

## 大花紫薇及其新品种紫婵光合特性比较

袁 汕<sup>1</sup>, 林嘉蓓<sup>1</sup>, 张 恒<sup>1</sup>, 奚如春<sup>1,2\*</sup>

1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 广东广州 510642

**摘 要:** 探究大花紫薇新品种紫婵的光合生理特征, 为其栽培与推广应用提供理论基础。以 2 年生紫婵和大花紫薇幼苗为材料, 采用 Li-6400XT 便携式光合仪, 测定 2 个试验植物材料的光合日变化、光响应曲线及叶绿素含量。研究表明: (1) 紫婵的叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、类胡萝卜素 (Car) 含量、叶绿素含量 (Chl) 以及叶绿素 a/b (Chla/Chlb) 均显著大于大花紫薇 ( $P < 0.05$ )。 (2) 紫婵的净光合速率 ( $P_n$ ) 日变化呈单峰曲线, 峰值出现在 10:00, 为  $17.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 气孔导度 ( $G_s$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ) 日变化均呈单峰曲线, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 为早晚高中午低的单谷型, 气孔限制值为早晚低中午高的单峰曲线。 (3) 大花紫薇的净光合速率日变化呈双峰曲线, 峰值分别出现在 8:00 和 12:00, 分别为  $14.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $13.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 气孔导度亦呈双峰曲线, 峰值分别出现在 8:00 和 12:00, 蒸腾速率日变化呈单峰曲线, 峰值出现在 10:00 左右, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度为早晚高中午低的单谷型, 气孔限制值为早晚低中午高的双峰型曲线。 (4) 灰色关联分析表明, 2 种植物材料的  $P_n$  与环境因子关联度排序均为  $\text{PAR} > C_a > \text{RH}$ 。紫婵的  $P_n$  与生理因子的关联度排序为  $T_r > G_s > T_a > C_i$ , 而大花紫薇为  $G_s > T_r > T_a > C_i$ 。 (5) 紫婵的光饱和点为  $2388.729 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 光补偿点为  $55.590 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 大花紫薇的光饱和点为  $2080.297 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 光补偿点为  $29.871 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 与大花紫薇相比较, 紫婵的光饱和点和光补偿点均较高, 具有较强的光合同化能力, 但对弱光环境适应性较差。紫婵为喜光型树种, 适宜栽植在光照充足的环境。

**关键词:** 紫婵; 大花紫薇; 光合特性; 叶绿素含量

中图分类号: S685.99 文献标识码: A

## Comparative Study on Photosynthetic Characteristic of *Lagerstroemia speciosa* and Its New Variety Zichan

YUAN Shan<sup>1</sup>, LIN Jiabei<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>1</sup>, XI Ruchun<sup>1,2\*</sup>

1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2. Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, Guangzhou, Guangdong 510642, China

**Abstract:** *Lagerstroemia speciosa* Zichan is a new variety of *Lagerstroemia speciosa*. In order to provide theoretical basis for its cultivation and promotion application, the physiological characteristics would be explored. The paper used the Li-6400 XT photosynthetic apparatus to determine the light response curves, diurnal variation and chlorophyll of biennale *L. speciosa* Zichan and *L. speciosa* sapling. The results showed that: (1) The contents of chlorophyll a (Chla), chlorophyll b (Chlb), carotenoid (Car), chlorophyll content (Chl) and chlorophyll a/b (Chla/Chlb) of *L. speciosa* Zichan were higher than those of *L. speciosa*, and there were significant differences in the above indexes. (2) Diurnal change of photosynthetic rate of *L. speciosa* Zichan displayed a unimodal curve, and the peak appeared at around 10:00 am, which was  $17.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; diurnal change of stomatal conductance and transpiration rate showed unimodal curves as well. The diurnal variation of intercellular  $\text{CO}_2$  concentration was high in the morning and evening, low at noon, and the diurnal variation of stomatal limitation value was low in the morning and evening, high at noon. (3) Diurnal change of

收稿日期 2022-06-07; 修回日期 2022-07-12

基金项目 广东省林业科技创新项目 (No. 2023KJCX002)。

作者简介 袁 汕 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 森林培育。\*通信作者 (Corresponding author): 奚如春 (XI Ruchun), E-mail: xirc2003@126.com。

photosynthetic rate of *L. speciosa* displayed a bimodal curve, and the peak appeared at around 8:00 am or 12:00 am, which was  $14.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $13.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; diurnal change of stomatal conductance showed bimodal curve as well, and the peak appeared at around 8:00 am or 12:00 am. The diurnal variation of transpiration rate showed unimodal curve, and the peak appeared at around 10:00 am. The diurnal variation of intercellular  $\text{CO}_2$  concentration was high in the morning and evening, low at noon, and the diurnal variation of stomatal limitation value was low in the morning and evening, high at noon. (4) Grey relational analysis showed that the order of correlation degree between  $P_n$  and environmental factors of the two materials was  $\text{PAR} > C_a > \text{RH}$ . The order of correlation between  $P_n$  and physiological factors was  $T_r > G_s > T_a > C_i$ , while  $G_s > T_r > T_a > C_i$ . (5) The light saturation point of *L. speciosa* Zichan was  $2388.729 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and the light compensate point was  $55.590 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; The light saturation point of *L. speciosa* was  $2080.597 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and the light compensate point was  $29.871 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Compared with *L. speciosa* and *L. indica*, *L. speciosa* Zichan showed the strong photosynthetic assimilation ability, but its adaptability to low light environment was weak. *L. speciosa* Zichan needs plenty of light, which is suitable for planting in the region with abundant light supply.

