

竹节树无性系叶片生长特性与叶绿素荧光^{*}

黄东兵¹ 彭莉霞¹ 曾振宇² 黄小丹¹ 罗 中¹ 石茗馨¹

(1. 广东生态工程职业学院, 广东 广州 510520; 2. 广东如春园林设计有限公司, 广东 广州 510530)

摘要 对优选的 6 个竹节树 (*Carallia brachiata*) 无性系叶片性状 (叶片干质量、叶面积、比叶重)、叶绿素相对含量和叶绿素荧光参数进行测定, 并作单因素方差分析和聚类分析。结果表明: 竹节树不同无性系叶片的干质量和叶面积差异不显著, 叶绿素相对含量具有显著的差异性, 不同无性系具有不同的光能吸收和利用能力; 不同的无性系其叶绿素荧光的部分参数 (F_o 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 $\Phi PS II$ 、ETR) 差异显著; 竹节树无性系 C-15 植株与其他无性系相比具有较高水平的实际光化学效率 ($\Phi PS II$) 值, 而非化学猝灭系数 (q_N) 较低, 同时具有较高的表观电子传递速率 (ETR), 表明竹节树无性系 C-15 有较高的光呼吸; 相关分析表明, 叶片生长较好的无性系其叶绿素相对含量较高, 同时也具有较高的 $PS II$ 光化学效率; 无性系 C-15 号具有较高的叶绿素相对含量及较强的光化学特性, 可进行大力推广研发。

关键词 竹节树; 叶片性状; 叶绿素相对含量; 叶绿素荧光

中图分类号: Q945.79 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053 (2017) 04-0019-06

Analysis on Leaf Growth Characteristics and Chlorophyll Fluorescence of *Carallia brachiata* Clones

HUANG Dongbing¹ PENG Lixia¹ ZENG Zhenyu² HUANG Xiaodan¹
LUO Zhong¹ SHI Mingxin¹

(1. Guangdong Eco-engineering Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

2. Guangdong Ruchun Landscape Design Co. Ltd, Guangzhou, Guangdong 510530, China)

Abstract In this paper, the leaf traits (including the leaf dry weight, leaf area, and specific leaf weight), chlorophyll relative content and chlorophyll fluorescence parameters of the six superior *Carallia brachiata* clones were determined and analyzed. And the one-way ANOVA and cluster analysis was carried out. The results showed that there were no significant differences in leaf dry weight and leaf area between leaves of different clones, and the relative contents of chlorophyll were the significant difference. Different clones had different ability of light energy absorption and utilization. Some parameters (F_o , F_v/F_m , F_v/F_o , $\Phi PS II$, ETR) of chlorophyll fluorescence among different clones were significantly different. The NO. C-15 clone had a higher level of the photochemical efficiency value ($\Phi PS II$) than the other clones, while the non-chemical quenching coefficient (q_N) was relatively low, and had a high electron transport rate (ETR). The correlation analysis showed that the chlorophyll content of the clones with better leaf growth was higher, and that of the clones had the higher $PS II$ photosynthetic efficiency. The NO. C-15 clone had higher relative chlorophyll content and stronger photochemical properties, which could be vigorously promoted to the future research and development.

Key words *Carallia brachiata*; leaf traits; chlorophyll relative content; chlorophyll fluorescence

