

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.02.009

# 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

陈婷<sup>1</sup>, 马姜明<sup>1,2\*</sup>, 梁士楚<sup>1,2</sup>(1. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西师范大学 珍稀濒危  
动植物生态与环境保护省部共建教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 以岩溶石山生境的3年生巨尾桉人工林为研究对象, 采用LI-6400型便携式光合仪测定巨尾桉在春季的叶片净光合速率( $P_n$ )及其他生理生态因子日变化, 同时测定巨尾桉光合-光响应曲线, 并通过相关分析和通径分析探讨净光合速率与其他生理生态因子的关系。结果表明: 巨尾桉光合-光响应曲线符合Walker的非直线双曲线模型。巨尾桉的光饱和点为 $1\ 340\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 光补偿点为 $14.68\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 表观量子效率(AQY)为 $0.06\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 具有阳生植物的特点。净光合速率日变化呈现“单峰型”的特点。蒸腾速率( $Tr$ )、气孔导度( $G_s$ )和大气 $\text{CO}_2$ 浓度( $Ca$ )是影响巨尾桉叶片净光合速率日变化的重要因子。巨尾桉有较高的水分利用效率, 说明巨尾桉具有适应岩溶石山干旱的特征或避旱策略。

**关键词:** 巨尾桉; 光合作用; 日变化; 通径分析; 光曲线; 岩溶石山

中图分类号: Q945.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2012)02-0185-07

## Study on the adaptability of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* in karst hills(I): photosynthetic physiological ecology characteristics in spring

CHEN Ting<sup>1</sup>, MA Jiang-Ming<sup>1,2\*</sup>, LIANG Shi-Chu<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Diurnal changes of net photosynthetic rate( $P_n$ ), other physiological and ecological factors, and photosynthesis and photo-response curve of *E. grandis* × *E. urophylla* were measured with the LI-6400 photosynthesis system in spring in karst hills. The relationship between  $P_n$  and other physiological and ecological factors were analyzed using correlation analysis and path analysis. The results showed that the photosynthesis and photo-response curve of *E. grandis* × *E. urophylla* were complied with the Walker' Nonlinear-Hyperbolic Model. The light saturation point(LSP) and light compensation point(LCP) of *E. grandis* × *E. urophylla* were  $1\ 340\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $14.68\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  respectively, which conformed the characteristic of heliophyte. The apparent quantum yield(AQY) was  $0.06\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ . The diurnal change of  $P_n$  of *E. grandis* × *E. urophylla* was a "single peak" curve. Transpiration rate( $Tr$ ), stomatal conductance( $G_s$ ) and atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration( $Ca$ ) were the main factors influencing the  $P_n$

① 收稿日期: 2011-10-21 修回日期: 2012-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(31160156); 广西教育厅科研项目(200911MS50, 200807LX020); 广西科技重大专项(2010GXNSFD169007, 桂科基1123014, 11166-01, 桂科基11199001); 省部共建教育部重点实验室(桂科能1101Z003)[Supported by the National Natural Science Foundation of China(31160156); Research Project of Education Department of Guangxi(200911MS50; 200807LX020); Guangxi Science and Technology Major Project(2010GXNSFD169007, 1123014, 11166-01, 11199001); Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection(Guangxi Normal University), Ministry of Education, Chian(1101Z003)]

作者简介: 陈婷(1986-), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态学研究, (E-mail)chenting212121@163.com。

\* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: mjming03@mailbox.gxnu.edu.cn)

of *E. grandis* × *E. urophylla*. That the high water use efficiency(WUE) of *E. grandis* × *E. urophylla* indicated that *E. grandis* × *E. urophylla* had the characteristic being suitable to the karst hills or the tactics avoiding drought.

**Key words:** *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*; photosynthesis; diurnal change; path analysis; light curve; karst hills

中国西南喀斯特地区生态环境脆弱,森林退化,水土流失严重,岩溶区生态环境建设和石漠化治理首要的任务就是植被恢复,只有在石漠化地区加快植被建设,加速恢复和重建好岩溶地区严重退化的生态系统,才能从根本上遏制土地石漠化(李先琨等,2003)。然而,退化岩溶生态系统植被恢复的首要任务是选择合适的建群植物种类,以保证系统能迅速地朝良性方向发展(赵平,2003)。如何选择树种,使其符合“适地适树”的原则,又能到达快速恢复的效果是进行岩溶石漠化治理过程中所要考虑的一个重要环节。在岩溶区开展人工诱导植被恢复时,了解被选用植物种类的光合生理生态特性,从而明确生态适应性,为岩溶区生态恢复与重建工作中植物种类选择等提供理论依据(黄玉清等,2006; Yue-min 等,2010)。

