

文章编号: 1001-1498(2009)04-0475-07

青檀光合作用和荧光特性对岩溶区不同生境的响应^{*}

王晓英^{1,2}, 黄玉清^{1*}, 王冬梅², 陆树华¹, 覃家科¹

(1. 广西壮族自治区/中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006;

2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:在岩溶石质山区,研究了不同生境下青檀的光合和荧光生理特性。结果表明:不同生境下,山顶青檀叶片的光饱和点($336 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、光补偿点($10.93 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)较山脚高;在同一光照强度下,山顶青檀有着较高的净光合速率、蒸腾速率,而水分利用效率和叶水势却低于山脚;山顶青檀的荧光参数 F_m 、 F_v 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 均低于山脚。在低光下,山脚青檀的光化学淬灭系数(qP)和 PS 电子传递量子产率(PS)较大;在强光下,山顶青檀的 qP 较大,而山脚和山顶青檀的 PS 几乎没有差别;山顶青檀保持相对较低的暗呼吸速率。

关键词:青檀;光合特性;叶绿素荧光参数;岩溶区;生境

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

Photosynthetic Characteristics and Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Pteroceltis tatarinowii* in Response to Different Habitats in Karst Area

WANG Xiao-ying^{1,2}, HUANG Yu-qing¹, WANG Dong-mei², LU Shu-hua¹, QIN Jia-ke¹

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Academia Sinica, Guilin 541006, Guangxi, China;

2. College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: *Pteroceltis tatarinowii* is considered as an endangered species on the brink of extinction endemic to China. In order to reveal ecophysiology characteristics and geological adaptability of *Pteroceltis tatarinowii* in different habitats, the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameter were studied. The results showed that the light saturation point ($336 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), light compensate point ($10.93 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), maximum net photosynthetic rate ($P_{n_{max}}$), and transpiration rate (Tr) of *Pteroceltis tatarinowii* were higher at the top site than that at foot site, both water utility efficiency (WUE) and water potential were lower at the top site. The fluorescence parameters F_m 、 F_v 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' at the top site were lower, but photochemistry quench (qP) and PS electronic transport quantum yield (PS) of *Pteroceltis tatarinowii* were higher at foot site under shade condition; under strong light at the top site the qP were lower, PS were similar as at foot site; and respiration rate of *Pteroceltis tatarinowii* was lower at the top site. It was obvious that some physiological properties varied with habitat change, *Pteroceltis tatarinowii* did not seem to be menaced with the strong light and heat drought stress. Consequently, *Pteroceltis tatarinowii* at the top site adapted the karst condition well by comprehensive ways such as increasing producing more photosynthetic substance and lowering the respiration *et al*, while had low shade-tolerance at the foot site.

收稿日期: 2008-02-25

基金项目: 广西科技攻关项目(桂科攻 0322021), 中科院西部之光人才培养项目(2005), 广西自然科学基金(桂科回 0575009)

作者简介: 王晓英(1982-), 女, 山西大同人, 硕士研究生

*致谢: 感谢汪清和咸忠华同志参加了野外工作!

* *通讯作者: 黄玉清, 副研究员, 主要研究喀斯特地区生态环境的恢复生态和植物生理生态学. E-mail: hyqcoco@gxib.cn

Key words: karst area; habitat; *Pteroceltis tatarinowii*; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameters

亚热带湿润气候带的石灰岩等碳酸盐岩类分布区造壤能力低,长期的岩溶化作用下产生了地表及地下双层空间结构,大气降水通常快速、直接渗入地下岩溶空间,导致地表保水蓄水能力很差。植被、土壤分布具较大的局限性和离散性。在自然动力和人为的影响下,使原本不连续的土被进一步流失,造成大片岩溶化基岩裸露,土地严重退化,地段呈现出干旱状态,其荒凉贫瘠程度与干旱气候带的荒漠相近似^[1]。关于干旱引起的植物生理生态学效应一直是许多学者关注的热点^[2-4],特别是这种效应在生态系统恢复和演化过程中的表现。

青檀 (*Pteroceltis tatarinowii* Maxim) 属榆科 (Ulmaceae), 落叶乔木, 通常生于海拔 800 m 以下的石灰岩山地山麓、林缘、沟谷、河滩、溪边或石缝中, 在广西中、北部岩溶植被退化地区的坡积土、石穴土、石缝土、石板地及峭壁上较常见, 具有耐阳性、耐干旱瘠薄和喜生于钙质土等特点, 是岩溶退化生态系统恢复的优良先锋树种, 此外还具有特殊的经济价值和科学研究价值。由于自然植被的破坏, 致使其分布区逐渐缩小、数量在日趋减少。目前关于岩溶区优势植物的生理特性研究尚少^[5-6], 而关于青檀这种具有特殊价值的岩溶先锋植物在岩溶石漠化区不同生境的生理响应尚未见报道。本文拟对岩溶石漠化地区不同生境下青檀的光合生理特性以及叶绿素荧光特性进行研究, 旨在探索青檀在岩溶区不同生境的生理生态适应性, 为岩溶石漠化地区生态重建和恢复提供一定的理论依据, 为岩溶区优势先锋树种、石山经济树种、石山绿化树种的选育提供参考, 同时也为青檀的保护、科学种植和管理提供科学根据。

