

巨尾桉与薰蒴栲、红锥光响应曲线的比较研究*

Comparative Study on the Light Response Curve of Photosynthesis among *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix*黄雅丽^{1,2}, 梁士楚^{1,2*}, 韦宇静^{1,2}, 李冰^{1,2}, 石贵玉^{1,2}HUANG Ya-li^{1,2}, LIANG Shi-chu^{1,2}, WEI Yu-jing^{1,2}, LI Bing^{1,2}, SHI Gui-yu^{1,2}

(1. 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541004)

(1. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:【目的】通过对广西桂林灵田乡巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)、薰蒴栲 (*Castanopsis fissa*) 和红锥 (*Castanopsis hystrix*) 光合-光响应曲线研究, 寻找高光效阔叶树种。【方法】采用 Li-6400 便携式光合仪测定各树种光响应曲线。【结果】当光合有效辐射 (PAR) 开始增强时, 各树种间净光合速率 (Pn) 差异较小, 但随着光合有效辐射强度的增加, 不同树种间净光合速率出现较大的差异。各树种的净光合速率随着光合有效辐射升高达到最高点之后稳定。蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (Gs)、水分利用效率 (WUE) 和 CO₂ 利用效率 (CUE) 对光合有效辐射的响应趋势与净光合速率相似, 胞间 CO₂ 浓度、光能利用效率对光合有效辐射的相应趋势则与净光合速率相反。3 个树种的净光合速率为 3.975~20.800 μmol · m⁻² · s⁻¹, 巨尾桉最高, 薰蒴栲最低。光补偿点和光饱和点都是巨尾桉最高, 薰蒴栲最低。【结论】综合各指标和光响应变化规律, 确定巨尾桉为优良的高光效阔叶树种, 可在水分和光照条件好的地方适当推广。

关键词: 巨尾桉 薰蒴栲 红锥 光响应曲线 特征参数 相关性分析

中图分类号: Q945.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2014)04-0222-07

Abstract:【Objective】To select broad-leaf species with high photosynthetic efficiency, we analyzed the light response curve of photosynthesis among *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix* in the country of Lingtian, Guilin, Guangxi.【Methods】The Li-6400 portable photosynthesis system was used to measure the light response curves among tree species.【Results】There was little difference in net photosynthetic rate (Pn) among species when photosynthetically active radiation (PAR) began to increase, whereas with the increase in the intensity of PAR, significant differences showed up. The Pn of different species increased and reached the highest stable point with the increase of PAR. The trend of response to PAR in transpiration rate (Tr), stomatal conductance (Gs), water use efficiency (WUE) and CO₂ use efficiency (CUE) were similar to that of Pn whereas intercellular CO₂ density, light use efficiency showed opposite trend with Pn in response to PAR. The Pn ranged from 3.975 to 20.800 μmol · m⁻² · s⁻¹ among three tree species. *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* showed the

收稿日期: 2014-10-10

作者简介: 黄雅丽 (1989-), 女, 硕士, 主要从事植物生理研究。

* 广西科技重大专项 (2010GXNSFD169007, 桂科基 1123014, 桂科基 11166-01, 桂科基 11199001) 资助。

** 通讯作者: 梁士楚 (1965-), 男, 教授, 主要从事湿地生态和

植物生态研究, E-mail: gxslsc@sina.com.

use efficiency (WUE) and CO₂ use efficiency (CUE) were similar to that of Pn whereas intercellular CO₂ density, light use efficiency showed opposite trend with Pn in response to PAR. The Pn ranged from 3.975 to 20.800 μmol · m⁻² · s⁻¹ among three tree species. *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* showed the

highest Pn and *Castanopsis fissa* the lowest. Highest light compensation point and light saturation point (LSP) appeared in *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and the lowest appeared in *Castanopsis fissa*. **【Conclusion】** Considering the trends of indexes responding to light, *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* was determined as the high light efficiency tree species and can be popularized in the areas with good water and light conditions.

