



## 竹柏2种颜色叶片的光合特性研究

闫邱杰, 曹景怡

引用本文:

闫邱杰, 曹景怡. 竹柏2种颜色叶片的光合特性研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(2): 177–184.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4134>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### UV-B辐射诱导芒果叶片抗氧化响应研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 70–77 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4079>

### 雷州半岛尾巨桉人工林土壤呼吸动态变化及其对气象因子的响应

Soil Respiration of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation and Its Response to Meteorological Factors in Leizhou Peninsula

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 346–354 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3833>

### 珊瑚菜和滨旋花离体叶片代谢系统的耐热极限与夏季生长停滞机理的分析

Heat Tolerance Threshold of Leaves in vitro in *Glehnia littoralis* and *Calystegia soldanella* Association with the Mechanism of Growth Stagnation in Summer

热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 503–509 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3723>

### 基于Farquhar改进模型的北亚热带森林常见树种光合限速因子研究

Limiting States of Photosynthesis of Common Tree Species in the North-subtropical Forest Based on Improved Farquhar Model

热带亚热带植物学报. 2016, 24(4): 359–366 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.04.001>

### 银杏叶萜内酯含量的变化及其与叶绿素荧光特性的关系

Changes in Terpene Lactones of *Ginkgo biloba* and Its Relation with Chlorophyll Fluorescence Characters

热带亚热带植物学报. 2015(6): 683–690 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.06.013>

# 竹柏 2 种颜色叶片的光合特性研究

闫邱杰, 曹景怡

(广州怡境景观设计有限公司, 广州 510600)

**摘要:** 为了解竹柏(*Podocarpus nagi*)的光合特性, 以 3 a 生全绿叶和花叶竹柏为材料, 测定其光合色素含量和气体交换参数。结果表明, 全绿叶竹柏叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶绿素 a+b、叶绿素 a/b 和叶绿素 a+b/类胡萝卜素均显著高于花叶竹柏; 全绿叶竹柏叶片的初始量子效率、最大光合速率和暗呼吸速率均显著高于花叶, 而光饱和点和光补偿点均显著低于花叶; 全绿叶竹柏叶片的初始羧化效率、光合速率、CO<sub>2</sub> 饱和点和光呼吸速率均高于花叶, 而 CO<sub>2</sub> 补偿点低于花叶。2 种颜色叶片的气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率均随着光合有效辐射的增大而增大, 且均表现为全绿叶 > 花叶, 而胞间 CO<sub>2</sub> 浓度则相反, 表现为花叶 > 全绿叶。因此, 全绿叶竹柏利用弱光的能力强于花叶竹柏, 而花叶竹柏利用强光的能力更强, 在园林绿化配置中, 可根据 2 种颜色叶片的光合特性合理配置。

**关键词:** 竹柏; 光合色素; 光合气体交换参数; 光合特性

doi: 10.11926/jtsb.4134

## Photosynthetic Characteristics of Two Color Leaves of *Podocarpus nagi*

LÜ Qiu-jie, CAO Jing-yi

(Guangzhou Greenview Landscape Design Limited CO., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** In order to understand the photosynthetic characteristics of *Podocarpus nagi*, the photosynthetic pigment content and gas exchange parameters of green and striped leaves of 3-year-old *P. nagi* seedlings were measured. The results showed that the chlorophyll (Chl) a, Chl b, carotenoid (Car), Chl a+b, Chl a/b and Chl a+b/Car in green leaves were significantly higher than those in striped leaves. The initial quantum efficiency, maximum photosynthetic rate and dark respiration rate in green leaves were significantly higher than those in striped leaves, and the light saturation point and light compensation point were significantly lower than those in striped leaves ( $P < 0.05$ ). The initial carboxylation efficiency, photosynthetic capacity, CO<sub>2</sub> saturation point and photorespiration rate of green leaves were higher than those of striped leaf, and CO<sub>2</sub> compensation point of green leaves was lower than that of striped leaves. The stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency increased with the increment of photosynthetic active radiation with the order of green leaf > striped leaf, while the intercellular CO<sub>2</sub> concentration had opposite trend with striped leaf > green leaf. So, it could be rationally planted according to the photosynthetic characteristics of two different color leaves according to the different photosynthetic characteristics of two color leaves of *P. nagi*, which green leaf had strong ability to use weak light and striped leaf had strong ability to use stronger light.

**Key words:** *Podocarpus nagi*; Photosynthetic pigment; Photosynthetic gas exchange parameter; Photosynthetic characteristics

收稿日期: 2019-08-19

接受日期: 2019-11-04

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目([2013]15 号)资助

This work was supported by the Project for Forestry Science and Technology Promotion Demonstration of Central Finance (Grant No. [2013]15).