^{*} 基金项目: 校级课题“竹节树在高污染区园林绿化中的应用”(2015kykt-xj-jb02)。

第一作者: 黄东兵 (1968—), 男, 副教授, 主要从事园林规划设计、园林植物应用研究, E-mail: 1057964927@qq.com。

通信作者: 彭莉霞 (1980—), 女, 副教授, 主要从事园林植物应用研究, E-mail: 20186598@qq.com。

竹节树 (*Carallia brachiata*) 属红树科 (Rhizophoraceae) 常绿小乔木, 是山地雨林、常绿季雨林森林群落的常见树种, 主要分布在我国东南部的广东省、海南省及广西省, 是我国特有树种^[1-2]。竹节树因其树形优美, 枝叶繁茂, 远观如巨大绿伞, 被作为绿化树种来引种驯化。竹节树根系发达, 抗风力强, 对土壤要求不高, 容易成活, 在材用、食用、药用方面也具有很大潜力^[3-5]。近年来, 竹节树虽广泛应用于绿化工程, 但对其生理生态特性还认识较浅, 这也是繁殖育苗需首要考虑的关键因素。在国内对竹节树的研究上仅在原生地范围内对引种嫁接繁育的方面有所涉及, 而对光合生理特性研究较少^[6-7]; 梁惠凌等^[8]对同科同属的锯叶竹节树 (*C. diplopetala*) 幼龄和成龄植株的光合特性进行研究表明, 锯叶竹节树的光合能力较强, 对环境的适应范围较广, 幼树对强光的适应性较差; 田雪琴等^[6]用不同栽培基质和激素栽培竹节树, 结果表明不同基质间竹节树幼苗地径、叶片叶绿素 b 含量和质膜透性有显著差异。

为了促进竹节树在全国范围园林规划中的推广应用, 首要工作是扩大优质种源, 其中筛选优良种质是关键。近几年, 国内外各育种单位扩大了竹节树种质资源的收集范围并发掘其优良基因, 旨在寻找高遗传特性的基因种。植物的光合能力对物种的引种栽培具有重要的指导意义, 光合能力是植物生物产量的基础, 叶绿素作为植物光合作用必不可少的光催化剂, 其含量和比值常作为植物适应环境的重要评价因子^[9]; 叶绿素荧光与光合作用反应过程紧密相关, 叶绿素荧光技术是一种快速、灵敏、无损伤的技术, 是光合作用的探针^[10]。为了明确同一生长区域不同无性系之间光合生理的差异, 本文以通过前期筛选的 6 个竹节树优良无性系为研究材料, 对其叶片的性状 (叶面积、比叶重)、叶绿素含量和叶绿素荧光特性进行测定, 通过比较分析, 旨在筛选竹节树优良单株, 为竹节树的引种栽培及园林应用提供材料及科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于广东生态工程职业学院资源收集圃内进行, 研究地位于 113°22'3.19"E, 23°11'46.90"N, 平均海拔约 200 m, 属于亚热带季风气候, 全年雨

热同期, 雨量充沛, 夏季长, 霜期短, 年平均气温 20~22 ℃, 年平均降雨量 1 982.7 mm。土壤以红壤为主, pH 为 5。

1.2 试验材料

选取 6 个竹节树优良无性系 4 a 生嫁接植株, 平均株高 2.5 m, 胸径 30 cm, 冠幅 2.06 m × 2.58 m, 每个无性系选择 3 株长势优良的植株。

1.3 研究方法

从每个无性系中选取 3 株植株, 从东、南、西、北 4 个方位分别选取植株中部外侧相同高度、无病虫害的 4~5 片成熟叶片进行叶片生长性状、叶绿素相对含量和叶绿素荧光参数的测定。采用 Am300 叶面积仪扫描叶面积, 然后将叶片置于烘箱内烘干至恒重, 用电子天平称取叶片干质量, 并计算比叶重。采用便携式叶绿素测定仪 (CCM-200) 测定叶绿素相对含量 (CCI), 每片叶片测定 3 次, 取平均值。

于 2017 年 5 月选择晴朗天气用便携式调制叶绿素荧光仪 (LI-6400F, USA) 进行测定。测量时用暗适应夹先对叶片进行黑暗处理 20 min 后测定叶片初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m)、可变荧光 (F_v)、PS II 的非环式电子传递的量子效率 ($\Phi_{PS II}$)、PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 的潜在活性 (F_v/F_0)、光化学猝灭系数 (qP)、非光化学猝灭系数 (qN) 和表观电子传递速率 (ETR)。

1.4 数据分析

所有数据采用 Microsoft excel 2010 整理, 采用 SPSS 19.0 进行数据分析, 平均值之间的比较采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并采用 LSD 法进行多重比较, 叶绿素荧光参数间采用 Pearson 相关分析法, 聚类分析采用最短距离和欧式距离聚类法。

2 结果与分析

2.1 竹节树叶片生长性状及叶绿素相对含量的差异性分析

如表 1 所示, 竹节树无性系间叶片干质量、叶面积、比叶重的差异均不显著, 而叶绿素相对含量具有极显著差异 ($P < 0.01$)。由表 1 可知, 无性系 C-15 叶绿素相对含量最大, 与无性系 C-8 具有差异但未达显著水平, 与其余植株差异显著, 无性系 C-25、C-26 的叶绿素相对含量最低, 这表明不同的无性系在吸收和利用光能方面差异较大。