Key word: *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa*, *Castanopsis hystrix*, light response curve, characteristic parameters, correlation analysis

【研究意义】本试验中的桉树(GL₉)其本质为巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*),属桃金娘科(Myrtaceae)桉树属(*Eucalyptus*)植物双萼盖亚属(*Symphyomyrtus* subgenus)横脉组(*Transversaria* Section)植物。桉树为高大阳生乔木,具有生长速度快、躯干直而挺,耐寒性好,但抗风力弱,易倒伏的特点^[1,2]。光合作用是植物有机质合成、能量贮存与转化的基础,也是高光效树种筛选培育的关键指标^[3]。外界太阳光提供给植物所需的光合有效辐射是植物进行光合作用的主要能源物质,也是对植物光合生理最重要且影响最大的环境因素^[4]。植物的光响应曲线反映其光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度等光合作用指标随着光照强度变化的特性^[5],光响应曲线的测定有利于判断植物的光合作用潜力。而人工桉树林多数是砍伐黛蕨栲(*Castanopsis fissa*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)等优势树种而建成的。目前有不少人质疑人工桉树林与其它优势树种在适应性和生长状况等方面的优越性。**【前人研究进展】**尽管桉树光合生理研究起步较早,仅仅为桉树种间或与其它树种光合响应的比较研究,但对桉树与其它优势阔叶人工树种进行筛选却少有报道。**【本研究切入点】**以桂林人工种植最多的巨尾桉与其它阔叶树种(黛蕨栲和红锥)为研究对象,测定它们的光响应特征及其对光强变化的响应。**【拟解决的关键问题】**揭示这3个树种基本光合生理学特征和规律,通过不同树种光响应特性的比较,为高光效阔叶树种的筛选以及经营管理提供理论依据。

1 材料与方

1.1 试验地与试验材料

试验地设在广西桂林市灵田乡。气候属中亚热带季风气候,年平均气温 18.6℃,年平均降水量 1614mm,降水量集中在 4~6 月份,占全年降雨量的 51%,相对湿度 76%,全年无霜期 309d^[6]。选取巨尾桉、黛蕨栲和红锥为试验材料。试验地中,除了

巨尾桉、黛蕨栲和红锥外,其他种类主要还有山茶花(*Camellia japonica*)、红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杨梅(*Morella rubra*)等。

1.2 测定方法

测定时间为 2013 年 4 月中旬,仪器为美国 Li-6400 便携式光合仪测定仪,测定方法参照 Li-6400XT OPEN6.1 中文操作手册中的光响应曲线测定步骤。其中,控制参比室 CO₂ 浓度为环境 CO₂ 浓度(400 μmol · mol⁻¹),保持植物叶片的自然状态。植物叶片所受光强梯度由 Li-6400-02B 红蓝光源设定为 0, 50 μmol · m⁻² · s⁻¹, 100 μmol · m⁻² · s⁻¹, 150 μmol · m⁻² · s⁻¹, 200 μmol · m⁻² · s⁻¹, 400 μmol · m⁻² · s⁻¹, 600 μmol · m⁻² · s⁻¹, 800 μmol · m⁻² · s⁻¹, 1000 μmol · m⁻² · s⁻¹, 1200 μmol · m⁻² · s⁻¹, 1400 μmol · m⁻² · s⁻¹, 1500 μmol · m⁻² · s⁻¹, 1800 μmol · m⁻² · s⁻¹, 2000 μmol · m⁻² · s⁻¹。测量前先在 1500 μmol · m⁻² · s⁻¹ 光强下诱导 20min,待植物叶片各项参数稳定之后开始测量。植物叶片测定时间控制在 9:00~16:00,每株随机选择冠层中上部生长良好并完全展开的 3 张叶片。由于试验材料植株高大,参照 Yang 等^[7]和孙双峰等^[8]试验方法,即测定前用高枝剪将标定植物部位枝条剪下,立即插入盛有清水的塑料桶中,并马上进行测定。

1.3 数据分析方法

采用经典的 Farquhar 模型

$$P = (L * Q + P_{\max} - \text{sqrt}((Q * L + P_{\max}) * (Q * L + P_{\max}) - 4 * Q * P_{\max} * L * k)) / (2 * k) - RD,$$