作者简介: 闫邱杰(1976-), 男, 高级工程师, 从事园林植物与景观设计研究。E-mail: gvl\_research@163.com

竹柏(*Podocarpus nagi*)是罗汉松科(Podocarpaceae)罗汉松属常绿乔木,别名椰树、罗汉柴等。竹柏形态优美,是我国和日本特有的赏叶景观植物,常作为公园、庭园观赏、生态林、道路广场等园林景观植物。目前,关于竹柏的研究主要集中在苗木培育技术<sup>[1-2]</sup>、活性成分筛选<sup>[3]</sup>和提取工艺优化<sup>[4]</sup>等方面。而对其不同颜色叶片光合特性的比较研究尚未见报道。

光合作用是植物新陈代谢的基础,为植物生长提供必需的物质,光合特性的差异会引起植物生长过程的差异<sup>[5-7]</sup>。目前,对植物光合作用的研究主要集中在外界环境因素包括光照强度<sup>[8]</sup>、光质<sup>[9-14]</sup>、温度<sup>[15]</sup>、水分<sup>[16-17]</sup>和矿质元素<sup>[18]</sup>等的影响。但是,植物光合作用不仅受外界环境因子的影响,同时也受植物本身特性的影响,光合作用受植物叶片光合色素含量的影响较大<sup>[19-21]</sup>,一般情况下,叶绿素的含量越高,则植物利用光照进行光合作用的能力越强<sup>[22]</sup>。有鉴于此,本研究以全绿叶和花叶竹柏为材料,研究两者光合特性的差异,为 2 种叶色竹柏在园林绿化配置的应用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

试验地位于广东省鹤山市四堡林场,地处北回归线以南(112°28'~113°25' E, 22°29'~22°52' N),属南亚热带季风区,冬无严寒,夏无酷暑,全年温和湿润,境内具有海洋气候特征,温、光、热、雨量充足。选择 3 a 生全绿叶和花叶竹柏(*Podocarpus nagi*)盆栽苗各 1 盆,盆栽苗为 2016 年播种实生苗,于 2017 年 1 月移植,2018 年 6 月 11 号开始试验,分别挑选竹柏中上部,长势较好的全绿叶、花叶进行试验。

### 1.2 光合色素含量的测定

参考王学奎<sup>[23]</sup>的方法。称取竹柏叶片 0.15 g 于研钵中,加入少量 95%乙醇和适量石英砂研磨成匀浆,移入试管中,用 95%乙醇定容至 5 mL,于暗处提取至匀浆完全变成白色为止,2 680×g 离心 10 min,稀释,摇匀,使用紫外分光光度计(UV-9600,北京北分瑞利分析仪器公司),分别在波长 470、649、665 nm 下测定提取液吸光值。每种叶色各 3 次重复,计算叶绿素(Chl) a、Chl b 和类胡萝卜素(Car)含量(mg/g)。Chl a=(12.21A<sub>665</sub>-2.81A<sub>649</sub>)V/1000W;

Chl b=(20.13A<sub>649</sub>-5.03A<sub>665</sub>)V/1000W; Car=(4.4A<sub>470</sub>-0.01Chl a-0.45Chl b)V/1000W,式中,A<sub>665</sub>、A<sub>649</sub>和 A<sub>470</sub>分别为波长 665、649 和 470 nm 下的吸光值,V 为溶液体积(mL),W 为叶片质量(g)。

### 1.3 叶片光合参数的测定

光合-光响应参数的测定采用 LI-6400 便携式光合作用测定系统(LI-6400, USA)。先预试验测定竹柏 2 种颜色叶片的光饱和点,将待测叶片在 LSP 处对应的光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)下诱导 30 min,再利用 LI-6400 便携式光合仪 LED 红蓝光源,PAR 梯度依次为:2 000、1 600、1 200、800、500、300、200、150、100、50 及 0 μmol/(m<sup>2</sup> s),测定不同梯度下的净光合速率(P<sub>n</sub>)。测定时用 CO<sub>2</sub> 钢瓶将参比室的 CO<sub>2</sub> 浓度稳定在(400±0.5) μmol/mol,气体流速 Flow 值设为(500±0.5) mmol/s。设置每次最短稳定时间为 180 s,最长稳定时间为 300 s。测定 P<sub>n</sub> [μmol/(m<sup>2</sup> s)]、气孔导度(G<sub>s</sub>, μmol/mol)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>, μmol/mol)、蒸腾速率[T<sub>r</sub>, μmol/(m<sup>2</sup> s)],并计算水分利用瞬时效率 WUE=P<sub>n</sub>/T<sub>r</sub>。

光响应曲线采用 Thornley<sup>[24]</sup>提出的非直角双曲线模型进行拟合:

$$P_n = \frac{\alpha I + P_{n\max} - \sqrt{(\alpha I + P_{n\max})^2 - 4\theta\alpha I P_{n\max}}}{2\theta} - R_d$$