**Keywords:** *Lagerstroemia speciosa* Zichan; *Lagerstroemia speciosa*; photosynthetic characteristics; chlorophyll content

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.04.012

大花紫薇 (*Lagerstroemia speciosa*) 是千屈菜科 (Lythraceae) 紫薇属 (*Lagerstroemia* L.) 落叶乔木, 原产澳大利亚和亚洲东南部, 分布于马来西亚、越南、菲律宾、斯里兰卡和印度等地。紫薇属植物在园林中的应用主要有 4 种, 分别为紫薇 (*L. indica*)、大花紫薇、南紫薇 (*L. subcostata*) 和福建紫薇 (*L. limii*)。大花紫薇于 20 世纪 50 年代引入广东、广西及福建等省 (区) 栽培, 目前已成为主要景观绿化树种之一。大花紫薇, 喜强光, 耐热, 耐剪, 抗污染能力强, 枝叶茂密, 开花时大量紫花垂挂于枝头, 秋冬季落叶前叶变紫红色, 春季萌发新叶时为紫色<sup>[1]</sup>。目前该植物的研究主要集中在栽培技术<sup>[2]</sup>和药用价值<sup>[3]</sup>等方面, 关于生理特征和品种选育与改良研究较少<sup>[3-4]</sup>。紫婵为 2019 年华南农业大学从大花紫薇群体变异中培育出的新品种, 其花色艳丽, 花序紧凑, 花期较长, 景观效果极佳, 目前已获国家新品种授权。

光合作用是林木重要的生理过程, 其强弱取决于林木的遗传特性及环境条件的影响<sup>[5]</sup>。光合生理参数能反映植物光合能力的强弱, 是评判植物生理生态环境适应性的重要指标<sup>[6]</sup>。植物的生命过程受环境影响的同时, 也反作用于环境, 造成环境因素的变化。如植物的光合作用会引起植物周围的  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  浓度的变化。因植物材料不同, 叶片结构与叶表面微形态不同, 使其对有效光的反射率和折射率不同, 导致试验所测的光合有效辐射 (PAR) 强度不同<sup>[7]</sup>。另外, 植物的蒸腾作用对大气湿度也有影响。环境因素同样制约着植物生命过程的发生, 光合作用作为绿色植物最重要的生命过程, 也受到环境因子的严重影

响, 其中主要影响因素有光照强度、大气温度、相对空气湿度和大气  $\text{CO}_2$  浓度等。植物叶片光合色素含量和植物光合能力密切相关, 可直接反映植物叶片光合能力的大小<sup>[8]</sup>。目前, 已有学者研究了大花紫薇和紫薇的光合生理特性<sup>[9-10]</sup>, 紫婵作为大花紫薇的一个新品种, 其光合生理特性还未进行研究。因此本研究通过测定比较紫婵和大花紫薇 2 个植物材料的光合参数特性和光合色素含量, 阐明紫婵的光合生理特征, 为其在园林绿化中的树种选择及景观配置提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验地位于华南农业大学教学试验苗圃。该区域属亚热带季风气候, 温暖多雨、光热充足、夏季长、霜期短。年平均气温为  $23.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 各月平均气温均在  $13.0 \text{ }^\circ\text{C}$  以上, 最冷为 1 月, 平均气温为  $13.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最热为 8 月, 平均气温  $28.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。全年最高温  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最低温  $-0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 年降水量为  $1820.5 \text{ mm}$ , 4—9 月的降水量占全年降水量的 80%, 尤以 5—8 月最高, 占全年 62%, 年平均湿度为 79%。全年水热同期, 雨量充沛<sup>[11-12]</sup>。

在试验苗圃中, 分别选择 3 株生长健壮, 无病虫害的紫婵和大花紫薇 2 年生营养繁殖容器幼苗 (容器规格为  $30 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ ), 生长情况见表 1。所有苗木按常规苗圃管理, 技术措施保持一致。

### 1.2 方法

1.2.1 光合色素含量测定 于 2021 年 7 月, 选择晴朗天气, 采用酒精浸提法, 将大花紫薇和紫婵的叶片清洗干净并用吸水纸吸干表面水分, 避开

表 1 参试植物材料生长情况  
Tab. 1 Growth of tested materials

植物材料 Plant material	地径 Ground diameter/mm	苗高 Seedling height/cm	冠幅 Crown diameter/m <sup>2</sup>
紫婵	18.48±2.25	97.30±5.84	0.70±0.13
大花紫薇	12.21±1.66	80.73±5.70	0.41±0.02

叶脉及叶缘，称取 0.1 g 样品，剪成 0.5 cm 的正方形，放入 10 mL 试管中，加入 10 mL 95%乙醇，密封摇晃均匀，每个处理 6 次重复，置于黑暗中浸提 36 h，并使用振荡器持续摇晃离心管，直至叶片发白，使光合色素充分被提取。用紫外可见光光度计 (UV-2600, 上海恒平) 测定提取液，以 95%乙醇为空白对照，在波长 470、649、665 nm 下测定吸光值，根据以下公式计算样品光合色素含量。

叶绿素 a 含量： $Chla(mg/g)=(13.95A_{665}-6.88A_{649})\times V/1000\times W$

叶绿素 b 含量： $Chlb(mg/g)=(24.96A_{649}-7.32A_{665})\times V/1000\times W$

类胡萝卜素含量： $Car(mg/g)=(1000A_{470}-2.05\times Chla-114\times Chlb)\times V/245\ 000\times W$

叶绿素： $Chl=Chla+Chlb$

式中， $V$  为提取液体积，10 mL， $W$  为样品重量。

1.2.2 光合日变化参数测定 于 2021 年 7 月，选择晴朗天气，采用 LI-6400 XT 便携式光合仪进行测定，测定参数包括净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )、光合有效辐射 (PAR)、大气  $CO_2$  浓度 ( $C_a$ )、大气温度 ( $T_a$ )、空气相对湿度 (RH) 等。每种参试材料 3 株，每株选取完整、无病虫害的正常功能叶进行测定，测定起止时间 6:00—18:00，每隔 2 h 测定 1 次，重复 5 次读数，取平均值。利用光合和环境参数计算水分利用效率 ( $WUE=P_n/T_r$ ) 和气孔限制值 ( $L_s=1-C_i/C_a$ )。