桉树(*Eucalyptus*),又名尤加利树,是桃金娘科桉属植物的总称,原产于澳大利亚,共有 945 个种及其变种,我国南方多省均有栽培(钱国钦,2007;刘小香等,2004)。桉树的生长迅速,对土地的营养条件要求不高,在一些贫瘠土壤上,可以作为防风固沙、水土保持的先锋、优良树种,也能够较短的时间内,形成绿化和植被景观(莫晓勇等,2010)。近年来,桉树在广西的种植面积不断扩大,岩溶石山上也开始出现种植桉树的现象。桉树种植在岩溶石山这种成土条件差、渗漏严重、可利用水分低的生境之后,其适应性如何?生长状况如何?因此,探讨桉树在岩溶石山生境中的生态适应性,揭示桉树在岩溶石山生境中的生存对策等,是采用桉树作为造林树种进行岩溶石山植被恢复时所解决的关键性科学问题。目前,有关岩溶石山生境中桉树的光合生理生态方面的研究还未见报道。本文以桂林岩溶石山巨尾桉(*E. grandis* × *E. urophylla*)为研究对象,旨在揭示岩溶石山桉树光合作用的日变化特点、桉树的光合能力和水分利用效率,分析净光合速率的变化规律及其与其他生理生态因子的关系,探讨桉树在岩溶石山生境中的适应性。这对揭示速生、高耗水的桉树适应岩溶石山的生理生态学机制具有重要的理论和实践意义。也为桂林岩溶石山的生态恢复

与重建过程中预选树种的选择提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在桂林市七星区田心村后山,地处广西东北部,位于南岭山系西南部,气候属中亚热带湿润季风气候,雨量充沛,气候温和。年平均气温 19 °C;年平均降雨量 1 856.7 mm,雨水最多的季节为 4~7 月,秋季干燥少雨,全年相对湿度 76%。全年无霜期 309 d,最冷天在 1、2 月。山体土壤少,土壤贫瘠。样地中除了巨尾桉外,主要还有红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆(*Vitex negundo*)、龙须藤(*Bauhinia championii*)、何首乌(*Fallopia multiflora*)、狗尾草(*Setaira viridis*)、苘草(*Arthraxon hispidus*)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 日变化测定 试验采用 LI-6400 型便携式光合仪,于 2011 年 4 月上旬,晴朗的天气情况下,随机选取生长状况正常且相似的成熟叶片在自然条件下测定净光合速率等生理生态指标。每天 8:00~17:00 时每隔 1 h 测定 1 次,连续测两天。每株取 5 片叶子,每片叶子测定 5 个瞬时净光合速率值( $P_n$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),同时测定的其他指标还有蒸腾速率( $Tr$ ,  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、气孔导度( $G_s$ ,  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、大气  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、光合有效辐射( $PAR$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、气温( $T_a$ , °C)、空气相对湿度( $RH$ , %)、基于叶温的水蒸汽压差( $V_{pdL}$ , kPa)等。

1.2.2 光响应曲线测定 采用 LI-6400 型便携式光合仪,于 2011 年 4 月上旬上午 8:00~12:00 测定巨尾桉的光合一光响应曲线。保持在自然条件下的温度和湿度,利用系统红蓝光源设定光强的梯度 1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、25、0  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  进行曲线测定。

1.2.3 数据处理 使用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据分析处理。叶片瞬时水分利用效率( $WUE$ ,  $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ )和气孔限

制值( $L_s$ )分别利用以下公式计算:  $WUE = P_n/Tr$  (Fischer, 1978),  $L_s = 1 - C_i/C_a$  (Berry & Downton, 1982)。光曲线理论模型采用非直线双曲线模型 (Walker, 1989):  $A = \{ \Phi \cdot Q + A_{max} - \sqrt{[(\Phi \cdot Q + A_{max})^2 - 4k \cdot \Phi \cdot Q \cdot A_{max}]/2k} \} - R_{day}$

$A$ : 净光合速率,  $Q$ : 光合有效辐射,  $\Phi$ : 表观量子效率 ( $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $A_{max}$ : 最大光合速率,  $k$ : 曲角,  $R_{day}$ : 光下呼吸速率 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  以下光强用直线拟合。