表 1 竹节树无性系植株间叶片生长性状和叶绿素相对含量的差异

无性系	叶片干质量/g	叶面积/cm ²	比叶重/(g·cm ⁻²)	叶绿素相对含量
C-8	0.268 ± 0.002	13.125 ± 1.131	0.020 ± 0.002	95.867 ± 7.948 AB
C-10	0.248 ± 0.068	12.904 ± 3.171	0.019 ± 0.001	87.333 ± 7.597 B
C-15	0.239 ± 0.039	11.923 ± 1.650	0.020 ± 0.004	113.700 ± 5.028 A
C-19	0.253 ± 0.021	13.324 ± 1.020	0.019 ± 0.001	49.800 ± 0.985 D
C-25	0.247 ± 0.008	13.124 ± 0.921	0.019 ± 0.002	62.667 ± 2.701 C
C-26	0.261 ± 0.004	13.423 ± 0.313	0.019 ± 0.001	62.667 ± 3.495 C

注：表中数据为平均值 ± 标准误；同列数据后凡有 1 个相同大写字母者，表示该指标在 0.01 水平差异不显著。

2.2 竹节树无性系叶绿素荧光参数的差异性对比

叶绿素荧光参数是 PS II 反应中心最大光能转换效率的反映指标，方差分析结果表明（表 2），6 个竹节树无性系间叶绿素荧光参数除 Fo、Fv/Fm、Fv/Fo、ΦPS II、ETR 达到了显著差异（ $P<0.05$ ）外，其余叶绿素荧光参数均无显著性差异。

竹节树的 Fo 以无性系 C-15 最大，最小为无性系 C-25，其余无性系之间有差异但未达到显著水平。Fm 表示最大荧光，是 PS II 反应中心处于完全关闭的荧光产量；Fv=Fm-Fo，为可变荧光，反映了原初稳态受体（Q_A）的还原情况；6 个无性系中这两个参数均无显著差异。Fv/Fm 表示 PS II 最大光化学量子产量，反映 PS II 反应中心内禀光能转换效率。在不受光抑制的情况下，Fv/Fm 一般介于 0.75~0.85 之间，其参数的大小和变化特征往往用于判断和推测植物对环境因子的抗性，当值低于 0.75，则表明植物受光抑制的程度大，不利于植株的生长^[11]。由表 2 可知，竹节树无性系植株

的 Fv/Fm 均大于 0.75，说明无性系植株在试验期间 PS II 系统光能转换效率正常，且无性系 C-15 和 C-26 的值显著大于其他无性系（ $P<0.05$ ），说明这两者有较强的抗高光强能力。Fv/Fo 表示 PS II 植物叶片潜在的光化学活性，与有活性的 PS II 反应中心数量成正比，竹节树无性系 Fv/Fo 值 C-15、C-25 较大，最低为 C-19 无性系。Fv/Fm 和 Fv/Fo 被绝大多数研究者认为是反映叶片光合效率的重要依据，两者的值越高说明植物叶片所捕获的光能可以更加有效地转化为植物所需要的能量^[12-13]。ΦPS II 是反映 PS II 反应中心在环境胁迫中部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率的指标，反映植物的实际光化学效率^[14]。从表 2 分析结果可知，竹节树无性系 C-15 的 ΦPS II 值显著大于其他无性系（ $P<0.05$ ），其他无性系间无显著差异。qP 反映 PS II 开放程度及原初电子受体的还原情况，由表 2 可见，竹节树的 qP 值为无性系 C-8 大于其他无性系，但差异不显著。qN 反映了植物热耗散的