1.2.3 光响应曲线测定 于 2021 年 7 月，选择晴朗的天气，采用 LI-6400 XT 便携式光合仪的红蓝光源叶室测定，每次测定时间为 8:30—11:30。每种植物材料测定 3 株，叶片选取法与上述一致。参比室  $CO_2$  浓度设定为 400  $\mu mol/mol$ ，叶室温度设为  $(25\pm 1)^\circ C$ ，气体流速设定为 500  $\mu mol/mol$ 。设置光合有效辐射 (PAR) 梯度 (共 18 个)，分别为：0、20、50、80、100、120、150、180、200、500、800、1000、1200、1500、1800、2000、2200、2500  $\mu mol/(m^2\cdot s)$ ，采用叶子飘<sup>[13]</sup>的光合计算方法，使用直角双曲线修正模型，拟合计算得出最大净光合速率 ( $P_{nmax}$ )、表观量子效率 (AQY)、光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP) 和暗呼吸速率 ( $R_d$ )。

### 1.3 数据处理

采用 LI-6400XT 便携式光合仪的自带软件进行参数分析；采用 SPSS 20.0 统计软件进行因子分析和 Tukey 方差分析；使用 DPS 软件进行灰色关联度计算；采用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子日变化特征

图 1 为试验区域测定时大气温度 ( $T_a$ )、光合有效辐射 (PAR)、大气  $CO_2$  浓度 ( $C_a$ ) 和相对空气湿度 (RH) 的日变化情况。由图 1A 可知，大气  $CO_2$  浓度和相对空气湿度总体呈现先下降后上升的趋势。 $C_a$  值在 6:00 时为 405.46  $\mu mol/mol$ ，之后降低，12:00 后回升至 18:00 时达到最大值，为 409.67  $\mu mol/mol$ ；RH 值在 6:00 时是最大值，为 80.04%，之后上下波动，在 14:00 时降至最低值 41.49%，18:00 时升至 61.08%。图 1B 结果表明，光合有效辐射变化趋势呈先上升后

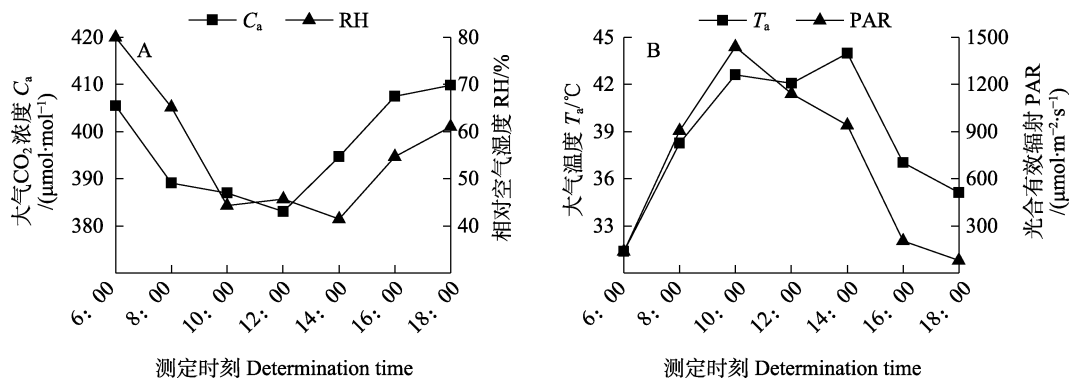


图 1 环境因子日变化

Fig. 1 Diurnal changes of environmental factors

下降的趋势, PAR 在 6: 00—10: 00 时不断上升, 10: 00 时达到最大值  $1439.79 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 之后不断下降, 至 18: 00 时到达最低值  $80.86 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。大气温度的日变化呈双峰型, 当光合有效辐射达到最高值时, 大气温度出现第 1 个峰值  $42.61 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在 12: 00 时略有下降, 升高至 14: 00 时出现第 2 个峰值  $43.98 \text{ }^\circ\text{C}$ , 之后逐渐下降, 18: 00 时降至  $35.14 \text{ }^\circ\text{C}$ , 表现为早晚低, 中午高。

## 2.2 光合参数日变化特征

**2.2.1 净光合速率** 净光合速率在一定程度上反映植物的生长速率, 光合能力越强在相同时间内制造的光合产物也越多。参试植物材料叶片净光合速率的日变化曲线如图 2A 所示。紫婵净光合速率日变化呈单峰型, 最大值在 10: 00 出现, 为  $17.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ; 大花紫薇的日变化为双峰型, 10: 00 左右出现“午休”现象, “午休”时的净光合速率为  $12.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 2 个峰值分别出现在 8: 00 和 12: 00 左右, 且第 1 个峰值略高于第 2 个峰值, 其最大净光合速率为  $14.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。大花紫薇出现“午休”现象的时间刚好与紫婵出现峰值的时间相同, 说明紫婵比大花紫薇有更强

的光合能力。从 2 个参试植物材料的净光合速率日均值来看, 紫婵 [ $9.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > 大花紫薇 [ $8.76 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ], 同样说明紫婵有更强的光合能力。

**2.2.2 气孔导度** 气孔导度的日变化曲线如图 2B 所示。紫婵的气孔导度日变化曲线为单峰型, 大花紫薇为双峰型, 且首峰值大于次峰值。二者气孔导度最大值均出现在 8: 00, 紫婵为  $0.50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 大花紫薇为  $0.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。随着气温升高, 光照变得强烈, 部分气孔关闭, 大花紫薇的气孔导度在 10: 00 左右降低, 此时大花紫薇气孔导度为  $0.42 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ; 之后 PAR 降低, 气孔再次打开, 气孔导度上升, 大花紫薇的次峰在 12: 00 左右出现。之后随着气温降低, 光强减弱, 气孔导度逐渐下降。

