

两种不同生态型麻风树夏季光合特性的比较

黄红英^{1,2}, 窦新永¹, 孙蓓育¹, 邓 斌², 吴国江³, 彭长连^{1,*}

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广州 510631; 2. 湘南学院化学与生命科学系, 郴州 423000; 3. 中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要:以来源于海南及贵州的两种不同生态型麻风树 (*Jatropha curcas* L.) 为试材, 利用 LI-6400 便携式光合作用测量系统及 PAM-2100 调制叶绿素荧光仪, 在夏季对其气体交换特性及叶绿素荧光参数等进行测定。光强-光合速率响应曲线显示两种不同生态型叶片最大净光合速率 (P_{\max}) 和光饱和点 (LSP) 分别为 $18.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (贵州型) 和 $20.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (海南型), 而 CO_2 光合速率响应曲线则显示两者的差异不大。两者的净光合速率 (P_n) 的日变化曲线都呈双峰型, 主峰出现在 10:00, 在 14:00 左右出现低谷, 次峰出现在 16:00 左右, 有明显的光合“午休”现象。海南麻风树的 P_{\max} 、 LSP 、光补偿点 (LCP)、表观量子效率 (AQY) 和暗呼吸速率 (R_d) 均高于贵州麻风树。两种生态型麻风树 PS II 最大原初光化学效率 (F_v/F_m) 日变化无显著差异, 而实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 变化趋势与 P_n 相同。这表明麻风树是一种具有较高的光合速率和强光适应性的木本能源植物, 不同生态型麻风树的气体交换特性及叶绿素荧光参数有一定的差异, 海南麻风树对强光的适应能力强于贵州麻风树。

关键词:麻风树; 生态型; 光合特性

文章编号: 1000-0933(2009)06-2861-07 中图分类号: Q945, Q948 文献标识码: A

Comparison of photosynthetic characteristics in two ecotypes of *Jatropha curcas* in summer

HUANG Hong-Ying^{1,2}, DOU Xin-Yong¹, SUN Bei-Yu¹, DENG Bin², WU Guo-Jiang³, PENG Chang-Lian^{1,*}

1 College of Life Sciences, South China Normal University, Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, Guangzhou 510631, China

2 Department of Chemistry and Life Science, Xiang Nan College, Chenzhou, 423000, China

3 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2861 ~ 2867.

Abstract: Gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in two ecotypes of *Jatropha curcas* originally growing in Hainan Province and Guizhou Province were determined by a Li-6400 portable photosynthesis analysis system (LI-6400, Licor USA) and a chlorophyll fluorometer (PAM 2100, Walz, Germany) in summer. The photosynthetic capacity of *Jatropha curcas* was high. The light saturation point (LSP) of the Hainan and Guizhou ecotypes was $1700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and the maximum photosynthetic rate (P_{\max}) was $20.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $18.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. There was no obvious difference in responses of photosynthetic rate to CO_2 concentrations between the two ecotypes of *Jatropha curcas*, Hainan and Guizhou. The diurnal variation of net photosynthetic rate in leaves of the two ecotypes presented a two-peak pattern. The first peak and second peak occurred at about 10:00 am and at 16:00 pm, respectively, an obvious phenomenon of “midday depression of photosynthesis”. The P_{\max} , LSP , LCP (light compensation point), AQY (apparent quantum yield) and R_d (dark respiration) of the Hainan ecotype were higher than those of Guizhou

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30870385); 中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KSCX2-YW-G-027; KSCX2-YW-G-035)

收稿日期: 2008-11-15; 修订日期: 2009-03-31

致谢: 感谢中国科学院华南植物园林植芳研究员和澳大利亚国立大学曹华顺教授对本文写作的帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengchl@scib.ac.cn

ecotype. The daily changes of maximal photochemical efficiency of photosystem II (F_v/F_m) exhibited little difference between the Hainan ecotype and the Guizhou ecotype, whereas the daily changes of actual photosystem II efficiency (Φ_{PSII}) were consistent with daily changes of P_n . The Hainan ecotype displayed more tolerance to strong light intensity than Guizhou ecotype. These experimental results indicate that *Jatropha curcas* is a woody plant with a high photosynthetic capacity and a strong capacity for acclimation to high light intensity and, therefore, a potentially significant bioenergy source.

