

巨尾桉与针叶树种光合生理特性的比较研究*

Comparative Study on the Photosynthetic and Physiological Characteristics between *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and Conifer Species

梁士楚^{1,2**}, 石贵玉^{1,2}, 黄雅丽^{1,2}, 韦宇静^{1,2}, 李冰^{1,2}

LIANG Shi-chu^{1,2}, SHI Gui-yu^{1,2}, HUANG Ya-li^{1,2}, WEI Yu-jing^{1,2}, LI Bing^{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】比较桂林市灵田乡人工巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) 林和针叶混交林的光合生理特性, 探究该地区是否适应巨尾桉的生长。【方法】采用 Li-6400 型便携式光合仪测定巨尾桉与马尾松、杉木在春季叶片净光合速率 (Pn) 及其光合生理因子的日变化, 并通过相关性分析了解净光合速率与其它光合生理因子的关系。【结果】这 3 种树种净光合速率在春季均呈现“双峰型”的特点, 光合有效辐射 (PAR)、气孔导度 (Gs)、蒸腾速率 (Tr) 和胞间 CO₂ 浓度是影响这 3 种树种叶片净光合速率日变化的重要因子。【结论】巨尾桉具有较高的水分利用效率 (WUE)、光能利用效率 (LUE) 和 CO₂ 利用效率 (CUE), 还具有适应桂林土山生境且生长快速的特性。

关键词: 巨尾桉 马尾松 杉木 光合作用 日变化 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)04-0217-05

Abstract: 【Objective】 To explore whether Guilin region is suitable for the growth of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, we made comparison of photosynthetic physiological characteristics among *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* plantations and leguminous mixed forest in Lingtian country. 【Methods】 The Li-6400 portable photosynthesis system was used to measure the net photosynthetic rate (Pn) and the daily variation of photosynthetic physiological factors among *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Pinus massoniana*, and *Cunninghamia lanceolata* in spring. Correlation analysis was used to understand the relationship of Pn and other photosynthetic physiological factors. 【Results】 Pn of all tree species showed double-peak characteristic in spring. Photosynthetically active radiation (PAR), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr), and intercellular CO₂ density are main factors affecting Pn daily variation. 【Conclusion】 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* has high

water use efficiency (WUE), light use efficiency (LUE) and CO₂ use efficiency and adapt to mountain habitat with fast growing in Guilin.

Key words: *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, photosynthesis, daily variation, correlation analysis

收稿日期: 2014-04-10

作者简介: 梁士楚 (1965-), 男, 教授, 主要从事湿地生态和植物生态研究。

* 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: E-mail: gxslsc@sina.com.

【研究意义】21世纪以来,随着市场经济的高速发展木材和纸浆需求量越来越大,而供应量持续低迷的市场状况引起了世界各国的高度重视。木材和纸浆供给量严重不足的问题已俨然从普通的经济问题逐步演变为严峻的资源战略问题。我国不仅是木材生产及消费大国,也是木材进口大国,木材自给能力较弱,供不应求的矛盾日益尖锐,木材产业对外进口依赖程度日益加大,再加上我国原木出口受到极大限制,这严重威胁到我国木材安全和经济稳定^[1]。为解决这一问题盛炜彤^[2]在1999年提出大力发展人工森林(简称人工林)。因此,了解人工林树种的光合生理特性,可以为人工林树种选择提供理论依据。**【前人研究进展】**巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)为高大乔木,阳生植物,生长速度快,树干直而挺,耐寒性好,能耐-3℃短期霜冻,但抗风力弱,易倒伏;适宜生长在肥沃、疏松、排水良好的山地红壤、砖红壤性红壤。巨尾桉有效结合了巨桉生长快,制浆性能高和尾叶桉适应低海拔干旱土壤、耐贫瘠和无性繁殖容易的优点^[3,4]。**【本研究切入点】**人工桉树林多数是砍伐马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等树种而建成的。不少学者质疑人工桉树林比马尾松、杉木人工林在适应性和生长状况等方面是否具有优越性。目前有关桉树和针叶树种的光合生理比较的研究少见报道。**【拟解决的关键问题】**以桂林灵田乡巨尾桉、马尾松和杉木为研究对象,比较树种的光合能力和水分利用效率,分析3种树种春季净光合速率的变化与其它光合生理因子的关系,探讨巨尾桉与针叶树种在同一生境中的适应性。研究结果对揭示巨尾桉与针叶树种在桂林市土山生境的生理学机制具有重要的理论和实践意义。