相关分析和通径分析方法参考生物统计学(第3版)(李春喜等, 2005)。

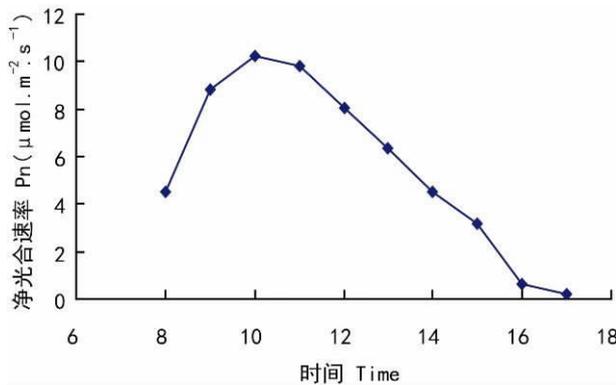


图 1 巨尾桉净光合速率日变化  
Fig. 1 Diurnal changes of  $P_n$  of *E. grandis* × *E. urophylla*

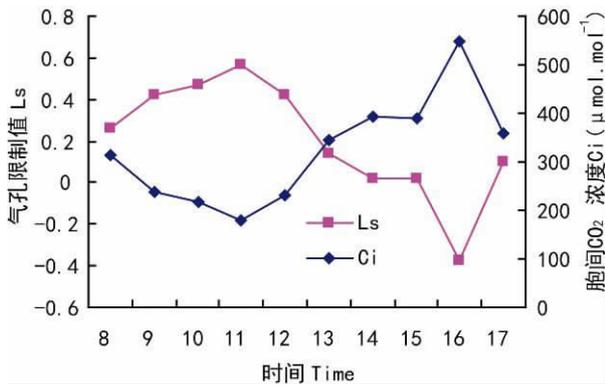


图 2 巨尾桉气孔导度和水分利用效率日变化  
Fig. 2 Diurnal changes of  $G_s$  and  $WUE$  of *E. grandis* × *E. urophylla*

## 2 结果与分析

### 2.1 巨尾桉净光合速率与其他生理生态因子日变化

由图 1 看出, 巨尾桉的净光合速率日变化曲线

呈现“单峰型”。最高峰出现在 10:00 时, 峰值为 10.21  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。气孔导度日变化总体上呈现单峰曲线, 11:00 时左右气孔导度达最大值 (0.18  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (图 2)。水分利用效率在 9:00 时 (3.79  $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ ) 出现一个最高峰(图 2)。

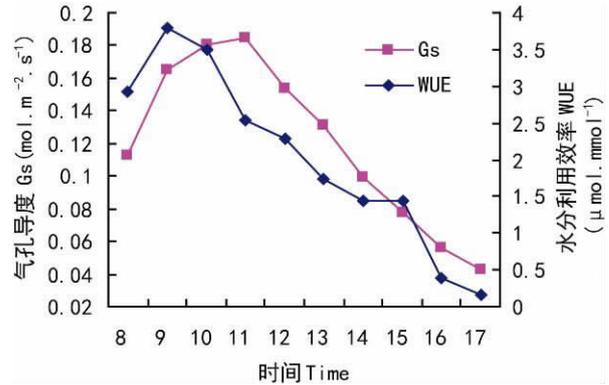


图 3 巨尾桉蒸腾速率和大气  $\text{CO}_2$  浓度日变化  
Fig. 3 Diurnal changes of  $Tr$  and  $C_a$  of *E. grandis* × *E. urophylla*

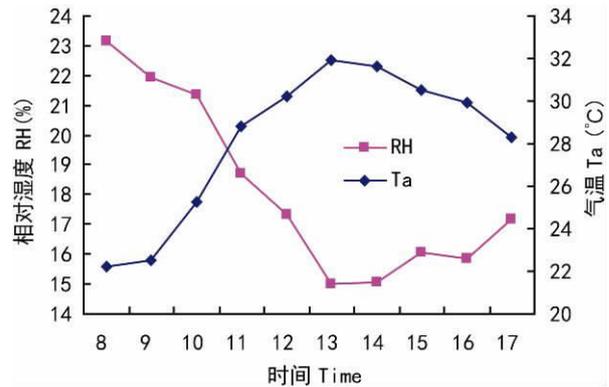


图 4 巨尾桉气孔限制值和胞间  $\text{CO}_2$  浓度日变化  
Fig. 4 Diurnal changes of  $L_s$  and  $C_i$  of *E. grandis* × *E. urophylla*