Key Words: *Jatropha curcas* L.; ecotype; photosynthetic characteristics

麻疯树(*Jatropha curcas* L.)又称小桐子、臭油桐,属于大戟科(*Euphorbiaceae*)麻疯树属(*Jatropha* L.),落叶灌木或小乔木。广泛分布于热带及亚热带地区,在我国四川、云南、广东、广西、贵州、福建、台湾和海南等地都有分布^[1],是一种生长迅速并具有广阔开发应用前景的木本植物^[2]。它的种子可以入药,有清热解毒、消肿散瘀等作用;其乳汁中含有多种药用成分^[3];更为重要的是种子含油量高达40%~60%^[4],油质近似柴油,且因其耐贫瘠,被认为是一种具良好应用前景的生物柴油能源植物。在当前世界性能源危机中,广泛利用荒芜的非耕地种植麻疯树等能源植物,以生物质能源作为部分化石燃料的替代物,已备受国内外科学家的关注。

光合作用是植物生长的基础,是构成生产力的最主要因素,植物叶片光合性能与其生产能力呈正相关^[5]。目前对麻疯树生物学特性的研究主要集中在种子和乳汁的化学成分、毒理学和分子水平方面^[6-8],有关麻疯树对环境因子的生理生态适应性研究较少,仅有少量关于其光合特性^[9]和对低温的适应性研究^[10,11],夏亮等^[12]最近报道了麻疯树叶片净光合速率日变化及其与环境因子的相互关系,而对比较不同地区来源的不同生态型麻疯树光合特性的研究尚未见报道。本文以原生长在海南和贵州的麻疯树为研究材料,比较两个不同地区来源的麻疯树光合特性及光合日变化规律,了解不同地区麻疯树光合能力和光合日进程过程中影响光合速率的因素,从而为麻疯树的进一步开发利用提供实验和理论依据。

1 材料和方法

1.1 植物材料

麻疯树种子分别来源于贵州黔西县(属于亚热带地区,全年平均气温14℃上下,年平均日照1313.8h)和海南儋州(热带地区,年平均气温23.9℃,年平均日照2072h),种子发芽后种植于广东省广州市中国科学院华南植物园试验样地(属于南亚热带季风气候,年平均气温21.4℃,年平均日照1566h)。种植地土壤为花岗岩母质风化的赤红壤土,有机质含量为2.2%~5.35%,全氮含量为0.128%~0.146%,速效磷含量为0.35~2.05mg/100g土,速效钾含量为2.0~15.5mg/100g土,pH值4.5左右,为贫肥性土壤。两年生,一般田间管理。从植株叶片的外形上可以区分两种不同来源地的麻疯树,海南麻疯树的叶片大边缘圆,贵州麻疯树的叶片相对小边缘尖些,可以确定为两种不同生态型麻疯树。选取长势一致的植株取其成熟叶片,每种处理3棵,每棵2个叶片,试验的各项测定于2007年7~8月进行。

1.2 光合速率光强响应曲线的测定

利用LI-6400便携式光合作用测定系统(Li-cor, USA)测定光合作用光强响应曲线。测定前将待测叶片在1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光强下诱导20 min。LI-6400-2B红蓝光源提供不同强度的光合有效辐射,光合有效辐射(PAR)设定为2000、1800、1500、1200、1000、800、600、400、200、100、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,测定时用CO₂钢瓶将参比室的CO₂浓度稳定在380 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,叶室温度控制在30℃,测定不同光强下叶片相应的净光合速率(P_n)。设定光强梯度为以光量子通量密度(PPFD)为横轴,净光合速率为纵轴绘制光合作用光响应曲线。依据Bassman^[13]的方法,利用最小二乘法拟合 P_n -PAR响应曲线,求得两种生态型麻疯树的最大净光合速率(P_{max}),同时计算光补偿点(LCP, P_n 为0时的光强)和光饱和点(LSP, 90% P_{max} 相应的光强),测定时间为9:00左右。

