

4 个观赏竹种的光合特性及其影响因子分析

黄滔^{1,2}, 刘玮¹, 唐红¹, 黄程前¹, 黄文韬¹, 唐军¹

(1. 湖南省森林植物园, 湖南长沙 410116; 2. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004)

摘要: 本研究以白纹阴阳竹 (*Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura)、鼓节竹 (*Bambusa tuldooides* ‘Swolleninternode’)、花秆早竹 (*Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang) 和美丽箬竹 (*Indocalamus decorus* Q. H. Dai) 4 个观赏竹种为供试材料, 分析了各竹种的光响应和 CO₂ 响应曲线及参数、光合和气体交换参数以及相关环境因子的日变化规律, 并通过相关性分析、逐步多元回归分析和通径分析探讨了影响 4 个竹种叶片净光合速率 (Pn) 的主要因子。测定结果表明: 随光合有效辐射强度 (PAR) 或胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的提高, 各竹种叶片的 Pn 值均逐渐增大, 但增幅有一定差异; 各竹种的光响应和 CO₂ 响应参数均有较大差异, 其中, 白纹阴阳竹叶片的表观量子产量 (AQY) 最低, CO₂ 饱和点 (CSP) 和 CO₂ 补偿点 (CCP) 也较低, 其他参数均最高; 而花秆早竹叶片的 AQY 和 CCP 值均最高, 而其他参数总体上均最低。4 个竹种的光合及气体交换参数日变化曲线均有一定差异; 美丽箬竹叶片 Pn 值日变化曲线呈“双峰型”; 白纹阴阳竹、鼓节竹和花秆早竹叶片的 Pn 值日变化曲线均呈“单峰型”, 峰值分别出现在 14:00、10:00 和 12:00; 总体上看, 4 个竹种叶片的气孔导度 (Gs)、Ci、蒸腾速率 (Tr) 和水分利用效率 (WUE) 总体上具有相似的日变化趋势。分析结果表明: 按照总影响效应由高至低进行排序, 对白纹阴阳竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 PAR、Tr、大气 CO₂ 浓度 (Ca)、Ci, 对鼓节竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 PAR、Tr、Ca、Gs, 对花秆早竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 PAR、Tr、Gs、气温 (Ta)、Ci, 对美丽箬竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 PAR、空气相对湿度 (RH)、Ta、Ca、Tr、Gs。综合分析结果显示: 4 个竹种中, 白纹阴阳竹光合能力最强, 但对弱光的适应和利用能力较弱, CO₂ 同化能力强且适应范围广; 鼓节竹和美丽箬竹对光和 CO₂ 的利用能力和适应范围均居中; 花秆早竹光合能力和 CO₂ 同化能力最差, 但对弱光的适应和利用能力较强, CO₂ 适应范围较窄。

关键词: 观赏竹种; 光合特性; 气体交换参数; 环境因子; 相关性分析; 通径分析

中图分类号: Q945.11; S975 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2016)01-0024-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.01.04

Analyses on photosynthetic characteristics of four ornamental bamboo species and its influence factors HUANG Tao^{1,2}, LIU Wei¹, TANG Hong¹, HUANG Chengqian¹, HUANG Wentao¹, TANG Jun¹ (1. Hu'nan Forest Botanical Garden, Changsha 410116, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(1): 24-33

Abstract: Taking four ornamental bamboo species of *Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura, *Bambusa tuldooides* ‘Swolleninternode’, *Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang and *Indocalamus decorus* Q. H. Dai as materials tested, light response and CO₂ response curves and parameters, and diurnal change laws in photosynthetic and gas exchange parameters and related environmental factors related were analyzed, and the main factors affecting net photosynthetic rate (Pn) of leaf of four bamboo species were discussed by correlation analysis, stepwise multiple regression analysis and path analysis. The determination results show that with enhancing of photosynthetically active radiation intensity (PAR) or intercellular CO₂ concentration (Ci), Pn value of leaf of each bamboo species increases gradually, but there is a certain difference in their increasing ranges. There are great differences in light response and CO₂ response parameters of each bamboo

收稿日期: 2015-04-23

基金项目: 湖南省科学技术厅项目(2011NK3019); 中央财政林业科技推广示范项目([2013]XT03)

作者简介: 黄滔(1977—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事森林生态和园林植物方面的研究。

species. In which, apparent quantum yield (AQY) of leaf of *H. tranquillans* f. *shiroshima* is the lowest, CO₂ saturation point (CSP) and CO₂ compensation point (CCP) are also lower, and other parameters all are the highest, while both AQY and CCP values of *P. violascens* f. *viridisulcata* are the highest, other parameters are the lowest generally. There are some differences in all diurnal change curves of photosynthetic and gas exchange parameters of four bamboo species. Diurnal change curve of Pn value of leaf of *I. decorus* is “double-peak type”. That of *H. tranquillans* f. *shiroshima*, *B. tuldooides* ‘Swolleninternode’ and *P. violascens* f. *viridisulcata* is “single-peak type”, their peak values appear at 14:00, 10:00 and 12:00, respectively. Overall, diurnal change trends of stomatal conductance (Gs), Ci, Transpiration rate (Tr) and water use efficiency (WUE) of leaf of four bamboo species are similar. The analysis results show that according to total influence from high to low, main factors affecting Pn value of leaf of *H. tranquillans* f. *shiroshima* are PAR, Tr, air CO₂ concentration (Ca), Ci; those of *B. tuldooides* ‘Swolleninternode’ are PAR, Tr, Ca, Gs, those of *P. violascens* f. *viridisulcata* are PAR, Tr, Gs, air temperature (Ta), Ci, and those of *I. decorus* are PAR, air relative humidity (RH), Ta, Ca, Tr, Gs. The comprehensive analysis results indicate that among four bamboo species, *H. tranquillans* f. *shiroshima* has the strongest photosynthetic ability, while it has a weak ability to adapt and use to low light, and its CO₂ assimilation ability is also strong with a wide adaptability; *B. tuldooides* ‘Swolleninternode’ and *I. decorus* are at the middle both in utilization ability and in adaptation range of light and CO₂; *P. violascens* f. *viridisulcata* is the worst both in photosynthetic ability and in CO₂ assimilation ability, while it has a strong ability to adapt and use to low light, and has a narrow CO₂ adaptation range.