式中 P 为净光合速率、 P_{\max} 为最大净光合速率、 Q 为表观量子效率、 K 为曲角、 RD 为暗呼吸速率、 L 为光合有效辐射(PAR)。结合 0~200 (μmol · m⁻² · s⁻¹) Pn- PAR 的直线回归求表观量子效率 Q 、 R^2 决定系数和光补偿点(LCP),然后利用模型的理论

公式计算最大净光合速率 (P_{max}), 其中把 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的直线方程与最大净光合速率与 X 轴平行的这两条直线相连, 得出交点, 其 Y 轴的数值即为光饱和点 (LSP)^[9]。

2 结果与分析

2.1 净光合速率对光强的响应

由图 1 可知, 当光合有效辐射 PAR 为 $0 \sim 200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 巨尾桉、黧蒴栲和红锥的净光合速率 P_n 均呈现线性增长的趋势, 其中巨尾桉的增长较快, 而黧蒴栲和红锥的增长相对较慢, 且它们之间的差异较小。当 PAR 达到 $250\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之后, 随着 PAR 增加, 巨尾桉的 P_n 呈现继续上升的趋势, 直至 P_n 达到最大值, 而黧蒴栲和红锥的 P_n 的上升趋势不明显 (图 2)。巨尾桉的光饱和点和光合速率比黧蒴栲和红锥的高, 且光抑制现象不明显; 黧蒴栲和红锥较早达到饱和光强, 因此它们的净光合速率显著低于巨尾桉。

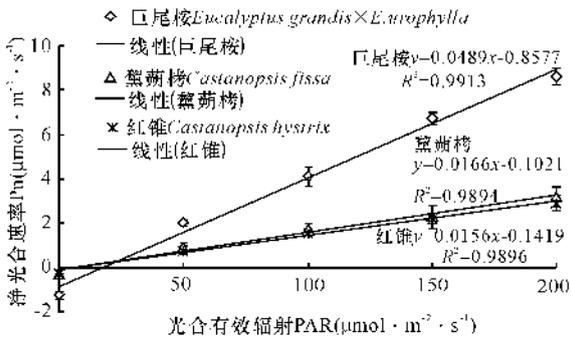


图 1 采用直线模型拟合的巨尾桉、黧蒴栲和红锥光响应曲线

Fig. 1 Light response curve of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix* using the linear model

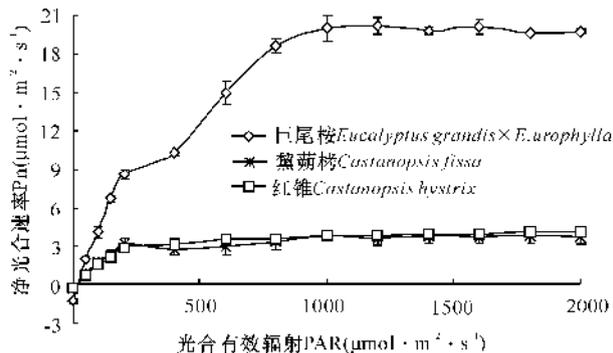


图 2 巨尾桉、黧蒴栲和红锥的光响应曲线

Fig. 2 Light response curve of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix*

2.2 蒸腾速率和气孔导度对光强的响应

由图 3 可知, 巨尾桉、黧蒴栲和红锥的蒸腾速率

和气孔导度随着光强的增加而增加, 其中巨尾桉的增长趋势最为明显, 而且其叶片的蒸腾速率和气孔导度远高于黧蒴栲和红锥。当光合有效辐射 PAR 达到 $600\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之后, 随着 PAR 增加, 巨尾桉的蒸腾速率呈现较快的增长过程, 而黧蒴栲和红锥的蒸腾速率增长比较平缓。总体上, 3 种树种蒸腾速率的大小顺序为巨尾桉 > 红锥 > 黧蒴栲。气孔导度 (G_s) 通过气孔开关控制植物叶片与外界大气中的 CO_2 、 O_2 和 H_2O 进行交换^[10]。根据图 3, 巨尾桉的气孔导度比黧蒴栲和红锥的高得多, 说明巨尾桉具有较强的气孔交换能力和光合能力, 从而有利于植物叶片进行光合作用和合成有机物^[11]。随着 PAR 增加, 巨尾桉、黧蒴栲和红锥气孔导度的响应趋势与其蒸腾速率的类似, 说明这些树种气孔导度和蒸腾速率之间的相关性较强。