1.3 光合作用 CO₂ 响应曲线测定

利用 CO₂ 钢瓶控制 CO₂ 浓度,红蓝光源叶室测定,测定时光强为 1500 μmol·m⁻²·s⁻¹,温度设定为 (30 ± 0.5) °C,CO₂ 浓度梯度为 400、300、200、150、100、50、20、400、600、800、1200、1400、1600、1800、2000 μmol·mol⁻¹,测定净光合速率 (P_n),在 CO₂ 为 0 ~ 200 μmol·mol⁻¹,叶片羧化效率的计算以 P_n 对胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 做直线回归,得回归方程: $P_n = R_p + CE \times C_i$,当 $P_n = 0$ 时, C_i 即为光合作用的 CO₂ 补偿点 Γ_0 , R_p 为光下呼吸速率, CE 为羧化效率,由于光下暗呼吸很小,可以近似将光下叶片向空气中释放 CO₂ 的速率看作光呼吸速率^[14]。

1.4 光合作用日变化及环境因子测定

选择晴朗的天气,在户外自然状况下测定,测定时间区段为 06:00 ~ 18:00,每隔 2h 进行一次净光合速率 (P_n) 的测定,同时获得相关的光合参数。利用 Li-6400 透明叶室,测定光源为自然光源。

1.5 叶绿素荧光日变化测定

选择一晴天分别于 6:00、8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 测定荧光日变化规律。用独立样本 T-Test 分析海南和贵州麻疯树参数的差异,所用软件为 SPSS11.5,并用 Originpro7.5 绘图。

2 结果和分析

2.1 麻疯树光合速率对光强的响应及参数

海南与贵州麻疯树的光响应曲线如图 1 所示,在弱光下(光强低于 150 μmol·m⁻²·s⁻¹), P_n 随着光强的增大而呈线性上升,且海南与贵州麻疯树的 P_n 差异很小,随着光强的继续增大, P_n 的上升幅度逐渐变小,在此阶段海南麻疯树的 P_n 高于贵州麻疯树。

海南与贵州麻疯树的光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP)、表观量子效率 (AQY)、暗呼吸速率 (R_d) 以及最大净光合速率 (P_{max}) 如表 1 所示,海南麻疯树各参数都高于贵州麻疯树,但除 LSP 两者有显著差异外,其余各参数均无显著差异 ($P < 0.05$)。

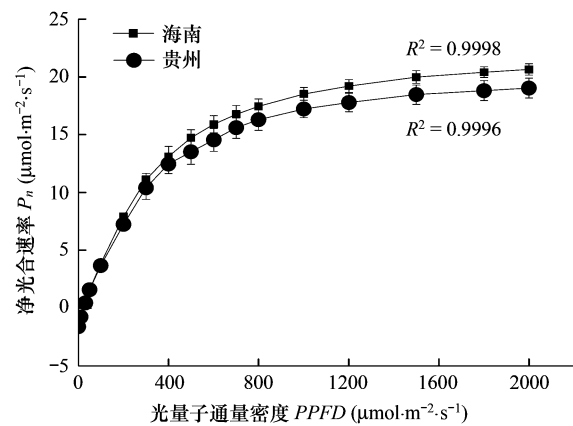


图 1 海南与贵州麻疯树叶片净光合速率随光强的变化

Fig. 1 Responses of net photosynthetic rate to different light intensities in two ecotypes of *Jatropha curcas* from Hainan province and Guizhou province

表 1 海南与贵州麻疯树光响应参数

Table 1 Photosynthetic parameters from P_n -PPFD curves of two ecotypes of *Jatropha curcas* from Hainan province and Guizhou province

生态型 Ecotype	LSP (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	LCP (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	AQY (μmol·μmol ⁻¹)	R_d (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	P_{max} (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
海南 Hainan	1778 ± 17a	20.9 ± 1.70a	0.0535 ± 0.0003a	1.35 ± 0.051a	20.4 ± 0.1a
贵州 Guizhou	1686 ± 32b	21.61 ± 3.72a	0.0524 ± 0.0035a	1.30 ± 0.145a	18.9 ± 1.0a

数据以均值标准差表示,同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Data represented mean ± SD ($n = 3$), different letter in the same column showed significantly different ($P < 0.05$)

2.2 麻疯树的 CO₂ 响应参数

海南与贵州麻疯树的羧化效率 (CE)、CO₂ 补偿点 (Γ_0)、光下呼吸速率 (R_p) 和 CO₂ 饱和光合速率 (P_m) 见表 2,海南麻疯树除 CE 和 P_m 低于贵州麻疯树外, Γ_0 与 R_p 均高于贵州麻疯树,但 CE 、 Γ_0 与 R_p 3 个参数间差异不显著 ($P < 0.05$)。

