

由表 4 分析可知,毛竹光合作用最适湿度的季节变化与空气相对湿度的季节变化趋势大抵相反,空气相对湿度高时,光合最适湿度低,而当空气湿度低时,光合最适湿度高。一年中,虽然毛竹光合作用对空气相对湿度的要求以秋季最高(65%),但其与测定月平均湿度和季节平均湿度值是四个季节当中最为接近的。因此,通过毛竹光合作用对空气湿度的响应行为在一定程度上说明,秋季是毛竹光合作

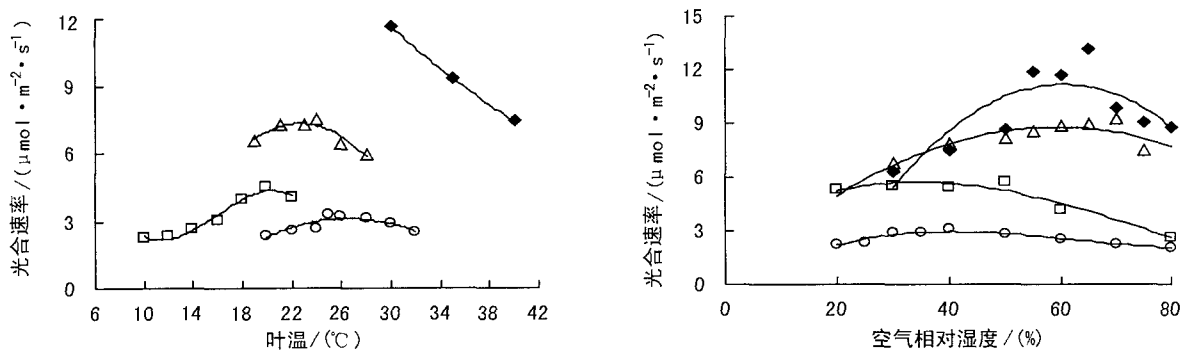


图3 不同季节毛竹温度、湿度响应曲线

Fig. 3 Response curve of *P. edulis* to temperature and humidity in four seasons

用较为适合的一个季节。

表4 不同季节毛竹光合作用最适湿度

Table 4 Photosynthetic optimal humidity of *P. edulis* in four seasons

季节 Season	光合最适湿度 Photosynthetic optimal humidity (%)	测定月平均湿度 Average humidity of the test months (%)	季节平均湿度 Average humidity of the season (%)
夏季 Summer	≈60	73	76
秋季 Autumn	≈65	66	70
冬季 Winter	≈50	80	72
春季 Spring	≈40	81	75

4 讨论

4.1 光响应

植物光合作用对光强的响应与其生理活性密切相关。叶片成熟时,最大净光合速率、光合量子效率和光饱和点均较高、光补偿点较低,随着叶片的逐渐衰老,最大净光合速率、光合量子效率和光饱和点降低,而光补偿点升高。本文对毛竹的测定结果与台湾桫木(朱万泽,2002)光响应特征值的季节变化规律基本一致。

强光可引起植物光合速率下降。台湾桫木光响应曲线中光合速率下降的主要原因为非气孔因素(朱万泽,2002)。本文测定结果也认为,毛竹不同季节光响应中光合速率的下降主要由非气孔因素引起。李新国等(1998)认为强光对银杏有严重的光抑制作用,但强光导致毛竹光合作用光抑制现象仍有待证实。毛竹的最大光合速率 $11 \sim 15.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (黄承才等,2000;谢会成,2002),光补偿点约 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光饱和点在 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(许大全等,1987;黄启民等,1989b),光合量子效率数值

0.036(许大全等,1987)。邱尔发等(2001)对9个毛竹种源新竹光合特性的测定结果则表明,各毛竹种源新竹年均光补偿点变幅为 $10.3 \sim 16.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。本文测定的毛竹光响应特征值基本与上述文献的研究结果相符,唯一稍有出入的是光补偿点,本文测定值(年均值 $19.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$)居中。

研究表明毛竹秋季的光合作用是最强的(黄启民等,1989b;陈存及等,2001),本文的湿度响应分析也从湿度方面说明秋季是毛竹光合作用较为适合的一个季节。而本文的光响应测定结果表明,毛竹的最大净光合速率在秋季有大幅度下降。造成这种现象的主要原因,可能是2003年长期高温、干旱天气的逆境胁迫所致,原因是否属实,还有待今后的连续观测来证实。

