

3种山茶科植物苗期光合特性的研究^{*}

郭彩霞 朱铨楠 杨佳曼 武宇凡
谢子才 肖可菁 李 铄 陈红跃

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要 以杜鹃红山茶 *Camellia azalea*、山茶 *C. japonica* 和金花茶 *C. petelotii* 3 种山茶科植物苗木为试验对象, 测定其叶片光合特性参数和叶绿素荧光参数。结果表明: 3 种山茶科植物光合特性参数差异显著, 其中光合速率强弱表现为山茶 ($4.574 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 杜鹃红山茶 ($1.881 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 金花茶 ($0.855 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 蒸腾速率强弱表现为山茶 ($1.774 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 杜鹃红山茶 ($0.608 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 金花茶 ($0.339 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 气孔导度强弱表现为山茶 ($0.060 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 杜鹃红山茶 ($0.020 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 金花茶 ($0.010 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 光能利用率强弱表现为山茶 ($0.005 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) > 杜鹃红山茶 ($0.002 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) > 金花茶 ($0.001 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)。3 种山茶科植物叶绿素荧光参数差异显著, 其中光下最大荧光产量强弱表现为杜鹃红山茶 (1.825) > 金花茶 (1.611) > 山茶 (1.442), PS II 实际光量子效率强弱表现为山茶 (0.095) > 金花茶 (0.070) > 杜鹃红山茶 (0.067), 表观电子传递速率强弱表现为山茶 (7.551) > 金花茶 (5.697) > 杜鹃红山茶 (5.477)。总体上看, 光合能力山茶 > 杜鹃红山茶 > 金花茶。

关键词 山茶科; 光合特性; 叶绿素荧光

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 05-0097-05

Study on the Photosynthetic Characteristics of Three Camellia Plants at Seedling Stage

GUO Caixia ZHU Hua'nan YANG Jiaman WU Yufan
XIE Zicai XIAO Kejing LI Shuo CHEN Hongyue

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong, 510642, China)

Abstract Three species of Camellia seedlings, *Camellia azalea*, *C. japonica* and *C. petelotii* were used as test objects to determine the leaf photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters. The results showed that the photosynthetic parameters of the three species of Camellia plants were significantly different, among which the photosynthetic rate was as follows: *C. japonica* ($4.574 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *C. azalea* ($1.881 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *C. petelotii* ($0.855 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). The transpiration rate is as follows: *C. japonica* ($1.774 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *C. azalea* ($0.608 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *C. petelotii* ($0.339 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). The strength of the stomatal conductance is *C. japonica* ($0.060 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *C. azalea* ($0.020 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > *C. petelotii* ($0.010 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). The light energy utilization rate performance is represented by *C. japonica* ($0.005 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) > *C. azalea*

^{*} 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2017KJCX010, 2014KJCX015)。

第一作者: 郭彩霞 (1995—), 女, 在读硕士, 研究方向为园林植物与城市绿化, E-mail: 2500246508@qq.com。

通信作者: 陈红跃 (1964—), 男, 教授, 主要从事森林培育研究, E-mail: 34752952@qq.com。

($0.002 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) > *C. petelotii* ($0.001 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$). The chlorophyll fluorescence parameters of the three species of *Camellia* plants have significant differences. Among them, the maximum fluorescence yield under light is as follows: *C. azalea* (1.825) > *C. petelotii* (1.611) > *C. japonica* (1.442), and the actual light quantum efficiency of PS II is represented by *C. japonica* (0.095) > *C. petelotii* (0.070) > *C. azalea* (0.067), the apparent electron transfer rate is *C. japonica* (7.551) > *C. petelotii* (5.697) > *C. azalea* (5.477). In general, photosynthetic capacity *C. japonica* > *C. azalea* > *C. petelotii*.