蒸腾速率日变化最高峰出现在 11:00 时 (3.87  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (图 3)。大气  $\text{CO}_2$  浓度在 8:00 时最高 (421.49  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 之后呈现下降的趋势, 在 16:00 开始呈现缓慢的上升(图 3)。气孔限制值日变化趋势在 16:00 之前与净光合速率基本上相同。胞间  $\text{CO}_2$  浓度的日变化与气孔限制值日变化完全相反(图 4)。光合有效辐射一天中变化和基于叶温的水蒸汽压差都呈现“单峰型”的趋势(图 5), 峰值分别出现在 12:00 时 (1 226.92  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和 14:00 时 (3.89 kPa)。相对湿度的日变化与大气  $\text{CO}_2$  浓度的日变化大体相同(图 6), 8:00 最高

(22.17%),之后呈现下降的趋势,在 14:00 时开始上升。基于叶温的水蒸汽压差日变化与相对湿度的日变化完全相反。气温与大气 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化完全相反(图 6),8:00 最低(22.23 °C),之后呈现上升的趋势,在 13:00 时开始下降。

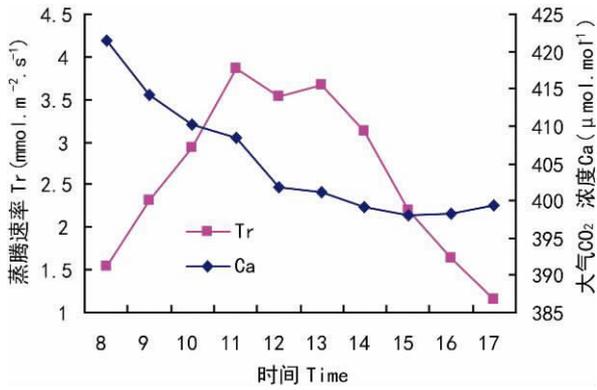


图 5 基于叶温的水蒸汽压差和光合有效辐射日变化  
Fig. 5 Diurnal changes of *VpdL* and *PAR* of *E. grandis* × *E. urophylla*

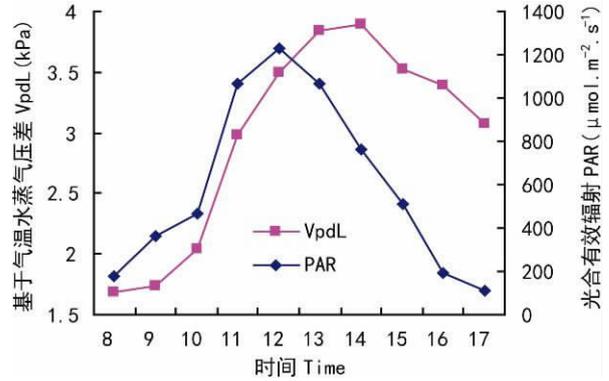


图 6 空气相对湿度和气温日变化  
Fig. 6 Diurnal changes of *RH* and *Ta* of *E. grandis* × *E. urophylla*

## 2.2 巨尾桉净光合速率与影响因子关系分析

2.2.1 相关性分析 对影响巨尾桉净光合速率 (*Pn*) 的主要生理生态因子气孔导度 (*G<sub>s</sub>*)、胞间 CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*)、蒸腾速率 (*Tr*)、基于叶温的水蒸汽压差 (*VpdL*)、光合有效辐射 (*PAR*)、大气 CO<sub>2</sub> 浓度 (*Ca*)、气

表 1 巨尾桉净光合速率与其他生理生态因子及其他生理生态因子之间的相关性

Table 1 Correlations between *Pn* of *E. grandis* × *E. urophylla* and related physiological and ecological factors and correlations among the related physiological and ecological factors

项目 Items	<i>Pn</i>	<i>G<sub>s</sub></i>	<i>C<sub>i</sub></i>	<i>Tr</i>	<i>VpdL</i>	<i>PAR</i>	<i>Ca</i>	<i>Ta</i>	<i>RH</i>	<i>PAR</i>
<i>G<sub>s</sub></i>	0.995**									
<i>C<sub>i</sub></i>	-0.868**	-0.865**								
<i>Tr</i>	0.739*	0.721*	-0.531							
<i>VpdL</i>	-0.357	-0.391	0.458	0.346						
<i>PAR</i>	0.574	0.559	-0.446	0.943**	0.502					
<i>Ca</i>	0.485	0.534	-0.552	-0.094	-0.903**	-0.225				
<i>Ta</i>	-0.285	-0.321	0.404	0.408	0.991**	0.538	-0.901**			
<i>RH</i>	0.456	0.492	-0.566	-0.225	-0.981**	-0.363	0.946**	-0.969**		
<i>PAR</i>	0.866**	0.865**	-0.999**	0.510	-0.489	0.423	0.587	-0.438	0.598	
<i>WUE</i>	0.864**	0.869**	-0.774**	0.363	-0.708*	0.184	0.795**	-0.671*	0.778**	0.791**