4.2 CO₂ 响应

从CO₂的补偿点、饱和点和羧化效率的季节变化看,毛竹光合作用CO₂响应的季节变化同叶片的生理活性关系十分密切。本文测定结果与台湾桫木(朱万泽,2002)CO₂响应特征值的季节变化趋势相似。9个种源新竹年平均CO₂补偿点范围为 $91 \sim 112 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,5月份最高,其次为10月、7月和11月,12月份最低,而且各种源的CO₂补偿点季节变化表现不一致,波动较大,认为这可能与各种源新竹生长特性有关(邱尔发等,2002)。本文测定结果($73.52 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)与之相比,不但CO₂补偿点低,而且季节变化规律也不一致。造成研究结果产生分歧原因到底是种源差异,或是研究方法(离体测定)和手段(CO₂补偿点不是由CO₂反应曲线中算得)的不同,还是测定年份的气候差异,仍需进一步的研究证实。

4.3 温度响应

毛竹光合作用的最适温度 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$,随环境温

度的高低变化而波动,具有明显的季节性变化。

近年来,国内研究者对一些树种光合作用的温度响应展开了探讨。光合最适温度范围因树种特性不同而稍有差异,孝顺竹介于 19~23 °C 间(贺东祥等, 1995);杉木为 25~30 °C (张小全等, 2002);柑桔在 17.0~30.5 °C 间(陈志辉等, 1994);龙眼为 22~28 °C (刘殊等, 1997)。虽然毛竹光合最适温度的上、下限与上述树种相差无几,但是其光合最适温度的变动幅度较大,这反映出毛竹对温度的适应能力较强。

对于光合最适温度与环境温度之间的关系,说法不一,有的认为光合最适温度接近于测定前 5 天日最高气温的平均值(张小全等, 2002);而有的认为光合最适温度与植株前 5~10 天所处的环境平均气温密切相关(陈志辉等, 1994;刘殊等, 1997)。通过对比气象资料,本文测定结果认为:光合最适温度与季节的温度变化密切相关。在相对温和的春、秋季节,毛竹的光合最适温度与实验前 3 天最高气温的平均值十分接近;而极端温度的夏、冬季,环境气温对毛竹光合作用的后效时间较长,光合最适温度与实验前 10 天最高气温的平均值较为接近。

许大全等(1987)研究指出:从秋季到冬季,随着气温的下降,气孔导度与光合速率基本上平行地降低,但是细胞间隙 CO₂ 浓度的升高和气孔限制值的下降,说明毛竹叶片冬季光合速率降低的主要原因并不是气孔部分关闭,而是叶肉细胞光合活性的降低。在低温条件下,不仅酶的反应速度慢,而且光合膜系统的结构与功能也会发生不利于光合作用的变化。通过分析数据,本文的测定结果对该结论予以证实和支持。

植物光合适宜温度波动的原因可能涉及叶绿体膜稳定性的变化,也可能与 RuBP 羧化酶、果糖二磷酸酶的结构、稳定性和催化特性的变化有关(Bojckman 等, 1980)。毛竹光合机构对温度响应的季节性差异是否与叶绿体的上述变化有关,有待探讨。

4.4 湿度响应

研究树木的光合作用与大气湿度的关系,探讨大气水分亏缺对树木光合生理指标的影响,这对深入认识不同树木的光合生态生理特性,评价其抗旱能力,合理进行森林经营管理,具有重要意义。毛竹光合作用最适空气相对湿度为 40%~65%,季节变化与空气相对湿度的季节变化恰好相反。侧柏、樟子松、油松、白栎 4 种针叶幼树的光合速率随着大气湿度的降低而减弱,除侧柏外,其余 3 树种光合速率的饱和相对

湿度均在 70%左右,其中空气相对湿度的变化对樟子松和油松光合生理特性的影响结果很近似(郭连生等, 1994)。葛滢等(1998)的研究认为,当空气相对湿度小于 79%时,枫香的光合速率随相对湿度的升高而增加,超过 79%时光合速率下降,在 60%~85%范围内,光合速率均较高。本文对毛竹光合最适湿度的测定结果与之相比较小,这可能是因为不同树种的光合生理特性对大气湿度的反应状况与其遗传性及形态解剖学构造有关(郭连生等, 1994)。