表 2 竹节树无性系植株叶绿素荧光参数差异

无性系	Fo	Fv	Fm	Fv/Fm	Fv/Fo	ΦPS II	qP	qN	ETR
C-8	206.81 ± 5.39 ab	723.10 ± 3.41	958.12 ± 6.79	0.75 ± 0.00 b	3.08 ± 0.01 c	0.09 ± 0.01 b	0.32 ± 0.04	2.64 ± 0.34	71.47 ± 6.98 ab
C-10	196.49 ± 6.19 b	674.26 ± 9.56	870.75 ± 5.36	0.77 ± 0.01 a	3.45 ± 0.17 ab	0.13 ± 0.00 ab	0.25 ± 0.03	2.93 ± 0.29	71.11 ± 1.44 ab
C-15	235.01 ± 3.38 a	747.59 ± 6.43	954.41 ± 3.83	0.78 ± 0.00 a	3.66 ± 0.03 a	0.14 ± 0.00 a	0.19 ± 0.00	2.88 ± 0.03	80.95 ± 1.67 a
C-19	188.24 ± 4.80 b	572.40 ± 3.83	760.63 ± 4.62	0.75 ± 0.00 b	3.01 ± 0.05 c	0.09 ± 0.03 b	0.23 ± 0.06	2.61 ± 0.02	53.98 ± 5.94 c
C-25	179.88 ± 0.32 c	594.82 ± 5.00	774.70 ± 4.68	0.77 ± 0.01 a	3.44 ± 0.14 a	0.12 ± 0.01 ab	0.25 ± 0.02	2.39 ± 0.04	71.07 ± 4.86 ab
C-26	201.90 ± 9.05 ab	743.33 ± 9.24	945.23 ± 8.29	0.79 ± 0.01 a	3.61 ± 0.13 ab	0.10 ± 0.00 b	0.19 ± 0.00	2.34 ± 0.1	55.96 ± 2.03 c

注：表中数据为平均值 ± 标准误；同列数据后但凡有 1 个相同小写字母者，表示该指标在 0.05 水平差异不显著；Fo 为初始荧光；Fm 为最大荧光；Fv 为可变荧光；ΦPS II 为实际光化学效率；Fv/Fm 为 PS II 最大光化学效率；Fv/Fo 为 PS II 的潜在活性；qP 为光化学淬灭系数；qN 为非光化学淬灭系数；ETR 为表观电子传递速率。

表 3 竹节树叶片生长特性、叶绿素相对含量与叶绿素荧光参数的相关性分析

指标	Fv	Fm	Fv/Fm	Fv/Fo	ΦPSⅡ	qP	qN	ETR	叶绿素相对含量	叶片干质量	叶面积	比叶重
Fo	0.746**	0.825**	0.062	-0.030	-0.082	0.109	-0.035	-0.208*	0.025	0.054	0.059	0.204
Fv		0.989**	0.661**	0.580**	-0.007	0.079	-0.102	-0.121	0.040	0.010	0.037	0.047
Fm			0.564**	0.477**	-0.019	0.080	-0.086	-0.152	0.051	0.001	0.045	0.077
Fv/Fm				0.894**	-0.187	-0.092	-0.068	0.079	-0.030	0.005	0.046	-0.083
Fv/Fo					0.090	-0.003	0.002	0.064	0.053	0.055	0.012	-0.118
ΦPSⅡ						0.733**	0.255**	0.409**	0.986**	0.031	0.086	-0.178
qP							0.351**	0.404**	-0.036	0.100	0.196	-0.151
qN								-0.022	0.033	0.099	0.093	0.036
ETR									-0.117	0.107	0.125	-0.028
叶绿素相对含量										0.847**	0.243	0.167
叶片干质量											0.573	0.231
叶面积												0.258

注：“**”表示在 0.01 水平上显著相关；“*”表示在 0.05 水平上显著相关。

能力，由表 2 可见，竹节树不同无性系间的热耗散能力无显著差异，总体上植物 qN 值的变化范围为 0.27~0.59^[15]，竹节树 6 个无性系具有较低的值域，说明具有较差的抗高温能力。表观光合电子传递速率 ETR 值反映了实际光强下的表观电子传递速率，竹节树 ETR 值在各无性系间具有显著差异 ($P<0.05$)，其中，无性系 C-15 明显大于其他无性系，ETR 值越高说明植株能将有效量子传递到光反应的能力越强。