式中,P<sub>n</sub>为净光合速率,α为表观量子效率,I为入射到叶片上的光合有效辐射量,P<sub>nmax</sub>为最大净光合速率,R<sub>d</sub>为暗呼吸速率,θ为光响应曲线曲角。根据光响应曲线,可以获得最大净光合速率(P<sub>nmax</sub>)、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、暗呼吸速率(R<sub>d</sub>)和模拟方程的决定系数(r)等指标。

CO<sub>2</sub>响应曲线采用叶子飘等<sup>[25-26]</sup>提出的直角双曲线修整模型进行拟合,P<sub>n</sub>=a(1-bC<sub>i</sub>)C<sub>i</sub>/(1+cC<sub>i</sub>)-R<sub>p</sub>,式中,P<sub>n</sub>为净光合速率,C<sub>i</sub>为胞间 CO<sub>2</sub>浓度,R<sub>p</sub>为光呼吸速率,a是初始羧化效率,b和c为系数(mol/μmol)。根据 CO<sub>2</sub>响应曲线,可以获得 P<sub>nmax</sub>、羧化效率(CE)、CO<sub>2</sub>饱和点(CSP)、CO<sub>2</sub>补偿点(CCP)、光呼吸速率(R<sub>p</sub>)和模拟方程的决定系数(r)等指标。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2007 软件对数据进行统计分析,并

利用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析。

花叶。

## 2 结果和分析

### 2.1 光合色素含量

全绿叶竹柏叶片的 Chl a、Chl b、Car 和 Chl a+b 含量均显著高于花叶竹柏, 分别高出 86.13%、68.20%、45.73% 和 94.38% (表 1)。2 种叶片的 Chl a/b 和 Chl a+b/Car 均存在显著差异, 表现为全绿叶 >

### 2.2 光响应曲线和参数

光响应曲线反映了植物的光合速率随着光照强度的变化规律。从图 1 可见, 竹柏全绿叶光合速率随着光照强度的增大, 由负值迅速升高, 当光照强度为 900  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$  时, 达到最大值, 而后光合速率不再增加, 反而呈下降趋势。花叶竹柏呈同样趋势, 当光照强度为 1 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$  时, 光合速率达到最大值。

表 1 竹柏 2 种叶片的光合色素含量

Table 1 Photosynthetic pigment contents in two kinds of leaf of *Podocarpus nagi*

光合色素 Photosynthetic pigment	全绿叶 Green leaf	花叶 Striped leaf
Chl a (mg/g)	15.071 $\pm$ 0.671a	10.213 $\pm$ 0.241b
Chl b (mg/g)	5.743 $\pm$ 0.357a	4.890 $\pm$ 0.219b
Car (mg/g)	3.123 $\pm$ 0.141a	2.143 $\pm$ 0.098b
Chl a+b (mg/g)	27.414 $\pm$ 0.876a	14.103 $\pm$ 0.329b
Chl a/b	2.624 $\pm$ 0.087a	2.088 $\pm$ 0.079b
Chl a+b/Car	8.778 $\pm$ 0.235a	6.581 $\pm$ 0.143b

同行不同字母表示存在显著差异( $P < 0.05$ )。下同。

Data followed different letters in the same line indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Tables.

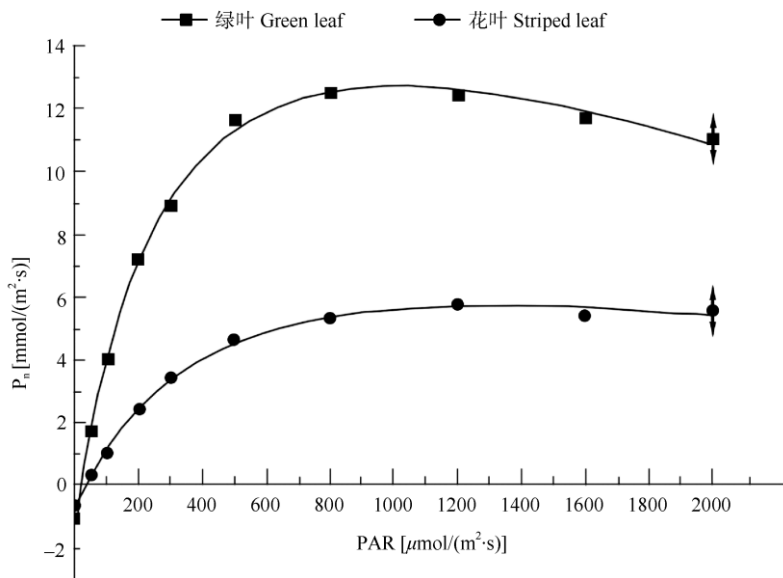


图 1 2 种竹柏的光响应曲线。P<sub>n</sub>: 净光合速率; PAR: 光合有效辐射。

Fig. 1 Light response curves of two different *Podocarpus nagi*. P<sub>n</sub>: Net photosynthetic rate; PAR: Photosynthetic active radiation.

