

# 南亚热带 11 种珍贵阔叶树种光合特性研究\*

## Photosynthetic Characteristics of Eleven Precious Broad-leaved Tree Species in South Subtropics

郭昉晨<sup>1</sup>, 刘世荣<sup>2\*\*</sup>, 温远光<sup>1,3\*\*</sup>, 唐敬超<sup>2</sup>, 蔡道雄<sup>3</sup>, 明安刚<sup>3</sup>, 史作民<sup>2</sup>, 雷丽群<sup>3</sup>  
GUO Fang - chen<sup>1</sup>, LIU Shi - rong<sup>2</sup>, WEN Yuan - guang<sup>1,3</sup>, TANG Jing - chao<sup>2</sup>,  
CAI Dao-xiong<sup>3</sup>, Ming An-gang<sup>3</sup>, SHI Zuo-min<sup>2</sup>, LEI Li-qun<sup>3</sup>

(1. 广西大学林学院, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 中国林业科学研究院森林生态与保护研究所, 北京 100091; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 友谊关森林生态系统定位研究站, 广西凭祥 532600)

(1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China; 3. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

**摘要:**【目的】了解我国南亚热带珍贵阔叶树种的光合特性, 为造林树种的选择和结构优化提供参考。【方法】使用 Li-6400 便携式光合测定系统测定各树种的光响应曲线和二氧化碳响应曲线, 采用模型拟合的方法, 计算出各树种的光合特征参数并比较分析。【结果】不同珍贵阔叶树种的光合生理特性存在明显差异, 各树种最大净光合速率为 7.00~18.19  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平均值为 10.83  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最大净光合速率由高到低排序依次为柚木 *Tectona grandis* (18.19  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、米老排 *Mytilaria laosensis* (13.07  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、红锥 *Castanopsis hystrix* (12.60  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* (11.63  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、香梓楠 *Michelia hedyosperma* (11.29  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、灰木莲 *Manglietia glauca* (10.85  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、观光木 *Tsoongiodendron odorum* (10.64  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、格木 *Erythrophleum fordii* (8.90  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、擎天树 *Parashorea chinensis* (7.72  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、山白兰 *Paramichelia baillonii* (7.22  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、铁力木 *Mesua ferrea* (7.00  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。光合能力较强的树种为柚木、米老排和红锥, 较弱的为擎天树、铁力木和山白兰; 对高光强适应能力较强的树种为铁力木、柚木、观光木和降香黄檀, 较弱的为灰木莲和山白兰; 对弱光利用能力较强的树种为格木、红锥和香梓楠, 较弱的为山白兰、擎天树、观光木和米老排。【结论】在全球气候变化的背景下, 可选择光合能力强的树种造林。格木、红锥和香梓楠对弱光利用能力较强, 可作为松、杉人工针叶纯林近自然化改造树种。

关键词: 珍贵阔叶树种 光合特性 南亚热带

中图分类号: Q145 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2015)06-0606-06

**Abstract:** 【Objective】In order to acquire the photosynthetic characteristics of precious tree species in south subtropical zone, the eleven tree species that were commonly planted were selected for physiological study. 【Methods】Light response curves and CO<sub>2</sub> response curves of these

收稿日期: 2015-10-09

作者简介: 郭昉晨(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。

\* 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD22B01)和国家林业行业公益专项重大项目(201404201)资助。

\*\* 通讯作者: 刘世荣(1962-), 男, 博士, 研究员, 主要从事全球变化和森林生态学研究; 温远光(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林生态和森林培育研究, E-mail: wenyg@263.net.