**2.2.3 胞间  $\text{CO}_2$  浓度** 胞间  $\text{CO}_2$  浓度的日变化曲线如图 2C 所示, 紫婵和大花紫薇均呈“V”型变化趋势。紫婵和大花紫薇的  $C_i$  值在 6: 00—12: 00 时逐渐下降, 6: 00 时紫婵的胞间  $\text{CO}_2$  浓度为  $380.57 \mu\text{mol}/\text{mol}$ , 大花紫薇为  $367.87 \mu\text{mol}/\text{mol}$ , 12: 00 时胞间  $\text{CO}_2$  浓度到达最低值, 紫婵为  $272.06 \mu\text{mol}/\text{mol}$ , 大花紫薇为

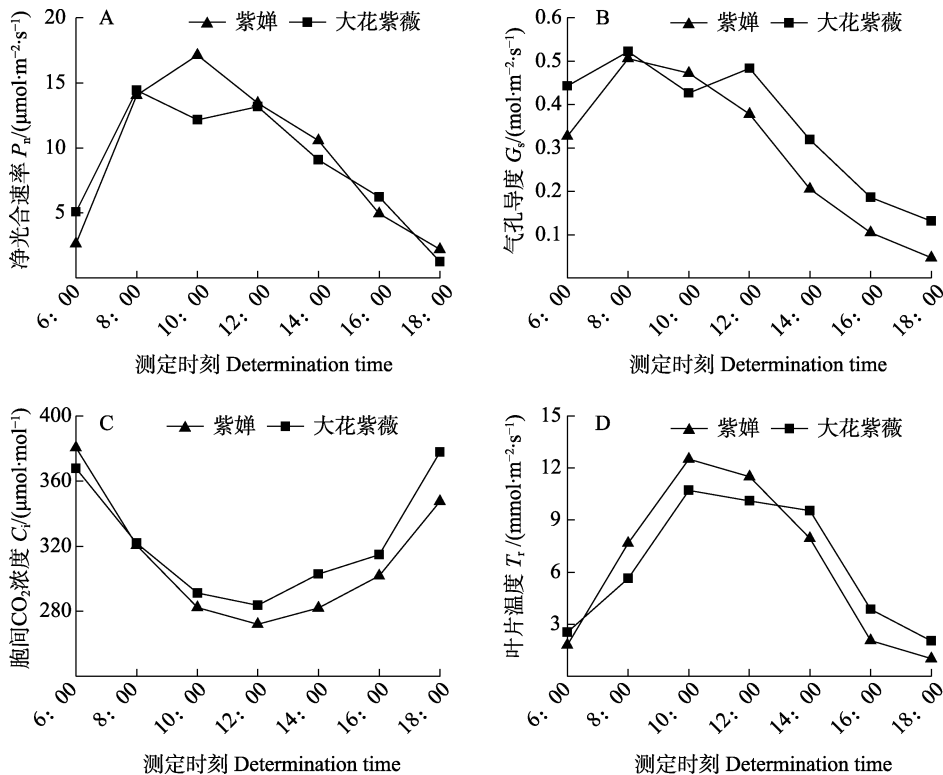


图 2 参试材料光合气体交换参数日变化

Fig. 2 Diurnal changes of photosynthetic gas exchange parameters of the tested materials

283.64  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，可能是因为早上光合作用不断增强， $\text{CO}_2$  被消耗，因此  $C_i$  浓度值逐步降低；随着 PAR 值下降， $C_i$  逐渐回升。8: 00—18: 00 大花紫薇的胞间  $\text{CO}_2$  浓度一直高于紫婵，原因可能是大花紫薇的气孔导度大于紫婵。

**2.2.4 蒸腾速率** 蒸腾速率的日变化曲线如图 2D 所示。二者的蒸腾速率日变化趋势均为单峰型。在 6: 00—10: 00 二者的蒸腾速率随着时间的增加而不断上升，并达到最大值，紫婵和大花紫薇的  $T_r$  的最大值分别为 12.51  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和 10.71  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，之后随着时间的变化逐渐下降，至 18: 00 时降至最低。14: 00—18: 00 大花紫薇的蒸腾速率一直略高于紫婵，这可能与大花紫薇气孔导度大有关。

**2.2.5 水分利用率和气孔限制值** 水分利用率是指每消耗单位重量的水所制造的干物质量。如图

3A 所示，二者的水分利用率日变化均呈倒“W”型，且早上的水分利用率较高。紫婵的水分利用效率 8: 00 左右出现一个小峰值，之后略有下降，10: 00—14: 00 整体趋于平缓，14: 00 之后不断上升，至 18: 00 达到一天最大值 2.82  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ；大花紫薇的水分利用率总体呈波动下降趋势，8: 00 时 WUE 达到最高值 2.61  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ，之后下降，16: 00 到达次高峰，18: 00 时降至最低值 0.71  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

气孔限制值如图 3B 所示。紫婵的气孔限制值的日变化曲线为单峰型，大花紫薇的则是双峰型。紫婵的气孔限制值在 14: 00 时达到了最高值 0.28  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ；大花紫薇的气孔限制值峰值分别出现在 10: 00 和 16: 00，其气孔限制值分别为 0.23  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  和 0.24  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，次峰值略高于首峰值。

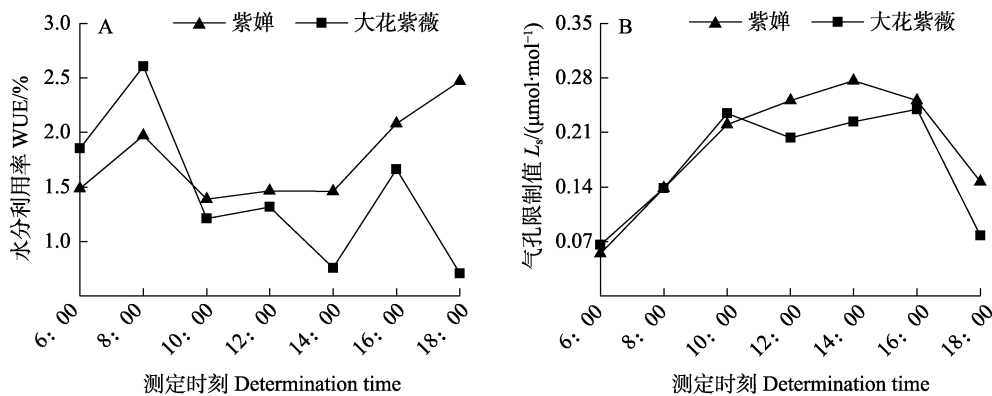


图 3 水分利用率、气孔限制值日变化  
Fig. 3 Diurnal changes of water use efficiency and stomatal limitation value