从表 2 可见, 竹柏全绿叶的初始量子效率、最大净光合速率和暗呼吸效率分别为 0.0691、12.793 和 1.088 4  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$  均高于花叶竹柏 [0.023 3、5.7518 和 0.690 4  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$ ], 且均达显著差异( $P < 0.05$ ); 花叶竹柏的光饱和点和光补偿点均显著高于

全绿叶竹柏。

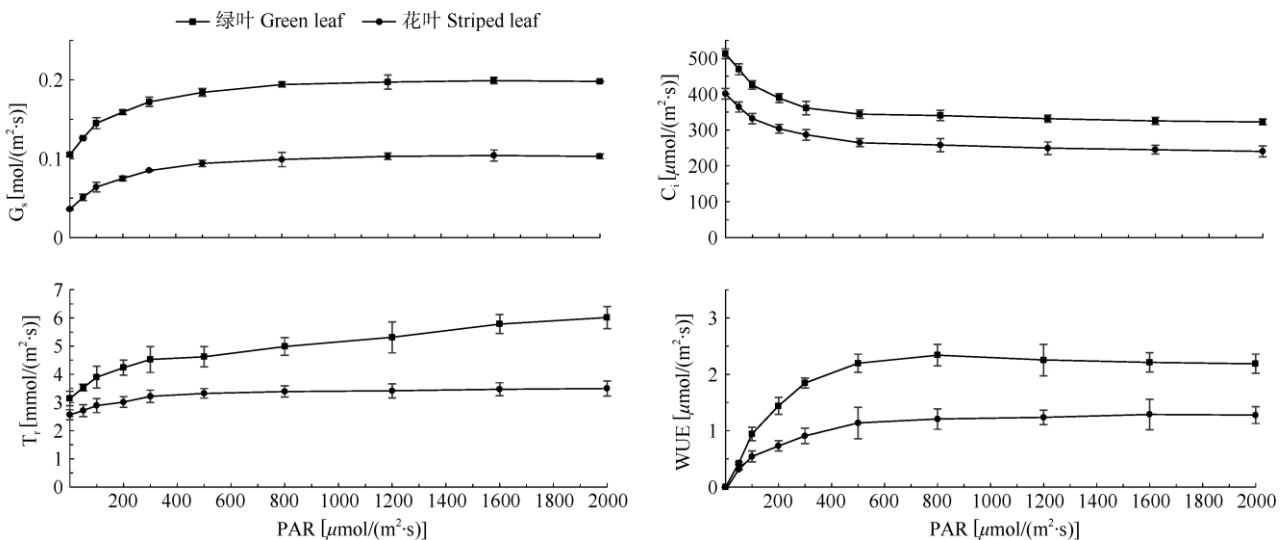
### 2.3 气体交换参数

从图 2 可见, 随着光照强度的增加, 竹柏叶片的 G<sub>s</sub> 逐渐增大, T<sub>r</sub> 随之增大, 但 C<sub>i</sub> 随着气孔的

表 2 竹柏 2 种叶片光合光响应曲线的特征参数

Table 2 Feature parameters of light response curves for two kinds of leaves of *Podocarpus nagi*

	全绿叶 Green leaf	花叶 Striped leaf
初始量子效率 Initial quantum efficiency ( $\alpha$ )	0.069 1 $\pm$ 0.005a	0.023 3 $\pm$ 0.002b
最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate ( $P_{\text{max}}$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	12.793 $\pm$ 0.075a	5.751 8 $\pm$ 0.125b
光饱和点 Light saturation point (LSP) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	1 014.659 $\pm$ 69.342b	1 323.736 $\pm$ 145.456a
光补偿点 Light compensation point (LCP) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	16.585 $\pm$ 3.213b	31.711 7 $\pm$ 6.312a
暗呼吸效率 Dark respiration rate ( $R_d$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	1.088 4 $\pm$ 0.078 4a	0.690 4 $\pm$ 0.041 9b
决定系数 Determination coefficient ( $r$ )	0.998 6	0.997 3

图 2 竹柏 2 种叶片的气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和水分利用效率( $WUE$ )对光合有效辐射( $PAR$ )的响应Fig. 2 Response of stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ), transpiration rate ( $T_r$ ) and water use efficiency ( $WUE$ ) to photosynthetic active radiation ( $PAR$ ) of two kinds of leaf of *Podocarpus nagi*

张开和光合速率的加快迅速降低, 在光照强度达  $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  时逐渐平稳, 而  $WUE$  则随着光照强度的增加先迅速上升后趋于平稳。

