

# 巨尾桉光合特征与水分消耗的季节适应\*

邓 云<sup>1,2</sup> 张 磊<sup>2,3</sup> 王 冰<sup>2</sup> 苏文华<sup>2</sup> 张光飞<sup>2</sup> 邓晓保<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园 勐腊 666303; 2. 云南大学生态学与地植物学研究所 昆明 650091;  
3. 云南新兴职业学院 昆明 650501)

**摘 要:** 使用 Li-6400 于旱季和雨季分别对云南省澜沧地区种植巨尾桉的净光合速率和蒸腾速率、气孔导度进行测定。研究发现: 雨季巨尾桉光饱和点达  $1\ 590\ \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ , 而旱季土壤水分不足时光饱和点仅  $867\ \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ , 光补偿点亦有下降。旱季气孔导度对蒸腾和光合的限制作用明显强于雨季。旱季巨尾桉气孔限制强度及蒸腾对光强变化的响应均与本地植物红木荷类似, 而雨季巨尾桉的净光合速率远高于后者。巨尾桉具有与环境水分供应变化相协调的水分利用策略, 旱季减少水分消耗以尽量节水, 雨季则充分光合以获得更多生长。其类似本地植物季节变化的蒸腾特征和水分利用对策有利于维持群落地段的水分平衡。

**关键词:** 巨尾桉; 光合速率; 蒸腾特征; 水分利用效率

中图分类号: S718.43 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2010)08-0084-07

## Seasonal Variations in Photosynthesis and Water Use Efficiency of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*

Deng Yun<sup>1,2</sup> Zhang Lei<sup>2,3</sup> Wang Bing<sup>2</sup> Su Wenhua<sup>2</sup> Zhang Guangfei<sup>2</sup> Deng Xiaobao<sup>1</sup>

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences Mengla 666303;

2. Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University Kunming 650091; 3. Yunnan Xinxing Occupations Institute Kunming 650501)

**Abstract:** The photosynthesis, transpiration and stomatal conductance of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* was studied under different seasons in Lancang, Yunnan Province with Li-6400. Result showed that LSP of *E. grandis* × *E. urophylla* was  $1\ 590\ \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  in rainfall season, and decreased to  $867\ \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  in dry season. Seasonal drought enhanced stomatal limitation to both photosynthesis and transpiration. *E. grandis* × *E. urophylla* had similar change patterns of stomatal conductance and transpiration in response to irradiation intensity as native species *Schima wallichii* in dry season, but the photosynthesis was much higher than *Schima wallichii*. *E. grandis* × *E. urophylla* could adapt different water conditions in different seasons as native species.

**Key words:** *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*; photosynthesis; transpiration; water use efficiency

水分是植物生长所需的重要因子, 尤其在在我国西南和华南地区, 由于受季风影响强烈, 虽然降水充沛, 但由于旱雨 2 季分明, 每年 11 月一次年 5 月漫长的干旱成为本区生态环境最为脆弱的时期。近年来我国人工林发展迅速, 面积已居世界首位 (Pamela 2003), 由于人工林物种较为单一, 不恰当的树种选择很有可能极大地增加当地环境负担, 因此, 在人工林抚育时判明所选树种对当地环境脆弱期的适应策略, 对当地经济与环境的可持续发展显得尤为重要。

作为优良的速生树种之一, 巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) 由于其速生丰产特性以及伴

随而来的巨大经济意义, 在我国许多地方都有大面积种植 (祁述雄, 2002)。但由于受多种原因影响, 目前对本树种与环境的相互利用与竞争关系存在较大争议, 而对水分的过度利用是其争论的焦点之一 (王震洪等, 1998; 谢直兴等, 2006)。

已有研究表明: 不同种类桉树 (*Eucalyptus*) 的光合和水分消耗特征可能存在较大差异 (Calder, 1992), 即使对于同种桉树, 不同的环境差异也可能有不同的适应机制从而导致不同的光合速率和蒸腾强度, 水分利用效率和相关适应策略可能在不同种间存在较大差别。作为外来引种植物之一, 判明其本地环境的适应策略, 了解该策略是否对本地环境