\*\* : *P* < 0.01, \* : *P* < 0.05。下同(The same below)。

温 (*Ta*)、空气相对湿度 (*RH*)、气孔限制值 (*L<sub>s</sub>*) 和水分利用效率 (*WUE*) 进行简单相关分析(表 1)。从表 1 看出,净光合速率与气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值和水分利用效率呈极显著或显著的正相关;与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度呈极显著的负相关;与光合有效辐射、基于叶温的水蒸汽压差、大气 CO<sub>2</sub> 浓度、气温、空气相对湿度相关性不显著。相关系数虽然能表明各生理生态因子之间的相关程度,但要搞清各生理生态因子对净光合速率的作用大小,还需要进一步进行多元回归分析。

### 2.2.2 逐步回归分析 植物的光合速率对生态生理

因子相当敏感,为定量了解生态因子对巨尾桉叶片光合速率的影响,采用逐步回归的分析方法建立模型,得出回归方程:  $Pn = 49.812 + 30.787G_s + 1.690Tr - 0.899VpdL - 0.0007PAR - 0.134Ca + 0.191RH + 1.063WUE + 0.711L_s$ 。复相关系数  $R = 1$ ,回归方程经 *F* 检验表明, *P* < 0.01,变量与自变量的相关性极显著。回归系数检验结果 *G<sub>s</sub>*, *Tr*, *Ca*, *RH*, *WUE*, *L<sub>s</sub>* 各回归系数均达到极显著或显著水平,只有 *VpdL*, *PAR* 回归系数未达到显著水平。从回归方程看出,气孔导度很大程度上影响巨尾桉净光合速率。

2.2.3 通径分析 通径分析是对回归自变量和因变量直接相关系数的分解,它既可反映自变量对因变量的直接作用还可反映自变量之间的相互作用。因

此通径分析常用来分析系统内部多变量间复杂的因果关系及其变量间作用程度的大小,有效地表示相关的自变量分别对因变量的直接和间接影响。

表 2 巨尾桉净光合速率与生理生态因子的通径分析

Table 2 Path analysis between  $P_n$  of *E. grandis* × *E. urophylla* and each related physiological and ecological factors

因子 Factors	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect								小计 Total	相关系数 Correlation coefficients
		X1→Y	X2→Y	X3→Y	X4→Y	X5→Y	X6→Y	X7→Y	X8→Y		
X1	0.433*		0.324	0.082	-0.042	-0.159	0.077	0.072	0.208	0.561	0.995**
X2	0.449*	0.312		-0.072	-0.072	0.028	-0.035	0.042	0.087	0.290	0.739*
X3	-0.209	-0.169	0.155		-0.038	0.268	-0.154	-0.041	-0.169	-0.148	-0.357
X4	-0.076	0.242	0.424	-0.105		0.067	-0.057	0.035	0.044	0.650	0.574
X5	-0.297*	0.231	-0.042	0.189	0.017		0.149	0.049	0.190	0.783	0.485
X6	0.157*	0.213	-0.101	0.205	0.028	-0.281		0.050	0.186	0.299	0.456
X7	0.083*	0.375	0.229	0.102	-0.032	-0.175	0.094		0.189	0.783	0.866**
X8	0.239**	0.377	0.163	0.148	-0.014	-0.236	0.122	0.066		0.626	0.864**

X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8 和 Y 分别表示  $G_s, Tr, VpdL, PAR, Ca, RH, WUE, L_s$  和  $P_n$ 。

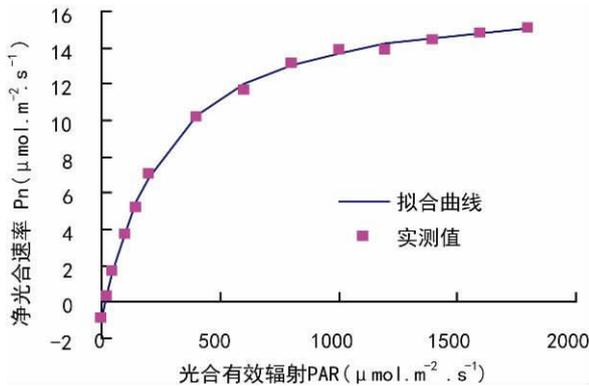


图 7 用非直角双曲线模型拟合的巨尾桉光合-光响应曲线

Fig. 7 Photosynthesis-light response curve of *E. grandis* × *E. urophylla* fitted by nonlinear-hyperbolic mode