Key words: ornamental bamboo species; photosynthetic characteristics; gas exchange parameters; environmental factors; correlation analysis; path analysis

园林植物的光合生理特性与其自身的遗传特性和周围的环境因素紧密相关,是植物栽培过程中重要的依据指标之一^[1-2]。竹类植物是重要的园林绿化植物,种类繁多、用途广泛。近年来,观赏竹的生态和景观功能日益受到重视,市场前景十分广阔。竹类的研究主要集中在生长规律^[3-4]和光合特性^[5-8]方面,对其无性繁殖^[9-10]和分子生物学^[11-12]方面也有相关研究报道。研究结果表明,不同竹种的光合生理特性差异较大,且影响光合作用的主要因素也不尽相同^[5-8],因此,应该按照不同竹种的光合特性进行合理配置、栽培和管理。

白纹阴阳竹 (*Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura) 隶属于阴阳竹属 (*Hibanobambusa* Maruy. et H. Okamura), 属混生竹种; 新叶黄白色, 渐绿间有较宽的黄白色条纹, 叶色亮丽, 是极具观赏价值的观叶竹种。鼓节竹 (*Bambusa tuldooides* ‘Swolleninternode’) 隶属于簕竹属 (*Bambusa* Schreber); 秆高6~8 m, 竹秆节间下部缩短膨大, 秆形奇特, 为优良的园林观秆竹种。花秆早竹 (*Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang) 隶属于刚竹属 (*Phyllostachys* Sieb. et Zucc.), 属散生竹种; 秆金黄色, 沟槽白色, 为珍稀的观秆竹种。美丽箬竹 (*Indocalamus decorus* Q. H. Dai)

隶属于箬竹属 (*Indocalamus* Nakai); 叶片呈带状披针形, 叶片较大, 在园林中应用广泛, 是优良的观叶竹种。目前这4个观赏竹种尚未被广泛推广, 因此, 研究这4个观赏竹种的光合生理特性, 并有针对性的制定各竹种的栽培措施, 有助于对它们进行合理推广和应用。

为揭示上述4个观赏竹种的光合生理特性, 作者对它们的光响应和CO₂响应特征及光合参数日变化进行了研究, 同时还分析了各竹种的净光合速率与部分生理生态因子的关系, 以期掌握各竹种的光合作用规律, 为筛选出适合不同生态环境的栽培竹种, 以及不同竹种的推广种植、配置造景、植被恢复和生态建设等提供基础研究数据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试白纹阴阳竹、鼓节竹、花秆早竹和美丽箬竹均为3年生竹, 种植于湖南省森林植物园观赏竹专类园, 地理坐标为东经113°00′、北纬28°20′, 海拔70~85 m。种植地年均气温17.2℃, 极端高温40.6℃, 极端低温-11.3℃; 年平均降水量1412.3 mm; 全年无霜期281 d。主要土壤类型为第四纪网纹红壤, 土

壤 pH 5.6 左右。

选取同一地块不同栽植位置且生长旺盛、长势一致的健壮植株为样株,各竹种样株的平均秆高和平均秆直径见表 1。

表 1 供试 4 个竹种样株的平均秆高和平均秆直径 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
Table 1 Average height and diameter of culm of four bamboo species tested ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 竹种 Bamboo species | 平均秆高/m Average height of culm | 平均秆直径/cm Average diameter of culm |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| HT | 0.82±0.08 | 0.85±0.04 |
| BT | 2.83±0.09 | 5.14±0.26 |
| PV | 4.92±0.31 | 3.58±0.21 |
| ID | 1.17±0.13 | 0.49±0.06 |

¹⁾ HT: 白纹阴阳竹 *Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura; BT: 鼓节竹 *Bambusa tuldooides* 'Swolleninternode'; PV: 花秆早竹 *Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang; ID: 美丽箬竹 *Indocalamus decorus* Q. H. Dai.

1.2 方法

1.2.1 光响应曲线和 CO₂ (ACI) 响应曲线测定 在 2014 年的 9 月 2 日、9 月 16 日和 9 月 28 日的 9:00 至 11:00, 每个竹种选取样株 3 株, 每样株各选取中部向阳的叶片 3 枚, 用 LI-6400 便携式光合仪 (美国 LI-COR 公司) 测定叶片的净光合速率, 结果取平均值。

测定光合响应曲线时, 设定光合测定系统的叶室温度 (25±1) °C、胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 400 μmol·mol⁻¹、气体流速 0.5 L·min⁻¹、空气相对湿度 (RH) 70%, 在光合有效辐射强度 (PAR) 为 0、25、50、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600 和 1 800 μmol·m⁻²·s⁻¹ 条件下测定叶片净光合速率 (P_n)。

测定 CO₂ 响应曲线时, 安装 CO₂ 钢瓶后稳定 20 min, 按照上述条件设置测定系统的叶室温度、气体流速和空气相对湿度, PAR 设为 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹, 在胞间 CO₂ 浓度为 50、100、200、300、400、600、800、1 000 和 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 条件下测定叶片 P_n 值。

1.2.2 光合和气体交换参数以及环境因子日进程测定 于 2014 年 9 月选 3 个典型晴天, 在每天的 6:00 至 18:00 测量光合和气体交换参数的日变化。各种竹均选择样株 3 株, 每一样株各选择中部向阳的叶片 3 枚并挂牌标记, 测定时保持叶片自然生长角度不变, 每枚叶片重复测定 3 次。用 LI-6400 便携式光合仪每隔 2 h 测定 1 次。

光合和气体交换参数包括净光合速率、气孔导度 (G_s)、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率 (T_r), 并计算叶片水

分利用效率 (WUE)。同时对相关环境因子的日变化进行测定, 包括光合有效辐射强度、气温 (T_a)、空气相对湿度和大气 CO₂ 浓度 (C_a)。

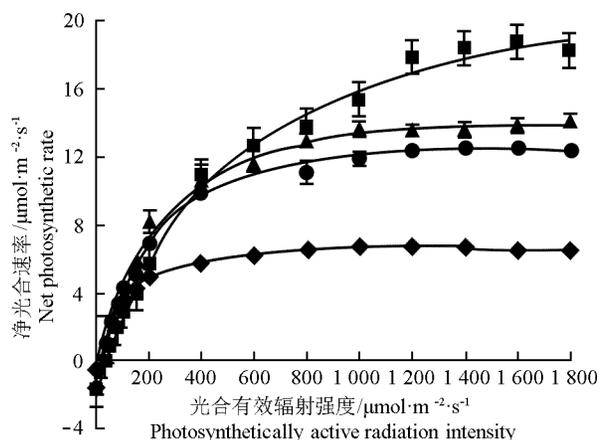
1.3 数据处理和统计分析

采用 EXCEL 2010 软件和 SPSS 17.0 统计分析软件进行数据处理、方差分析、相关性分析和逐步多元回归分析等。另外, 采用叶子飘等^[13]的光合新模型对光响应曲线和 CO₂ 响应曲线进行拟合, 并据此计算光响应参数和 CO₂ 响应参数。

2 结果和分析

2.1 供试 4 个竹种叶片的光响应曲线及光响应参数分析

供试 4 个竹种叶片的光响应曲线见图 1。结果显示: 随光合有效辐射强度 (PAR) 的升高, 4 个竹种叶片的净光合速率 (P_n) 变化趋势相似, 均呈先急剧升高后趋于平稳的变化趋势, 但各竹种叶片的 P_n 值差异较大。



—■—: 白纹阴阳竹 *Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura; —▲—: 鼓节竹 *Bambusa tuldooides* 'Swolleninternode'; —◆—: 花秆早竹 *Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang; —●—: 美丽箬竹 *Indocalamus decorus* Q. H. Dai.