2.3 麻疯树光合作用日变化规律

麻疯树的净光合速率 (P_n) 的日变化趋势呈典型的双峰型,有明显的“午休”现象(图 2A),主峰出现在 10:00 左右,在 14:00 左右出现低谷,次峰出现在 16:00 左右;海南麻疯树“午休”现象明显小于贵州麻疯树,

海南麻疯树谷底时的 P_n 与主峰值相比,下降了 41.43%;而贵州中麻疯树下降到主峰值的 24%,下降了 76%。说明海南麻疯树对中午的高光、高温环境有更好的适应能力。

表 2 海南与贵州麻疯树 CO_2 响应参数

Table 2 Photosynthetic parameters from P_n - C_i curves of two ecotypes of *Jatropha curcas* from Hainan Province and Guizhou province

生态型 Ecotype	$CE(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Gamma_0(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$R_p(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$P_m(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
海南 Hainan	$0.126 \pm 0.006\text{a}$	$56.30 \pm 2.11\text{a}$	$7.11 \pm 0.60\text{a}$	$30.3 \pm 2.524\text{a}$
贵州 Guizhou	$0.128 \pm 0.002\text{a}$	$55.56 \pm 1.34\text{a}$	$7.09 \pm 0.04\text{a}$	$33.4 \pm 0.707\text{b}$

数据以均值标准差表示,同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Data represented mean \pm SD ($n = 3$), different letter in the same column showed significantly different ($P < 0.05$)

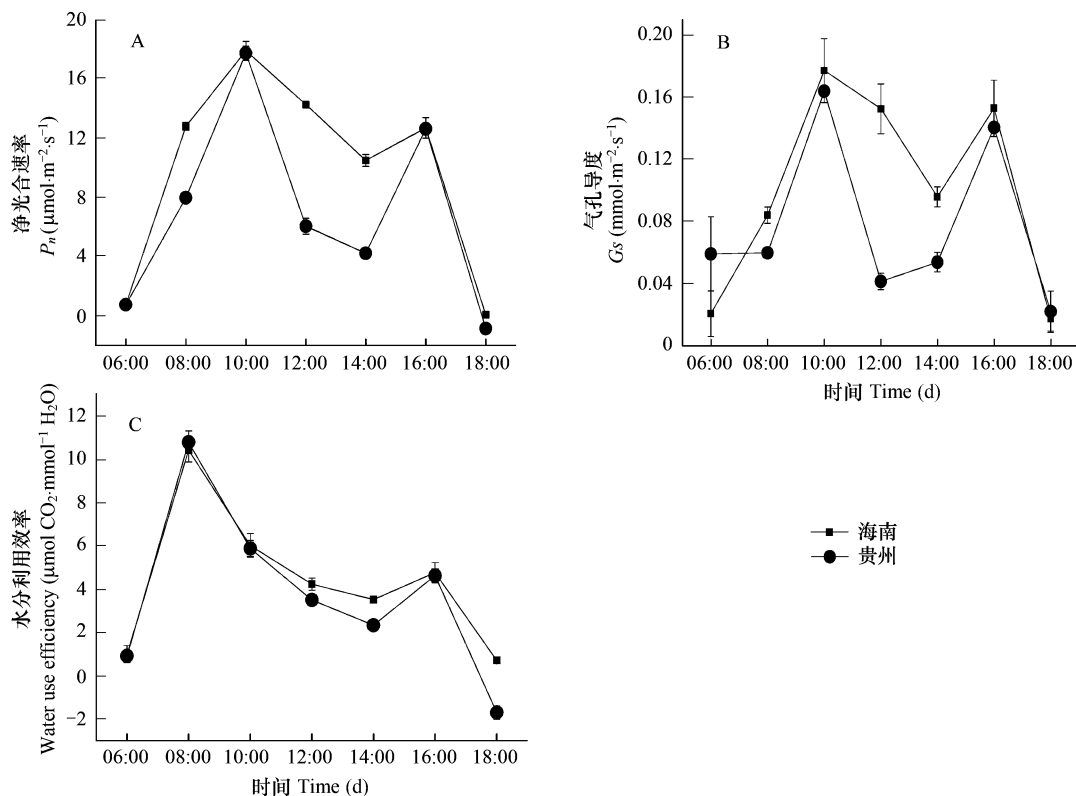


图 2 海南与贵州麻疯树光合作用参数日变化

Fig. 2 Daily changes of photosynthetic parameters in two ecotypes of *Jatropha curcas* from Hainan province and Guizhou Province