**2.2.6 净光合速率与相关生理生态因子的灰色关联分析** 为进一步探究植物本身或是环境因素对紫婵和大花紫薇光合作用的影响程度，对 2 个植物材料日变化过程中的净光合速率与相关生理生态因子进行灰色关联分析。结果表明，2 个植物材料  $P_n$  与环境因子关联度排序均为  $\text{PAR} > C_a > \text{RH}$ 。紫婵的净光合速率与生理因子的关联度排序为  $T_r > G_s > T_a > C_i$ ，大花紫薇的净光合速率与生理因子的关联度排序为  $G_s > T_r > T_a > C_i$  (表 2)。

$T_r$  是影响紫婵净光合速率的首要因素，对大花紫薇影响最大的因素是  $G_s$ 。

**2.3 光响应曲线及特征参数比较**

**2.3.1 光响应曲线** 光响应曲线反映植物净光合速率<sup>[14]</sup>，由图 4 可知，2 个植物材料间光响应曲线有较大差异。2 个植物材料的光响应曲线呈现相似的规律，均随光照强度的增加而增加，达到一定数值后，净光合速率趋于饱和，呈平稳状态。当光合有效辐射为  $0 < \text{PAR} < 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  时， $P_n$

表 2 净光合速率与生理、生态因子的灰色关联度

Tab. 2 Grey relational degree between net photosynthetic rate and physiological, ecological factors

植物材料 Plant material	关联度 Relational degree						
	$T_r$	$C_i$	$G_s$	$T_a$	PAR	RH	$C_a$
紫婵	0.804	0.500	0.697	0.593	0.762	0.481	0.526
大花紫薇	0.682	0.532	0.696	0.604	0.642	0.490	0.561

增速较快,由负值增长为正值,2个植物材料间差异较小,但紫蝉的增长幅度略大于大花紫薇;当光合有效辐射在 200~800  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间时,  $P_n$  增速放缓,紫蝉的净光合速率增长幅度仍大于大花紫薇;当光合有效辐射大于 1000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,大花紫薇的净光合速率趋于稳定且有下降的趋势,紫蝉则未出现明显的下降趋势。紫蝉的净光合效率与大花紫薇相比一直较高,大花紫薇的净光合速率变化幅度一直较缓。除此之外,可以看出大花紫薇的光补偿点略低于紫蝉,说明大花紫薇对弱光的利用能力强于紫蝉;但是大花紫薇的光饱和点远低于紫蝉,说明紫蝉更喜光,对强光的利用能力更大。

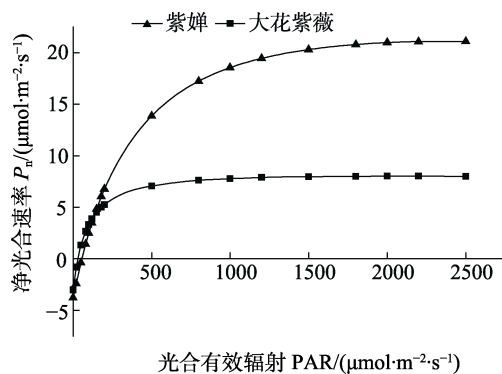


图 4 参试材料光响应曲线

Fig. 4 Light response curves of tested materials

2.3.2 光响应曲线特征参数 净光合速率反映一定环境条件下单叶光合能力的强弱<sup>[15]</sup>,由表 3 可看出,紫蝉的最大净光合速率 ( $P_{nmax}$ ) 显著大于大花紫薇。光饱和点和光补偿点反映了植物对强光和弱光的利用能力<sup>[15]</sup>,紫蝉和大花紫薇的光饱和点分别为 2388.729  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和 2080.597  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,光补偿点分别为 55.590  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和 29.871  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,紫蝉的光饱和点和光补偿点显著高于大花紫薇,表明紫蝉的强光利用能力较强,不易出现光抑制现象,大花紫薇的光补偿点较低,说明它对弱光的适应范围较大。表观量子速率反映植物在弱光下的光合能力,大花紫薇较大,为 0.136  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,可知大花紫薇的叶片光能转化效率高,利用其他弱光的能力略优于紫蝉。暗呼吸速率是指黑暗条件下叶片进行气体交换的速率,紫蝉的暗呼吸速率显著大于大花紫薇,表明紫蝉进行呼吸作用时消耗的光合产物较大花紫薇多。

## 2.4 叶绿素含量比较

大花紫薇和紫蝉 2 个植物材料的叶片光合色素含量如表 4 所示,紫蝉的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量、胡萝卜素含量以及叶绿素 a/b 均高于大花紫薇,采用 tukey 检验得出以上指标均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

表 3 参试植物光响应曲线参数

Tab. 3 Photosynthetic parameters in light response curves of tested materials

植物材料 Plant material	表观量子速率 AQE $/(\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1})$	最大净光合速率 $P_{nmax}$ $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光补偿点 LCP/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	暗呼吸速率 $R_d/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
紫蝉	0.079±0.007 <sup>a</sup>	21.107±0.428 <sup>a</sup>	2388.729±95.324 <sup>a</sup>	55.590±5.448 <sup>a</sup>	3.869±0.259 <sup>a</sup>
大花紫薇	0.136±0.044 <sup>a</sup>	8.017±0.178 <sup>b</sup>	2080.597±103.688 <sup>b</sup>	29.871±9.442 <sup>b</sup>	3.035±0.296 <sup>b</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