图 1 供试 4 个竹种叶片的光响应曲线
Fig. 1 Light response curve of leaf of four bamboo species tested

以 PAR 值为自变量 X, P_n 值为因变量 Y, 利用叶子飘等^[13]的光合新模型进行拟合, 获得各竹种叶片的光响应回归方程, 并据此计算出各竹种的光响应参数, 结果见表 2。由表 2 可见: 4 个竹种叶片的表观量子产量 (AQY)、最大净光合速率 (P_{max})、光饱和点

(LSP)、光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(Rd)均存在显著性差异。其中,白纹阴阳竹叶片的 P_{\max} 、LSP、LCP 和 Rd 值在供试4个竹种中均最高,分别为 20.70、2 644.06、29.47 和 $1.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,与其他3个竹种有显著差异($P < 0.05$),而其 AQY 值显著低于其他3个竹种,为 $47.34 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$,说明供试的4个竹种中白纹阴阳竹的光合能力最强,但对弱光的适应和利用能力较弱,与光响应曲线的变化结果一致,因此,当 PAR 值低于 $25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,由于白纹阴阳竹叶片的光合同化速率低于其消耗速率,因而其叶

片的 P_n 值均为负值。鼓节竹与美丽箬竹叶片间各光响应参数均无显著差异($P > 0.05$),且各参数的数值在4个竹种居中,表明供试的4个竹种中鼓节竹与美丽箬竹光合能力居中。在4个竹种中,花秆早竹叶片的 AQY 值最高,其 P_{\max} 、LSP、LCP 和 Rd 值均最低,说明花秆早竹对弱光的适应和利用能力在供试的4个竹种中最强,但其光合能力较弱,因此,当 PAR 值低于 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,花秆早竹的 P_n 值高于其他3个竹种,但随 PAR 值的升高,其 P_n 值则明显低于其他3个竹种。

表2 供试4个竹种叶片的光响应参数($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Light response parameters of leaf of four bamboo species tested ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 竹种 Bamboo species | AQY | P_{\max} | LSP | LCP | Rd |
|--|--------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| 白纹阴阳竹 <i>Hibanobambusa tranquillans</i> f. <i>shiroshima</i> | 47.34±13.16c | 20.70±0.67a | 2 644.06±45.63a | 29.47±2.83a | 1.33±0.08a |
| 鼓节竹 <i>Bambusa tuldooides</i> 'Swolleninternode' | 69.18±12.37b | 13.57±0.59b | 1 565.81±12.32b | 11.09±1.74b | 0.74±0.05b |
| 花秆早竹 <i>Phyllostachys violascens</i> f. <i>viridisulcata</i> | 86.81±34.33a | 6.46±0.58c | 1 146.28±11.78c | 5.84±1.62b | 0.48±0.05c |
| 美丽箬竹 <i>Indocalamus decorus</i> | 65.63±26.17b | 12.26±0.64b | 1 371.87±8.16bc | 9.36±1.73b | 0.59±0.04bc |

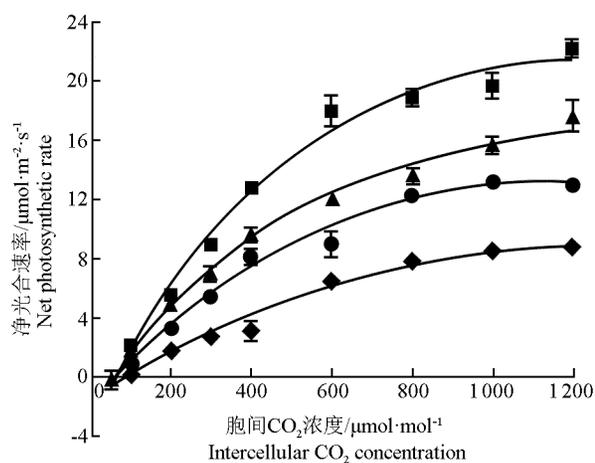
¹⁾ AQY: 表观量子产量 Apparent quantum yield ($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$); P_{\max} : 最大净光合速率 The maximum net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); LSP: 光饱和点 Light saturation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); LCP: 光补偿点 Light compensation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Rd: 暗呼吸速率 Dark respiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

2.2 供试4个竹种叶片的 CO_2 响应曲线及 CO_2 响应参数分析

供试4个竹种叶片的 CO_2 响应曲线见图2。结果显示:供试4个竹种叶片 CO_2 响应曲线的变化趋势基本一致,但随胞间 CO_2 浓度(C_i)的升高,不同竹种间 P_n 值差异明显增大。

以 C_i 值为自变量 X、 P_n 值为因变量 Y,利用叶子飘等^[13]的光合新模型进行拟合,获得各竹种叶片的 CO_2 响应回归方程,并据此计算出各竹种的 CO_2 响应参数,结果见表3。由表3可见:白纹阴阳竹叶片的羧化效率(CE)、 P_{\max} 和光呼吸速率(R_p)在供试的4个竹种中最高, CO_2 饱和点(CSP)和 CO_2 补偿点(CCP)则相对较低,表明白纹阴阳竹的羧化酶活性较高,RUBP(1,5-二磷酸核酮糖)的再生速率也较高,且对低浓度 CO_2 有较强的利用能力和同化能力。鼓节竹叶片的 CE、 P_{\max} 、CCP 和 R_p 值略低于白纹阴阳竹,但差异不显著,而其 CSP 值则在供试的4个竹种中最高,说明鼓节竹的同化能力略弱于白纹阴阳竹,但差异不大。花秆早竹叶片的 CE、 P_{\max} 和 R_p 值在4个观赏竹种中均最低,CCP 值则最高,表明花秆早竹的 CO_2 同化能力弱,并且对低浓度 CO_2 的利用能力也较

差。美丽箬竹叶片 CSP 值在4个竹种中最低,但其 CE、 P_{\max} 和 R_p 值均略高于花秆早竹,但明显低于白纹阴阳竹和鼓节竹,表明美丽箬竹利用低浓度 CO_2 的能力略优于花秆早竹,但整体对 CO_2 的同化能力较弱。



—■—: 白纹阴阳竹 *Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura; —▲—: 鼓节竹 *Bambusa tuldooides* 'Swolleninternode'; —◆—: 花秆早竹 *Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang; —●—: 美丽箬竹 *Indocalamus decorus* Q. H. Dai.