Key words *Camellia*; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence parameters

光合作用是植物最重要的生理过程之一, 是植物生长发育的物质和能量来源^[1-2]。通过研究不同植物的光合特性, 可作为判断植物生长、发育态势、产量和抗逆性的指标^[3]。叶绿素荧光分析能够表征植物对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面的能力, 运用此技术可研究植物光合生理功能, 以及各外界因子的影响^[4]。

金花茶 *Camellia petelotii* 属于山茶科山茶属, 是国家一级重点保护植物^[5]。该植物在国外被誉为“植物界大熊猫”、“茶族皇后”。金花茶喜温暖湿润气候, 观赏性极高, 兼有药用价值、经济价值、科研价值。山茶 *Camellia japonica* 属于山茶科山茶属, 为中国的传统园林花木, 喜温暖、湿润和半阴环境。具有较高的药用价值, 还兼有观赏和食用价值。杜鹃红山茶 *Camellia azalea* 是山茶科山茶属植物, 喜光而耐半阴, 是我国特有的山茶科濒危植物, 主要分布在我国广东省阳春市鹅凰嶂省级自然保护区。前人关于山茶科的光合特性研究较少, 主要集中在红山茶叶绿素荧光特性的比较, 结果显示红山茶不同亚组、同一亚组不同系之间的叶绿素荧光参数值存在显著差异, 且亚组间大于亚组内^[6]; 王坤、韦晓娟等^[7]比较分析 12 种金花茶品种的光合生理特性, 结果说明 12 种金花茶的光合特性具有显著差异, 越南引种的金花茶对本地环境具有极强的适应性。唐炜、谭晓凤等^[8]对山茶属 3 个物种光合特性日变化等生理指标进行分析, 结果表明攸县油茶有更好的光合效率。张方秋等^[9]探讨杜鹃红山茶光响应曲线模型的适用性, 结果显示杜鹃红山茶叶片光合速率与光强之间存在非线性关系, 直角双曲线修正模型的拟合效果最佳。通过研究山茶、金花茶、杜鹃红山茶的光合特征以及叶绿素荧光特征, 能为山茶、金花茶、杜鹃红山茶的栽培提供基础资料, 为花木资源的培育和筛选研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在华南农业大学校园内, 其地理位置为东经 $113^{\circ} 21' 21.31''$, 北纬 $23^{\circ} 9' 45.43''$, 属海洋性亚热带季风气候, 温暖多雨、光热充足、夏季长、霜期短。年平均气温为 $20.8 \sim 22.8^{\circ}\text{C}$; 一年中最热的月份是 7 月, 月平均气温达 $28.1 \sim 28.7^{\circ}\text{C}$ 。最冷月为 1 月份, 月平均气温为 $9 \sim 16^{\circ}\text{C}$ 。平均相对湿度 77%, 年降雨量约为 1 720.4 mm。

1.2 试验材料

3 种苗木的生长环境和日常管理一致。每天傍晚浇一次水。选用生长健壮、无病虫害、长势一致的苗木作为试验材料。杜鹃红山茶、山茶和金花茶平均苗高分别为 32.79、25.06 和 34.12 cm; 平均地径分别为 0.51、0.82 和 0.65 cm。

1.3 试验方法

1.3.1 瞬时光合特征测定 于 2021 年 1 月中旬, 连续 3 d, 每天天气晴朗的上午 9:00—11:30 时, 各挑选 3 株生长一致并具代表性的当年生成熟叶 3 片为材料, 并作标记, 采用 Li-6400XT 便携式光合分析仪, 测定指标包括叶片净光合速率 (Net photosynthesis, P_n)、气孔导度 (Stomatal conductance, G_s)、胞间二氧化碳浓度 (Intercellular CO_2 concentration, C_i)、蒸腾速率 (Transpiration rate, Tr)、饱和蒸气压亏缺 (Vapor pressure deficit, V_{pd})、气孔限制值 (Stomatal limitation value, L_s)、水分利用效率 (Water use efficiency, WUE)、光能利用率 (Utility rate of luminous energy, LUE)。测量时设定光照强度为 $1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度为 25°C , 空气流量为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为环境浓度。 L_s 、WUE 和 LUE 的计算公式分别如下^[10]:

$$L_s = 1 - C_i/C_a;$$

$WUE = Pn/Tr;$

$LUE = Pn/1000。$

1.3.2 叶绿素荧光参数的测定 在测定光合作用的同时，测定自然条件下 3 种苗木的叶绿素荧光参数。选取植物枝条顶端向阳叶片中充分展开的叶片中部进行活体测定，同种植物各 3 株，每株植物测定 3 个叶片，每叶片重复 2~3 次。采用 PAM-2500 便携式调制叶绿素荧光仪，先对叶片进行充分暗适应 30 min，选择非化学淬灭（Non-photochemical quenching,NPQ）模式，再经过一小段时间（1 ~ 2 min），待荧光水平稳定后测定光下最大荧光产量（Maximum fluorescence output, Fm' ）、PSII 实际光量子效率（Actual optical quantum efficiency, $Y(II)$ ）、调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$ 、非调节性能量耗散的量子产量 $Y(NO)$ 、NPQ、表观电子传递速率（Apparent electron transfer rate, ETR）等参数，测定时间和植物叶片光合特征参数的测定同步。

1.4 分析方法

利用 Microsoft Excel 2010 软件对试验结果进行初步分析和作图，利用 SPSS19.0 统计分析软件进行方差分析和 Duncan 多重比较，显著水平设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 叶片瞬时光合特性参数

3 种山茶科叶片瞬时光合特性参数的测定结果见表 1。由表可知，在 3 种苗木数中，山茶的 Pn 、 Gs 、 Tr 都显著高于其他两种植物；同时杜鹃红山茶的 Pn 、 Gs 、 Tr 也显著高于金花茶；金花茶的 Pn 、 Gs 、 Tr 最低。

金花茶的 Ci 和 $Vpdl$ 最高，山茶的 Ci 和 $Vpdl$ 最低。山茶的 Ls 最大，杜鹃红山茶的 Ls 次之，金花茶的 Ls 最小。山茶的水分利用效率（WUE）最高，金花茶的 WUE 最低。LUE 是指植物经过光合作用所产生的有机物中所含的能量，与照射在单位土地上的日光能量的比值。它能反映植物对光辐射的利用效率^[11]。其中山茶的 LUE 最高，而金花茶的 LUE 最低。杜鹃红山茶的各项光合特性指标居中；山茶的 Pn 、 Gs 、 Tr 、 Ls 、WUE、LUE 值皆最高，而 $Vpdl$ 和 Ci 值均最低，金花茶的多项光合指标值均偏低。

方差分析结果表明，3 种植物之间的 Pn ($F=65.354 > F_{0.01}=4.796$)、 Gs ($F=90.986 > F_{0.01}=4.796$)、 Tr ($F=96.679 > F_{0.01}=4.796$)、 $Vpdl$ ($F=100.588 > F_{0.01}=4.796$)、LUE ($F=63.534 > F_{0.01}=4.796$) 的差异都极显著。 Ci ($F=0.423 < F_{0.05}=3.076$)、气孔限制值 (Ls) ($F=0.285 < F_{0.05}$)

表 1 3 种山茶科各项光合特性指标的多重比较结果

Table 1 Measurement results of various photosynthetic characteristics of three kinds of Camellia

物种 Species	净光合速率 $Pn/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 $Gs/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳浓度 $Ci/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 $Tr/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和蒸汽压亏缺 $Vpdl/\text{kPa}$	气孔限制值 Ls	水分利用效率 WUE/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	光能利用率 LUE/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)
金花茶	0.855 ± 0.064c	0.010 ± 0.000c	286.167 ± 7.547a	0.339 ± 0.015c	3.264 ± 0.014a	0.347 ± 0.017a	2.482 ± 0.134a	0.001 ± 0.000c
山茶	4.574 ± 0.330a	0.060 ± 0.004a	273.535 ± 13.211a	1.774 ± 0.122a	2.995 ± 0.017c	0.371 ± 0.030a	2.914 ± 0.257a	0.005 ± 0.000a
杜鹃红山茶	1.881 ± 0.247b	0.020 ± 0.002b	279.375 ± 7.228a	0.608 ± 0.054b	3.069 ± 0.010b	0.360 ± 0.016a	2.785 ± 0.149a	0.002 ± 0.000b

注：表中为平均值 ± 标准误差，不同字母表示物种之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。

Note: mean ± SE were shown. different letters indicate significant differences between species.