1 试验材料及研究方法

1.1 样地概况

试验样地设在桂林市灵田乡。灵田乡位于桂林市区北面,灵川县城东面,距桂林市区35km,气候温和,年均气温18.6℃,年降水量1614mm,4~6月为全年降水量的高峰期,占全年降水量的51%,秋季干燥少雨,全年相对湿度76%,全年无霜期309d,最冷天在1月和2月^[5]。样地为土山生境,土壤肥沃。样地中除了有巨尾桉、马尾松和杉木外,主要还有山茶花(*Camellia japonica*)、红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)、黧蒴栲(*Castanopsis fissa*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、

杨梅(*Morella rubra*)等树种。

1.2 实验材料

两年生人工巨尾桉林和附近人工种植的马尾松和杉木林。

1.3 研究方法

1.3.1 指标的日变化测定

测定时间为2012年春季(4月中旬)天气晴朗时。在人工巨尾桉林与人工针叶林中选择具有代表性的且长势良好的巨尾桉、马尾松和杉木各3株,每个树种选取植株中上部完全展开且长势良好的5张叶片,用Li-6400便携式光合仪测定叶片光合特性日变化,测定时间为8:00~17:00,每1h对植株叶片测定1次,连续测定3d,每片叶片采集5个数据(每隔5s采集1次)。测定光合指标参数包含净光合速率(Pn)、光合有效辐射(PAR)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)以及胞间CO₂浓度(Ci)等生理指标。数据从仪器中导出并传入电脑后,有效数据的选择条件是稳定系数必须大于等于0.7,最后取巨尾桉、马尾松和杉木各时间段相对应数据组的平均值作为试验结果。

1.3.2 数据处理

用Excel2003对Li-6400便携式光合仪导出的数据进行整理并作图,再利用便携式叶面积仪(Li-3000C,美国)测量出针叶树种(马尾松和杉木)叶面积,并计算3个光合特性指标:水分利用效率(WUE)、光能利用效率(LUE)、CO₂利用效率(CUE);其计算公式为WUE = Pn/Tr^[6]; CUE = Pn/Ci^[7]; LUE = Pn/PAR^[8,9];最后采用SPSS17.0软件对植物光合生理试验数据分别进行显著性检验、相关性分析^[10]等统计学分析。

2 结果与分析

2.1 光合有效辐射和净光合速率

由图1可知,巨尾桉、马尾松和杉木净光合速率Pn的日变化均呈现“双峰型”的现象。这3种树种Pn在10:00~14:00维持相对较高的水平,其中在12:00左右因植物叶片“光合午休”而出现Pn下降的现象。3种树种Pn的大小顺序为巨尾桉(12.107 ± 4.283 μmol · m⁻² · s⁻¹) > 马尾松(10.281 ± 3.624 μmol · m⁻² · s⁻¹) > 杉木(4.229 ± 1.705 μmol · m⁻² · s⁻¹)。3种树种光合有效辐射PAR日变化与Pn日变化趋势基本一致,均呈现“双峰型”的现象,其双峰出现在11:00和14:00。

2.2 气孔导度和 CO₂ 利用效率

通常,随着外界光照强度增大,气温逐渐升高,气孔开放程度也逐渐加大,植物叶片气孔导度 Gs 也随着升高。由图 2 可知,巨尾桉、马尾松和杉木的 Gs 在 10:00 达到最大值。3 种树种 Gs 的大小顺序为巨尾桉($0.1932 \pm 0.0737 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 马尾松($0.1777 \pm 0.0580 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 杉木($0.0284 \pm 0.0121 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。巨尾桉、马尾松和杉木的 CO₂ 利用效率(CUE) 均呈现“双峰型”的现象。3 种树种 CUE 在 11:00 峰值的大小顺序为马尾松($0.063 \pm 0.0005 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 巨尾桉($0.08 \pm 0.0003 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 杉木($0.029 \pm 0.0001 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