麻疯树的气孔导度 (G_s) 的日变化规律与 P_n 的基本相同,呈明显的双峰型。主峰与次峰也分别出现在 10:00 左右和 16:00 左右,但低谷出现时间与 P_n 不同(图 2B),海南麻疯树低谷出现在 14:00 左右,而贵州麻疯树在 12:00 左右出现最低值。并且与 P_n 一样,海南麻疯树的 G_s 下降的幅度小于贵州麻疯树。而由图 2C 可知,水分利用效率 (WUE) 的日变化趋势与 P_n 基本一致,主峰出现在 10:00 左右,在 14:00 左右到达谷底,在 16:00 左右出现次峰,但次峰峰值较小,双峰型变化趋势不明显。

2.4 主要生态因子日变化规律

由图 3 可知,一天中各生态因子以光照的变化最为迅速,在 12:00 前后达最高值,强光引起气温升高,湿度降低。相对于光照变化,气温与空气湿度的变化有些滞后,气温的最高点与湿度的最低值都出现在 14:00 前后。 CO_2 浓度是早晨最高,然后迅速下降,从 12:00 至 16:00 变化比较平稳,稳定在 $350\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 左右,16:00 后逐渐回升。

2.5 麻疯树叶绿素荧光日变化规律

叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独

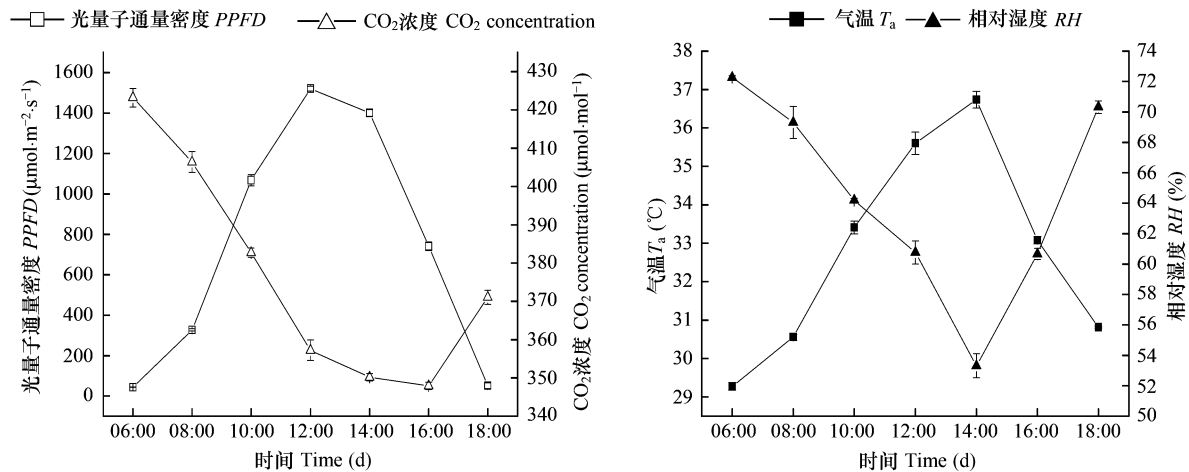


图3 光量子通量密度(PPFD)、大气CO₂浓度(Ca)、大气温度(Ta)和大气相对湿度(RH)日变化

Fig. 3 Diurnal changes in photo-quantum flux density (PPFD), air CO₂ concentration (Ca), air temperature (Ta), and relative humidity (RH)

特的作用,与“表观性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”特点^[15]。由图4可知, F_v/F_m 日进程呈现先下降后上升的趋势,在12:00左右最小,但两种生态型麻疯树 F_v/F_m 之间无显著差异(图4A); $\Phi PS II$ 日变化规律与 P_n 相同,呈双峰型,但谷底出现在12:00左右,海南麻疯树 $\Phi PS II$ 在12:00左右下降幅度显著小于贵州麻疯树,其他时间两者差异不显著(图4B)。海南麻疯树对强光的适应能力强于贵州麻疯树,这和前面光饱点的结果一致。