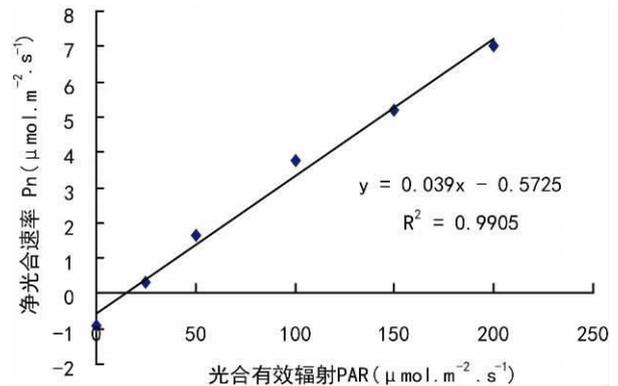


图 8 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  以下光合有效辐射与巨尾桉净光合速率直线拟合

Fig. 8 Linear fitting between  $P_n$  of *E. grandis* × *E. urophylla* and PAR below  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

对净光合速率和生理生态因子做进一步通径分析结果表明(表 2),各环境因子中,各生理因子对净光合速率直接通径系数的大小依次为  $Tr > G_s > Ca > VpdL > L_s > RH > WUE > PAR$ 。  $L_s$  对净光合速率产生极显著直接正效应。  $G_s, Tr, RH, WUE$  对净光合速率产生显著直接正效应。  $Ca$  对净光合速率产生显著直接负效应。  $VpdL, PAR$  对净光合速率直接效应不显著。尽管  $G_s$  通过  $PAR$  的间接作用为负值,依然没有影响  $G_s$  与  $P_n$  呈极显著正相关;  $Ca$  对  $P_n$  的直接负作用被  $G_s$  较大负间接作用所掩盖,而使其与  $P_n$  正相关。可以看出  $Tr, G_s$  不仅对巨尾桉净光合速率有显著直接的影响,还通过影响其他因子进而影响其净光合速率的变化能力也较强。  $PAR$  对光合速率的影响不显著。但这并不说

明  $PAR$  不重要,  $PAR$  是植物光合作用能量的最终来源,也是影响其他环境因子的最根本因素,在本研究中  $PAR$  主要通过  $G_s, Tr$  等因子对巨尾桉  $P_n$  起限制作用,直接影响不显著。但从通径系数总和和可以看出,在环境因子中  $PAR$  仍然是巨尾桉净光合速率的主要限制因子。

### 2.3 巨尾桉净光合速率对光合有效辐射的响应曲线

从图 7 和图 8 看出,当光合有效辐射很低时,随着光合有效辐射的加强,净光合速率逐渐增大,直到饱和。利用曲线拟合计算得出的最大净光合速率为  $17.89 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,暗呼吸速率为  $0.97 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表观量子效率(AQY)为 0.06。光补偿点为直线 Y 轴截距除以直线斜率,经过拟合巨尾桉的光补偿点为  $14.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由二项式拟合,

表 3 巨尾桉光合生理参数  
Table 3 Photosynthetic and physiological parameters of *E. grandis* × *E. urophylla* leaves

$Rd(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$AQY(\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	$A_{\text{max}}(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$LCP(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$LSP(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
$0.966 \pm 0.152$	$0.058 \pm 0.004$	$17.893 \pm 0.395$	14.68	1344

得到光响应曲线的拟合方程为:  $y = -8E - 06x^2 + 0.0215x + 1.1195$ , 则可求出光饱和点(LSP)的值为  $1344 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 3)。

### 3 结论与讨论

光合作用是一个复杂的生理过程(Agu 等, 2009)。植物净光合速率日变化曲线通常呈现“单峰型”和“双峰型”(郑炳松等, 2001; 张中锋等, 2008)。本研究中, 巨尾桉春季的净光合速率日变化呈现“单峰型”。

气孔作为气体交换的门户, 调节和控制光合和蒸腾(黄玉清等, 2006)。本研究通过通径分析可知, 在春季, 蒸腾速率和气孔导度都是影响巨尾桉净光合速率的重要因子, 体现了净光合速率与蒸腾速率的关系很密切, 这与净光合速率的日变化趋势整体上与蒸腾速率和气孔导度日变化趋势一致相符。春季, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度的日变化与净光合速率日变化基本相反, 可能是由于净光合速率升高, 固定的  $\text{CO}_2$  较多, 而引起胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低, 进而降低光合的强度。