表 2 3 种山茶科各项叶绿素荧光的测定结果

Table 2 Measurement results of chlorophyll fluorescence of three kinds of Camellia

物种 Species	光下最大荧光产量 Fm'	PS II 实际光量子效率 $Y(II)$	调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$	非调节性能量耗散的量子产量 $Y(NO)$	非光化学淬灭系数 NPQ	表观电子传递速率 ETR
金花茶	1.611 ± 0.058b	0.070 ± 0.005b	0.182 ± 0.025a	0.748 ± 0.029a	0.322 ± 0.055a	5.697 ± 0.482b
山茶	1.442 ± 0.054c	0.095 ± 0.005a	0.200 ± 0.031a	0.716 ± 0.035a	0.429 ± 0.082a	7.551 ± 0.551a
杜鹃红山茶	1.825 ± 0.056a	0.067 ± 0.004b	0.243 ± 0.018a	0.690 ± 0.021a	0.396 ± 0.037a	5.477 ± 0.430b

注：表中为平均值 ± 标准误差，不同字母表示指标之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。

Note: mean ± SE were shown. different letters indicate significant differences between species.

=3.076)、WUE ($F=1.394 < F_{0.05}=3.076$) 的差异不显著。

2.2 叶片叶绿素荧光参数

由表 2 可知, 杜鹃红山茶的 F_m' 值最高, 而山茶的最低。PS II 实际光量子效率 $Y(II)$ 反应了植物叶片的实际光合效率。从表中可知, 山茶的 $Y(II)$ 值处在最高水平, 杜鹃红山茶的 $Y(II)$ 值处在最低水平。3 种植物的调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$ 也有差异, 杜鹃红山茶的 $Y(NPQ)$ 值最高, 次之是山茶, $Y(NPQ)$ 值最低是金花茶。非调节性能量耗散的量子产量 $Y(NO)$ 表示植物通过其他形式减少进入光化学途径的能量占总吸收能量的比值, 是光损伤的重要指标^[12]。若 $Y(NO)$ 比较高, 则说明光化学能量转换和保护性的调节机制(如热耗散)不足以将植物吸收的光能完全消耗掉, 这时的植物可能已经受到损伤^[13]。从表中可知, 金花茶处于最高水平, 其次是山茶; 杜鹃红山茶处于最低水平。

NPQ 是指以热能的形式耗散掉的那一部分光能, 反映了植物叶片热耗散的情况, 反映的是 PSII 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递以热的形式耗散掉的光能部分^[14]。当 PS II 反应中心天线色素吸收了过量的光能时, 如不能及时地耗散将对光合机构造成失活或破坏, 所以非光化学淬灭是一种自我保护机制, 对光合机构起一定的保护作用^[15], 金花茶和杜鹃红山茶的 NPQ 值低于山茶的 NPQ 值。ETR 反映了光合能量的传递速率, 由表可知, 山茶的 ETR 最高, 杜鹃红山茶的 ETR 最低。

方差分析结果表明。3 种植物之间的叶绿素荧光特征参数中, F_m' ($F=11.829 > F_{0.01}=4.796$)、 $Y(II)$ ($F=9.879 > F_{0.01}=4.796$)、ETR ($F=5.394 > F_{0.01}=4.796$) 的差异都极显著。($F=1.563 < F_{0.05}=3.076$) ($F=1.025 < F_{0.05}=3.076$) ($F=0.809 < F_{0.05}=3.076$) 的差异不显著。

3 讨论与结论

本实验条件下, 3 种山茶科植物的 P 、 G_s 、 Tr 、 V_{pdl} 、LUE 的差异都显著。而 C_i 、 L_s 、WUE 的差异不显著。说明了 3 种山茶科植物的光合作用能力、水分利用能力等差别较大, 还反映 3 种山茶科植物对同一环境的光合作用能力存在很大的差别。 P_n 值能直接反映出植物的光合作用能