致谢 许仕、谢冬明、陈尚钊、李彦连、郭联华、魏绪英等同学为野外试验测定工作给予热情帮助,园林与艺术学院森林培育学科为本试验提供了大力支持。文中气象数据由江西农业大学气象观测站提供。

参考文献:

- 朱万泽. 2002. 台湾栲木生理生态学特性及其环境关系的研究 [M]. 南京:南京林业大学
- 江泽慧. 2000. 在第四届中国竹子之乡联谊会暨全国竹(藤)业经济发展研讨会开幕式上的讲话[J]. 竹子研究汇刊, 19(3): 2-3
- 许大全,李德耀,邱国雄,等. 1987. 毛竹叶光合作用的气孔限制研究[J]. 植物生理学报, 13(2): 154-160
- 谢会成. 2002. 栓皮栎光合生理生态的研究[M]. 南京:南京林业大学
- Bojckman O, Badger M R, Armond P A. 1980. Response and adaptation of photosynthesis to high temperatures[C]//Turner N C, Kramer P J (eds). Adaptation of plants to water and high temperature stress. New York: John Wiley and sons; 233-249
- Cai SQ(蔡时青), Xu DQ(许大全). 2000. Relationship between the CO₂ compensation point and photorespiration in Soybean leaves(大豆叶片 CO₂ 补偿点和光呼吸的关系) [J]. Acta Phyto Physiol Sin(植物生理学报), 26(6): 545-550
- Chen ZH(陈志辉), Zhang LC(张良诚). 1994. Acclimation of photosynthesis to temperature in citrus(柑桔光合作用对环境温度的适应)[J]. J Zhejiang Agric Univ(浙江农业大学学报), 20(4): 389-392
- Chen CJ(陈存及), Qiu EF(邱尔发), Liang YC(梁一池), et al. 2001. Study on the photosynthetic characters of *Phyllostachy heterocycla* cv. Pubescens provenances(毛竹不同种源光合特性研究)[J]. Sci Silv Sin(林业科学), 37(6): 15-19
- Ge Y(葛滢), Chang J(常杰), Chen ZH(陈增鸿), et al. 1998. Relations between the net photosynthesis and environmental factors of *Liquidambar formosana*(枫香净光合作用与环境因子的关系) [J]. J Zhejiang Fore Sci Tech(浙江林业科技), 18(5): 1-5
- Guo LS(郭连生), Tian YL(田有亮). 1994. Study on the relationship between the photosynthetic features of four coniferous species saplings and air humidity(4种针叶幼树的光合生理特性与大气湿度关系的研究)[J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 14(2): 136-141
- Guo QR(郭起荣), Hu FM(胡芳名). 2001. Bamboo fertilizer (下转第 922 页 Continue on page 922)

- 社:32-34
- 朱守谦,何纪星,魏鲁明,等. 2003. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究[C]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社:38-48
- 张云贵,谢永红. 1994. PEG 在模拟植物干旱胁迫和组织培养中的应用[J]. 亚热带植物通讯,23(2):61-64
- 张邦琨,张萍,赵云龙. 2000. 喀斯特地貌不同演替阶段植被小气候特征研究[J]. 贵州气象,24(3):17-21
- 喻理飞,朱守谦,叶镜中. 2003. 喀斯特森林不同种组的耐旱适应性[C]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社:212-217
- Chen YZ(陈贻竹), Li XP(李晓萍), Xia L(夏丽), et al. 1995. The application of chlorophyll fluorescence technique in the study of responses of plants to environmental stresses(叶绿素荧光技术在植物环境胁迫研究中的应用)[J]. *J Trop Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报),3(4):79-86
- Kaufmann MR, Eckard AN. 1971. Evaluation of water stress control with polyethylene glycol by analysis of guttation[J]. *Plant Physiol*,47(4):453-456
- Michel BE, Kaufmann MR. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. *Plant Physiol*,51(5):914-916
- Song LH(宋林华). 2000. Progress and trend of karst geomorphology study(喀斯特地貌研究进展与趋势)[J]. *Progress in Geo*(地理科学进展),19(3):193-202
- Wan FX(万福绪), Zhang JC(张金池). 2003. Ecological characteristics and vegetation rehabilitation techniques in the karst mountain areas of Guizhou Province(黔中喀斯特山区的生态环境特点及植被恢复技术)[J]. *J Nanjing Fore Univ(Nat Sci Edi)*(南京林业大学学报·自然科学版),27(1):45-49
- Yao CH(姚长宏), Jiang ZC(蒋忠诚), Yuan DX(袁道先). 2001. Vegetation karst effects on the karst area of southwest China(西南岩溶地区植被喀斯特效应)[J]. *Acta Geo Sin*(地球学报),22(2):159-164
- Zhang SR(张守仁). 1999. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance(叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论)[J]. *Chin Bull Bot*(植物学通报),16(4):444-448