水分利用效率的大小可以反映植物对逆境适应能力的强弱, 水分利用效率越高, 植物在单位耗水量下合成的干物质就越多(张正斌等, 1997)。植物的水分利用效率在一定的缺水条件下会更高(Hertholt, 1989; Kirnak 等, 2005)。本研究显示, 春季巨尾桉的平均水分利用率为  $2.56 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ , 与沈利娜等(2010)研究的广西马山峰丛洼地恢复树种银合欢(*Leucaena leucocephala*)的最大平均水分利用率( $2.91 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ )相当。可见, 巨尾桉有较高的水分利用率, 说明其具有适应岩溶石山干旱的特征或避旱策略。

当光合有效辐射很低时, 随着光合有效辐射的加强, 净光合速率逐渐增大(Bunce, 2000)。通过光响应曲线模拟, 巨尾桉符合 Walker(1989)的非直线双曲线模型。与岩溶石山上其他植物红背山麻杆(LSP:  $1027 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; LCP:  $3.87 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 龙须藤(LSP:  $628 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; LCP:

$2.06 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )(张中锋等, 2009)相比, 巨尾桉有较高的光饱和点( $1344 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 较高的光补偿点( $14.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。但与干旱区植物紫叶李(*Prunus cerasifera*)(LCP:  $24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和紫叶矮樱(*Prunus* × *Cistena pissardii*)(LCP:  $92 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )(庄红梅等, 2011)相比, 有较低的光补偿点。表明巨尾桉为阳性植物, 具有较强的光合能力。植物的最大初始量子效率理论上在  $0.08 \sim 0.125$ (蹇洪英等, 2003; 陆佩玲等, 2001)。而在一般情况下, 植物的表观量子效率在  $0.03 \sim 0.07$ (丘国维, 1992)。巨尾桉表观量子效率为  $0.06$ , 暗呼吸速率为  $0.97 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明巨尾桉相对岩溶石山地区的其它植物而言, 如广西美登木(*Maytenus guangxiensis*)( $0.029$ )、圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*)( $0.06$ )、龙须藤( $0.075$ )、红背山麻杆( $0.071$ )等(张中锋等, 2009), 在对弱光的利用上能力较低, 对光响应的敏感性也较差。但相对于黄土高原常见造林树种刺槐(*Robinia pseudoacacia*,  $0.049 \sim 0.061$ )、沙棘(*Hippophae rhamnoides*,  $0.042 \sim 0.048$ )而言, 巨尾桉利用弱光的能力较强。巨尾桉具有较高的光饱和点、较低的光补偿点和较大的表观量子效率, 表明巨尾桉是一种光强适应范围较广的阳生性植物, 能有效地利用强光, 在受到强光刺激是不易发生光抑制。也能够适应一定的遮荫环境。

在岩溶石山地区, 植被覆盖主要以灌木为主, 乔木种类少, 组成简单, 群落单一。所以, 岩溶地区的森林群落一旦被破坏, 要想进行乔木种植的恢复往往比较困难。巨尾桉春季的光合生理特征在一定程度上符合了岩溶地区的生长, 其喜光且能适应较强光照; 并且对于缺水的岩溶地区, 巨尾桉能通过光合作用和蒸腾作用的共同调节, 保持较高的水分利用率。这些表明, 巨尾桉可以作为恢复岩溶地区森林生态系统的优势树种, 构建多样的、稳定的和抗逆性强的巨尾桉群落。这对岩溶石山地区森林生态系统能迅速地朝着良性方向发展具有深远的影响。综上所述, 在桂林岩溶石山的生态恢复与重建过程中, 为了缩短恢复演替的进程, 笔者初步认为具有阳生植