2.3 竹节树无性系叶片生长特性、叶绿素含量与叶绿素荧光参数相关性分析

竹节树不同无性系叶片的生长特性、叶绿素含量与叶绿素荧光参数的相关性分析结果见表 3。叶片的初始荧光与可变荧光、最大荧光呈极显著正相关，与表观电子传递速率呈显著负相关，与其他因素无显著相关性；说明初始荧光产量会影响竹节树的最大荧光产量、叶片的生长特性及电子传递速率。可变荧光与最大荧光、PSⅡ最大光化学效率和潜在的光化学活性呈极显著正相关，且与最大荧光的相关系数为 0.989，说明其主要影响因子是最大荧光。最大荧光与 PSⅡ最大光化学速率、潜在的光化学活性呈极显著正相关，与其他因子无显著相关性。PSⅡ最大光化学效率与潜在的光活性极显著正相关，与其他因子无显著相关性，说明 PSⅡ最大光化学效率的决定因素是潜在的光化学活性。潜在光化学活性与其他因子无相关性。实际光化学效率与光化学淬灭系数、非

光化学淬灭系数和表观电子传递速率极显著正相关，与叶绿素相对含量极显著正相关，相关系数为 0.986；这说明竹节树不同无性系叶片潜在光合作用量子转化和传递效率将直接影响植物的实际光合速率，且叶绿素相对含量在叶片吸收利用光能时起重要作用。叶绿素相对含量对叶绿素荧光特性有一定的影响，主要体现在影响叶片的实际光化学效率。

2.4 竹节树无性系的聚类分析

根据不同无性系叶片的生长特性、叶绿素相对含量及叶绿素荧光参数的测定结果，采用最短距离和欧式距离聚类法，对 6 个无性系进行分类，见图 1。无性系可明显分为 2 类：第 1 类只包含了无性系 C-19、C-25，其余的无性系为第 2 类，C-19 和 C-25 与其他无性系的叶片生长特性、叶

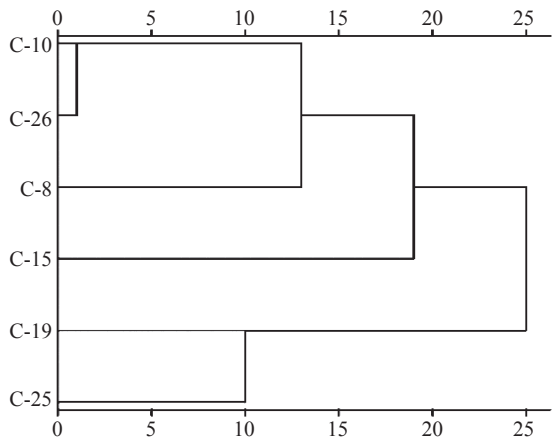


图 1 基于叶片生长特性、叶绿素相对含量和叶绿素荧光参数测定结果的 6 个竹节树无性系聚类分析

绿素相对含量及光合生理特征差别较大, 且它们的叶绿素相对含量及叶绿素荧光参数 ($\Phi PS II$ 、ETR) 均为偏下的水平。第 2 类无性系可以分为 2 个亚类, 第一个亚类为 C-15, C-10、C-26 和 C-8 为第二个亚类, 其中无性系 C-10 和 C-26 的距离最短, 说明其光合生理特征最接近, 此亚类中, 无性系叶绿素相对含量和叶绿素荧光处于偏上水平, 且 C-15 植株最优。

3 结论与讨论

研究表明, 同域环境下分布的自然种群通常在受到环境选择压力时, 会改变资源利用或营养器官相关的性状来适应环境, 通过形态特征的适应调整, 从而更加有利于生存与竞争, 获得更多的有效资源^[16]。对竹节树的种质遗传变异性研究能够甄选优良的遗传单株, 为新品种选育提供有效的数据及材料。叶片作为营养器官同时也是植物光合作用的主要器官, 叶片的形态和性状是光合作用研究的重要组成部分^[17]。结果显示竹节树 6 个无性系植株间叶片的叶片干质量、叶面积无显著差异, 表明其有较稳定的遗传性, 在 6 个无性系中可以选择出叶片表型观赏性和遗传性较高的优良单株。