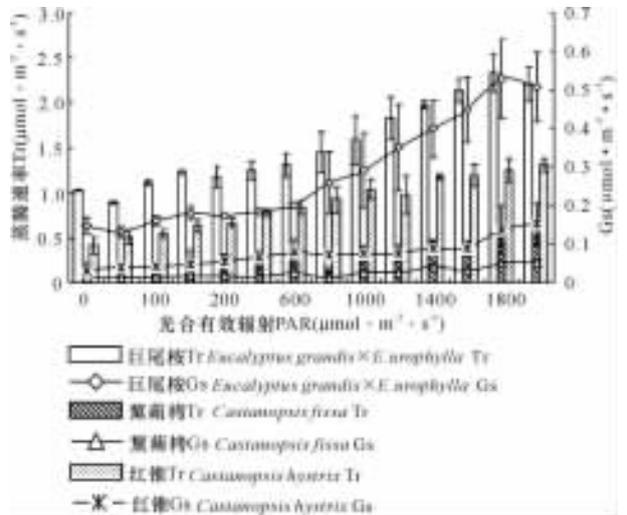


图 3 巨尾桉、黧蒴栲和红锥蒸腾速率 (Tr) 和气孔导度 (G_s) 的光响应曲线

Fig. 3 Light response curve of transpiration rate and stomatal conductance of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix*

2.3 胞间 CO_2 浓度和 CO_2 利用效率对光强的响应

胞间 CO_2 浓度 (C_i) 是外界 CO_2 气体进入叶肉细胞过程中所受各种驱动力和阻力以及叶片内部光合作用和呼吸作用的最终平衡结果^[12]。由图 4 可知, 当光合有效辐射 PAR 为 $0 \sim 200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 巨尾桉、黧蒴栲和红锥的 C_i 随着 PAR 增加呈现较大幅度的下降趋势, 这种现象与光合速率对 PAR 的响应趋势相反。当 PAR 达到 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之后, 这 3 种树种的 C_i 对 PAR 变化呈现类似的响应, 即随着 PAR 增加, C_i 逐渐趋于平稳。总体上, 3 种树种 C_i 的高低顺序为巨尾桉 > 黧蒴栲 > 红锥。

CO₂利用效率(CUE)的大小是由植物叶片的净光合速率(Pn)和胞间CO₂浓度(Ci)之间的比值来决定的。相对于较低的光照强度,较高的光合有效辐射(PAR)更有利于提高植物叶片的CUE^[13]。由图4可知,当PAR为0~200 μmol·m⁻²·s⁻¹时,巨尾桉、黧蒴栲和红锥CUE对光强的响应呈现线性上升的趋势,当PAR达到1000 μmol·m⁻²·s⁻¹之后,各树种的CUE呈现减少的趋势,并趋于平稳。总体上,3种树种CUE的高低顺序为巨尾桉>红锥>黧蒴栲。

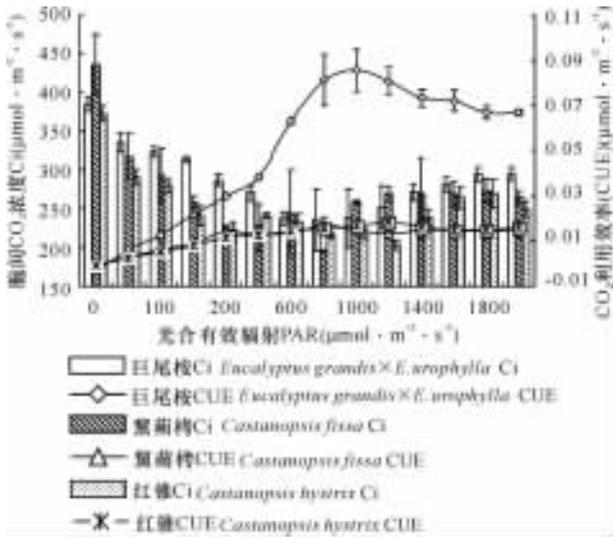


图4 巨尾桉、黧蒴栲、红锥胞间CO₂浓度和CO₂利用效率的光响应曲线

Fig. 4 Light response curve of intercellular CO₂ concentration and CO₂ utilization efficiency of *Eucalyptus grandis* × *E. wrophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix*