叶片气孔是植物与外界进行气体交换的通道, 影响着植物光合、呼吸和蒸腾作用。竹柏 2 种叶色叶片的  $G_s$ 、 $T_r$  均随光照强度的增加而逐渐增大, 当光照强度较低时,  $G_s$  和  $T_r$  的增幅均较大, 而当光照强度达到一定值时, 开始趋于平稳, 表明达到了光饱和。全绿叶竹柏的  $G_s$  和  $T_r$  均高于花叶竹柏, 表明全绿叶竹柏的净光合速率高于花叶竹柏, 利用光合作用消耗  $C_i$  较多。

## 2.4 $\text{CO}_2$ 响应曲线和参数

从图 3 可见, 竹柏全绿叶和花叶的光合速率都随着  $\text{CO}_2$  浓度的增加而增加, 在  $\text{CO}_2$  浓度较低时, 光合速率迅速提高, 而后缓慢增加。

表 3 为  $\text{CO}_2$  响应曲线的拟合结果, 竹柏全绿叶与花叶的初始羧化效率、 $\text{CO}_2$  补偿点和光呼吸效率存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而光合能力和  $\text{CO}_2$  饱和点不存在显著差异。全绿叶竹柏具有较高的  $\text{CO}_2$  饱和点和较低的  $\text{CO}_2$  补偿点, 而花叶竹柏则具有较低的  $\text{CO}_2$  饱和点和较高的  $\text{CO}_2$  补偿点, 两种叶片  $\text{CO}_2$  响应曲线的决定系数均高于 0.99, 表明拟合结果较好。

## 3 结论和讨论

光合色素在植物生长过程中起着重要作用, 可以利用太阳能将  $\text{CO}_2$  转化为碳水化合物, 提供植物生长所必需的有机物<sup>[27-28]</sup>。其中, 叶绿素含量的高低直接影响着植物光合作用的强弱, 叶绿素含量越高, 越有利于植物进行光合作用。赖金莉等<sup>[22]</sup>研究

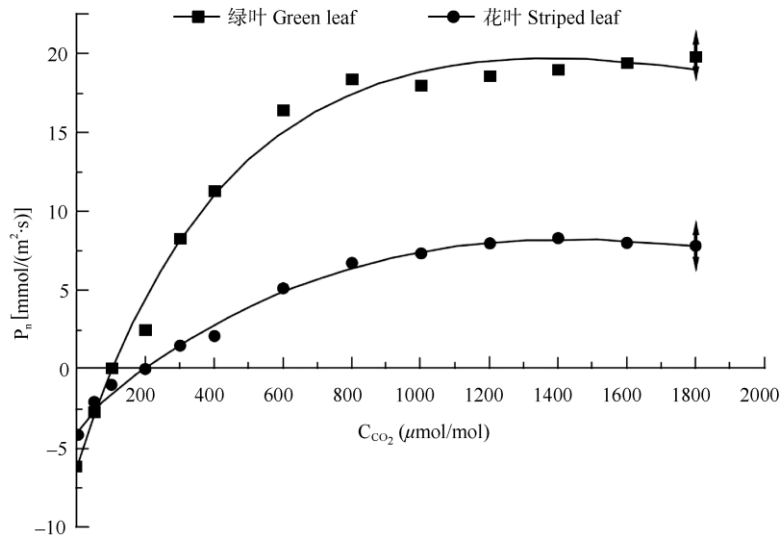


图 3 竹柏 2 种叶片的 CO<sub>2</sub> 响应曲线

Fig. 3 CO<sub>2</sub> response curves of two kinds of leaf of *Podocarpus nagi*

表 3 竹柏 2 种叶片 CO<sub>2</sub> 响应曲线参数

Table 3 Parameters of CO<sub>2</sub> response curve for two kinds of leaf of *Podocarpus nagi*

	叶色 Leaf color	
	全绿叶 Green leaf	花叶 Striped leaf
初始羧化效率 Initial carboxylationEfficiency (CE) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	0.069 1 $\pm$ 0.002a	0.0233 $\pm$ 0.001b
光合能力 Photosynthetic capacity ( $A_{\text{max}}$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	17.437 $\pm$ 1.548a	7.486 $\pm$ 0.878a
CO <sub>2</sub> 饱和点 CO <sub>2</sub> saturation point (CSP) ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	1 323.736 $\pm$ 35.876b	1 014.656 $\pm$ 25.654b
CO <sub>2</sub> 补偿点 CO <sub>2</sub> compensation point (CCP) ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	104.58 $\pm$ 8.37b	201.54 $\pm$ 12.315a
光呼吸速率 Photorespiration rate ( $R_p$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]	1.088 $\pm$ 0.002a	0.694 $\pm$ 0.001b
决定系数 Determination coefficient ( $r$ )	0.998 6	0.997 3