图2 供试4个竹种叶片的 CO_2 响应曲线

Fig. 2 CO_2 response curve of leaf of four bamboo species tested

表3 供试4个竹种叶片的CO₂响应参数($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 3 CO₂ response parameters of leaf of four bamboo species tested ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 竹种 Bamboo species | CE | P _{max} | CSP | CCP | R _p |
|--|--------------|------------------|------------------|--------------|----------------|
| 白纹阴阳竹 <i>Hibanobambusa tranquillans</i> f. <i>shiroshima</i> | 55.35±18.23a | 21.34±0.71a | 1 266.48±21.62b | 59.41±8.83bc | 3.11±0.12a |
| 鼓节竹 <i>Bambusa tuldooides</i> 'Swolleninternode' | 51.11±11.62a | 18.76±1.47a | 1 784.26±22.02a | 51.11±9.74c | 2.65±0.14ab |
| 花秆早竹 <i>Phyllostachys violascens</i> f. <i>viridisulcata</i> | 15.65±8.72b | 8.84±0.68c | 1 300.03±15.71ab | 88.23±8.66a | 1.33±0.18c |
| 美丽箬竹 <i>Indocalamus decorus</i> | 28.34±12.64b | 13.05±1.04b | 1 118.20±18.17b | 64.01±7.84b | 1.75±0.22bc |

¹⁾ CE: 羧化效率 Carboxylation efficiency ($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$); P_{max}: 最大净光合速率 The maximum net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); CSP: CO₂饱和点 CO₂ saturation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); CCP: CO₂补偿点 CO₂ compensation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); R_p: 光呼吸速率 Photorespiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

2.3 供试4个竹种叶片的净光合速率及部分光合和气体交换参数的日变化规律分析

供试4个竹种叶片的净光合速率(P_n)日变化曲线见图3;各竹种叶片的部分光合和气体交换参数的日变化曲线见图4。

2.3.1 净光合速率的日变化规律 由图3可以看出:白纹阴阳竹、鼓节竹和花秆早竹叶片的P_n值日变化曲线均呈“单峰型”,仅峰值出现的时间有一定差异,而美丽箬竹叶片的P_n值日变化曲线呈“双峰型”。白纹阴阳竹叶片的P_n值在6:00至10:00迅速上升,10:00至14:00缓慢上升,14:00达到峰值,之后迅速下降;鼓节竹叶片的P_n值在6:00至10:00迅速上升,10:00达到峰值,之后逐渐下降;花秆早竹叶片的P_n值在6:00至10:00迅速上升,10:00至12:00缓慢上升,12:00达到峰值,之后逐渐下降。美丽箬竹叶

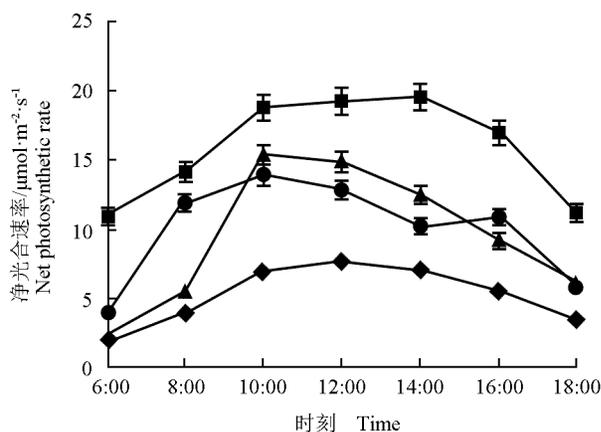
片的P_n值在6:00至10:00迅速上升,10:00达到峰值,在10:00至14:00迅速下降,之后又缓慢上升,至16:00达到次峰值,之后又迅速下降。总体上看,白纹阴阳竹叶片的P_n值明显高于其他3个竹种,花秆早竹叶片的P_n值明显低于其他3个竹种。

2.3.2 光合和气体交换参数的日变化规律 由图4可见:白纹阴阳竹叶片蒸腾速率(Tr)的日变化趋势与P_n值日变化趋势基本一致,在6:00至10:00迅速上升,10:00至12:00缓慢上升,之后迅速下降;其水分利用效率(WUE)日变化趋势与P_n值日变化趋势相反,6:00至10:00迅速下降,10:00至16:00基本稳定,之后缓慢回升;其气孔导度(G_s)在6:00至8:00迅速上升,之后迅速下降,10:00至14:00基本稳定,14:00至16:00缓慢下降,16:00后迅速下降;其C_i值在12:00前呈下降趋势,之后逐渐上升。

鼓节竹叶片Tr值日变化趋势与其P_n值日变化趋势基本一致;其WUE值日变化趋势则与其P_n值日变化趋势相反;其G_s值在10:00前迅速上升,之后逐渐下降;其C_i值在12:00前呈逐渐下降趋势,12:00至14:00缓慢上升,随后又呈下降后上升的波动趋势。

花秆早竹叶片Tr值日变化趋势与其P_n值日变化趋势基本一致;其WUE值在12:00前逐渐下降,12:00至16:00上升,至16:00后又下降;其G_s值在12:00前逐渐上升,之后逐渐下降;其C_i值在14:00前逐渐下降之后迅速上升。