tree species were measured by Li-6400 portable photosynthesis system. The curvilinear model was used for calculating the parameters of photosynthetic characteristics of these tree species, and then their comparisons of the physiological parameters were analyzed among the eleven tree species. **【Results】**The photosynthetic characteristic parameters have obvious differences among the eleven precious tree species. The maximum net photosynthetic rate of the tree species ranges from  $7.00 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $18.19 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the average value is  $10.83 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . The maximum net photosynthetic rate is highest for *Tectona grandis* ( $18.19 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), followed by *Mytilaria laosensis* ( $13.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Castanopsis hystrix* ( $12.60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Dalbergia odorifera* ( $11.63 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Michelia hedyosperma* ( $11.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Manglietia glauca* ( $10.85 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Tsoongiodendron odorum* ( $10.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Erythrophleum fordii* ( $8.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Parashorea chinensis* ( $7.72 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), *Paramichelia baillonii* ( $7.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), and *Mesua ferrea* ( $7.00 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). *Tectona grandis*, *Mytilaria laosensis* and *Castanopsis hystrix* have relatively higher photosynthetic capacity, while *Parashorea chinensis*, *Mesua ferrea* and *Paramichelia baillonii* have lower photosynthetic ability. *Mesua ferrea*, *Tectona grandis* and *Dalbergia odorifera* have relatively higher adaptability in high photosynthetic active radiation, while *Manglietia glauca* and *Paramichelia baillonii* have lower adaptability. *Erythrophleum fordii*, *Castanopsis hystrix* and *Michelia hedyosperma* have relatively higher utilization capacity in low photosynthetic active radiation, while *Paramichelia baillonii*, *Parashorea chinensis*, *Tsoongiodendron odorum* and *Mytilaria laosensis* have lower capacity. **【Conclusion】**Tree species with higher photosynthetic capacity can be selected for afforestation under the changes of global climates. The tree species with higher utilization capacity in low photosynthetic active radiation like *Erythrophleum fordii*, *Castanopsis hystrix* and *Michelia hedyosperma* perform better in close-to-nature management for *P. massoniana* and *C. lanceolata* monoculture plantations.

**Key words:** precious broad leaved tree species, photosynthetic characteristics, south subtropics

## 0 引言

**【研究意义】**广西自然环境得天独厚,珍贵树种资源极其丰富,是我国南亚热带重要的珍贵树种分布区<sup>[1]</sup>。大力发展珍贵阔叶树种人工林,特别是用其逐渐替代大面积马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)针叶人工纯林,具有重大的经济意义和生态意义<sup>[2]</sup>。虽然广西部分地区已经栽有一些珍贵的阔叶树种,但是对这些珍贵阔叶树种的生理生态学特性还缺乏深入认识。**【前人研究进展】**光合作用是植物重要的生理生化过程之一,光响应和二氧化碳响应模型是研究植物光合作用的有效工具,可供选择的模型种类众多。叶子飘<sup>[3,4]</sup>构建的新模型——直角双曲线修正模型有效解决了传统模型存在的一些问题,在拟合光响应和二氧化碳响应曲线上收到了良好的效果。**【本研究切入点】**在南亚热带广西凭祥的中国林业科学研究院热带林业实验中心,选择人工种植的11种珍贵树种:观光木

(*Tsoongiodendron odorum*)、格木(*Erythrophleum fordii*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、灰木莲(*Manglietia glauca*)、降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)、米老排(*Mytilaria laosensis*)、擎天树(*Parashorea chinensis*)、山白兰(*Paramichelia baillonii*)、铁力木(*Mesua ferrea*)、香梓楠(*Michelia hedyosperma*)和柚木(*Tectona grandis*)为实验对象,探究各树种的光合特性以比较不同树种间的差异。**【拟解决的关键问题】**为进一步发展利用南亚热带珍贵树种资源,指导珍贵树种造林提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

在位于凭祥的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验场和白云实验场,选择上述11个乡土珍贵阔叶树种为研究对象。所选的植株生长状况良好,无病虫害,年龄15~20 a,树高6~8 m。每个

树种选取 3~5 株,进行重复测定。

### 1.2 方法

本实验在 2014 年 8~9 月进行。由于实验区尚未建观测塔,直接测量大树叶片的光合作用困难,故采用剪枝离体测量的方法<sup>[5,6]</sup>。选取树冠中部向阳部位的叶片,用高枝剪剪下带叶的枝条后,将离体枝条快速插入水中,之后再剪断枝的底部,以确保枝条水分传导畅通。