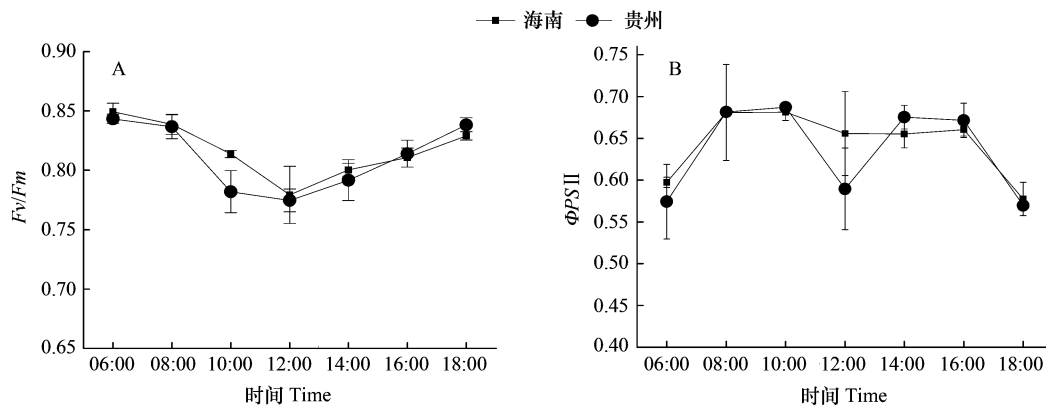


图4 海南与贵州麻疯树叶绿素荧光日变化

Fig. 4 Diurnal changes of chlorophyll fluorescence parameters in two ecotypes of *Jatropha curcas* from Hainan province and Guizhou Province

3 讨论

植物光合作用能力的强弱与植物的遗传性和生长环境关系密切,光合作用的某些生理参数,如 P_{max} 、 LSP 、 LCP 等,已成为植物速生丰产以及制定栽培措施的科学依据^[16]。海南与贵州麻疯树的 LSP 分别为 $1778 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1686 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, LCP 分别为 $20.97 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $21.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, P_{max} 为 $20.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $18.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,无论对强光还是弱光的利用,麻疯树都有较强的利用能力;海南麻疯树的 P_{max} 、 LSP 都高于贵州麻疯树, AQY 也高于贵州麻疯树,但 LCP 低于贵州麻疯树,说明海南麻疯树的光合能力强,无论是高光环境还是弱光环境都有较强的适应能力,这也是麻疯树生长迅速的原因。种植于华南植物园的试验材料麻疯树从种子萌发开始,2a就可以长到2m多高,而且第2年就开始挂果,是一种生长非常快的木本植物。夏量等^[11]测定的麻疯树最大光合速率及光饱和点等参数明显低于本文的结果,其主要原因可能测定的季节不同,他们是9月份在四川测定的,当地已进入了秋季。而测定的季节是7~8月份,正是广州最热

的夏季。从获得的结果来看,麻风树显著耐高温和耐干旱^[17],而对冷胁迫比较敏感^[18]。夏季的高温高光及高蒸发的环境可能更适合其生长。另外,生态型的差异也可能是结果相差较大的原因之一。

植物的碳同化受到羧化速率和 RuBP 的再生速率的限制,而 RuBP 再生与光合电子传递速率直接关联。海南麻疯树 *CE* 低于贵州麻疯树(表 2),显示其叶片中活化的 Rubisco 酶量较少,羧化效率小于贵州麻疯树,但两者差异不显著。当 CO₂ 处于饱和阶段时,CO₂ 已不是光合作用的限制因素,而 CO₂ 受体的量,即 RuBP 的再生速率则成为影响光合作用的因素,此时光合机构由 Rubisco 限制转变为依赖类囊体 RuBP 再生的限制。由于 RuBP 再生依赖于同化力 ATP 和 NADPH 的形成,而同化力的形成又依赖于光合电子传递和与其偶联的光合磷酸化,再生限制在一定程度上反映了光合电子传递和光合磷酸化状况。 P_m 为 CO₂ 饱和阶段的光合速率,反映了光合电子传递和光合磷酸化活性^[19]。海南麻疯树 P_m 显著低于贵州麻疯树,其 RuBP 的再生速率低于贵州麻疯树,结果表明贵州麻疯树对 CO₂ 有更高的利用效率。