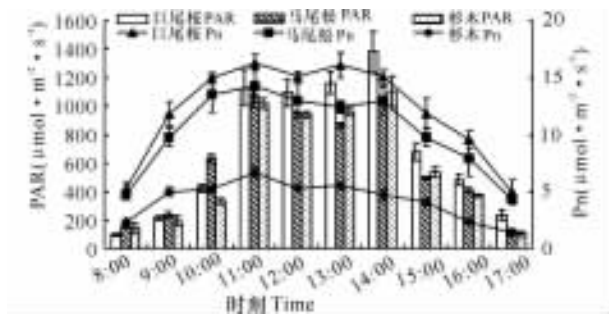


图 1 巨尾桉、马尾松和杉木光合有效辐射(PAR)和净光合速率(Pn)的日变化

Fig. 1 Daily variation of PAR and Pn for *Eucalyptus grandis* × *E. wrophylla*, *Pinus massoniana* and *Cunningham lanceolata*.

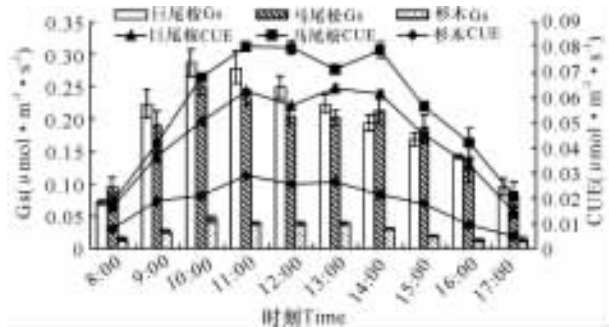


图 2 巨尾桉、马尾松和杉木气孔导度(Gs)和 CO₂ 利用效率(CUE)的日变化

Fig. 2 Daily variation of Gs and CUE for *Eucalyptus grandis* × *E. wrophylla*, *Pinus massoniana* and *Cunningham lanceolata*.

2.3 蒸腾速率和光能利用效率

巨尾桉、马尾松和杉木的蒸腾速率(Tr)基本上都呈现出双峰曲线趋势(图 3),第 1 个峰值出现在 10:00 左右,蒸腾速率分别为 $3.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $6.02 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.72 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,第 2 个峰值出现在 14:00 左右,蒸腾速率分别为

$4.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $4.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中以马尾松的蒸腾速率最高,同一时段杉木最低;在春季这 3 种树种的 LUE 日变化基本呈现“U”型曲线,从 8:00~9:00 出现上升现象,9:00 之后 LUE 逐渐降低,11:00~14:00 达到最低值,随之又开始缓慢上升,但是早上的 LUE 要比下午的高。比较这 3 种树种春季平均 LUE 可知,巨尾桉和马尾松不存在显著性差异,且巨尾桉的平均 LUE 最高($0.0257 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),杉木最低($0.0107 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

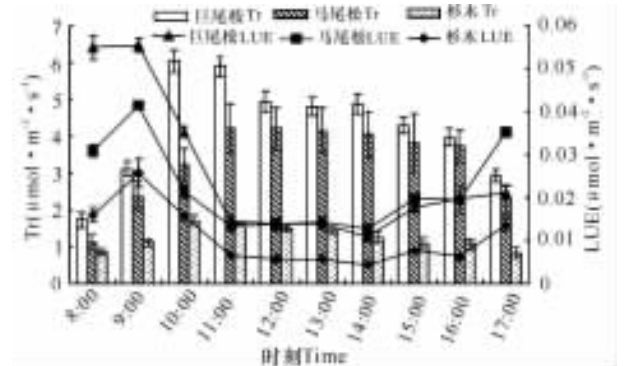


图 3 巨尾桉、马尾松和杉木蒸腾速率(Tr)和光能利用效率(LUE)的日变化

Fig. 3 Daily variation of Tr and LUE for *Eucalyptus grandis* × *E. wrophylla*, *Pinus massoniana* and *Cunningham lanceolata*