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2010-06-21。

基金项目: 云南省政府科技专项项目“云南人工桉树林的生态环境效应及调控对策研究”。

\* 苏文华为通讯作者。

尤其是水分循环造成潜在影响,是桉树林可持续发展中的重要问题。国内学者对桉树一些品种的渗透调节物质(李昆等,1999),水势与气孔导度(高洁等,2004)、综合抗旱性(马焕成等,2002),以及植被恢复功能(曾觉民,2001)等进行过相关探讨,但针对云南季风气候下巨尾桉不同季节光合作用与气孔调节能力的变化与适应方面的研究还相对较少。本文主要通过对本地区种植的巨尾桉光合特征及水分利用效率研究,以期了解野外旱雨 2 季不同水分条件下巨尾桉对应光合/蒸腾规律及其气孔调节能力变化,判断其对不同环境的适应机制,对巨尾桉的生长及水分消耗特性做出科学评价。

## 1 研究方法

试验于 2006—2007 年间于云南澜沧县进行。澜沧县位于云南省西南部,年均温 18.9 °C,年均降水量 1 643.4 mm。由于地处“田中线”以南,气候受东南季风影响强烈,旱雨 2 季分明。本地巨尾桉种植以巨桉(*Eucalyptus grandis*)、尾叶桉(*E. urophylla*)及其杂交品系为主(徐伦先,2004)。试验中选择云南省澜沧县东岗乡磨介村的巨尾桉(品系 JG-3)人工林作为调查样地。样地坡向正西,坡度 25°,其内巨尾桉均为 2005 年 6 月种植。同时选取附近邻接常绿阔叶林中代表树种红木荷(*Schima wallichii*)为对照,选择能够受到充分光照的巨尾桉和红木荷植株进行试验。

### 1.1 光合作用与蒸腾作用测定

使用便携式光合测定系统(Li-cor Li-6400, USA)于 2006 年 9 月和 2007 年 4 月 2 次前往该地进行雨季和旱季的光合速率及蒸腾速率测定,每次保证 3 个全天的有效记录。叶片尽量选择外侧能够接受充分光照的叶片,测量时尽量顺应叶片自然朝向。每株植物南北各取 1 片叶,测 5 株共 10 片叶。测量时间设为每天 9:00,11:00,13:00,15:00,17:00,时间误差控制在前后半小时之内。记录每时间点上植物净光合速率( $P_n$ ),蒸腾速率( $T_r$ ),气孔导度( $G_s$ ),以及空气湿度、叶温、光强等环境参数。根据公式:  $WUE = P_n / T_r$ ,计算瞬时水分利用效率 WUE。考虑本地气候尤其是雨季天气多变,即使严格控制测定时间,但多变的天气往往直接导致日变化观测结果随时间呈现不规则波动状态(时间与天气变化无相关性),因此本文放弃传统光合日变化特征比较,而是选用日变化中的瞬时测量结果进行光响应曲线拟合并计算光饱和点及光补偿点,以期真实反映野外自然条件下环境因子对植物光合作

用强度的复合作用。

依据 Bassman 等(1991)的方法拟合  $P_n$ -PFD 的曲线方程:  $P_n = P_{max} (1 - C_0 e^{-\Phi PFD / P_{max}})$ ,其中  $P_{max}$  为最大净光合速率, $\Phi$  为弱光下光化学量子效率, $C_0$  为度量弱光下净光合速率趋于 0 的指标,PFD 为光量子通量密度(文中以光合有效辐射 PAR 代替)。若方程通过适合性检验,拟合效果良好,则用下式计算光补偿点(LCP):  $LCP = P_{max} \ln(C_0) / \Phi$ ,假定  $P_n$  达到  $P_{max}$  的 99% 的 PFD 为光饱和点(LSP),则:  $LSP = P_{max} \ln(100C_0) / \Phi$ 。

### 1.2 土壤含水量测定

每次测定 9:00 前使用 HH2 土壤水分速测仪完成 10 cm 深度土壤含水量测定,每季每种植林分下至少重复 5 次。

### 1.3 统计分析

数据简单处理和绘图使用 Excel2003 和 SigmaPlot9.0,数据分析使用 SPSS13.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同季节土壤含水量

不同季节各树种林下土壤含水量如图 1。对东岗地区旱季和雨季 2 树种的检验结果表明:旱季和雨季桉树与红木荷方差均为齐性( $F$  的相伴概率旱季为 0.470,雨季为 0.752)。旱季的  $t$  检验结果支持 2 树种林下土壤含水量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),而雨季则差异不明显( $P = 0.109$ )。雨季各树种下土壤