使用 Li-6400 便携式光合测定系统测定各树种的光响应曲线和二氧化碳响应曲线。测定时间为上午 9:30~11:30,叶片温度 30~35℃。为保证测定过程稳定,光响应曲线测定时使用二氧化碳注入系统,设定二氧化碳浓度为接近大气浓度的 400 ppm。测定二氧化碳响应曲线时设定光强为各树种的饱和光强。测定过程中光强梯度变化和二氧化碳浓度梯度变化均采用手动调节的方法。

### 1.3 数据处理与统计分析

使用直角双曲线修正模型拟合各树种的光响应曲线和二氧化碳响应曲线,并计算光合特征参数<sup>[3]</sup>。

光响应曲线模型表达式为

$$P_n = \alpha \times (1 - \beta \times I) \times I / (1 + \gamma \times I) - R_d,$$

式中,  $P_n$  为净光合速率,单位为  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $I$  为光照强度,即光合有效辐射,单位为  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $R_d$  为暗呼吸速率;  $\alpha, \beta, \gamma$  为模型参数<sup>[4]</sup>。

二氧化碳浓度响应曲线模型表达式为

$$P_n = a \times (1 - b \times C_a) \times C_a / (1 + c \times C_a) - R_p,$$

式中,  $P_n$  为净光合速率,单位为  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $C_a$  为环境二氧化碳( $\text{CO}_2$ )浓度,单位为 ppm;  $R_p$  为光呼吸速率;  $a, b, c$  为模型参数<sup>[7]</sup>。

使用 SPSS19.0 软件,用迭代法进行非线性回归拟合。

表 1 各树种光响应曲线回归方程拟合结果

Table 1 The fitted equations of light response curves

树种 Species	光响应曲线方程 Light response curve	拟合优度 Goodness of fit ( $r^2$ )
格木 <i>E. fordii</i>	$P_n = 0.0659 \times (1 - 0.000065 \times I) \times I / (1 + 0.005353 \times I) - 0.9875$	0.999
观光木 <i>T. odorum</i>	$P_n = 0.0994 \times (1 - 0.000025 \times I) \times I / (1 + 0.006861 \times I) - 2.2109$	0.999
降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	$P_n = 0.0913 \times (1 - 0.000032 \times I) \times I / (1 + 0.006004 \times I) - 1.5139$	0.999
米老排 <i>M. laosensis</i>	$P_n = 0.0846 \times (1 - 0.000059 \times I) \times I / (1 + 0.004489 \times I) - 1.9266$	0.997
擎天树 <i>P. chinensis</i>	$P_n = 0.0480 \times (1 - 0.000116 \times I) \times I / (1 + 0.003810 \times I) - 1.1871$	0.999
铁力木 <i>M. ferrea</i>	$P_n = 0.0892 \times (1 - 0.000016 \times I) \times I / (1 + 0.009816 \times I) - 1.3848$	0.999
香梓楠 <i>M. hedyosperma</i>	$P_n = 0.0790 \times (1 - 0.000090 \times I) \times I / (1 + 0.004883 \times I) - 1.0643$	0.999
柚木 <i>T. grandis</i>	$P_n = 0.0635 \times (1 - 0.000059 \times I) \times I / (1 + 0.002352 \times I) - 1.5150$	0.999
山白兰 <i>P. baillonii</i>	$P_n = 0.0484 \times (1 - 0.000150 \times I) \times I / (1 + 0.003883 \times I) - 1.2272$	0.994
红锥 <i>C. hystrix</i>	$P_n = 0.0582 \times (1 - 0.000140 \times I) \times I / (1 + 0.002768 \times I) - 0.8665$	0.996
灰木莲 <i>M. glauca</i>	$P_n = 0.0686 \times (1 - 0.000121 \times I) \times I / (1 + 0.004049 \times I) - 1.1630$	0.994