力^[16], 3 种山茶科植物山茶的 P_n 值最高, 说明同等条件下山茶的光合能力强; 山茶的 G_s 最高, 则说明山茶的气孔导度高。 Tr 值是植物单位叶面积瞬间的耗水量, 能够反应出不同植物的耗水潜力^[17]。山茶的 Tr 值最高, 从生产实践的方面看, 在高温少雨以及干旱的环境中, 应及时浇水, 避免植物因蒸腾作用而发生叶片缺水的状态, 这样也有利于植物的健康生长。而存在这种差异可能和物种本身的内部结构和生理过程有关^[18]。 C_i 的大小取决于叶片周围空气的二氧化碳浓度、气孔导度以及叶肉细胞的光合活性^[19]。由于 3 种山茶科所处环境相近, C_i 值相差不显著。 L_s 值指随着叶片水分散失, 气孔开度减小, 气孔阻力增加, 二氧化碳进入叶片受阻, 导致植物光合速率下降^[20]。3 种山茶科植物 L_s 值相差不显著, 说明外界环境一致。3 种山茶科植物 V_{pdl} 值相差显著, 而外界环境一致, 可能和当时的测定时间以及测定时光强的高低有关^[10]。3 种山茶科的 WUE 值差别不大, 而 LUE 值相差显著, 山茶的 LUE 值最大, 杜鹃红山茶次之, 金花茶的最小, 说明山茶的光合能力较高。3 种山茶科植物中, 山茶光合能力强, 适宜栽培在阳光充足, 水肥条件好的地方, 而金花茶是低光合、低蒸腾、低水分利用率, 适宜栽培在干旱, 阴凉的环境中, 而杜鹃红山茶介于山茶和金花茶之间。

通常情况下, 植物叶片叶绿素吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散 3 种途径来消耗, 这 3 种途径之间存在着此消彼长关系, 光合作用和热耗散的变化会引起荧光的相应变化。因此, 可以通过对荧光的观测来探究植物光合作用和热耗散的情况^[21]。

研究结果表明, 3 种山茶科植物的 F_m' 、 $Y(II)$ 、ETR 的种间差异显著, 说明 3 种山茶科植物传递光能的能力、光能转化效率的同化力以及光合能量传递速率的能力差异明显。一般认为, ETR 值低, $Y(II)$ 也低, 且对环境的适应能力相对较弱, 山茶的 ETR 和 $Y(II)$ 最高, 杜鹃红山茶的 ETR 和 $Y(II)$ 最低^[22]。这有可能是 PS II 吸收的光能未全部用于光合电子传递, 部分以热能耗散掉, 这也是一种自我保护机制, 对光合系统起一定的保护作用^[23]。3 种山茶科植物的调节性能量耗散的 (NPQ)、非调节性能量耗散的 $Y(NO)$ 、NPQ 相差不显著, 说明 3 种山茶科植物光损伤和热耗散

的程度相当。没有受到叶片中光合酶活性、二氧化碳扩散阻力尤其是气孔阻力的影响^[24]。总体来看, 山茶的 Y(II)、NPQ、ETR 值均最高, 而 Y(N-PQ) 和 Y(NO) 是植物光保护的指标, 山茶的 Y(N-PQ) 和 Y(NO) 值相对较低, 说明山茶是光合速率较高的植物, 同时还具有较强的剩光能耗散能力。而金花茶的 Y(NO) 值最高, 说明其消耗的光能少, 影响光合作用的进行^[25]。杜鹃红山茶的光合速率介于山茶和金花茶之间。

综上所述, 3 种同科的植物光合特性相差明显, 山茶的光合速率最强, 推测栽培时需要日照充足的环境, 能耐一定的强光, 而金花茶光合速率最弱, 适宜栽种在阴凉的环境, 在生产培育中应注意遮阴。杜鹃红山茶则处于山茶和金花茶之间。本次研究是在相同环境下测定 3 种植物的瞬时光合特性和叶片叶绿素荧光特性, 易受其它环境参数因子影响, 故今后还需要进一步完善研究, 为山茶科植物的研究和栽培提供理论参考。