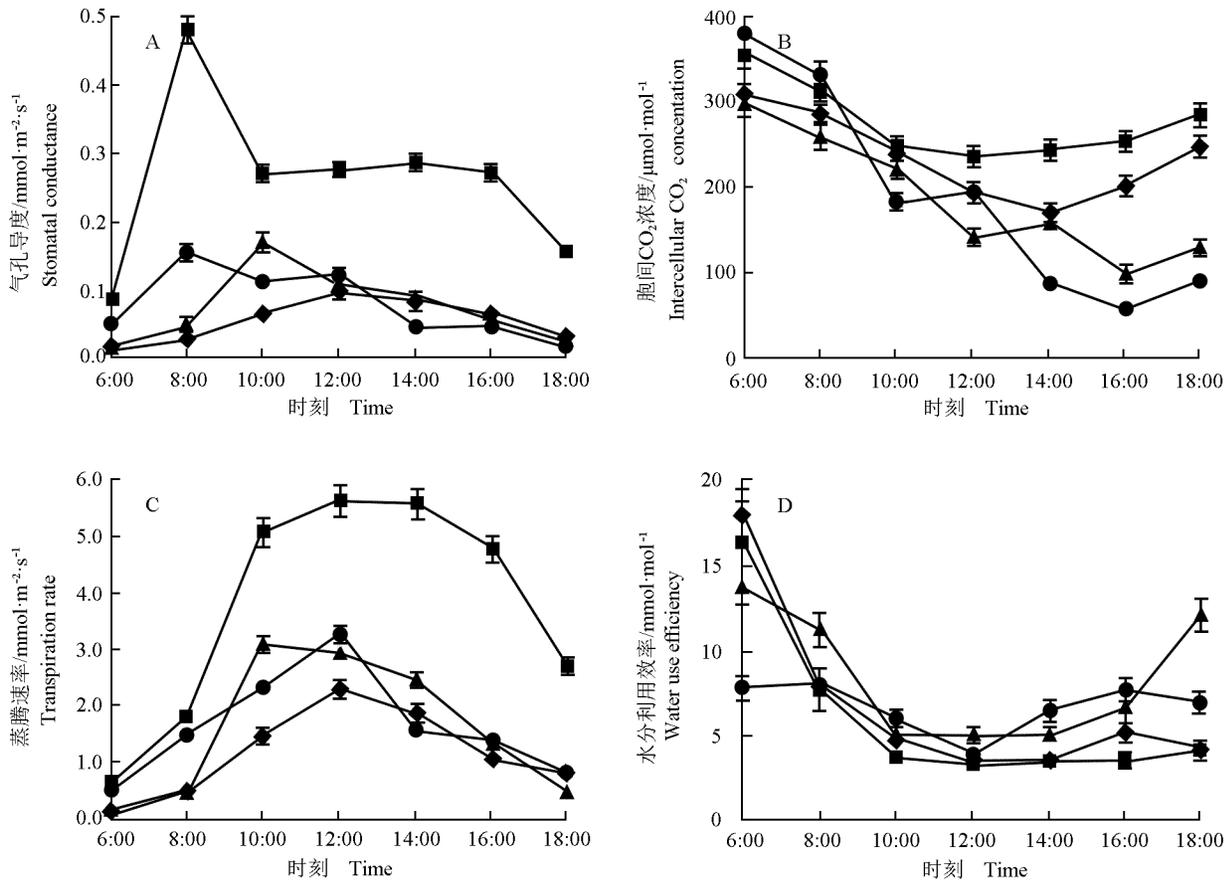
美丽箬竹叶片Tr值日变化趋势与其P_n值日变化趋势有一定差异,其Tr值在12:00前逐渐上升,之后逐渐下降;其WUE值在12:00前逐渐下降,12:00至16:00上升,16:00后又下降;其G_s值在8:00前上升,之后波动下降;其C_i值在16:00前总体上呈逐渐下降的趋势,16:00之后则上升。



—■—: 白纹阴阳竹 *Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura; —▲—: 鼓节竹 *Bambusa tuldooides* 'Swolleninternode'; —◆—: 花秆早竹 *Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang; —●—: 美丽箬竹 *Indocalamus decorus* Q. H. Dai.

图3 供试4个竹种叶片的净光合速率日变化曲线

Fig. 3 Diurnal change curve of net photosynthetic rate of leaf of four bamboo species tested



—■—: 白纹阴阳竹 *Hibanobambusa tranquillans* f. *shiroshima* H. Okamura; —▲—: 鼓节竹 *Bambusa tuldoides* 'Swolleninternode'; —◆—: 花秆早竹 *Phyllostachys violascens* f. *viridisulcata* P. X. Zhang et W. X. Huang; —●—: 美丽箬竹 *Indocalamus decorus* Q. H. Dai.

A: 气孔导度日变化曲线 Diurnal change curve of stomatal conductance; B: 胞间 CO_2 浓度日变化曲线 Diurnal change curve of intercellular CO_2 concentration; C: 蒸腾速率日变化曲线 Diurnal change curve of transpiration rate; D: 水分利用效率日变化曲线 Diurnal change curve of water use efficiency.

图4 供试4个竹种叶片光合和气体交换参数的日变化曲线
Fig. 4 Diurnal change curves of photosynthetic and gas exchange parameters of leaf of four bamboo species tested

总体上看,供试4个竹种叶片的 G_s 、 C_i 、 T_r 和 WUE 值总体上具有相似的日变化趋势,但其中峰值出现的时间、各指标测定值的波动变化等方面存在一定的差异。

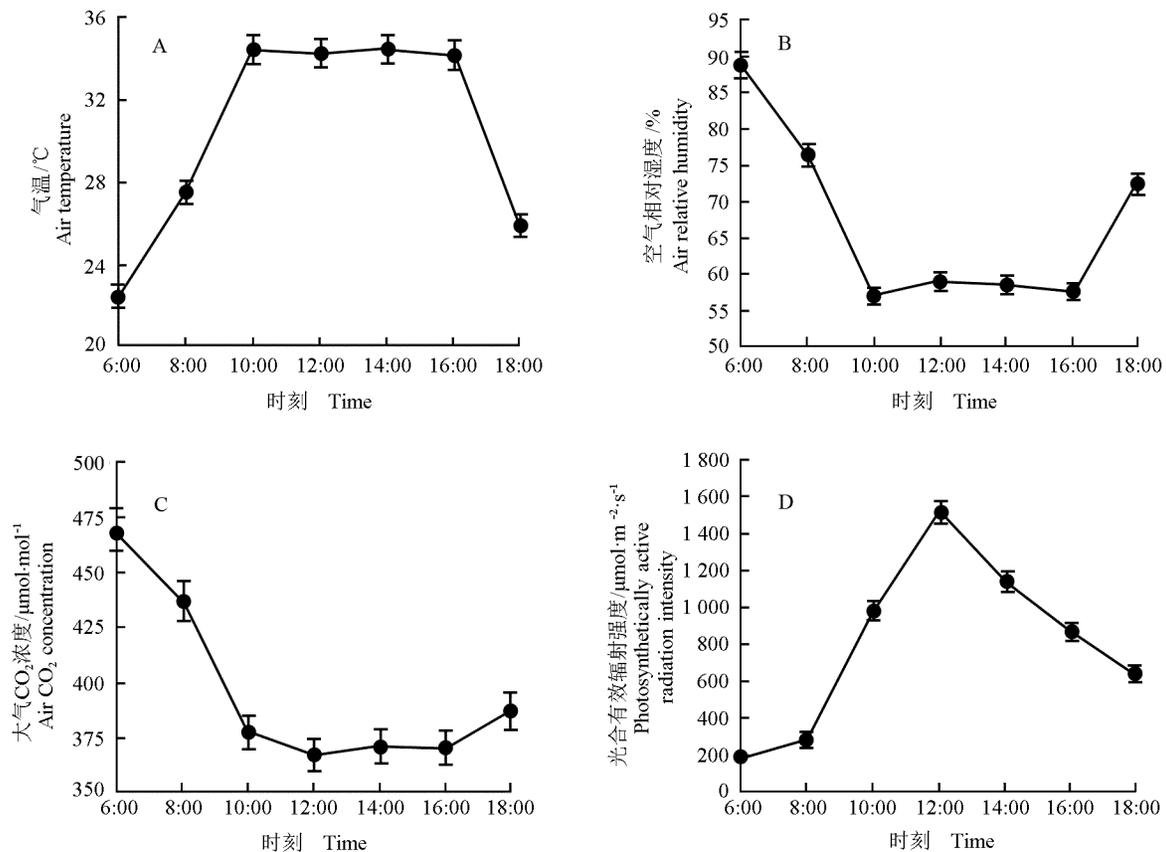
2.4 供试4个竹种叶片与光合参数相关的环境因子日变化规律分析

供试4个竹种叶片与光合参数相关的环境因子日变化曲线见图5。由图5可见:气温(T_a)在6:00至10:00上升,10:00至16:00几乎维持不变,16:00后下降;与 T_a 值相反,空气相对湿度(RH)在6:00至10:00下降,10:00至16:00维持不变,16:00后又逐渐上升;大气 CO_2 浓度(C_a)在6:00至12:00急剧下降,12:00时达到最低值,维持一段时间后在16:00后