表 4 参试植物材料光合色素含量

Tab. 4 Photosynthetic pigment content of tested materials

植物材料 Plant material	叶绿素 a 含量 Chl a/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	叶绿素 b 含量 Chl b/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	类胡萝卜素含量 Car/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	叶绿素 Chl/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	叶绿素 Chl a/ Chl b
紫蝉	1.109±0.043 <sup>a</sup>	0.301±0.016 <sup>a</sup>	0.422±0.014 <sup>a</sup>	1.410±0.059 <sup>a</sup>	3.684±0.043 <sup>a</sup>
大花紫薇	0.601±0.037 <sup>b</sup>	0.178±0.011 <sup>b</sup>	0.270±0.015 <sup>b</sup>	0.779±0.048 <sup>b</sup>	3.383±0.046 <sup>b</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

## 3 讨论

植物叶片光合色素含量直接反映了植物叶片光合能力的大小<sup>[8]</sup>,本研究中,大花紫薇和紫蝉 2

个植物材料的叶片光合色素含量均为紫蝉较高,表明紫蝉捕获和吸收光能的作用更强。而且紫蝉的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量、叶绿素

总量和叶绿素 a/b 均与大花紫薇的光合色素含量指标差异显著, 表明紫婵对光能的吸收能力比大花紫薇强, 同时其叶绿素 a/b 值也反映了紫婵对强光环境具有更强的适应能力。

光合作用是评价植物生长状况的重要指标。植物光合作用日变化一般分为 2 种曲线类型, 包括单峰型和双峰型<sup>[16-17]</sup>。本研究中, 紫婵的  $P_n$  日变化曲线为单峰型曲线, 大花紫薇为双峰型, 说明大花紫薇新品种紫婵对夏季的高温强光条件具有较强的适应能力和光合潜力, 而且紫婵的  $P_n$  日均值和峰值也明显高于大花紫薇, 具有较强的净光合能力。紫婵无光合“午休”现象, 净光合速率日变化趋势与外界光合有效辐射的变化趋势相同, 10:00 时 PAR 达到最大值, 此时紫婵  $P_n$  也达到最大, 之后逐渐下降。紫婵的气孔导度于 8:00 时达到最大值, 之后随着光强和气温的升高出现下降趋势, 大花紫薇的气孔导度均值大于紫婵, 由此可见大花紫薇较紫婵有更强的传导  $\text{CO}_2$  和水汽的能力。

胞间  $\text{CO}_2$  浓度反映的是植物对  $\text{CO}_2$  的利用情况, 大气  $\text{CO}_2$  浓度和气孔导度的增大可导致胞间  $\text{CO}_2$  浓度的升高。早上, 大气  $\text{CO}_2$  浓度逐渐下降, 光合作用和蒸腾作用的加剧, 气孔导度增大, 加大了胞间  $\text{CO}_2$  浓度的消耗, 使其值降低, 下午随着 PAR 和  $T_a$  逐渐下降, 大气  $\text{CO}_2$  浓度逐步升高。因此, 大花紫薇和紫婵的胞间  $\text{CO}_2$  浓度变化曲线均呈“V”型。紫婵的日平均光合速率与蒸腾速率及气孔导度均较高, ‘紫婵’可将自然光能转化为热能, 减少光合“午休”现象的发生, 使光合速率稳定在较高水平。

植物的水分利用效率可以揭示植物内在的耗水机制<sup>[18]</sup>, 判断植物的节水、抗旱及对环境的适应能力, 一般植物的水分利用效率越大, 消耗相同水分时制造的有机物越多, 耐旱能力和适应能力越强<sup>[19]</sup>。紫婵的水分利用效率日均值大于大花紫薇, 说明紫婵的水分利用效率较高, 具有更高的合成有机物的能力, 对干旱环境的适应能力较好<sup>[20]</sup>。目前的研究认为, 判断叶片光合速率降低是气孔或非气孔因素的主要根据是气孔限制值和胞间  $\text{CO}_2$  浓度的变化方向, 其中气孔限制主要受气孔数量和气孔开度等影响<sup>[21]</sup>。当净光合速率降低, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度下降, 气孔限制值升高时, 气孔限制因素是光合速率下降的主要因素, 反之,

则属于非气孔限制因素<sup>[22]</sup>。紫婵和大花紫薇净光合速率降低时, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度升高, 气孔限制值下降, 因此认为非气孔限制因素是影响二者光合作用的主要限制因素。本研究可知, 大花紫薇和紫婵的  $C_i$  值由 12:00 开始不断上升, 但是紫婵的气孔限制值自 14:00 后才逐渐下降, 大花紫薇则是在 10:00 之后总体呈波动下降趋势,  $C_i$  升高和  $L_s$  降低并不同步, 以此判断光合速率下降的主要原因为非气孔因素并不全面。影响植物光合作用的非气孔因素还包括叶绿体结构发生变化、光合色素含量下降以及光合酶活性的降低等, 均可引起光合速率降低<sup>[22]</sup>。

植物的光合作用是一个涉及多种生理变化的过程<sup>[23]</sup>。灰色关联度分析显示, 2 个植物材料  $P_n$  与环境因子关联度的排序均为  $\text{PAR} > C_a > \text{RH}$ 。2 个植物材料净光合速率与生理因子的关联度排序则不同,  $T_r$  是影响紫婵净光合速率的首要因素, 而对大花紫薇净光合速率影响最大的因素是  $G_s$ , 也是所有因子中对净光合速率影响最高的。说明 2 个植物材料的光合作用影响因素比较相近, 却有所区别, 蒸腾速率、光照强度和气孔导度是限制 2 个植物材料光合作用的主要因子。紫婵光合有效辐射和蒸腾速率对净光合速率影响的关联度均远高于大花紫薇, 说明紫婵对外界环境因子变化的响应比大花紫薇强, 可以通过改变光合生理特性来适应不同时间段的环境变化, 有较强的适应能力, 基于此, 也可以认为紫婵适宜种植在气温较高, 光照条件充足的生境。