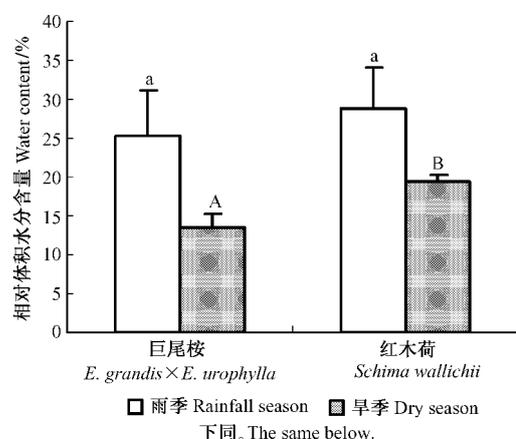


图 1 不同季节各树种林下土壤含水量状况

Fig. 1 Soil water content under different forest during different seasons

图中误差线表示标准差,相同字母表示差异不显著( $P < 0.05$ )。Bars indicate the standard deviation of the means; Same letters indicate no significant differences among species at 0.05 level. 下同。The same below.

含水量差异不明显,同时具有较大的相对误差,这是雨季特有的气候条件决定的。旱季红木荷林下水分含量相对稳定并相对偏高,这是由于红木荷林内不存在巨尾桉林内的人为整地、除草等行为,地表覆盖物较多,可以保证土壤水分环境的相对稳定。

### 2.2 不同季节净光合速率对光强的响应

雨季 2 种植物净光合速率随光合有效辐射变化规律均明显强于旱季,方程  $R^2$  较旱季拟合结果更高,拟合效果良好(图 2)。其中,巨尾桉净光合速率在雨季  $500 \mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  以上高光强阶段明

显高于红木荷,这可能是由于红木荷强光下  $P_n$  降低,受到明显光抑制所致。

旱季巨尾桉和红木荷净光合速率与光强变化间的拟合情况并不理想,拟合度较雨季下降不少,但方程  $P > 0.01$ ,因此拟合结果在统计上有一定意义(图 2)。拟合结果降低暗示此时光强并不再是限制植物光合速率的唯一因素,而方程仍有意义则表明光合有效辐射仍是影响植物净光合速率的主要因子之一,拟合结果能够代表光强因子对光合速率的作用规律。

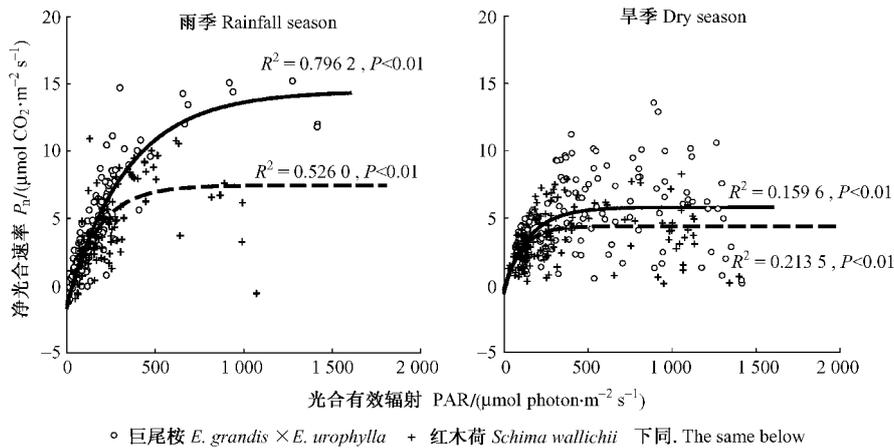


图 2 不同季节巨尾桉与红木荷净光合速率随光合有效辐射变化散点及预测曲线

Fig. 2 The effect of photosynthetic active radiation on leaf net photosynthetic rate of *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* during different seasons

图中实线为巨尾桉拟合结果,虚线为红木荷拟合结果。The lines show the curve fitting result for *E. grandis* × *E. urophylla* (solid line) and *Schima wallichii* (dotted line). 下同。The same below.

雨季巨尾桉光饱和点高达  $1590 \mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,体现出较强的光合能力;而此时红木荷  $697 \mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  下即达饱和,之后还

有一定的光抑制趋势。雨季巨尾桉光补偿点与红木荷较为接近,分别为  $31$  和  $33 \mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 3)。