参考文献

- [1] 许大全. 回忆光合作用研究五十年[J]. 植物生理学报, 2016, 52(11): 1593-1608.
- [2] LOMBARDINI L, RESTREPO-DIAZ H, VOLDER A. Photosynthetic light response and epidermal characteristics of sun and shade pecan leaves[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science American Society for Horticultural Science, 2009, 134(3): 372-387.
- [3] 苏培玺, 严巧娣. C4 荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征[J]. 生态学报, 2006(1): 75-82.
- [4] 刘落鱼, 余汉基, 周彤彤, 等. 10 种茶花叶片的光合和荧光特性[J]. 经济林研究, 2018, 36(4): 145-149.
- [5] 宾晓芸, 唐绍清, 周俊亚, 等. 金花茶遗传多样性的 ISSR 分析[J]. 武汉植物学研究, 2005(1): 20-26.
- [6] 吕芳德, 徐德聪, 侯红波, 等. 5 种红山茶叶绿素荧光特性的比较研究[J]. 经济林研究, 2003, 21(4): 4-7.
- [7] 王坤, 韦晓娟, 李宝财, 等. 12 种金花茶组植物光合生理特性比较[J]. 经济林研究, 2019, 37(1): 80-86.
- [8] 唐炜, 谭晓风, 袁德义. 山茶属 3 个物种光合特性日变化[J]. 北方园艺, 2010(9): 5-8.
- [9] 张方秋, 杨会肖, 徐斌等. 杜鹃红山茶的光响应特性及其最适模型筛选[J]. 生态环境学报, 2015, 24(10): 1599-1603.
- [10] 刘玉玲, 刘信凯, 湛光辉, 等. 杜鹃红山茶与 3 个山茶栽培品种光合日变化特性研究[J]. 广东林业科技, 2011, 27(1): 17-22.
- [11] 许大全, 丁焕根, 苏丽英, 等. 红豆草和苜蓿的光合效率比较研究[J]. 生态学报, 1991(1): 89-91.
- [12] SCHREIBER U. Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview[J]. Chlorophyll a Fluorescence: Advances in Photosynthesis and Respiration, 2004, 19: 279-319.
- [13] 刘爱荣, 陈双臣, 王森博, 等. 高温胁迫对番茄幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 145-148.
- [14] KRAMER D M, JOHNSON G, KIIRATS O, et al. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes [J]. Photosynthesis Research, 2004, 79(2): 209-218.
- [15] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999(4): 444-448.
- [16] 李云霞, 张艺伟, 郭艳珊, 等. 4 种独蒜兰属植物光合特性比较研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(5): 891-897.
- [17] 惠利省, 徐立安, 王章荣. 马褂木不同种源苗期光合特性差异分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3222-3224; 3233.
- [18] 唐炜, 谭晓风, 袁德义. 山茶属三个物种光合特性日变化[J]. 北方园艺, 2010(9): 5-8.
- [19] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1): 64-66.
- [20] 姚庆群, 谢贵水. 干旱胁迫下光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 热带农业科学, 2005(4): 84-89.
- [21] 郑淑霞, 上官周平. 8 种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较[J]. 生态学报, 2006(4): 1080-1087.
- [22] 徐双, 刘英, 曾炳山, 等. 南洋楹 5 个无性系苗木光合作用特性研究[J]. 林业与环境科学, 2014, 30(5): 19-23.
- [23] 刘爱荣, 陈双臣, 王森博, 等. 高温胁迫对番茄幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 145-148.
- [24] 卢广超, 张柔, 叶龙华, 等. 4 种彩叶植物叶绿素荧光参数日变化研究[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(1): 25-28; 68.
- [25] 陈伟光, 张卫强, 郭艳珊, 等. 木荷等 6 种阔叶树种光合生理特性比较[J]. 林业与环境科学, 2010, 26(4): 12-17.