2.4 光能利用效率和水分利用效率对光强的响应

由图5可知,巨尾桉、黧蒴栲和红锥光能利用效率(LUE)的光响应过程基本类似。在光合有效辐射PAR低于200 μmol·m⁻²·s⁻¹的情况下,随着PAR增加,巨尾桉、黧蒴栲和红锥的LUE呈现上升的趋势,且这3种树种的LUE在PAR为100~200 μmol·m⁻²·s⁻¹范围内达到最大值。当PAR达到200 μmol·m⁻²·s⁻¹之后,巨尾桉、黧蒴栲和红锥的LUE呈现下降的趋势。总体上,巨尾桉的LUE比黧蒴栲和红锥的高得多。水分利用效率(WUE)的大小可以直接反映植物适应能力的强弱^[14]。当PAR为0~200 μmol·m⁻²·s⁻¹时,巨尾桉、黧蒴栲和红锥的WUE呈现较快增长的现象。黧蒴栲的WUE在PAR为800 μmol·m⁻²·s⁻¹有

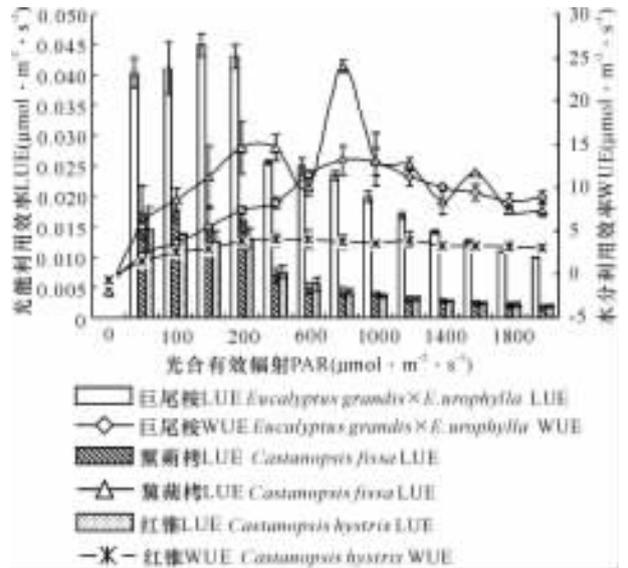


图5 巨尾桉、黧蒴栲和红锥光能利用效率(LUE)和水分利用效率(WUE)的光响应曲线

Fig. 5 Light response curve of light and water use efficiency of *Eucalyptus grandis* × *E. wrophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix*

1个明显的峰值。

2.5 光响应特征参数

表1为通过Farquhar模型和直线模型拟合的巨尾桉、黧蒴栲和红锥叶片光响应曲线的特征参数。其中,最大净光合速率P_{max}以巨尾桉最高,为20.800 μmol·m⁻²·s⁻¹,比黧蒴栲(3.975 μmol·m⁻²·s⁻¹)和红锥(4.195 μmol·m⁻²·s⁻¹)高4~5倍;暗呼吸速率RD多数为0.462~1.342 μmol·CO₂·m⁻²·s⁻¹,最高的是巨尾桉,最低的是红锥;表观量子效率Q以巨尾桉最高,红锥最低,表观量子效率Q反映的是植物利用弱光的能力^[15],说明巨尾桉利用弱光的能力最强,红锥最弱;光补偿点LCP以巨尾桉最高,达到26.504 μmol·m⁻²·s⁻¹,黧蒴栲最低,为15.633 μmol·m⁻²·s⁻¹,两者相差近10 μmol·m⁻²·s⁻¹;光饱和点LSP以巨尾桉最高,为444.925 μmol·m⁻²·s⁻¹,黧蒴栲最低,仅246.381 μmol·m⁻²·s⁻¹,说明巨尾桉对光合有效辐射强度的需求量显著高于其它两个树种,加上巨尾桉的LCP较低,说明巨尾桉对PAR的利用范围比黧蒴栲和红锥宽。