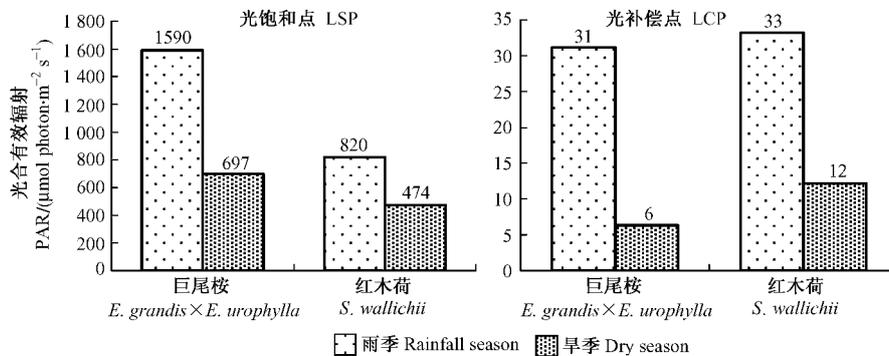


图 3 不同季节巨尾桉与红木荷光饱和点与光补偿点比较

Fig. 3 LCP and LSP variations between *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* during different seasons

旱季 2 种植物光饱和点和光补偿点均有下降,这可能与此时的温度、水分胁迫诱导的气孔关闭限制叶片  $\text{CO}_2$  交换有关。巨尾桉旱季光饱和点仅为雨季时的  $43.85\%$ ,为  $820 \mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而

红木荷则下降为雨季时的  $57.89\%$ ,达  $474 \mu\text{mol} \cdot \text{photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;相对雨季而言,旱季 2 种植物光饱和点相对接近,但巨尾桉仍然高于红木荷,表现出相对更强的光合能力。

光补偿点方面,巨尾桉光补偿点为  $6 \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 红木荷为  $12 \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 均较雨季有所降低。巨尾桉相对更低的光补偿点可能暗示巨尾桉能够利用更低水平光强, 有利于早晚温度、水分胁迫程度较低时更多的利用光能。

### 2.3 不同季节蒸腾速率对光强的响应

雨季巨尾桉和红木荷 PAR- $T_r$  关系虽方程拟合优度不高 ( $R^2 = 0.341$  和  $0.113$ ), 但  $P < 0.01$ , 方程仍有意义(图 4)。此时蒸腾速率随光强增加都有增加趋势, 其中巨尾桉增长的斜率相对较高。有部分

散点在低光强下也表现出较高的蒸腾速率, 这是当时的多云天气暂时降低瞬时 PAR 读数, 而相关的蒸腾仍在进行。

旱季天气相对晴朗, 因此强光下散点增加, 但此时蒸腾速率随光合有效辐射增加的趋势却弱于雨季(图 4)。预测曲线表明此时 2 种植物蒸腾速率随光强增加都有先增后降的趋势, 方程拟合度也较雨季情况要好(巨尾桉  $R^2 = 0.388$ , 红木荷为  $0.393$ ,  $P$  均小于  $0.01$ ), 散点分布较雨季的规律性更加明显。

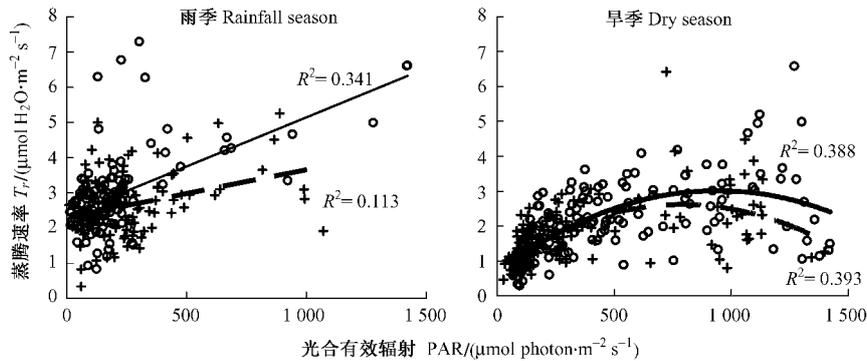


图 4 不同季节巨尾桉与红木荷蒸腾速率随光合有效辐射变化散点及预测曲线  
Fig. 4 The effect of photosynthetic active radiation on transpiration rate of *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* under different seasons

### 2.4 不同季节水分利用效率对光强的响应

雨季巨尾桉和红木荷光强度  $0 \sim 500 \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-2}$  范围内水分利用效率随光强增加而逐渐增加, 且此时 2 树种 WUE 的增加幅度较为近似; 光强  $500 \mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-2}$  以后红木荷 WUE 首先出现降低, 巨尾桉水分利用效率虽也有一定程