2.4 胞间 CO₂ 浓度及叶面饱和蒸汽压亏缺

巨尾桉、马尾松和杉木胞间 CO₂ 浓度 Ci 日变化幅度都比较大,而 Ci 的日变化基本与净光合速率相反,通过光合作用固定的 CO₂ 越多,则植物叶片的 Ci 就越低(图 4)。因此,在 13:00 外界高光强高温条件下,植物气孔关闭,Pn 减弱,Ci 上升,且 3 种树

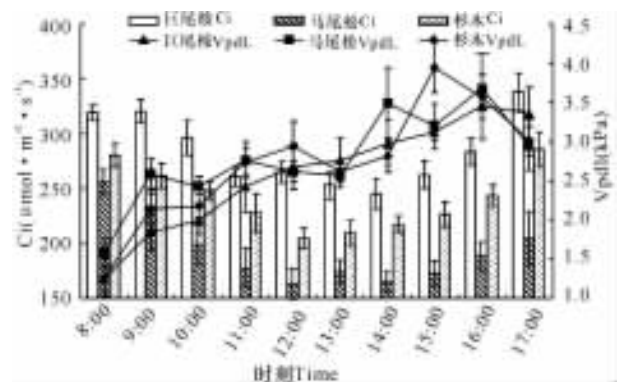


图 4 巨尾桉、马尾松和杉木胞间 CO₂ 浓度(Ci)和叶面饱和蒸汽压亏缺(Vpdl)的日变化

Fig. 4 Daily variation of Ci and Vpdl for *Eucalyptus grandis* × *E. wrophylla*, *Pinus massoniana* and *Cunningham lanceolata*.

种叶片的 C_i 存在极显著差异 ($P < 0.01$), 其中以巨尾桉的平均 C_i 最高 ($284.501 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。3种树种叶片 V_{pdl} 的日变化也比较大, 都是呈现波浪式上升的趋势, 且3种树种叶片的 V_{pdl} 之间的差异不显著。

2.5 净光合速率与影响因子之间的相关分析

2.5.1 相关性分析

巨尾桉、马尾松和杉木净光合速率 (P_n) 及其气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r)、叶面饱和蒸汽压亏缺 (V_{pdl})、光合有效辐射 (PAR) 等主要影响因子之间的相关性如表 1、表 2 和表 3 所示。

由表 1 可以看出, 巨尾桉净光合速率与气孔导度、蒸腾速率、光合有效辐射和 CO_2 利用效率呈极显著或显著正相关, 与胞间 CO_2 浓度、光能利用效率呈极显著或显著的负相关, 与叶面饱和蒸汽压亏缺、水分利用效率的相关不显著。

表 1 巨尾桉净光合速率及其主要影响因子的相关性

Table 1 Correlation of net photosynthetic rate (P_n) and its main affecting factors for *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*

项目 Item	P_n	G_s	C_i	T_r	V_{pdl}	PAR
G_s	0.745 *	—	—	—	—	—
C_i	-0.794 **	-0.285	—	—	—	—
T_r	0.915 **	0.576	-0.818 **	—	—	—
V_{pdl}	-0.152	-0.370	-0.122	0.176	—	—
PAR	0.806 **	0.358	-0.939 **	0.879 **	0.370	—
WUE	0.200	0.394	0.091	-0.152	0.939 **	-0.273
LUE	-0.697 *	-0.176	0.891 **	-0.818 **	-0.442	-0.964 **
CUE	0.976 **	0.673 *	-0.855 **	0.867 **	-0.103	0.855 **

* 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示差异极显著, $P < 0.01$ 。

* indicate significant difference at $P < 0.05$; ** indicate very significant difference at $P < 0.01$.