迅速上升;PAR值在6:00至12:00迅速上升,12:00达到峰值,之后逐渐下降,但在18:00的PAR值仍高于8:00。

2.5 供试4个竹种叶片净光合速率与光合和气体交换参数及相关环境因子的统计分析

2.5.1 相关性分析和逐步多元回归分析 供试4个竹种叶片净光合速率(P_n)与其他光合和气体交换参数及相关环境因子间的简单相关系数见表4。结果表明:4个竹种叶片的 P_n 值与叶片的气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)以及光合有效辐射强度(PAR)、气温(T_a)、空气相对湿度(RH)和大气 CO_2 浓度(C_a)总体上有显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关性。其中,各竹种



A: 气温日变化曲线 Diurnal change curve of air temperature; B: 空气相对湿度日变化曲线 Diurnal change curve of air relative humidity; C: 大气 CO₂ 浓度日变化曲线 Diurnal change curve of air CO₂ concentration; D: 光合有效辐射强度日变化曲线 Diurnal change curve of photosynthetically active radiation intensity.

图5 供试4个竹种叶片与光合参数相关的环境因子日变化曲线

Fig. 5 Diurnal change curves of environmental factors related to photosynthetic parameters of leaf of four bamboo species

表4 供试4个竹种叶片净光合速率(Pn)与不同因子间的简单相关系数

Table 4 Simple correlation coefficient between net photosynthetic rate (Pn) of leaf of four bamboo species tested and different factors

| 竹种 Bamboo species | 各因子与 Pn 的简单相关系数 ¹⁾ Simple correlation coefficient between different factors and Pn ¹⁾ | | | | | | |
|--|--|----------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | Gs | Ci | Tr | Ta | Ca | RH | PAR |
| 白纹阴阳竹 <i>Hibanobambusa tranquillans</i> f. <i>shiroshima</i> | 0.280* | -0.807** | 0.912** | 0.928** | -0.724** | -0.848** | 0.781** |
| 鼓节竹 <i>Bambusa tuldoidea</i> 'Swolleninternode' | 0.896** | -0.403** | 0.969** | 0.833** | -0.904** | -0.891** | 0.901** |
| 花秆早竹 <i>Phyllostachys violascens</i> f. <i>viridisulcata</i> | 0.931** | -0.785** | 0.910** | 0.873** | -0.348** | -0.804** | 0.885** |
| 美丽箬竹 <i>Indocalamus decorus</i> | 0.662** | -0.224 | 0.764** | 0.759** | -0.702** | -0.650** | 0.618** |

¹⁾ Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Ta: 气温 Air temperature; Ca: 大气 CO₂ 浓度 Air CO₂ concentration; RH: 空气相对湿度 Air relative humidity; PAR: 光合有效辐射强度 Photosynthetically active radiation intensity. *: P<0.05; **: P<0.01.

叶片的 Pn 值与 Gs、Tr、Ta、PAR 值呈极显著或显著正相关,与 Ci、Ca 和 RH 值总体上呈极显著负相关,仅美丽箬竹叶片的 Pn 值与 Ci 值呈不显著的负相关(P>0.05)。

对植物 Pn 值有影响作用的相关因子较多,简单

相关性分析并不能准确反映它们之间的相互关系,为此,在前述简单相关性分析的基础上进一步分析了供试4个竹种叶片的 Pn 值与其他光合和气体交换参数及相关环境因子的偏相关性,结果见表5。结果表明,4个竹种叶片 Pn 值与各因子的偏相关性差异较大,与

各竹种 Pn 值相关的主要因子并不一致。

利用逐步多元回归分析确定影响4个竹种叶片 Pn 值的主要因子,以 Gs (X₁)、Ci (X₂)、Tr (X₃)、Ta (X₄)、Ca (X₅)、RH (X₆) 和 PAR (X₇) 为自变量,叶片 Pn 值为因变量 Y,得到供试4个竹种叶片 Pn 值的最优回归方程分别为:Y_{白纹阴阳竹} = 1.572X₃ - 0.861X₂ + 1.346X₅ - 0.222X₇ [R² = 0.981, P < 0.01, 标准估计误差 (SEE) = 0.516]; Y_{鼓节竹} = 0.245X₃ - 0.286X₅ + 0.316X₇ + 0.233X₁ (R² = 0.989, P < 0.01, SEE = 0.499); Y_{花秆早竹} = 0.288X₁ + 0.199X₇ + 0.741X₄ +

0.595X₂ + 0.324X₃ (R² = 0.981, P < 0.01, SEE = 0.516); Y_{美丽箬竹} = -0.402X₃ + 0.663X₄ + 0.659X₁ - 1.91X₅ + 0.485X₇ + 2.032X₆ (R² = 0.951, P < 0.01, SEE = 0.820)。

由上述回归方程可知:白纹阴阳竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 Tr、Ci、Ca 和 PAR 值;鼓节竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 Tr、Ca、PAR 和 Gs 值;花秆早竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 Gs、PAR、Ta、Ci 和 Tr 值;美丽箬竹叶片 Pn 值的主要影响因子为 Tr、Ta、Gs、Ca、PAR 和 RH 值,与偏相关分析结果基本一致。

表5 供试4个竹种叶片净光合速率(Pn)与不同因子间的偏相关系数

Table 5 Partial correlation coefficient between net photosynthetic rate (Pn) of leaf of four bamboo species tested and different factors

| 竹种 Bamboo species | 各因子与 Pn 的偏相关系数 ¹⁾ Partial correlation coefficient between different factors and Pn ¹⁾ | | | | | | |
|--|--|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| | Gs | Ci | Tr | Ta | Ca | RH | PAR |
| 白纹阴阳竹 <i>Hibanobambusa tranquilans</i> f. <i>shiroshima</i> | 0.014 | -0.791** | 0.821** | 0.257 | 0.637** | 0.254 | -0.520** |
| 鼓节竹 <i>Bambusa tuldooides</i> 'Swolleninternode' | 0.541** | -0.339 | 0.183** | 0.290* | -0.378** | -0.225 | 0.688** |
| 花秆早竹 <i>Phyllostachys violascens</i> f. <i>viridisulcata</i> | 0.252* | 0.552* | 0.242* | 0.547** | -0.066 | -0.107 | 0.252* |
| 美丽箬竹 <i>Indocalamus decorus</i> | 0.379** | 0.225 | -0.358** | 0.321** | -0.678** | -0.504** | 0.401** |

¹⁾ Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Ta: 气温 Air temperature; Ca: 大气 CO₂ 浓度 Air CO₂ concentration; RH: 空气相对湿度 Air relative humidity; PAR: 光合有效辐射强度 Photosynthetically active radiation intensity. *: P < 0.05; **: P < 0.01.