2 个植物材料的光响应曲线特征参数存在一定差异。紫婵的  $P_{n\text{max}}$  最高, 光合生产力高, 不宜过密栽植。植物的光补偿点和光饱和点用于判断植物对光照环境的适应能力, 一般光饱和点和光补偿点均较高的植物是典型的喜光性植物, 反之则为耐荫性植物<sup>[24]</sup>。本研究发现, 紫婵的光饱和点和光补偿点均较高, 可见紫婵为喜光型树种, 强光生境下的植物一般具有较强的光合同化能力, 较高的光饱和点和较高的光补偿点等特征, 适宜栽植在光照充足的地区<sup>[25]</sup>。大花紫薇的光饱和点和点较高, 光补偿点低, 表观量子效率较高, 对林下光斑的利用能力较强, 能适应弱光环境, 在较宽光照幅度内可积累干物质, 可栽植的范围较广<sup>[26]</sup>。

综上所述, 紫婵作为大花紫薇的一个新品种, 从其光合特性的表现来看, 与大花紫薇存在一定差异。紫婵有较好的光能利用效率, 适宜栽植在

气温较高,光照条件充足的地区。本研究结果与盘李军等<sup>[27]</sup>对大花紫薇的研究结果基本一致,但测定的 LCP 差异略大,可能与测定时期和栽培环境不同有关。研究结果为其在园林绿化中的树种选择及景观配置提供了理论依据,但由于本研究只探讨了 2 个植物材料盛花期的光合特性,其实际生长情况应需结合生长指标等的测定并进行长期观测。

## 参考文献

- [1] 林嘉蓓,方姝懿,邓小梅,奚如春. 大花紫薇新品种‘紫婢’[J]. 园艺学报, 2021, 48(S2): 2987-2988.  
LIN J B, FANG S Y, DENG X M, XI R C. A new *Lagerstroemia speciosa* cultivar ‘Zichan’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(S2): 2987-2988. (in Chinese)
- [2] 焦垚. 大花紫薇与紫薇杂交后代重要观赏性状遗传分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.  
JIAO Y. Phenotypic and genetic analysis of ornamental traits in hybrids of *Lagerstroemia indica* and *L. speciosa*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [3] 王燕,詹勤,席忠新,吴锦忠,孙连娜. 紫薇属植物的化学成分和药理作用研究进展[J]. 药学实践杂志, 2010, 28(2): 88-93.  
WANG Y, ZHAN Q, XI Z X, WU J Z, SUN L N. Research progress on the chemical constituents and pharmacological effects of *Lagerstroemia* plants[J]. Journal of Pharmaceutical Practice, 2010, 28(2): 88-93. (in Chinese)
- [4] 王燕,孙连娜,楼永明. 大花紫薇化学成分与药理作用研究进展[J]. 福建分析测试, 2014, 23(5): 20-24.  
WANG Y, SUN L N, LOU Y M. Advances in research of the chemical constituents and pharmacological effects of *Lagerstroemia speciosa* (Linn.) Pers[J]. Fujian Analysis & Testing, 2014, 23(5): 20-24. (in Chinese)
- [5] 夏尚光,张金池,梁淑英. 南方岩榆光合作用日变化及其影响因子研究[J]. 亚热带植物科学, 2007, 36(3): 8-11, 36.  
XIA S G, ZHANG J C, LIANG S Y. Research on photosynthetic daily course of *Ulmus crassifolia* and its influencing factors[J]. Subtropical Plant Science, 2007, 36(3): 8-11, 36. (in Chinese)
- [6] 刘璐,毛永成,王倩颖,申亚梅. 木兰科植物光合作用的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(12): 135-138.  
LIU L, MAO Y C, WANG Q Y, SHEN Y M. Research progress on photosynthesis of *Magnoliaceae* plants[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2007, 36(3): 8-11, 36. (in Chinese)
- [7] 王海珍,韩路,徐雅丽,牛建龙. 胡杨异形叶光合作用对光强与 CO<sub>2</sub> 浓度的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1099-1109.  
WANG H Z, HAN L, XU Y L, NIU J L. Photosynthetic responses of the heteromorphic leaves in *Populus euphratica* to light intensity and CO<sub>2</sub> concentration[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(10): 1099-1109. (in Chinese)
- [8] 许中秋,隋德宗,谢寅峰,王俊毅. 两个乌桕新品种苗木光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 93-100.  
XU Z Q, SUI D Z, XIE Y F, WANG J Y. Comparison of photosynthetic characteristics of two new *Triadica sebifera* varieties[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 45(1): 93-100. (in Chinese)
- [9] 周袁慧子,王艺锦,潘会彪,王凌晖,滕维超,周维. 大花紫薇幼苗光合、荧光特性对光照的响应[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(24): 6488-6492.  
ZHOUYUAN H Z, WANG Y J, PAN H B, WANG L H, TENG W C, ZHOU W. Response of photosynthetic and fluorescence characteristics of *Lagerstroemia speciosa* seedling to different light conditions[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(24): 6488-6492, 6497. (in Chinese)
- [10] 高传友. 广西地区 15 种典型园林观赏植物的耐阴性及光合特性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 209-214.  
GAO C Y. Negative tolerance and photosynthetic characteristics of 15 typical garden ornamental plants in Guangxi[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 209-214. (in Chinese)
- [11] 戚嘉敏,许逸林,张鹏,奚如春,陆晨,高乐. 3 种木兰科珍稀濒危树种的光合及固碳特性[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 90-95.  
QI J M, XU Y L, ZHANG P, XI R C, LU C, GAO L. Photosynthetic and carbon sequestration characteristics of three rare and endangered species of Magnoliaceae[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(3): 90-95. (in Chinese)
- [12] 吴永彬,冯志坚. 华南农业大学树木园稀有濒危植物和国家重点保护植物的迁地保护[J]. 华南农业大学学报, 2006(3): 118-121.  
WU Y B, FENG Z J. Rare and endangered plants and national key protected plants for ex situ conservation in South China Agricultural University arboretum[J]. Journal of South China Agricultural University, 2006(3): 118-121. (in Chinese)
- [13] 叶子飘. 光合作用对光响应新模型及其应用[J]. 生物数学学报, 2008, 23(4): 710-716.  
YE Z P. A new model of photosynthesis response to light and its application[J]. Journal of Biomathematics, 2008, 23(4): 710-716. (in Chinese)
- [14] 张迎辉,王雪梅,连巧霞. 5 个彩叶树种光响应曲线特性研究[J]. 热带作物学报, 2019, 40(9): 1737-1741.  
ZHANG Y H, WANG X M, LIAN Q X. Light response