度降低, 但在此范围内均高于红木荷, 同时下降开始时的对应光强要高于红木荷(图 5)。

旱季 2 树种水分利用效率在各光强范围内均相差不大, 都表现出随光强增加而降低的趋势。此时散点与方程的离散程度也较高, 尤其在低光强部分最为明显。

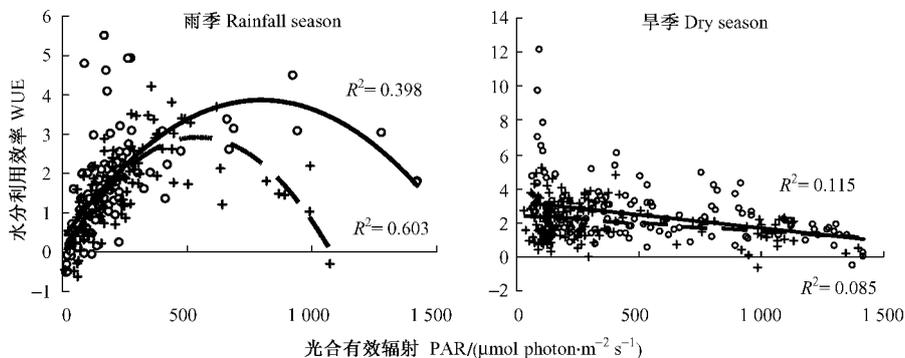


图 5 不同季节巨尾桉与红木荷水分利用效率随光合有效辐射变化散点及预测曲线  
Fig. 5 The effect of photosynthetic active radiation on water use efficiency of *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* under different seasons

### 2.5 不同季节水分利用效率对空气湿度的响应

湿度是影响植物蒸腾与光合特征的重要因子, 但试验发现不同季节下 2 种植物水分利用效率在对空气湿度变化有着显著差异。旱季巨尾桉和红木荷

水分利用效率随空气湿度增加均有明显的上升(图 8), 其中巨尾桉的方程斜率  $k$  较红木荷 ( $k = 0.0691$ ,  $R^2 = 0.6141$ ,  $P < 0.001$ ) 更高, 达到  $0.1026$  ( $R^2 = 0.621$ ,  $P < 0.001$ ); 但与旱季情况相

反,雨季巨尾桉和红木荷水分利用效率不表现出随湿度变化而变化的相关趋势,方程拟合不良(巨尾桉  $R^2 = 0.020$ ,  $P = 0.124$ ; 红木荷  $R^2 = 0.006$ ,  $P = 0.421$ ),空气湿度对植物水分利用效率基本不产生明显影响。

## 2.6 气孔导度对净光合速率和蒸腾速率调节作用

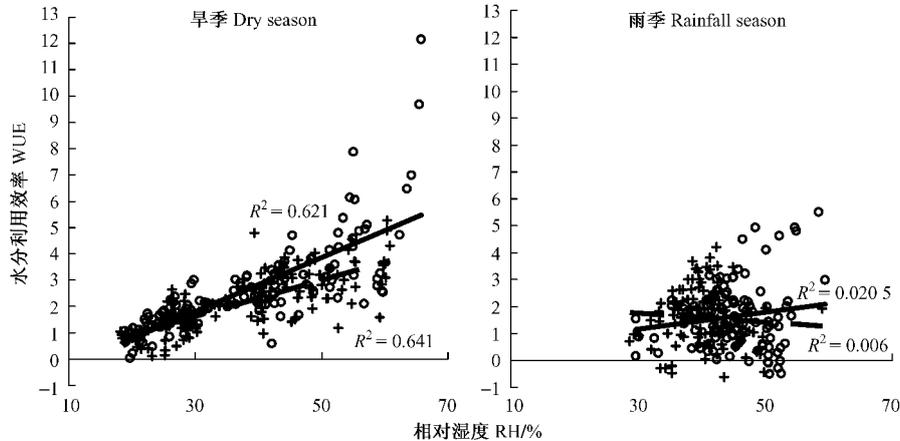


图6 不同季节巨尾桉与红木荷水分利用效率随大气相对湿度变化散点及预测曲线

Fig. 6 The effect of relative humidity on water use efficiency of *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* under different seasons