2.6 净光合速率与影响因子的关系分析

对巨尾桉、黧蒴栲和红锥的净光合速率(Pn)及其气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)等主要影响因子进行相关分析,结果如表2、表3和表4所示。由表2可知,巨尾桉的Pn与Tr、Gs、WUE和CUE呈极显著或显著正相关,与Ci呈

显著的负相关,与LUE呈负相关。从表3可知,黧蒴栲的P_n与Tr、G_s和CUE呈极显著或显著正相关,与WUE呈正相关,与C_i和LUE呈负相关。从表1 巨尾桉、黧蒴栲和红锥叶片光响应曲线的特征参数

表4可知,红锥的P_n与Tr、G_s和CUE呈极显著或显著正相关,与LUE呈显著负相关,与WUE呈正相关,与C_i呈负相关。

Table 1 Characteristic parameters of light response curve of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Castanopsis fissa* and *Castanopsis hystrix* leaves

树种 Tree species	P _{max}	Q	RD	LCP	LSP	R ²	K
巨尾桉(<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>E. urophylla</i>)	20.800 ^a	0.0515 ^a	1.342 ^a	26.504 ^a	444.925 ^a	0.990 ^a	0.494 ^a
黧蒴栲(<i>Castanopsis fissa</i>)	3.975 ^b	0.0175 ^b	0.495 ^b	15.633 ^b	246.381 ^b	0.978 ^a	0.645 ^a
红锥(<i>Castanopsis hystrix</i>)	4.195 ^b	0.0160 ^b	0.462 ^b	16.559 ^b	276.622 ^b	0.982 ^a	0.565 ^a

注:同一列不同字母之间表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column means significant differences ($P < 0.05$).

表2 巨尾桉净光合速率及其主要影响因子的相关性

Table 2 Correlation between net photosynthetic rate and key impacting indicators of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*

项目 Items (Spearman)	P _n	Tr	G _s	C _i	LUE	WUE	CUE
Tr	0.859**	—	—	—	—	—	—
G _s	0.859**	1.000**	—	—	—	—	—
C _i	-0.640*	-0.433	-0.433	—	—	—	—
LUE	-0.433	-0.596*	-0.596*	-0.011	—	—	—
WUE	0.789**	0.635*	0.635*	-0.925**	-0.209	—	—
CUE	0.903**	0.749**	0.749**	-0.802**	-0.323	0.930**	1.000

*表示在0.05水平上显著,**表示在0.01水平上极显著。

* means significant difference at 0.05 level,** means very significant difference at 0.01 level.

表3 黧蒴栲净光合速率及其主要影响因子的相关性

Table 3 Correlation between net photosynthetic rate and key impacting indicators of *Castanopsis fissa*

项目 Items (Spearman)	P _n	Tr	G _s	C _i	LUE	WUE	CUE
Tr	0.785**	—	—	—	—	—	—
G _s	0.811**	0.987**	—	—	—	—	—
C _i	-0.235	0.108	0.020	—	—	—	—
LUE	-0.473	-0.543*	-0.565*	-0.244	—	—	—
WUE	0.235	-0.196	-0.125	-0.845**	0.345	—	—
CUE	0.829**	0.385	0.464	-0.563*	-0.222	0.578*	1.000

*表示在0.05水平上显著,**表示在0.01水平上极显著。

* means significant difference at 0.05 level,** means very significant difference at 0.01 level.