了银丝竹(*Bambusa multiplex* ‘Silverstripe’)不同颜色叶片光合特性,认为银丝竹全绿叶的叶绿素和类胡萝卜素含量均高于花叶和全白叶,本研究中,竹柏全绿叶的叶绿素含量和类胡萝卜素含量均高于花叶,与其结果一致。同时,叶绿素和类胡萝卜素含量决定着叶片的颜色<sup>[15]</sup>,本研究中,竹柏全绿叶的叶绿素和类胡萝卜素含量分别为 27.414、3.123 mg/g,均高于花叶,因此,竹柏花叶可能是由于较低的叶绿素含量引起的,这与李力等<sup>[29]</sup>对北美红枫(*Acer rubrum*)和包努恩都特等<sup>[30]</sup>对紫叶矮樱花(*Prunus × cistena*)的研究结果相似。叶绿素 a/b 可作为区分阳生植物和阴生植物的一个重要指标<sup>[31]</sup>,一般认为,阴生植物的叶绿素 a/b 约为 2.3,阳生植物的约为 3.0<sup>[32]</sup>。本研究中竹柏 2 种叶片的叶绿素 a/b 有显著差异,全绿叶的为 2.624,花叶的为 2.088,均属阴生植物。光合作用是植物最为重要的代谢过程,光合能力直接影响着植物的生长发育和抗逆性<sup>[33]</sup>。光

响应参数能较好地反映植物的光合能力、光能利用效率和光抑制水平。本研究中,竹柏全绿叶和花叶的光合速率都随光照强度的增大而增加,当光照达一定强度时,则出现光饱和现象,光合速率呈下降趋势。2 种颜色叶片对高强度光照的反应不一样,全绿叶在高强度光照下仍具有较高的净光合速率,且在相同的光照条件下,全绿叶的净光合速率显著高于花叶,表明全绿叶的光合速率更高,这与赖金莉等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。光合响应参数,包括初始量子效率、最大净光合速率、光饱和点、光补偿点和暗呼吸效率,是反映植物光响应特征的重要参数。本研究中,竹柏全绿叶的最大净光合速率和初始量子效率分别为 12.793  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 和 0.069 1,均明显高于花叶,表明全绿叶的光合活性较高,且受光抑制程度较小<sup>[21]</sup>。而全绿叶的光补偿点、光饱和点分别为 1 014.659 和 16.585  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ,显著低于花叶竹柏,表明花叶利用弱光的能力较弱,利用强

光的能力强于全绿叶。

综上,竹柏 2 种叶片的色素含量与光合特性均存在较大差异,他们均为耐阴植物,但全绿叶竹柏更耐阴,利用弱光的能力更强。在园林绿化配植中,可将竹柏作为其他喜阳植物的辅景,在光照较强的林下种植花叶竹柏,而在光照较弱的林下种植全绿叶竹柏。既可丰富和美化景观,也可为幼龄竹柏的生长提供庇护,为其生长提供较为优越的光照条件。