2.5.2 通径分析 对供试4个竹种叶片净光合速率 (Pn) 与其主要影响因子进行通径分析,结果见表6。由白纹阴阳竹的直接通径系数可知,Tr 和 Ca 值对其 Pn 值有正效应,Ci 和 PAR 值对其 Pn 值有负效应;各因子间的间接效应复杂,根据总通径系数,按照对白纹阴阳竹叶片 Pn 值的总影响效应由高至低排序,各主要影响因子依次为 PAR、Tr、Ca、Ci。同理,按照对

鼓节竹叶片 Pn 值的总影响效应由高至低排序,各主要影响因子依次为 PAR、Tr、Ca、Gs;按照对花秆早竹叶片 Pn 值的总影响效应由高至低排序,各主要影响因子依次为 PAR、Tr、Gs、Ta、Ci;按照对美丽箬竹叶片 Pn 值的总影响效应由高至低排序,各主要影响因子依次为 PAR、RH、Ta、Ca、Tr、Gs。

表6 供试4个竹种叶片净光合速率与其主要影响因子的通径分析结果¹⁾

Table 6 Result of path analysis on net photosynthetic rate of leaf of four bamboo species tested with main influence factors¹⁾

| 主要影响因子 Main influence factor | 直接通径系数 ²⁾ Direct path coefficient ²⁾ | 间接通径系数 ³⁾ Indirect path coefficient ³⁾ | | | | | | | 总通径系数 Total path coefficient |
|---|---|---|--------|--------|---------|-------|---------|---------|---------------------------------|
| | | Gs | Ci | Tr | Ta | Ca | RH | PAR | |
| 白纹阴阳竹 <i>Hibanobambusa tranquilans</i> f. <i>shiroshima</i> | | | | | | | | | |
| Ci | -10.173 | — | -0.757 | — | 13.072 | — | 23.955 | — | 26.098 |
| Tr | 0.841 | 9.155 | — | — | -12.659 | — | -24.870 | — | -27.532 |
| Ca | 13.789 | -9.644 | -0.772 | — | — | — | 23.705 | — | 27.079 |
| PAR | -27.725 | 8.789 | 0.754 | — | -11.790 | — | — | — | -29.972 |
| 鼓节竹 <i>Bambusa tuldooides</i> 'Swolleninternode' | | | | | | | | | |
| Gs | 0.003 | — | — | 0.059 | — | 1.468 | — | 18.592 | 20.122 |
| Tr | 0.064 | 0.003 | — | — | — | 1.507 | — | 24.391 | 25.965 |
| Ca | -1.861 | -0.002 | — | -0.052 | — | — | — | -20.701 | -22.615 |
| PAR | 27.706 | 0.002 | — | 0.056 | — | 1.391 | — | — | 29.154 |

续表 6 Table 6 (Continued)

| 主要影响因子 Main influence factor | 直接通径系数 ²⁾ Direct path coefficient ²⁾ | 间接通径系数 ³⁾ Indirect path coefficient ³⁾ | | | | | | 总通径系数 Total path coefficient | |
|--|---|--|---------|--------|--------|---------|--------|---------------------------------|---------|
| | | Gs | Ci | Tr | Ta | Ca | RH | | PAR |
| 花秆早竹 <i>Phyllostachys violascens</i> f. <i>viridisulcata</i> | | | | | | | | | |
| Gs | 0.004 | — | -11.219 | 0.112 | 1.179 | — | — | 35.263 | 25.339 |
| Ci | 12.916 | -0.004 | — | -0.096 | -1.235 | — | — | -31.743 | -20.162 |
| Tr | 0.118 | 0.004 | -10.510 | — | 1.072 | — | — | 36.264 | 26.948 |
| Ta | 1.315 | 0.004 | -12.131 | 0.096 | — | — | — | 31.484 | 20.769 |
| PAR | 38.787 | 0.004 | -10.570 | 0.110 | 1.068 | — | — | — | 29.399 |
| 美丽箬竹 <i>Indocalamus decorus</i> | | | | | | | | | |
| Gs | 0.009 | — | — | -0.071 | 0.156 | 0.868 | 0.029 | 11.316 | 12.308 |
| Tr | -0.107 | 0.006 | — | — | 0.667 | 14.878 | -4.166 | 46.718 | 57.996 |
| Ta | 1.028 | 0.001 | — | -0.069 | — | 23.848 | -6.627 | 46.670 | 64.850 |
| Ca | -24.646 | -0.000 | — | 0.065 | -0.994 | — | 6.723 | -45.339 | -64.192 |
| RH | 6.811 | 0.000 | — | 0.065 | -1.000 | -24.326 | — | -48.424 | -66.874 |
| PAR | 58.536 | 0.002 | — | -0.085 | 0.819 | 19.089 | -5.635 | — | 72.727 |

¹⁾ Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Ta: 气温 Air temperature; Ca: 大气 CO₂ 浓度 Air CO₂ concentration; RH: 空气相对湿度 Air relative humidity; PAR: 光合有效辐射强度 Photosynthetically active radiation intensity.

²⁾ 叶片净光合速率与主要影响因子的直接通径系数 Direct path coefficient of net photosynthetic rate of leaf with main influence factors.

³⁾ 叶片净光合速率与主要影响因子的间接通径系数 Indirect path coefficient of net photosynthetic rate of leaf with main influence factors.

3 讨论和结论

植物光合作用是一个十分复杂的生理过程,植物的光合特性一定程度上取决于其自身的遗传特性^[1-2]。本研究中,供试 4 个竹种叶片的光合特性差异较大,除美丽箬竹外,白纹阴阳竹、鼓节竹和花秆早竹叶片净光合速率(Pn)日变化曲线均为“单峰型”。其中,白纹阴阳竹叶片 Pn 值明显高于其他竹种,其气孔在 8:00 后便可完全打开,导致 Pn 值迅速增加,随后在 10:00 至 14:00 之间 Pn 值有所提高但增幅不大,而其 Gs 值在 8:00 后迅速下降,Ci 值在 14:00 也降到低谷,说明在正午阳光充足的条件下白纹阴阳竹的气孔会部分关闭。鼓节竹叶片 Pn 和 Gs 值在 10:00 时均达到峰值,12:00 前 Ci 值呈下降趋势;花秆早竹叶片 Pn 值相对较低,在 12:00 时达到峰值,同时其 Gs 值最大,14:00 前 Ci 值不断下降,鼓节竹和花秆早竹的 Pn 值达到峰值前其 Gs 和 Ci 值的变化趋势相似,说明在此期间二者的气孔均逐渐开放且光合作用较强,因此 Ci 值不断降低。美丽箬竹叶片的 Pn 值日变化曲线呈“双峰型”,Pn 值在 14:00 降至最低,此时其 Gs、Ci 和 Tr 值均同时降低,说明美丽箬竹午间 Pn 值下降的原因与气孔限制因素有关^[14]。