表4 红锥净光合速率及其主要影响因子的相关性

Table 4 Correlation between net photosynthetic rate and key impacting indicators of *Castanopsis hystrix*

项目 Items (Spearman)	P _n	Tr	G _s	C _i	LUE	WUE	CUE
Tr	0.987**	—	—	—	—	—	—
G _s	0.965**	0.969**	—	—	—	—	—
C _i	-0.327	-0.310	-0.279	—	—	—	—
LUE	-0.587*	-0.591*	-0.569*	-0.095	—	—	—
WUE	0.336	0.314	0.376	-0.780**	0.103	—	—
CUE	0.837**	-0.824**	0.758**	-0.692**	-0.424	0.525	1.000

*表示在0.05水平上显著,**表示在0.01水平上极显著。

* means significant difference at 0.05 level,** means very significant difference at 0.01 level.

3 讨论

植物生长情况与其所处的光环境密切相关,而植物对外界光环境的直接响应则是进行光合作用^[16,17]。光合作用是十分复杂的生理过程,其强弱由植物自身的生物学特性、周围环境条件等综合决定。目前,通过高光效筛选培育经济树种已成为育种栽培普遍关注的问题。本研究通过对巨尾桉、黧蒴栲和红锥光响应曲线比较发现,光合有效辐射开始增强时,这3种树种净光合速率均呈现较快的上升趋势,但随着光合有效辐射的继续增加,不同树种出现较为显著的差异,其中巨尾桉的光饱和点和净光合速率高于其它2种树种。

通过对这3种树种在不同光强条件下各光合生理指标的相关性分析可得到,这3种树种的净光合速率与 T_r 、 G_s 呈极显著或显著正相关,这也说明植物的净光合速率的大小不仅仅受到外界光强的影响,也与自身植物叶片的光合生理特性关系密切。

本研究根据 Farquhar 模型和直线模型拟合光响应特征参数,其中表观量子效率 Q 是植物利用弱光环境的一个重要指标,即 Q 值越大,说明该植物利用弱光能力越强^[11]。一般植物叶片的表观量子效率范围是 $0.03 \sim 0.06 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-1} \text{ Photons}^{-1}$ ^[18],本研究中得出的巨尾桉表观量子效率居于中上等水平,与巨尾桉具有较高的光能利用效率密切相关。

植物的光饱和点说明该植物叶片对外界光强的需求程度,光补偿点则能放映植物对低光强的适应能力^[11]。巨尾桉的光饱和点和光补偿点较高,水分利用效率高,说明巨尾桉能适应一定的干旱和高光强的环境条件,而其它2种树种的光饱和点和光补偿点均较低,水分利用效率与巨尾桉差异不明显,因此巨尾桉种植在水分条件好和低光照的环境条件地区,可以获得较高的光合固碳和经济效益。

参考文献:

[1] 祁述雄. 中国桉树[M]. 北京:中国林业出版社,2002:34-55.
 Qi S X. Eucalyptus in China[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2002:34-55.

[2] 陆钊华. 尾叶桉种内种间交配遗传分析及 F_1 选择研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.
 Lu Z H. Genetic Analysis and F_1 Selection of *Eucalyptus urophylla* Intraspecific and Interspecific Crossing Combinations[D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry,2009.

[3] 葛滢,常杰,陈增鸿,等. 青冈(*Quercus glauca*)净光合作用与环境因子的关系[J]. 生态学报,1999,19(5):683-688.
 Ge Y,Chang J,Chen Z H,et al. Relationship between the net photosynthesis of *Quercus glauca* and the environmental factors[J]. Acta Ecological Sinica,1999,19(5):683-688.

[4] 俞新妥,卢建煌. 不同种源马尾松光合能力的比较研究[J]. 福建林学院学报,1991,11(2):131-135.
 Yu X T,Lu J H. A comparative study of photosynthetic capacity from different provenance of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Fujian College of Forestry,1991,11(2):131-135.

[5] 蒋高明,何维明. 一种在野外自然光照条件下快速测定光合作用-光响应曲线的新方法[J]. 植物学通报,1999,16(6):712-718.
 Jiang G M,He W M. A quick new method for determining light response curves of photosynthesis under field light conditions[J]. Chinese Bulletin of Botany,1999,16(6):712-718.