物特性的巨尾桉可以作为恢复重建的预选树种。

### 参考文献:

- 丘国维. 1992. 植物光合作用的效率. 植物生理学和分子生物学[M]. 北京: 科学出版社: 236—243
- 李春喜, 姜丽娜, 邵云, 等. 2005. 生物统计学[M]. 第3版. 北京: 科学出版社: 263—266
- Agu L, Ladislav N, Govindjee. 2009. Photosynthesis in Silico: Understanding Complexity from Molecules to Ecosystems [M]. Netherlands: Springer: 465—497
- Berry JA, Downton WJS. 1982. Environmental Regulation of Photosynthesis[M]. New York: Academic Press: 263—343
- Bunce JA. 2000. Contrasting effects of carbon dioxide and irradiance on the acclimation of photosynthesis in developing soybean leaves[J]. *Photosynthetica*, **38**(1): 83—89
- Fischer RA, Turner NC. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. *Ann Rev Plant Physiol*, **29**: 227—317
- Heitholt JJ. 1989. Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen- and water-stressed winter wheat [J]. *Agron J*, **81**: 464—469
- Huang YQ(黄玉清), Wang XY(王晓英), Lu SH(陆树华), et al. 2006. Studies of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of some dominant species in rocky desert area, Guangxi, China(岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **26**(2): 171—177
- Jian HY(蹇洪英), Zou SQ(邹寿青). 2003. The photosynthetic characteristics in leaves of carpet grass-Axonopus compressus(地毯草的光合特性研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **23**(2): 181—184
- Kirnak H, Higgs D, Kaya C, et al. 2005. Effects of irrigation and nitrogen rates on growth, yield and quality of muskmelon in semi-arid regions[J]. *J Plant Nutr*, **28**: 621—638
- Li XK(李先琨), He CX(何成新), Jiang ZC(蒋忠诚). 2003. Method and principles of ecological rehabilitation and reconstruction in fragile karst ecosystem(岩溶脆弱生态区生态恢复、重建的原理与方法)[J]. *Carsol Sin*(中国岩溶), **22**(1): 12—17
- Liu XX(刘小香), Xie LL(谢龙莲), Chen QB(陈秋波), et al. 2004. A review of allelopathic researches on *Eucalyptus*(桉树化感作用研究进展)[J]. *Chin J Trop Agric*(热带农业科学), **24**(2): 54—61
- Lu PL(陆佩玲), Yu Q(于强), Luo Y(罗毅), et al. 2001. Fitting light response curves of photosynthesis of winter wheat(冬小麦光合作用的光响应曲线的拟合)[J]. *Chin J Agrometeorol*(中国农业气象), **22**(2): 12—14
- Mo XY(莫晓勇), Liu LT(刘丽婷). 2010. *Eucalyptus* forest and its cultural differences(桉树文化认知的差异及分析)[J]. *J Beijing Fore Univ; Social Sci*(北京林业大学学报(社会科学版)), **9**(3): 19—25
- Qian GQ(钱国钦). 2007. Sociological thoughts on *Eucalyptus* development(桉树发展的社会学思维)[J]. *Fore Invent Plan*(林业调查规划), **32**(2): 78—82
- Shen LN(沈利娜), Jiang ZC(蒋忠诚), Qin XM(覃星铭), et al. 2010. Daily changes of photosynthetic ecophysiological characteristics of restoration tree species in peak cluster depression region: a case study of Nongla, Mashan County, Guangxi, China(峰丛洼地恢复树种光合生理生态特征日变化研究——以广西马山弄拉峰丛洼地为例)[J]. *J Guangxi Norm Univ; Nat Sci Edi*(广西师范大学学报·自然科学版), **28**(1): 47—53
- Walker. 1989. Automated measurement of leaf photosynthetic O<sub>2</sub> evolution as a function of photon flux density[J]. *Philosoph Trans Roy Soc London B*, **323**: 313—326
- Yue Y, Wang K, Zhang B, et al. 2010. Exploring the relationship between vegetation spectra and eco-geo-environmental conditions in karst region, Southwest China[J]. *Environ Monit Assess*, **160**: 157—168
- Zhang ZB(张正斌), Shan L(山仑). 1997. Research development in estimation models of crop water use efficiency and transpiration and evaporation(作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展)[J]. *Agric Res Arid Areas*(干旱地区农业研究), **15**(1): 73—78
- Zhang ZF(张中峰), Huang YQ(黄玉清), Mo L(莫凌), et al. 2008. Preliminary study on the relation between photosynthetic rate and environment factors of *Quercus glauca* in Guilin karst area(桂林岩溶区青冈栎光合速率与环境因子关系初步研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **28**(4): 478—482
- Zhang ZF(张中峰), Huang YQ(黄玉清), Mo L(莫凌), et al. 2009. Photosynthesis light response characteristics of four limestone plants in karst area(岩溶区4种石山植物光合作用的光响应)[J]. *J Northwest Fore Univ*(西北林学院学报), **24**(1): 44—48
- Zhao P(赵平). 2003. Advances in plant ecophysiological studies on re-vegetation of degraded ecosystems(退化生态系统植被恢复的生理生态学研究进展)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **14**(11): 2 031—2 036
- Zheng BS(郑炳松), Jin AW(金爱武), Cheng XJ(程晓建), et al. 2001. Study on the photosynthetic characteristics of lei bamboo leaves(雷竹光合特性的研究)[J]. *J Fujian Coll Fore*(福建林学院学报), **21**(4): 359—362
- Zhuang HM(庄红梅), Huang JH(黄俊华), Li JG(李建贵), et al. 2011. Photosynthetic characteristics of purple-leaf plants in drought region(干旱区3种彩叶植物的光合特性)[J]. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*(西北农业学报), **20**(10): 162—167