表 2 马尾松净光合速率及其主要影响因子的相关性

Table 2 Correlation of net photosynthetic rate (P_n) and its main affecting factors for *Pinus massoniana*

项目 Item	P_n	G_s	C_i	T_r	V_{pdl}	PAR
G_s	0.976 *	—	—	—	—	—
C_i	-0.491	-0.455	—	—	—	—
T_r	0.939 **	0.939 **	-0.600	—	—	—
V_{pdl}	-0.152	-0.152	-0.455	-0.006	—	—
PAR	0.879 **	0.842 **	-0.758 *	0.855 **	0.152	—
WUE	0.164	0.152	0.030	-0.127	-0.406	0.152
LUE	-0.612	-0.576	0.818 **	-0.648 *	0.382	0.903 **
CUE	0.879 **	0.818 **	-0.794 **	0.879 **	0.176	0.976 **

* 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示差异极显著, $P < 0.01$ 。

* indicate significant difference at $P < 0.05$; ** indicate very significant difference at $P < 0.01$.

从表 2 看出, 马尾松净光合速率与气孔导度、蒸腾速率、光合有效辐射和 CO_2 利用效率呈极显著或

显著正相关, 与胞间 CO_2 浓度、光能利用效率、叶面饱和蒸汽压亏缺、水分利用效率的相关不显著。

从表 3 看出, 杉木净光合速率与气孔导度、蒸腾速率、光合有效辐射、水分利用效率和 CO_2 利用效率呈极显著或显著正相关, 与胞间 CO_2 浓度、光能利用效率、叶面饱和蒸汽压亏缺的相关不显著。

表 3 杉木净光合速率及其主要影响因子的相关性

Table 3 Correlation of net photosynthetic rate (P_n) and its main affecting factors for *Cunninghamia lanceolata*

项目 Item	P_n	G_s	C_i	T_r	V_{pdl}	PAR
G_s	0.903 **	—	—	—	—	—
C_i	-0.600	-0.455	—	—	—	—
T_r	0.891 **	0.952 **	-0.552	—	—	—
V_{pdl}	-0.345	-0.394	-0.297	-0.248	—	—
PAR	0.636 *	0.527	-0.855 **	0.600	0.200	—
WUE	0.733 *	0.564	-0.418	0.527	-0.333	0.564
LUE	-0.273	-0.176	0.830 **	-0.285	-0.491	-0.806 **
CUE	0.952 **	0.842 **	-0.745 *	0.867 **	-0.164	0.830 **

* 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示差异极显著, $P < 0.01$ 。

* indicate significant difference at $P < 0.05$; ** indicate very significant difference at $P < 0.01$.

2.5.2 逐步回归分析

为了研究植物的净光合速率对光合生理因子的灵敏度, 即了解这些光合生理因子对巨尾桉、马尾松和杉木净光合速率的影响, 采用逐步回归的分析方法建立模型, 得出的回归方程: 巨尾桉 $P_n = 21.113 + 40.045G_s - 0.059C_i$; 马尾松 $P_n = 0.555 + 42.266G_s + 0.004PAR$; 杉木 $P_n = 0.685 + 124.628G_s$ 。复相关系数 $R = 1$, 回归方程经 F 检验表明, $P < 0.01$, 因变量与自变量的相关性极显著。回归系数检验结果得出 G_s 、 C_i 和 PAR 各回归系数均达到极显著或显著水平。从 3 个回归方程可以看出, 气孔导度很大程度上影响树种的净光合速率。

3 讨论

植物叶片所进行的光合作用是一个十分复杂的生理过程^[11], 其净光合速率日进程曲线通常被分为“双峰曲线型”和“单峰型曲线”。本研究中, 巨尾桉、马尾松和杉木的净光合速率日变化呈现双峰曲线型。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^[12]。对巨尾桉、马尾松和杉木各项光合生理指标进行通径分析表明, 这 3 种树种的净光合速率主要受到气孔导度、胞间 CO_2 浓度和光合有效辐射的影响。其中净光合速率的高低与其叶片的气孔的开度密切相关, 这与净光合速率日变化曲线整体上与气孔导度日变化曲线大体一致。胞间 CO_2 浓度日变化曲线趋势