本研究中竹节树 6 份竹节树无性系植株间叶片叶绿素相对含量有显著差异, 说明在不同的无性系中叶片吸收和利用光能存在差异。通过对荧光参数的测定, 可获得相关植物光能利用途径的信息。Fv/Fm 被认为是植物发生光抑制最明显的特征。在竹节树 6 个无性系中, 其值均大于 0.75, 说明这些无性系在生长过程中没有受到光抑制。光合量子产量是用于衡量植物光合电子传递的量子产量, 可作为判断植物叶片光合电子传递速率快慢的相对指标, 在本研究中 6 个无性系的 PS II 原初光能转换效率、实际光化学效率均表现出显著的差异性, 表明不同的无性系对环境适应的可塑性不同, 以及对相同的环境有不同的适应能力, 这与张其德等^[18]对相同植物不同无性系的研究结果一致, 叶片的光合速率受遗传基因的影响。在众多荧光参数中, 高的 Fv/Fm、Fv/Fo 和 $\Phi PS II$ 值已基本被认为是叶片高光合效率的重要依据, 且不少研究指出 Fv/Fm、Fv/Fo 和 $\Phi PS II$ 有很好的一致性^[13, 19-22], 在本研究中, 这些参数也表现出一致性。

从光合生理角度出发, 无性系 C-15 具有较高的叶绿素相对含量, 具有较强的光化学特性。其同属一类的无性系 C-10、C-26 和 C-8 也具有较高的潜在光能利用能力, 具有较好的生物学特性和生态适应能力。

参考文献

- [1] 黄世满, 吴庆书, 符气浩. 海南岛新绿化树种——竹节树[J]. 海南大学学报(自然科学版), 1996, 14(1): 43-46.
- [2] 肖文祥, 王洪. 一种多用途树种——锯叶竹节树[J]. 中国野生植物资源, 1992(4): 23-24.
- [3] 苏志龙. 红树科两种濒危物种的居群遗传结构分析及其迁地保护措施评价[D]. 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2005.
- [4] 黄建辉, 林光辉, 韩兴国. 不同生境间红树科植物水分利用效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 530-536.
- [5] 黄椰林, 邱小忠, 施苏华, 等. 中国主要红树科植物的分子系统发育[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1999, 38(1): 39-42.
- [6] 田雪琴, 谭家得, 陈香, 等. 不同栽培基质和激素对竹节树生长及生理生化的影响研究[J]. 林业与环境科学, 2015, 31(2): 59-63.
- [7] 黄威龙, 李洁, 薛立, 等. 4种绿化幼苗对于干旱胁迫的生理响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(7): 36-40.
- [8] 梁惠凌, 韦记青, 王满莲, 等. 幼龄和成龄锯叶竹节树的光合特性[J]. 福建林业科技, 2010, 37(2): 51-54.
- [9] WANG Y, NII N. Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in leaves during salt stress[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2015, 75(6): 623-627.
- [10] 赵会杰, 邹琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(3): 248-251.
- [11] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659-668.
- [12] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学报, 1999, 16(4): 444-448.
- [13] 李鹏民, 高辉远, RETO J S. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559-566.
- [14] CRRASCO R M, RODRIGUEZ J S, PEREZ P. Changes in chlorophyll fluorescence during the course of photope-

- riod and in response to drought in *Casuarina equisetifolia* forest[J]. *Photosynthetica*, 2000, 40(3): 363-368.
- [15] 陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. *浙江农业学报*, 2006, 18(1): 51-55.
- [16] SERVEDIO M R. The relationship between sexual selection and speciation[J]. *CurrZool*, 2012, 58(3): 413-415.
- [17] 孙红英, 曹光球, 辛全伟, 等. 香樟8个无性系叶绿素荧光特征比较[J]. *福建林学院学报*, 2010, 30(4): 309-313.
- [18] 张其德, 卢从明, 张启峰, 等. 几组杂交组合的杂交稻及其亲本光合特性的比较研究[J]. *生物物理学报*, 1996, 12(3): 511-516.
- [19] 张培, 郭俊杰, 谌红辉, 等. 西南桦24个无性系的幼苗叶绿素荧光特性[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 126-129.
- [20] 林世青, 许春辉, 张其德, 等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J]. *植物学报*, 1992, 9(1): 1-16.
- [21] CAMPBELL D, HURRY V, CLARKE A K, et al. Chlorophyll fluorescence analysis of cyanobacterial photosynthesis and acclimation[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1998, 62(3): 667.
- [22] SGHAIER D B, DUARTE B, BANKAJI I, et al. Growth, chlorophyll fluorescence and mineral nutrition in the halophyte *Tamarix gallica*, cultivated in combined stress conditions: Arsenic and NaCl[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*, 2015, 149: 204-214.