[6] 陈婷,马姜明,梁士楚. 巨尾桉在岩溶石山生境中的适应性研究(I)春季光合生理生态学特性[J]. 广西植物,2012,32(2):185-191.
 Chen T,Ma J M,Liang S C. Study on the adaptability of *Eucalyptus grandis* \times *E. urophylla* in karst hills (I):Photosynthetic physiological ecology characteristics in spring[J]. Guihaia,2012,32(2):185-191.

[7] Yang W Q,Murthy R,King p,et al. Diurnal changes in gas exchange and carbon partitioning in needles of fast- and slow-growing families of loblolly Pine (*Pinus taeda*) [J]. Tree physiology,2002,22:489-498.

[8] 孙双峰,黄建辉,林光辉,等. 三峡库区岸边共存松栎树种水分利用策略比较[J]. 植物生态学报,2006,30(1):57-63.
 Sun S F,Huang J H,Lin G H,et al. Contrasting water use strategy of co-occurring *Pinus quercus* trees in Three Gorges reservoir[J]. Journal of Plant Ecology,2006,30(1):57-63.

[9] Walker D A. Automated measurement of leaf photosynthetic O_2 evolution as a function of photon flux density[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society London B,1989,323:313-326.

[10] 米娜,张玉书,纪瑞鹏,等. 基于叶片尺度观测数据的气孔导度模型评价[J]. 生态学杂志,2011,30(2):389-394.
 Mi N,Zhang Y S,ji R P,et al. Evaluation of stomatal conductance models based on leaf level measurements [J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(2):389-

- 394.
- [11] 刘娟,马媛,廖康,等.新疆主栽杏品种的光响应曲线[J].经济林研究,2012,30(1):45-50.
Liu J, Ma Y, Liao K, et al. Light-response curves of different apricot cultivars in Xinjiang[J]. Nonwood Forest Research, 2012, 30(1): 45-50.
- [12] 迟丽华,宋凤斌.松嫩平原4种植物光合作用光响应特性的研究[J].吉林农业大学学报,2007,29(2):119-138.
Chi L H, Song F B. Study on light response of photosynthesis in leaves of four plants of Songnen plain[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2007, 29(2): 119-138.
- [13] 李明霞.桉树光合特性及抗逆性生理生化指标的季节变化研究[D].桂林:广西师范大学,2012.
Li M X. Seasonal Changes of Eucalyptus on Photosynthetic Characteristics and Physiological and Biochemical Indexes of Stress Resistance[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2012.
- [14] 吴志庄,高贵宾,熊德礼,等.9个主要丛生竹种光响应曲线的研究[J].竹子研究汇刊,2013,32(2):16-21.
Wu Z Z, Gao G B, Xiong D L, et al. A study on light response curve of photosynthesis of nine sympodial Bamboo species[J]. Journal of Bamboo Research, 2013, 32(2): 16-21.
- [15] 李映雪,谢晓金,李永秀,等.3种彩叶植物光合生理特性的差异[J].东北林业大学学报,2009,37(5):64-66.
Li Y X, Xie X J, Li Y X, et al. Different in photosynthetic physiological characteristics of three species of colorful plants[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(5): 64-66.
- [16] 蔡建国,任君霞,姜朝阳,等.芒属5种观赏草的耐荫性研究[J].福建林学院学报,2012,32(3):246-251.
Cai J G, Ren J X, Jiang C Y, et al. Study on shade tolerance of 5 *Miscanthus* ornamental grasses[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2012, 32(3): 246-251.
- [17] 陆鑫眉,阎光宇,杜晓娜,等.8种园林植物耐荫性与光合特性的研究[J].热带作物学报,2011,32(7):1249-1254.
Lu L M, Yan G Y, Du X N, et al. Photosynthetic and shade-tolerance characteristics of eight ornamental plants[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(7): 1249-1254.
- [18] 郭连旺,沈允钢.高等植物光合机构避免强光破坏的保护机制[J].植物生理学通讯,1996,32(1):1-8.
Guo L W, Shen Y G. Protective mechanisms against photodamage in photosynthetic apparatus of higher plants[J]. Plant Physiology Journal, 1996, 32(1): 1-8.

(责任编辑:陆雁)