与其净光合速率日变化趋势大体相反,原因可能是随着植物叶片的净光合速率的上升,其植物叶肉细胞固定 CO₂ 的能力也随之增大,导致胞间 CO₂ 浓度降低,大大提高了其 CO₂ 利用效率^[5]。太阳辐射所提供的光合有效辐射(PAR)是植物生长过程中最重要的限制因子之一,且可直接影响植物的光合作用情况和植物体的生长情况^[13~15]。本研究表明,光合有效辐射与植物净光合速率呈极显著正相关,说明巨尾桉吸收外界光照的能力比马尾松和杉木高,即巨尾桉具有较高的净光合速率。水分利用效率的大小可以反映植物对环境适应能力的强弱,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^[16],但其高低取决于气孔控制的光合作用和蒸腾作用两个相互耦合的过程^[17]。本研究的3种树种中,巨尾桉的水分利用效率最高。总之,从光合生理方面来看,巨尾桉适应环境能力比马尾松和杉木强。

参考文献:

[1] 陈勇. 基于木材安全的中国林产品对外依存度研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2008.
Chen Y. The Study on China's Foreign Dependence for Forest Products Based on Timber Safety[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2008.

[2] 盛炜彤. 我国人工林生产力长期保持问题[J]. 林业科技管理,1999(3):23-26.
Sheng W T. Long-term keep problem on productivity of plantation in China[J]. Forest Science & Technology Management,1999(3):23-26.

[3] 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.

[4] 陆钊华. 尾叶桉种内种间交配遗传分析及 F₁ 选择研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.
Lu Z H. Genetic Analysis and F₁ Selection of *Eucalyptus urophylla* Intraspecific and Interspecific Crossing Combinations[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2009.

[5] 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* × *E. urophylla* in karst hills (I): Photosynthetic physiological ecology characteristic in spring[J]. Guihaia,2012,32(2):185-191.

[6] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the Arid and Semiarid Zones [J]. Ann Rev Plant Physiology, 1978,29:227-317.

[7] 郭卫华,李波,黄永梅,等. 不同程度的水分胁迫对中间锦鸡儿幼苗气体交换特征的影响[J]. 生态学报,2004,24(12):2716-2722.

Guo W H, Li B, Huang Y M, et al. Effects of severity of water stress on gas exchange characteristics of *Caragana Intermedia* seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(12):2716-2722.

[8] Sims D A, Rahman A F, Cordova V D, et al. Midday values of gross CO₂ flux and light use efficiency during satellite overpasses can be used to directly estimate eight-day mean flux [J]. Agr Forest Meteorol, 2005, 131:1-12.

[9] Jenkins J P, Richardson A D, Braswell B H, et al. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous towerbased carbon flux and radiometric measurements [J]. Agric For Meteorol, 2007, 143:64-79.

[10] 李春喜,姜丽娜,邵云,等. 生物统计学[M]. 第3版. 北京:科学出版社,2005:263-266.
Li C X, Jiang L N, Shao Y, et al. Biostatistics[M]. 3rd edition, Beijing: Science Press, 2005:263-266.

[11] Agu L, Ladislav N, Govindjee. Photosynthesis in Silico: Understanding Complexity from Molecules to Ecosystems [M]. Netherlands: Springer, 2009: 465-497.

[12] 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.

[13] Wang Z F, Zhu T Y, Zhu J W. Forest Meteorology [M]. Beijing: China Forestry Press, 1985.

[14] Zhang Y L, Qin B Q. The basic characteristic and climatological calculation of the photosynthetically available radiation in Taihu region [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(1):118-123.

[15] 祁红彦,周广胜,许振柱. 北方玉米冠层光合有效辐射垂直分布及影响因子分析[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(1):22-26.
Qi H Y, Zhou G S, Xu Z Z. Vertical distribute on characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors [J]. Journal of meteorology and environment, 2008, 24(1):22-26.

[16] 张正斌,山仑. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1):73-78.
Zhang Z B, Shan L. Research development in estimation models of crop water use efficiency and transpiration and evaporation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(1):73-78.

[17] 王建林,于贵瑞,房全孝,等. 不同植物叶片水分利用效率对光和 CO₂ 的响应与模拟[J]. 生态学报, 2008, 28(2):525-533.
Wang J L, Yu G R, Fang Q X, et al. Responses of water use efficiency of nine plant species to light and CO₂ and its modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):525-533.