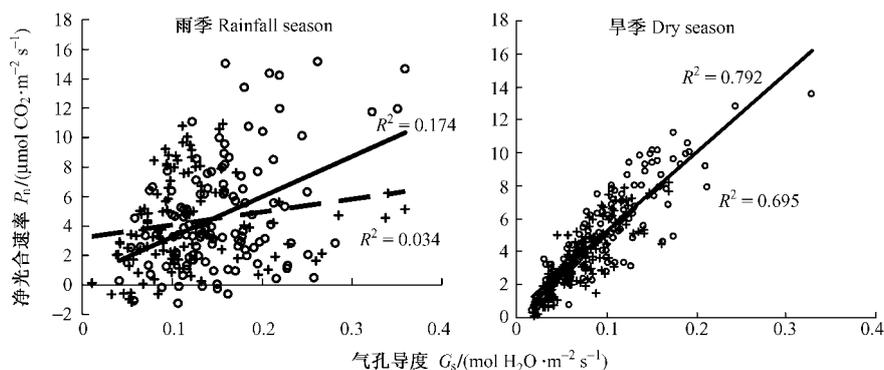


图7 不同季节巨尾桉与红木荷净光合速率随气孔导度变化散点及预测曲线

Fig. 7 The effect of stomatal conductance on net photosynthetic rate of *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* under different seasons

与雨季情况相反,旱季气孔导度与  $P_n$  间呈现出较高的拟合度 ( $R^2 = 0.792$  和  $0.695$ ),说明旱季植物光合能力很大程度上受到气孔开闭的影响。同时,此时巨尾桉与红木荷  $G_s$ - $P_n$  图像斜率相当接近 ( $k$  分别为  $48.18535$  和  $48.53114$ ),说明此时气孔对植物的限制作用在不同物种间具有很大的相似性。

雨季巨尾桉在气孔导度增加时蒸腾增加量更多,具有更高方程斜率 ( $k = 14.006$ )。当旱季到来时,巨尾桉与红木荷  $P_n$  随  $G_s$  的线性方程斜率却基本相当 ( $k = 12.748$  和  $11.740$ )。总体而言,旱季和雨季气孔对蒸腾的线性拟合程度相似,只是巨尾桉斜率略有下降,而红木荷则有所增加(图7)。这证

明气孔对蒸腾的调节作用的规律性类似,并随季节变化有一定影响,但影响的强度不大。

不论巨尾桉还是红木荷,雨季净光合速率与气孔导度的拟合度并不高 ( $R^2 = 0.174$  和  $0.034$ )。雨季巨尾桉与红木荷随气孔导度增加都有增加趋势(图6),其中巨尾桉线性关系相对明显,尤其气孔导度较高时  $P_n$  的增加量较红木荷高。

明气孔对蒸腾的调节作用的规律性类似,并随季节变化有一定影响,但影响的强度不大。

## 3 讨论

### 3.1 巨尾桉光合生长与水分利用效率的季节变化

光照和水分是植物水分利用效率的主要影响因素 (Farquhar *et al.*, 1982),其中光合速率的改变对于单叶水分利用效率有直接影响。研究发现:雨季巨尾桉 LSP 和  $P_{\text{max}}$  远高于本地植物红木荷,即使比较同属的其他种类 (White *et al.*, 2000; Whitehead *et al.*, 2004),本巨尾桉品系雨季  $P_{\text{max}}$  也属中上水平。这些特征有利于巨尾桉在雨季充足水分供应情况下

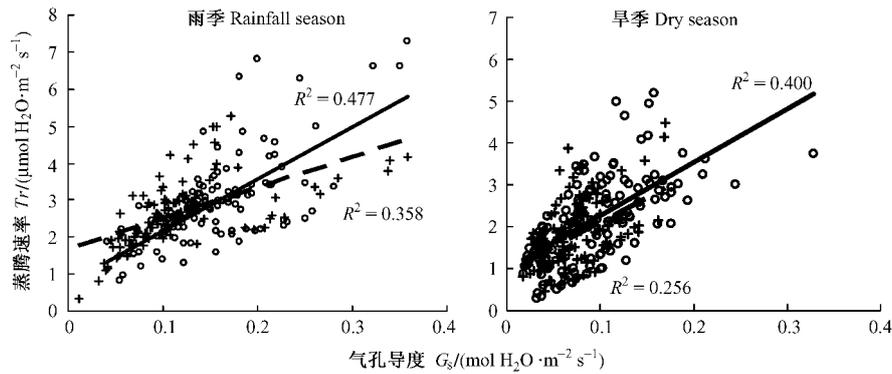


图 8 不同季节巨尾桉与红木荷蒸腾速率随气孔导度变化散点及预测曲线  
 Fig. 8 The effect of stomatal conductance on transpiration rate of *E. grandis* × *E. urophylla* and *S. wallichii* under different seasons