## 2 结果与分析

### 2.1 树种光响应曲线和二氧化碳响应曲线回归方程的拟合

光响应曲线回归方程的拟合结果见表 1,各树种的拟合方程都具有极高的决定系数,即拟合优度高,说明拟合效果极佳。故可通过该模型计算树种光响应相关的各特征参数,并能在一定程度上预测各树种在不同光强下的净光合速率。

二氧化碳浓度响应曲线回归方程的拟合结果见表 2。各树种的拟合方程也都具有极高的决定系数,即拟合优度高,说明拟合效果极佳。故可通过该模型计算树种二氧化碳响应相关的各特征参数,并可在一定程度上预测各树种在不同二氧化碳浓度下的净光合速率。

### 2.2 光合特征参数比较

#### 2.2.1 光响应特征参数

利用各树种的光响应曲线回归方程,可计算出以下特征参数:光饱和点(Light Saturation Point, LSP)、光补偿点(Light Compensation Point, LCP)、最大净光合速率( $P_{\max}$ )和暗呼吸速率( $R_d$ )(表 3)。从表 3 可以看出,各树种的光饱和点为 1077.86~2423.50  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均值为 1682.75  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光饱和点最高的树种是铁力木(2423.50  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );其次是柚木(2292.74  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、观光木(2273.19  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、降香黄檀(2120.93  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),3 者的光饱和点均在 2000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  以上;光饱和点最低的是山白兰,仅为 1077.86  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光饱和点越高则表明树种对高光强的适应能力和利用能力越强。

表 2 各树种环境 CO<sub>2</sub> 浓度响应曲线拟回归方程拟合结果

Table 2 The fitted equations of CO<sub>2</sub> response curves

树种 Species	二氧化碳响应方程 CO <sub>2</sub> response curve	拟合优度 Goodness of fit (r <sup>2</sup> )
格木 <i>E. fordii</i>	$P_n = 0.0332 \times (1 - 0.000210 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000145 \times C_n) - 3.0009$	0.999
观光木 <i>T. odorum</i>	$P_n = 0.0367 \times (1 - 0.000378 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000003 \times C_n) - 2.6555$	0.999
降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	$P_n = 0.0391 \times (1 - 0.000326 \times C_a) \times C_n / (1 - 0.000070 \times C_n) - 3.1671$	0.998
米老排 <i>M. laosensis</i>	$P_n = 0.0499 \times (1 - 0.000111 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000614 \times C_n) - 3.3693$	0.999
擎天树 <i>P. chinensis</i>	$P_n = 0.0201 \times (1 - 0.000200 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000063 \times C_n) - 1.6757$	0.990
铁力木 <i>M. ferrea</i>	$P_n = 0.0286 \times (1 - 0.000185 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000449 \times C_n) - 2.1074$	0.998
香梓楠 <i>M. hedysperma</i>	$P_n = 0.0449 \times (1 - 0.000239 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000535 \times C_n) - 3.2296$	0.998
柚木 <i>T. grandis</i>	$P_n = 0.0746 \times (1 - 0.000294 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000591 \times C_n) - 5.1968$	0.998
山白兰 <i>P. baillonii</i>	$P_n = 0.0296 \times (1 - 0.000346 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000052 \times C_n) - 2.5558$	0.999
红锥 <i>C. hystrix</i>	$P_n = 0.0483 \times (1 - 0.000354 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000178 \times C_n) - 3.0232$	0.999
灰木莲 <i>M. glauca</i>	$P_n = 0.0453 \times (1 - 0.000319 \times C_a) \times C_n / (1 + 0.000207 \times C_n) - 3.1324$	0.997

表 3 各树种光响应特征参数拟合值 (μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)

Table 3 The fitted values of light response characteristic parameters (μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)