(上接第 928 页 Continue from page 928)

- application in theory and practice(竹林培肥研究与 50 年理论与实践)[J]. *Eco Fore Res*(经济林研究),19(3):53-55
- He DX(贺东祥), Shen YG(沈允钢). 1995. Seasonal changes of photosynthetic characteristics of four evergreen plants(几种常绿植物光合特性的季节变化)[J]. *Acta Phytophysiol Sin*(植物生理学报),21(1):1-7
- Kramer P J. eds. 1980. Adaptation of plants to water and high temperature stress[C]. New York:Johnwiley and sons:233-249
- Liu S(刘殊), Liao JS(廖镜思), Chen QX(陈清西), et al. 1997. Photosynthetic response to surrounding temperature in longan leaves(龙眼光合作用对环境温度的响应)[J]. *J Fujian Agric Univ* (福建农业大学学报),26(4):407-410
- Huang QM(黄启民), Yang DD(杨迪蝶), Gao AX(高爱新), et al. 1989. The research on photosynthesis of bamboo(不同条件下毛竹光合作用的研究)[J]. *Bamboo Res*(竹类研究),8(2):8-16
- Huang QM(黄启民), Yang DD(杨迪蝶), Gao AX(高爱新). 1989. A study on photosynthesis of bamboo(毛竹光合作用的研究)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学),25(4):366-369
- Huang CC(黄承才), Ge Y(葛滢), Chang J(常杰). 2000. Studies on photosynthesis and respiration of blades of *Phyllostachy heterocycla* cv. Pubescens in eastern mid-subtropical zone, China(中亚热带东部毛竹叶片光合及呼吸的研究)[J]. *J Zhejiang Fore Sci Tech* (浙江林业科技),20(5):14-16
- Li XG(李新国), Xu DQ(许大全), Meng QW(孟庆伟). 1998. Response of photosynthesis to strong light in *Ginkgo biloba* leaves(银杏叶片光合作用对强光的响应)[J]. *Acta Phytophysiol Sin*(植物生理学报),24(4):354-360
- Ma NX(马乃训). 1989. Bamboo study in China(我国的竹类科学研究)[J]. *J Bamboo Res* (竹子研究汇刊),8(1):76-83
- Qiu EF(邱尔发), Chen CJ(陈存及). 2002. Analysis on respiratory characters in different provenances of *Phyllostachy heterocycla* cv. Pubescens(毛竹种源呼吸性状态动态变化分析)[J]. *J Fujian Coll Fore*(福建林学院学报),22(3):213-218
- Shi JM(施建敏), Guo QR(郭起荣), Yang GY(杨光耀). 2005. Study on the photosynthetic dynamic variation of *P. edulis*(毛竹光合动态研究)[J]. *Fore Res*(林业科学研究),18(5):551-555
- Sun GC(孙谷畴), Zhao P(赵平), Zeng XP(曾小平), et al. 2002. Changes of leaf photosynthetic parameters in leaves of *Woonyoungia septentrionalis* and *Tsoongiodendron lotungensis* under different growth-irradiation(不同光强下焕铺木和观光木的光合参数变化)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报),26(3):355-362
- Xia YG(夏有根), Xu EN(徐尔娜), Xu CH(许翠华), et al. 2000. Making progress on bamboo research of China(我国竹子研究概述)[J]. *J Jiangsu Fore Sci Tech* (江苏林业科技),27(3):44-48
- Xu DQ(许大全). 1997. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis(光合作用气孔限制分析中的一些问题)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯),33(4):241-244
- Yang DD(杨迪蝶), Huang QM(黄启民). 1990. The research on biomass and photosynthesis of bamboo seedlings and interrelated factors(毛竹实生苗生物量及光合速率的研究)[J]. *Fore Res* (林业科学研究),3(5):461-465
- Zhang XQ(张小全), Xu DY(徐德应). 2002. Effects of temperature on the photosynthetic physiology of 18-year-old Chinese Fir (*Cunninghamia langceolata*)(温度对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学),38(3):27-33