对光能也能够充分利用,是其速生丰产特性的生理基础。

旱季巨尾桉蒸腾有一定程度降低,这与尾叶桉等树种随季节不同能够调整蒸腾减少失水的现象一致(Pereira *et al.*, 1987; Mielke *et al.*, 2000)。由于植物对水分亏缺最早和最敏感的反应就是气孔关闭(许大全, 2002),因此当旱季降水减少,土壤含水量降低之后,巨尾桉气孔导度对蒸腾的限制作用增强。这有利于控制此时蒸腾失水,减少水分丧失。但另一方面,降低的  $G_s$  同时也对  $CO_2$  交换产生抑制,导致  $P_{max}$  及 LSP 相对雨季明显降低。此时巨尾桉相对较低的光补偿点 LCP 还意味着巨尾桉在旱季 LSP 而无法利用强光的情况下相对扩展对低光的利用范围,有利于延长 1 天中对碳积累的时间。

水分利用效率作为植物水分利用状况和抗旱特性评价指标之一,能够为树种对环境的适应性提供判断(严昌荣等, 2001)。虽然旱季水分利用效率与 PAR 的方程拟合参数并不理想,但从图可知:随 PAR 的增加,巨尾桉和红木荷的 WUE 均趋于稳定,而低光时的部分 WUE 散点反而相对较高。这可能是由于强光下普遍由于高温或缺水而发生气孔关闭,其对光合速率和蒸腾速率的影响具有可预测性;而弱光下的温度和湿度环境不尽相同,此时 WUE 的变化也难以预测。由于弱光时蒸腾一般并不旺盛,因此,此时 WUE 的高低更多的取决于植物能够更快的适应弱光。旱季巨尾桉相对较低的 LCP 有利于植物此时更充分的利用较弱光能,同时也有利于提高此时植物的 WUE。

雨季由于土壤水分含量相对较高,巨尾桉和红木荷水分利用效率均不表现出随空气湿度变化而变化的趋势,这与 Rawson 等(1977)的研究结果一致;而当旱季到来时,由于土壤含水量较低,空气湿度对

植物瞬时 WUE 的影响强度较雨季显著增加。巨尾桉 WUE 能够相对红木荷更快地对湿度变化做出响应,具有更高的作用强度,这表明巨尾桉具有类似红木荷的季节响应能力,在旱季还能够更有效地利用有限水分资源,随环境水分供应量变化而调节利用水分。巨尾桉在水分充足时类似其他植物具有相对低的 WUE,但当环境水分过少时巨尾桉亦将视情况限制或提高自身水分利用效率,因此不会给环境带来过多压力。

### 3.2 巨尾桉对本区气候环境的适应及潜在影响

红木荷产于云南省东南部、南部至西南部的常绿阔叶林或混交林中,是本地常绿阔叶林中的主要树种(中国科学院昆明植物研究所, 1997),能够代表成功适应本区气候的植物种类的一般特点。与红木荷相比,雨季巨尾桉强光下  $P_n$  下降不多,光抑制并不明显,与陆钊华等(2003)对尾叶桉光响应曲线的研究结果类似。由于光抑制现象发生的前提是光能过剩(蒋高明, 2004),因此巨尾桉并不明显的光抑制说明其能够对光能合理利用,保障光合作用的正常运行。

相对红木荷而言,雨季巨尾桉较高的光合速率和气孔导度也带来较高的蒸腾速率。虽然此时植物瞬时 WUE 相对较高,但此时的蒸腾失水总量也会较高,对水分的需求增加。本区雨季降水充沛,可以满足此时巨尾桉生长对水分的要求,巨尾桉的耗水特性应该不会对本区雨季造成太大压力。

旱季巨尾桉的 LSP 和  $P_{max}$  仍高于红木荷, LCP 甚至更低,说明此时巨尾桉具有更强的碳同化能力和更广的光能利用范围;同时巨尾桉对具有类似红木荷的对干旱环境的适应对策, 2 种植物 LSP 和 LCP 较雨季出现大幅度降低,气孔导度对蒸腾的限制作用明显,作用强度大体相当。Calder(1992)认

为具有良好气孔调节能力的桉属植物蒸腾失水特征与其他森林树种类似,而某些气孔调节能力较差,蒸腾旺盛的桉树种类若种植后则很可能导致对水分的过度利用。本研究结果发现:虽然本巨尾桉品系雨季时具有相对较高的蒸腾速率,但由于此时其具有较高的光饱和点,因此各光强下的水分利用效率均高于红木荷,能够更有效地利用水分;而当旱季来临时,巨尾桉气孔导度对蒸腾速率的作用斜率与红木荷接近,说明本品系巨尾桉旱季时具有类似红木荷的气孔调节能力。对蒸腾耗水而言,巨尾桉至少具有不亚于红木荷的气孔限制能力。Lane 等(2004)对我国雷州半岛尾叶桉种植地区降水与蒸腾的相关研究结果表明:当地的水分平衡并未由于尾叶桉的种植而打破,在降水充沛地区桉树可以被适当发展。本试验可知:巨尾桉对思茅地区旱雨 2 季分明气候条件的适应是具有生理基础的。雨季时巨尾桉能够充分利用光能满足碳同化需要,旱季时则合理降低强光下的蒸腾及光合水平,扩充低光下的光能利用空间。相对本地树种红木荷而言,巨尾桉对水分的利用更具效率。