树种 Species	LSP	ICP	P <sub>max</sub>	R <sub>d</sub>
格木 <i>E. fordii</i>	1518.74	16.31	8.90	0.99
观光木 <i>T. odorum</i>	2273.19	26.26	10.64	2.21
降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	2120.93	18.43	11.63	1.51
米老排 <i>M. laosensis</i>	1733.08	25.41	13.07	1.93
擎天树 <i>P. chinensis</i>	1264.47	27.39	7.72	1.19
铁力木 <i>M. ferrea</i>	2423.50	18.32	7.00	1.39
香梓楠 <i>M. hedysperma</i>	1317.51	14.43	11.29	1.06
柚木 <i>T. grandis</i>	2292.74	25.30	18.19	1.52
山白兰 <i>P. baillonii</i>	1077.86	28.23	7.22	1.23
红锥 <i>C. hystrix</i>	1285.29	15.56	12.60	0.87
灰木莲 <i>M. glauca</i>	1202.91	18.24	10.85	1.16

各树种光补偿点为 14.43~28.23 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 平均值为 21.26 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。光补偿点最高的树种是山白兰(28.03 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), 其次是擎天树(27.39 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、观光木(26.26 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、米老排(25.41 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、柚木(25.30 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>); 光补偿点最低的是香梓楠, 仅为 14.43 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> (表 3)。光补偿点越低则表明树种对弱光的利用能力越强。

最大净光合速率反映植物在大气二氧化碳浓度下的最大光合能力。各树种最大净光合速率为 7.00~18.19 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 平均值为 10.83 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。最大净光合速率最高的是柚木(18.19 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), 其次是米老排(13.07 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、红锥(12.60 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、降香黄檀(11.63 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、香梓楠(11.29 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), 最小为山白兰和铁力木, 分别是 7.22 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 和 7.00 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> (表 3)。

暗呼吸速率是植物在无光条件下的有氧呼吸速率, 体现植物在无光条件下消耗光合产物的速率。各树种暗呼吸速率为 0.87~2.21 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 平均值为 1.37 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。暗呼吸速率最高的为观光木(2.21 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), 其次是米老排、柚木和降香黄檀, 分别是 1.93 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 1.52 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 和 1.51 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 暗呼吸速率最低的是格木和红锥, 分别是 0.99 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 和 0.87 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> (表 3)。

2.2.2 二氧化碳响应特征参数

利用各树种的二氧化碳响应曲线回归方程, 可计算出二氧化碳饱和点 (Carbon Dioxide Saturation Point, CDSP)、二氧化碳补偿点 (Carbon Dioxide Compensation Point, CDCP)、最大净光合能力 (A<sub>max</sub>) 和光呼吸速率等特征参数 (R<sub>p</sub>), 计算结果如表 4 所示。

表 4 各树种二氧化碳响应特征参数拟合值

Table 4 The fitted values of CO<sub>2</sub> response characteristic parameters

树种 Species	CDSP (μmol · mol <sup>-1</sup> )	CDCP (μmol · mol <sup>-1</sup> )	A <sub>max</sub> (μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	R <sub>p</sub> (μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )
格木 <i>E. fordii</i>	2070.23	93.53	26.85	3.00
观光木 <i>T. odorum</i>	1320.14	74.45	21.53	2.66
降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	1626.31	82.86	30.51	3.17
米老排 <i>M. laosensis</i>	2533.69	71.09	32.16	3.37
擎天树 <i>P. chinensis</i>	2330.29	85.38	20.12	1.68
铁力木 <i>M. ferrea</i>	1895.82	77.29	16.92	2.11
香梓楠 <i>M. hedysperma</i>	1494.55	76.21	20.75	3.23
柚木 <i>T. grandis</i>	1243.65	74.30	28.75	5.20
山白兰 <i>P. baillonii</i>	1394.55	89.45	17.38	2.56
红锥 <i>C. hystrix</i>	1269.09	64.74	24.54	3.02
灰木莲 <i>M. glauca</i>	1372.45	71.76	24.11	3.13

由表 4 可知,各树种  $\text{CO}_2$  浓度饱和点为 1243.65~2533.69  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 差别相对较大。平均值为 1686.43  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。 $\text{CO}_2$  浓度饱和点较高的是米老排(2533.69  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )和擎天树(2330.29  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),其次是格木、铁力木和降香黄檀,分别是 2070.23  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、1895.82  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和 1626.31  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  浓度饱和点较低的是红锥、柚木,分别是 1269.09  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和 1243.65  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (表 4)。 $\text{CO}_2$  浓度饱和点越高则表示树种利用环境中高浓度  $\text{CO}_2$  进行光合作用的能力越强。