## 参考文献

- [1] CHEN D Q. Effects of substrate and soaking method on growth of container seedlings of *Podocarpus nagi* (Thunb.) Zoll. et Mor ex Zoll. [J]. *J Hebei For Sci Technol*, 2019(2): 36–38. doi: 10.16449/j.cnki.issn1002-3356.2019.02.010.  
陈德清. 基质及浸种方式对竹柏容器苗生长的影响 [J]. *河北林业科技*, 2019(2): 36–38. doi: 10.16449/j.cnki.issn1002-3356.2019.02.010.
- [2] ZHANG R J, LUO T S, HUANG D Z, et al. Characters and plantation techniques of *Nageia nagi* with multiple utilization purposes [J]. *For Environ Sci*, 2017, 33(2): 97–100. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2017.02.018.  
张瑞娟, 骆士寿, 黄德职, 等. 多用途树种竹柏的特性及其栽培 [J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(2): 97–100. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2017.02.018.
- [3] WANG Q X, YANG Z F, PENG W, et al. Study on the constituents of *Podocarpus nagi* [J]. *J Hainan Norm Univ (Nat Sci)*, 2018, 31(1): 1–5. doi: 10.12051/j.issn.1674-4942.2018.01.001.  
王秋香, 杨座发, 彭伟, 等. 竹柏化学成分的研究 [J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(1): 1–5. doi: 10.12051/j.issn.1674-4942.2018.01.001.
- [4] LÜ L L, YANG C W, LI C Y, et al. Extraction of *Podocarpus nagi* nut oil and analysis of their physicochemical properties [J]. *Food Mac*, 2018, 34(5): 142–147. doi: 10.13652/j.issn.1003-5788.2018.05.030.  
吕露露, 杨崇文, 李承勇, 等. 竹柏果油提取工艺优化及理化特性分析 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(5): 142–147. doi: 10.13652/j.issn.1003-5788.2018.05.030.
- [5] ARMBRUSTER U, GALVIS V C, KUNZ H H, et al. The regulation of the chloroplast proton motive force plays a key role for photosynthesis in fluctuating light [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2017, 37: 56–62. doi: 10.1016/j.pbi.2017.03.012.
- [6] JOHNSON M P. Photosynthesis [J]. *Essays Biochem*, 2016, 60(3): 255–273. doi: 10.1042/EBC20160016.
- [7] XU H J, CHEN Z L, SHI L J, et al. Photosynthetic characteristics and adaptability of four *Heuchera micrantha* varieties with different colourful leaf in Guizhou [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2018, 46(11): 101–106. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2018.11.026.  
许红娟, 陈之林, 石乐娟, 等. 4 种彩叶矾根的光合特性及在贵州的适应性 [J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(11): 101–106. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2018.11.026.
- [8] JIANG H W, LUO H Y, LI J H, et al. Effects of different light on photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of two species of ornamental forsythia [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2015, 43(11): 246–249. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.075.  
蒋华伟, 罗红雨, 李静会, 等. 不同光照对 2 种观赏连翘光合及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(11): 246–249. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.075.
- [9] ZHANG Y Q, KAISER E, ZHANG Y T, et al. Red/blue light ratio strongly affects steady-state photosynthesis, but hardly affects photosynthetic induction in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. *Physiol Plant*, 2019, 167(2): 144–158. doi: 10.1111/ppl.12876.
- [10] PARK J, DINH T B. Contrasting effects of monochromatic LED lighting on growth, pigments and photosynthesis in the commercially important cyanobacterium *Arthrospira maxima* [J]. *Bioresour Technol*, 2019, 291: 121846. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121846.
- [11] LUIMSTRA V M, SCHUURMANS J M, de CARVALHO C F M, et al. Exploring the low photosynthetic efficiency of cyanobacteria in blue light using a mutant lacking phycobilisomes [J]. *Photosynth Res*, 2019, 141(3): 291–301. doi: 10.1007/s11120-019-00630-z.
- [12] WANG F L, CAO G Q, YE Y Q, et al. Light response of photosynthesis in *Cunninghamia lanceolata* under different light qualities [J]. *J For Environ*, 2017, 37(3): 366–371. doi: 10.13324/j.cnki.jjfcf.2017.03.020.  
汪凤林, 曹光球, 叶义全, 等. 不同光质下杉木幼苗叶片光合作用的光响应 [J]. *森林与环境学报*, 2017, 37(3): 366–371. doi: 10.13324/j.cnki.jjfcf.2017.03.020.
- [13] MO H Z, LUO H R, LIU J H, et al. Photosynthetic characteristics influence of three species bryophytes under different light intensities [J]. *N Hort*, 2018(15): 85–91. doi: 10.11937/bfy.20180382.  
莫惠芝, 骆华容, 刘建华, 等. 不同光照条件对三种苔藓植物光合特性的影响 [J]. *北方园艺*, 2018(15): 85–91. doi: 10.11937/bfy.20180382.
- [14] XING A B, CUI H F, YU X P, et al. Effects of different lights qualities