植物对光的响应可以基本阐释该植物的光合特性,其中,光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)可以反映

植物对光能利用能力的强弱,一般认为,光饱和点高植物适应强光的能力强,光补偿点高即产物的消耗量大、表观量子产量(AQY)低则植物利用弱光的能力弱。CO₂是光合同化的底物,其浓度直接影响植物的光合作用;CO₂饱和点(CSP)高即植物对高浓度 CO₂ 适应性强,CO₂补偿点(CCP)低则植物利用低浓度 CO₂ 能力强;羧化效率(CE)越高 RuBP 酶活性越高,从而使光合效率提高^[15-17]。由供试 4 个竹种对光照和 CO₂ 的响应特征可见,4 个竹种对光照和 CO₂ 的利用能力差异明显。其中,白纹阴阳竹叶片的 LSP 和 LCP 值均最高,同时其 CE 值也最高但 AQY 值最低,说明其光合能力最强,但利用弱光的能力差,产物消耗量也大;鼓节竹和美丽箬竹叶片的 LSP 和 LCP 值均最低,同时其 CE 值也最低但 AQY 值最高,说明其光合能力最差且产物消耗量也低,但其对弱光的适应和利用能力较强,花秆早竹的 CE 值最低、CCP 值最高,表明其 CO₂ 同化能力弱且适应范围窄。

简单相关性分析结果表明:供试 4 个竹种叶片 Pn 值与其他光合和气体交换参数及环境因子总体上显著相关,但其偏相关性分析结果则表明影响各竹种

Pn 值的主要因子各不相同,表明简单相关性分析不能全面客观反映各因子与 Pn 间的相关性,这与张文标等^[18]对木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)光合特性以及余红兵等^[5]对花叶芦竹[*Arundo donax* var. *versicolor* (Mill.) Stokes]光合特性的研究结果一致。

本研究中,通过逐步多元回归分析得到供试4个竹种 Pn 值的主要影响因子,与偏相关分析结果一致。对4个竹种叶片 Pn 值与主要影响因子进行进一步通径分析,结果表明,各主要影响因子对4个竹种叶片 Pn 值的影响效应存在较复杂的相互作用,这与其他研究者对龟甲竹[*Phyllostachys heterocyclus* (Carr.) Mitford]^[8]、黄芩(*Scutellaria baicalensis* Georgi)^[19]和辣椒(*Capsicum annuum* Linn.)^[20]等植物光合作用与环境因子相关性的研究结果类似。由通径分析结果还可以看出:供试4个竹种叶片 Pn 值的主要影响因子中均包含 PAR 和 Tr 值,且 PAR 值的影响效应较大,这与吴志庄等^[7]对不同类型竹种光合特性的研究结果一致,显示 PAR 和 Tr 值均与不同竹种的 Pn 值具有显著或极显著相关性。

在实际的应用过程中,观赏竹的栽培利用应按照各自的光合特性和相关的影响因子,制定不同的栽培措施,因地制宜、因种制宜,保证各竹种旺盛生长,增强观赏性,使观赏竹能在园林建设中得到广泛应用。因此,应根据供试4个竹种各自的光合特性及其与相关环境因子的关系,规划合理的种植环境并制定适宜的栽培管理措施。其中,白纹阴阳竹和鼓节竹应栽培于阳光充足的区域,花秆早竹需种植在无强光直射且通风条件较好的区域,美丽箬竹则需种植在中等光照条件下。此外,根据不同竹种需要,合理灌溉和施肥,使其具有较好的生长状态和最佳的观赏性。

参考文献:

- [1] 于晓霞,阮成江. 曼陀罗光合特性研究[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(1): 40-45.
- [2] 李丽芳,吴晓敏,王立峰. 植物光合生理生态学研究进展[J]. 山西师范大学学报:自然科学版, 2007, 21(3): 71-75.
- [3] 陈玉华,宋丁全. 篾竹出笋成竹生长规律研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2005, 29(4): 109-112.
- [4] 楼扬,孙祥,江津凡. 黄纹竹出笋及幼竹高生长规律研究[J]. 世界竹藤通讯, 2010, 8(4): 7-10.
- [5] 余红兵,曾馨,肖润林,等. 花叶芦竹光合特性日动态及其影响因素分析[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2013, 39(2): 200-203.
- [6] 郑炳松,金爱武,程晓建,等. 雷竹光合特性的研究[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(4): 359-362.
- [7] 吴志庄,杜旭华,熊德礼,等. 不同类型竹种光合特性的比较研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1523-1527.
- [8] 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.
- [9] 李在留,辉朝茂. 珍稀竹种巨龙竹组织培养研究[J]. 林业科学, 2006, 42(2): 43-48.
- [10] 杨海芸,王晓芹,张宁,等. 日本花叶矢竹组织培养与叶色变异研究[J]. 竹子研究汇刊, 2010, 29(4): 15-20.
- [11] 蒋瑶. 慈竹 *CBF1* 基因克隆及其耐寒性研究[D]. 成都:四川农业大学林学院, 2012: 22-85.
- [12] 陈容,张丽,曹颖,等. 低温胁迫下梁山慈竹再生植株叶绿素荧光特性和耐寒转录因子的表达[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2014, 38(4): 39-44.
- [13] 叶子飘,高峻. 光响应和 CO₂ 响应新模型在丹参中的应用[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(1): 129-134.
- [14] 许大全,沈允钢. 植物光合作用效率的日变化[J]. 植物生理学报, 1997, 23(4): 410-416.
- [15] 靳甜甜,刘国华,胡婵娟,等. 黄土高原常见造林树种光合蒸腾特征[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5758-5765.
- [16] COSTE S, ROGGY J C, IMBERT P, et al. Leaf photosynthetic traits of 14 tropical rain forest species in relation to leaf nitrogen concentration and shade tolerance[J]. Tree Physiology, 2005, 25: 1127-1137.
- [17] 李永华,张开明,于红芳. 10个秋菊品种的光合特性及净光合速率与部分生理生态因子的相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(1): 70-76.
- [18] 张文标,金则新,柯世省,等. 木荷光合特性日变化及其与环境因子相关性分析[J]. 广西植物, 2006, 26(5): 492-498.
- [19] 邵玺文,韩梅,韩忠明,等. 不同生境条件下黄芩光合日变化与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1470-1477.
- [20] 邹学校,马艳青,张竹青,等. 环境因子对辣椒光合与蒸腾特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2005, 14(4): 15-20.

(责任编辑:张明霞)