各树种  $\text{CO}_2$  浓度补偿点介于 64.74~93.53  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 差别相对较小。平均值为 78.28  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。环境  $\text{CO}_2$  浓度补偿点由高到低排序依次为格木、山白兰、擎天树、降香黄檀、铁力木、香梓楠、观光木、柚木、灰木莲、米老排、红锥(表 4)。 $\text{CO}_2$  浓度补偿点越低则表明树种利用环境中低浓度  $\text{CO}_2$  的能力越强。

最大光合能力指植物在环境  $\text{CO}_2$  浓度和光照这两个因子均处于最佳条件下的最大净光合速率。各树种最大光合能力为 16.92~32.16  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平均值为 23.97  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最大光合能力由高到低排序依次为米老排、降香黄檀、柚木、格木、红锥、灰木莲、观光木、香梓楠、擎天树、山白兰、铁力木(表 4)。

光呼吸是植物在光照条件的呼吸作用,它吸收氧气,消耗光合产物并释放二氧化碳。可以认为光呼吸速率越快则对植物的光合效率影响越大。各树种光呼吸速率为 1.68~5.20  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平均值为 3.01  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光呼吸速率由高到低排序依次为柚木、米老排、香梓楠、降香黄檀、灰木莲、红锥、格木、观光木、山白兰、铁力木、擎天树(表 4)。

### 3 讨论

在模型拟合过程中,会出现拟合优度高但参数异常无法继续计算,或曲线上限过高即饱和点拟合值高过实测值的现象。在光响应曲线中,造成这种现象的原因可能是光诱导时间不充分或诱导光强不够,导致光强接近饱和点后,光合速率仍出现逐渐升高的趋势。这种现象也可能是树种特性所致,但直观地可以发现已经趋于饱和。这种情况下可以通过参数约束的方法来调整,使得拟合出的饱和点与实际值更加接近,但这会造成  $R_d$  或  $R_p$  值明显变小并低于实际值,拟合优度也会出现一定程度地降低。

各光合特征参数在树种间呈现出一定的差异。

各树种光饱和点、光补偿点、最大净光合速率、暗呼吸速率、二氧化碳饱和点、最大光合能力和光呼吸速率差异均较为明显,最大值是最小值的 2~3 倍,只有二氧化碳补偿点差别相对较小。各树种所处生境相似而光合特性相差较大,可能是各树种适应环境的方式和机制有所不同。

由光合特征参数的比较可知:光合能力较强的树种为柚木、米老排和红锥,较弱的为擎天树、铁力木、山白兰;对高光强适应力较强的树种为铁力木、柚木、观光木和降香黄檀,较弱的为灰木莲和山白兰;对弱光利用能力较强的树种为格木、红锥和香梓楠,较弱的为山白兰、擎天树、观光木和米老排;利用高浓度二氧化碳能力较强的树种有米老排、擎天树和格木,较弱的有观光木、红锥和柚木;利用低浓度二氧化碳能力较强的树种有灰木莲、米老排和红锥,较弱的有格木、山白兰和擎天树。光合产物的消耗方面,在无光条件下消耗光合产物较多的树种有观光木和米老排,较少的有格木和红锥;在光照条件下消耗光合产物较多的树种有柚木、米老排和香梓楠,较少的有铁力木和擎天树。在全球气候变化的背景下,可选择光合能力强的树种造林。格木、红锥和香梓楠对弱光利用能力较强,可作为松、杉人工针叶纯林改造树种。

#### 致谢:

本研究由国家“十二五”科技支撑计划项目(No. 2012BAD22B01)和国家林业行业公益专项重大项目(201404201)资助。国家林业局友谊关森林生态定位站为本研究提供了供试树种试验样地和观测的仪器设备,在实验过程中得到了中国林业科学研究院热带林业实验中心的卢立华、郭文富、蔡子良、贾宏炎等专家、领导的大力支持,在此一并衷心感谢。