#### 4 结 论

巨尾桉旱季时的光合速率、蒸腾速率在对自然光强的响应方面具有与本地植物红木荷类似的变化特征,能够及时减少强光下的光合速率并加强气孔限制以尽量减少蒸腾耗水;雨季时巨尾桉具有相对较高的光合速率及蒸腾速率,但由于此时降水充足,外界水分环境允许其消耗相对较多水分进行更多生长,因此雨季的耗水增加应当不会对环境造成太大压力。巨尾桉能够对不同的环境水分条件采取类似本地种的相应适应策略,并在合理用水同时保证更多的物质生产。

#### 参 考 文 献

- 高 洁,曹坤芳,王焕校. 2004. 干热河谷 9 种造林树种在旱季的水分关系和气孔导度. 植物生态学报, 28(2): 186-190.
- 蒋高明. 2004. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社.
- 李 昆,曾觉民,赵 虹. 1999. 金沙江干热河谷造林树种游离脯氨酸含量与抗旱性关系. 林业科学研究, 12(1): 103-107.
- 陆钊华,徐建民,陈儒香,等. 2003. 桉树无性系苗期光合作用特性研究. 林业科学研究, 16(5): 575-580.
- 马焕成, McConchie J A, 陈德强. 2002. 元谋干热河谷相思树种和桉树类抗旱能力分析. 林业科学研究, 15(1): 101-104.
- 祁述雄. 2002. 中国桉树. 北京: 中国林业出版社.
- 王震洪,段昌群,起联春,等. 1998. 我国桉树林发展中的生态问题探讨. 生态学杂志, 17(6): 64-68.
- 谢直兴,严代碧. 2006. 桉树人工林现状及其可持续发展. 四川林业科技, 27(1): 75-81.
- 许大全. 2002. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社.
- 徐伦先. 2004. 巨桉、尾叶桉及其无性系在思茅地区引种栽培适应性论证. 林业调查规划, 29(3): 106-110.
- 严昌荣,韩兴国,陈灵芝. 2001. 六种木本植物水分利用效率和其小生境关系研究. 生态学报, 21(11): 1952-1956.
- 曾觉民. 2001. 滇中高原桉树人工林植被恢复功能的探讨. 云南林业科技, 94(1): 1-9.
- 中国科学院昆明植物研究所. 1997. 云南植物志(第 8 卷). 北京: 科学出版社.
- Bassman J H, Zwier J C. 1991. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* clones. *Tree Physiology* 8(12): 145-159.
- Calder I R. 1992. Water use of eucalyptus—a review//Calder I R, Hall R L, Adlard P G. Growth and water use of forest plantations. New York: John Wiley and Sons.
- Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 9: 121-137.
- Lane P N J, Morris J, Ningnan Z, et al. 2004. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3-4): 253-267.
- Mielke M S, Oliva M A, Barros N F, et al. 2000. Leaf gas exchange in a clonal eucalypt plantation as related to soil moisture, leaf water potential and microclimate variables. *Trees*, 14: 263-270.
- Pamela J. 2003. The role of trees for sustainable management and less-favored lands: the cue of *Eucalyptus* in Ethiopia. *Forest Policy and Economics* 5(1): 83-95.
- Pereira J S, Tenhunen J D, Lange O L. 1987. Stomatal control of photosynthesis of *Eucalyptus globulus* Labill. trees under field conditions in Portugal. *Journal of Experimental Botany*, 38: 1678-1688.
- Rawson H M, Begg J E, Woodward R G. 1977. The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species. *Planta*, 134: 5-10.
- White D A, Turner N C, Galbraith J H. 2000. Leaf water relations and stomatal behavior of four allopatric *Eucalyptus* species planted in Mediterranean southwestern Australia. *Tree Physiology*, 20(17): 1157-1165.
- Whitehead D, Beadle C L. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, 193: 113-140.

(责任编辑 王艳娜)