- and photoperiods on plant growth and development [J]. *N Hort*, 2018 (3): 163–172. doi: 10.11937/bfy.20171162.
- 邢阿宝, 崔海峰, 俞晓平, 等. 光质及光周期对植物生长发育的影响 [J]. *北方园艺*, 2018(3): 163–172. doi: 10.11937/bfy.20171162.
- [15] WU S Z, LIANG W B, NEI D L, et al. Effects of high temperature stress on photosynthesis of different blueberry varieties [J]. *J CS Univ For Technol*, 2017, 37(11): 1–8. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.001.
- 吴思政, 梁文斌, 聂东伶, 等. 高温胁迫对不同蓝莓品种光合作用的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(11): 1–8. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.001.
- [16] HUANG Z, ZHONG Q P, CAO L Q, et al. Effects of drought stress on photosynthesis of adult *Camellia oleifera* forest [J]. *Nonwood For Res*, 2017, 35(4): 72–79. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.04.011.
- 黄拯, 钟秋平, 曹林青, 等. 干旱胁迫对油茶成林光合作用的影响 [J]. *经济林研究*, 2017, 35(4): 72–79. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.04.011.
- [17] ZHAO J, LANG Y, WU W, et al. Effects of soil extreme drought on photo-physiological and photo-biochemical characteristics of *Lonicera japonica* Thunb. [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2017, 37(12): 2444–2451. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2017.12.2444.
- 赵洁, 郎莹, 吴畏, 等. 土壤极端干旱对金银花光合生理生化特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2017, 37(12): 2444–2451. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2017.12.2444.
- [18] LI D M, ZHAO C Y, LIU X F. Effects of different fertilizers on the growth and photosynthesis of *Kaempferia elegans* cuttage in potted cultivation [J]. *Chin J Trop Agric*, 2017, 37(11): 4–10. doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.2017.11.002.
- 李冬梅, 赵超艺, 刘小飞. 施用不同肥料对扦插紫花山奈生长和光合作用的影响 [J]. *热带农业科学*, 2017, 37(11): 4–10. doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.2017.11.002.
- [19] LIU J M, LI J, WEN A H, et al. Responses of photosynthetic pigment and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum migao* to drought stress [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47(9): 171–174.
- 刘济明, 李佳, 文爱华, 等. 米槁幼苗光合色素与光合特征对干旱胁迫的响应 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(9): 171–174.
- [20] LAHR E C, DUNN R R, FRANK S D. Variation in photosynthesis and stomatal conductance among red maple (*Acer rubrum*) urban planted cultivars and wildtype trees in the southeastern United States [J/OL]. *PLoS One*, 2018, 13(5): e0197866. doi: 10.1371/journal.pone.0197866.
- [21] DILLON S, QUENTIN A, IVKOVIĆ M, et al. Photosynthetic variation and responsiveness to CO<sub>2</sub> in a widespread riparian tree [J/OL]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0189635. doi: 10.1371/journal.pone.0189635.
- [22] LAI J L, LI X X, CHEN L Y, et al. Photosynthetic characteristics of three different colors of leaves of *Bambusa multiplex* cv. Silverstrip [J]. *Ecol Environ Sci*, 2018, 27(2): 255–261. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.02.008.
- 赖金莉, 李欣欣, 陈凌艳, 等. 银丝竹3种颜色叶片光合特性研究 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 255–261. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.02.008.
- [23] WANG X K. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] YE Z P, YU Q. Comparison of a new model of light response of photosynthesis with traditional models [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2007, 38(6): 771–775. doi: 10.3969/j.issn.1000-1700.2007.06.001.
- 叶子飘, 于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型比较 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2007, 38(6): 771–775. doi: 10.3969/j.issn.1000-1700.2007.06.001.
- [25] YE Z P, YU Q. Comparison of new and several classical models of photosynthesis in response to irradiance [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(6): 1356–1361. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.06.016.
- 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型的比较 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1356–1361. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.06.016.
- [26] THORNLEY J H. Mathematical Models in Plant Physiology [M]. London: Academic Press, 1976.
- [27] LU Y, YAO J. Chloroplasts at the crossroad of photosynthesis, pathogen infection and plant defense [J/OL]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(12): 3900. doi: 10.3390/ijms19123900.
- [28] JIN S W, RAHIM M A, AFRIN K S, et al. Transcriptome profiling of two contrasting ornamental cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) lines provides insights into purple and white inner leaf pigmentation [J]. *BMC Genomics*, 2018, 19: 797. doi: 10.1186/s12864-018-5199-3.
- [29] LI L, ZHANG S N, LIU Y M, et al. Lab model based analysis on physiological factors affecting color of *Acer rubrum* L. [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2017, 45(9): 87–94. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.09.012.



- 李力, 张盛楠, 刘亚敏, 等. 基于 Lab 模型的北美红枫呈色生理因素探究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(9): 87-94. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.09.012.
- [30] BAONUENDUTE, LI H H, LIU X W, et al. Cromogenic pigments in *Prunus × cistena* leaves [J]. N Hort, 2016(7): 46-49. doi: 10.11937/bfyy.201607014.
- 包努恩都特, 李厚华, 刘小微, 等. 紫叶矮樱叶片成色色素分析 [J]. 北方园艺, 2016(7): 46-49. doi: 10.11937/bfyy.201607014.
- [31] SUN X L, XU Y F, MA L Y, et al. A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment [J]. Chin J Plan Ecol, 2010, 34(8): 989-999. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.08.012.
- 孙小玲, 许岳飞, 马鲁沂, 等. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 989-999. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.08.012.
- [32] ZHONG G C, ZHANG W L, ZHANG L, et al. A study on photosynthetic characteristics of different *Salvia miltiorrhiza* varieties [J]. Acta Pratac Sin, 2011, 20(4): 116-122.
- 钟国成, 张力文, 张利, 等. 不同叶型丹参光合特性研究 [J]. 草业学报, 2011, 20(4): 116-122.
- [33] FEN W L, WEN Z Y, ZHOU Y Q, et al. Photosynthetic characteristics of 3 *Melastoma* L. species [J]. J For Environ, 2019, 39(2): 188-193. doi: 10.13324/j.cnki.jjcf.2019.02.011.
- 樊晚林, 温振英, 周雨琦, 等. 3种野牡丹属植物的光合特性 [J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2): 188-193. doi: 10.13324/j.cnki.jjcf.2019.02.011.
- [34] GAO L, LE J X, ZHANG W, et al. Response to light intensity of *Torreya fargesii* in two kinds of tree age [J]. J Beijing For Univ, 2018, 40(10): 34-42. doi: 10.13332/j.1000-1522.20180208.
- 高岚, 乐佳兴, 张文, 等. 2种树龄巴山榿对光照的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(10): 34-42. doi: 10.13332/j.1000-1522.20180208.