- curve of photosynthesis of five colored-leaf trees[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(9): 1737-1741. (in Chinese)
- [15] 何海洋, 彭方仁, 张瑞, 徐建南, 吴斌, 李小飞, 苏文川. 不同品种美国山核桃嫁接苗光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 19-25.  
HE H Y, PENG F R, ZHANG R, XU J N, WU B, LI X F, SU W C. Photosynthetic characteristics of grafting plants of different pecan varieties[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(4): 19-25. (in Chinese)
- [16] 汤文华, 窦全琴, 潘平平, 季艳红, 谢寅峰. 不同薄壳山核桃品种光合特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 81-88.  
TANG W H, DOU Q Q, PAN P P, JI Y H, XIE Y F. Photosynthetic characteristics of grafted plants of different *Carya illinoensis* varieties[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(3): 81-88. (in Chinese)
- [17] 刘熙, 宋荣, 马英姿, 周诗雨, 刘智. 七种黄精属植物的光合特性[J]. 经济林研究, 2021, 39(2): 181-187.  
LIU X, SONG R, MA Y Z, ZHOU S Y, LIU Z. Photosynthetic characteristics of seven *Polygonatum* species[J]. Non-wood Forest Research, 2021, 39(2): 181-187. (in Chinese)
- [18] 吴俊文, 刘珊, 李吉跃, 何茜, 苏艳, 邱权, 白晶晶, 王燕, 贾朋. 干旱胁迫下广东石漠化地区造林树种光合和耗水特性[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3429-3440.  
WU J W, LIU S, LI J Y, HE Q, SU Y, QIU Q, BAI J J, WANG Y, JIA P. Photosynthetic and water consumption of tree species utilized for afforestation of rocky desert in Guangdong province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3429-3440. (in Chinese)
- [19] SOBRADO M A. Relation of water transport to leaf gas exchange properties in three mangrove species[J]. Trees (Berlin, West), 2000, 14(5): 258-262.
- [20] 包永志, 刘廷玺, 段利民, 王冠丽, 祁秀娇, 黄天宇, 黎明扬. 科尔沁沙地混生小叶锦鸡儿和人工杨树光合特性及其对气候的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 420-429.  
BAO Y Z, LIU T X, DUAN L M, WANG G L, QI X J, HUANG T Y, LI M Y. Photosynthetic traits of *Caragana microphylla* and *Populus* spp. and their responses to climate in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 420-429. (in Chinese)
- [21] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997(4): 241-244.  
XU D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis[J]. Plant Physiology Communications, 1997(4): 241-244. (in Chinese)
- [22] 高冠龙, 冯起, 张小由, 司建华, 鱼腾飞. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 929-937.  
GAO G L, FENG Q, ZHANG X Y, SI J H, YU T F. An overview of stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis of plants[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 929-937. (in Chinese)
- [23] 孙燕, 赵青云, 龙宇宙, 董云萍, 林兴军, 谭军. 不同育苗基质下咖啡种间嫁接苗生长及光合特性[J]. 热带作物学报, 2021, 42(6): 1606-1612.  
SUN Y, ZHAO Q Y, LONG Y Z, DONG Y P, LIN X J, TAN J. Growth and photosynthetic characteristics of inter-specific grafting coffee under different mixed substrate[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(6): 1606-1612. (in Chinese)
- [24] 王力刚, 张玉柱, 崔琳. 黑龙江省的西部松嫩平原 6 个杨树品种光合特征[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(8): 40-44.  
WANG L G, ZHANG Y Z, CUI L. Photosynthetic characteristics of six poplar varieties in the Songnen Plain of western Heilongjiang province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(8): 40-44, 63. (in Chinese)
- [25] 刘倩, 仲启铖, 曹流芳, 王璐, 陆颖, 王开运. 滨海围垦区几种耐盐乔灌木的光合特性比较[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 113-118.  
LIU Q, ZHONG Q C, CAO L F, WANG L, LU Y, WANG K Y. Comparison in photosynthetic characteristics of several salt-tolerant species of trees and shrubs coastal polders[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(1): 113-118. (in Chinese)
- [26] 牛贺雨, 刘丹, 彭梦婕, 徐晴晴, 王献.  $^{60}\text{Co-}\gamma$  辐射对大花紫薇叶绿素荧光特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(1): 23-28.  
NIU H Y, LIU D, PENG M J, XU Q Q, WANG X. Effect of  $^{60}\text{Co-}\gamma$  radiation on chlorophyll fluorescence characteristics of *Lagerstroemia speciosa* Pers.[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(1): 23-28. (in Chinese)
- [27] 盘李军, 洗杆标, 陈伟光, 苏木荣, 张卫强, 潘文, 陈建新. 深山含笑等 18 个景观树种光合生理特性研究[J]. 广东林业科技, 2013, 29(4): 33-37.  
PAN L J, XIAN G B, CHEN W G, SU M R, ZHANG W Q, PAN W, CHEN J X. Study on photosynthetic physiological characteristics of 18 kinds of landscape trees including *Michelia maudiae*[J]. Forestry and Environmental Science, 2013, 29(4): 33-37. (in Chinese)