在本文的试验中,麻疯树的净光合速率日变化呈明显的双峰型曲线,有“午休”现象,与夏亮等^[11]结果一致。“午休”现象的机理较为复杂,可以由生态、生理和生化等诸多因素造成。本试验光量子通量密度在中午 12:00 前后达到最高峰,但光强小于麻疯树的光饱和点,光强可能不是导致“午休”现象的最重要的生态因子。强光往往同时伴随高温,气温较高会引起叶温上升、空气湿度下降、叶片周围空气之间的水汽饱和亏缺(VPD)上升,从而导致叶片失水、气孔导度下降^[20],最终抑制光合作用的正常进行,推测 G_s 下降是“午休”的主要因素。另外高温下植物的 RuBP 羧化酶活性、光合磷酸化酶活性降低,呼吸速率提高,均可导致净光合速率的降低^[21]。本试验中 CO₂ 浓度早晚较高,中午前后较低(图 3),而适当升高的 CO₂ 浓度会减少蒸腾,抑制呼吸,从而提高植物光合作用^[22],因此推测中午 CO₂ 浓度降低也可能是导致麻疯树净光合速率出现“午休”现象的另外一个因素。Tadashi 等^[23]认为耐强光及高温的作物品种“午休”症状较轻,而本文海南麻疯树的“午休”现象明显小于贵州麻疯树,预示前者比后者具有更强的耐强光、高温和低湿的特性。

总之,两种不同生态型麻疯树的光合能力较强,对夏季高光有较高的适应能力,是一种极有潜力的木本能源植物,可以大面积推广种植于丘陵、荒山和坡地等自然条件较为恶劣的地方生境。海南产的麻疯树适合高温高光等热带亚热带地区引种,而贵州麻疯树则适合温带地区引种。

References:

- [1] Yu S M, Sun J C, Chen B T. Exploration and utilization of *Jatropha curcas* resources in Guizhou province. *Journal of West China Forestry Science*, 2006, 35(3):14–17.
- [2] Zhang M S, Fan W G, Yin J, Li J Q, Yuan Q F, Yang Y H. Biological characteristic, resource distribution, exploitation and utilization of *Jatropha curcas*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33(6):97–98.
- [3] Lin J, Zhou X W, Tang K X, Chen F. A survey of the studies on the resources of *Jatropha curcas*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, 12(3):285–290.
- [4] Deng Z J, Cheng H Y, Song S Q. Studies on *Jatropha curcas* seed. *Acta Botanica Yunnanica*, 2005, 27(6):605–612.
- [5] Buchanan B B, Gruissem W, Jones R L. *Biochemistry and molecular biology of plants*. Rockville: The American Society of Plant Physiologist, 2000. 260–310.
- [6] Sun Q B, Li L F, Li Y, Wu G J, Ge X J. SSR and AFLP markers reveal low genetic diversity in the biofuel plant *Jatropha curcas* in China. *Crop Science*, 2008, 48(5):1865–1871.
- [7] Li J, Li M R, Wu P Z, Tian C E, Jiang H W, Wu G J. Molecular cloning and expression analysis of a gene encoding a putative beta-ketoacyl-acyl carrier protein (ACP) synthase III (KAS III) from *Jatropha curcas*. *Tree Physiology*, 2008, 28(6):921–927.
- [8] Xiang Z Y, Song S Q, Wang G J, Chen M S, Yang C Y, Long C L. Genetic diversity of *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae) collected from southern Yunnan, detected by Inter-simple Sequence Repeat (ISSR). *Acta Botanica Yunnanica*, 2007, 29(6):619–624.
- [9] Zhang S Y, Fan W G. Study on the character of photosynthesis of *Jatropha curcas*. *Seed*, 2005, 24(8):13–15.
- [10] Luo T, Ma D W, Deng W Y, Chen F. Effect of low temperature on physiological indexes of *Jatropha curcas*. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2005, 27(4):50–54.
- [11] Luo T, Deng W Y, Chen F. Study on cold-resistance ability of *Jatropha curcas* growing in different ecological environments. *Acta Scientiarum*