#### 参考文献:

- [1] 朱积余,梁瑞龙,蒋焱. 广西优良珍贵树种发展的现状、问题与对策[J]. 广西林业科学, 2007(1):1-4.  
Zhu J Y, Liang R L, Jiang Y. Current situation, problem and counter-measures of Guangxi superior and rare species development [J]. Guangxi Forestry Science, 2007 (1):1-4.
- [2] 莫秋霜,谭军. 广西发展珍贵树种的优势条件及对策[J]. 现代农业科技, 2011(18):245-246.  
Mo Q S, Tan J. Strategies and advantageous conditions of the development of precious tree species in Guangxi province [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011(18):245-246.
- [3] 叶子飘. 光合作用对光和  $\text{CO}_2$  响应模型的研究进展[J]. 植物生态学, 2010, 34 (6):727-740.

- Ye Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO<sub>2</sub> [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34 (6): 727-740.
- [4] 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 light-response of photosynthesis and its application [J]. Journal of Biomathematics, 2008, 23(4): 710-716.
- [5] 曾小美, 袁琳, 沈允钢. 拟南芥连体和离体叶片光合作用的光响应[J]. 植物生理学通讯, 2002(1): 25-26.
- Zeng X M, Yuan L, Shen Y G. Response of photosynthesis to light intensity in intact and detached leaves of *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant Physiology Communications, 2002(1): 25-26.
- [6] 唐艳, 王传宽. 东北主要树种光合作用可行的离体测定方法[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 452-462.
- Tang Y, Wang C K. A feasible method for measuring photosynthesis *in vitro* for major tree species in north-eastern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(4): 452-462.
- [7] 叶子飘, 高峻. 光响应和 CO<sub>2</sub> 响应新模型在丹参中的应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009(1): 129-133.
- Ye Z P, Gao J. Application of a new model of light-response and CO<sub>2</sub>-response of photosynthesis in *Salvia miltiorrhiza* [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2009(1): 129-133.

(责任编辑: 米慧芝)

(上接第 605 页 Continue from page 605)

- [9] 胡舜士. 广西常绿阔叶林的群落学特点[J]. 植物学报, 1979(3): 128-132.
- Hu S S. Community characteristics of evergreen broad-leaved forest in Guangxi [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1979(3): 128-132.
- [10] 王献溥. 广西亚热带山地针阔混交林的群落学特点[J]. 武汉植物研究, 1990, 8(3): 243-253.
- Wang X P. The phytocoenological features of mixed needleleaf and broadleaf forest on subtropical mountain in Guangxi [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1990, 8(3): 243-253.
- [11] Magurran A E. Ecological Diversity and Its Measurement [M]. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [12] 苏宗明. 广西植被的自然环境条件对广西植被的影响[J]. 广西科学, 1998, 5(1): 51-57.
- Su Z M. Influence of natural environmental conditions on the vegetation in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 1998, 5(1): 51-57.
- [13] 温远光, 元昌安, 李信贤, 等. 大明山中山植被恢复过程植物多样性的变化[J]. 植物生态学报, 1998, 22(1): 33-40.
- Wen Y G, Yuan C A, Li X X, et al. Development of species diversity in vegetation restoration process in mid-mountain region of Damingshan, Guangxi [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(1): 33-40.
- [14] 温远光. 大明山不同环境梯度植被的物种多样性研究[J]. 广西农业大学学报, 1998, 17(2): 131-137.
- Wen Y G. A studies on the species diversity of vegetation in different environmental gradient in Daming Mountain [J]. Journal of Guangxi Agricultural University, 1998, 17(2): 131-137.
- [15] 何忠伟. 广西天然银杉群落植被与土壤微生物相关的格局分析[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- He Z W. Pattern Analysis of Vegetation and Soil Microbial in Natural *Cathaya argyrophylla*'s Community, Gaungxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2011.

(责任编辑: 尹 闯)