- Naturalium Universitatis NeiMongol, 2006, 37(4):446—449.
- [12] Xia L, Xing J, Wang S H, Chen F. Study on photosynthesis physiology characteristics of *Jatropha curcas* L. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(2):413—418.
- [13] Bassman J B, Zwier J G. Gas exchange characteristics of populus trichocarpa, *Populus deltoids* × *P. deltoids* clone. Tree Physiology, 1991, 11(8):145—149.
- [14] Cai S Q, Xu D Q. Relationship between the CO₂ compensation point and photorespiration in soybean leaves. Acta Phytophysiological Sinica, 2000, 26(6):545—550.
- [15] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4):444—448.
- [16] Zhu W Z, Wang J X, Xue J H. Study on the photosynthetic characteristics of introduced *Alnus formosana*. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(11):2012—2019.
- [17] Dou X Y, Wu G J, Huang H Y, Hou Y J, Gu Q, Peng C L. Responses of *Jatropha curcas* L. seedlings to drought stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7):1425—1430.
- [18] Liang Y, Chen H, Tang P F, Shen S H. Responses of *Jatropha curcas* seedlings to cold stress: photosynthesis-related proteins and chlorophyll fluorescence characteristics. Physiologia Plantarum, 2007, 131(3):508—517.
- [19] Coste S, Roggy J C, Imbert P, Born C, Bonal D, Dreyer E. Leaf photosynthetic traits of 14 tropical rain forest species in relation to leaf nitrogen concentration and shade tolerance. Tree Physiology, 2005, 25(9):1127—1137.
- [20] He W X, Yi J, Li H M. Comparative study on daily change of photosynthesis rate of the rhizomatous grasses in milky ripe stage. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2):205—209.
- [21] Veerana S, Jorgl, Peter S. Effect of heat stress on the photo synthetic apparatus in maize (*Zeamays* L.) grown at control or high temperature. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52(10):123—129.
- [22] Ceulenman S R, Mousseau M. Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants. New Phytologist, 1994, 127:425—446.
- [23] Tada S H, Theodore C. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field. Field Crops Research, 1999, 62(6):53—62.

参考文献:

- [1] 于曙明,孙建昌,陈波涛. 贵州的麻疯树资源及其开发利用研究. 西部林业科学, 2006, 35(3):14~17.
- [2] 张明生,樊卫国,尹杰,李金强,袁启凤,杨永华. 麻疯树资源概况及其利用. 贵州农业科学, 2005, 33(6):97~98.
- [3] 林娟,周选围,唐克轩,陈放. 麻疯树植物资源研究概况. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(3):285~290.
- [4] 邓志军,程红焱,宋松泉. 麻疯树种子的研究进展. 云南植物研究, 2005, 27(6):605~612.
- [8] 向振勇,宋送泉,王桂娟,陈茂盛,杨成源,龙春林. 云南南部不同种源地小桐子遗传多样性的 ISSR 分析. 云南植物研究, 2007, 29(6):619~624.
- [9] 张诗莹,樊卫国. 麻疯树的光合特性. 种子, 2005, 24(8):13~15.
- [10] 罗通,马丹炜,邓骛远,陈放. 低温对麻疯树生理指标的影响. 中国油料作物学报, 2005, 27(4):50~54.
- [11] 罗通,邓骛远,陈放. 不同产地麻疯树的抗冷性研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2006, 37(4):446~449.
- [12] 夏亮,邢杰,王胜华,陈放. 麻疯树光合生理特征研究. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(2):413~418.
- [14] 蔡时青,许大全. 大豆叶 CO₂ 补偿点和光呼吸的关系. 植物生理学报, 2000, 26(6):545~550.
- [15] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, 1999, 6(4):444~448.
- [16] 朱万泽,王金锡,薛建辉. 台湾桫木引种的光合生理特性研究. 西北植物学报, 2004, 24(11):2012~2019.
- [17] 窦新永,吴国江,黄红英,侯雨佳,顾群,彭长连. 麻疯树幼苗对干旱胁迫的响应. 应用生态学报, 2008, 19(7):1425~1430.
- [20] 何文兴,易津,李洪梅. 根茎禾草乳熟期净光合速率日变化的比较研究. 应用生态学报, 2004, 15(2):205~209.