1 试验地概况

试验点方竹山位于桂林市雁山镇雁山公园, 地理位置 25°04' N、110°18' E, 海拔 154 m, 年降水量 1 900 mm, 年平均日照 1 550 h, 年平均气温为 19℃, 属中亚热带季风气候区。山体高差小于 50 m, 典型喀斯特地貌类型, 山顶为黑壤, 山脚为棕色石灰土, 从山顶到山脚均有青檀分布。

本研究分别选取山顶和山脚两种不同生境中 10 年生左右的青檀进行研究。山顶光线充足, 青檀

数量较少, 生长在石缝中, 根系发达, 在岩石缝隙间盘旋伸展至底部土层。乔木层主要有圆叶乌桕 (*Sapium roundifolium* Hems)、水冬哥 (*Sinoadina racemosa* (Sieb. et Zucc.) Ridsd)、青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst) 等种类, 其根部均伸入石缝中, 该层高度约 4~6 m, 覆盖率约 35%; 灌木层主要有九龙藤 (*Bauhinia championi* (Benth.) Benth)、粗糠柴 (*Mallotus philippensis* (Lam.) Muell Arg)、雀梅藤 (*Sageretia thea* (Osbeck) Johnston) 等石山植物种类, 覆盖率约 30%; 山顶岩石裸露度 90%, 地上周围有土壤的地方土层平均厚度约 6~9 cm。山脚林分密度较大, 青檀生长于土中, 处于林下庇荫, 样地所在部位森林群落乔木层主要有青檀、青冈栎等种类, 覆盖率约 55%, 高度 6~8 m; 灌木层主要是九龙藤、红背山麻杆 (*Alchomea trevioides* (Benth.) Muell Arg)、青檀幼树幼苗等, 覆盖率 40%; 岩石裸露度 40%, 枯枝落叶层厚度约 3 cm, 土壤厚度 30 cm 以上。

2 研究方法

2.1 试验方法

2005 年 7 月在晴朗无云的 19—25 日, 选择生长健康且成熟程度相近的功能叶片进行以下指标的分析测定:

(1) 光合—光响应曲线: 在大气 CO₂ 浓度条件下, 开放式气路, 利用仪器配备的红、蓝人工光源 (L F6400-02B LED Light Source), 于上午 8:00—11:30 测定, 光量子通量密度 (PPFD) 由高到低依次设置为 1 800、1 500、1 200、900、600、400、200、100、50、30、15、5 μmol·m⁻²·s⁻¹, 温度设定 29℃, 每个 PPFD 下平衡时间均为 120 s, 9:00 以前的测定需在 1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 人工光源下诱导 20 min; 仪器自动记录净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i)、大气 CO₂ 浓度 (C_a) 等指标, 水分利用效率 WUE = P_n/T_r。

(2) 夜间呼吸速率: 测定光合—光响应曲线的当日晚上, 利用 L F6400 配备的标准叶室于夜间 21:00 到次日 5:00 自然条件下每 2 h 测定 1 次暗呼吸速率。

(3) 叶绿素荧光参数: 采用 L F6400 配备荧光叶

室 6400-40,设置仪器温度 29 ,于上午 8:30—11:30测定。测定前将待测青檀叶片暗适应 20 min 以上,首先测得叶片的初始荧光产量 (F_o)、再用饱和白光 7 200 μmol · m⁻² · s⁻¹照射 1 s 以保证得到最大荧光产量 (F_m),PS 最大光化学量子效率按 F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m 求得。荧光参数的光响应曲线测定按 Kitao 等^[7]的方法进行,PPFD 依次设置为 1 800、1 500、1 200、900、600、400、200、100、50、20、0 μmol · m⁻² · s⁻¹。仪器自动记录光适应的最小荧光参数 (F_o'),最大荧光参数 (F_m'),由此可计算出开放的 PS 反应中心捕获激发能效率:

$$F_v'/F_m' = (F_m' - F_o')/F_m' = 1 - F_o'/F_m'$$

光化学淬灭 (qP):

$$qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$$

$$P_n = \frac{Q + P_{n_{max}} - \sqrt{(Q + P_{n_{max}})^2 - 4 Q k P_{n_{max}}}}{2K} - R_{day}$$

其中, P_n:净光合速率; P_{n_{max}}:最大净光合速率; k:表观量子效率; Q:光量子通量密度 PPFD (下同)。

表观量子效率 (AQY)指光强 200 mol · m⁻² · s⁻¹以下 P_n-PPFD 直线回归方程的斜率。

该直线与 x 轴的交点即为光补偿点 (LCP)。

利用该直线方程与模拟得出来的最大净光合速率 P_{n_{max}}与 x 轴平行的这两条直线相连,得出交点,其 x 轴的数值即为光饱和点 (LSP)。

3 结果与分析

3.1 2种生境的温度日变化

2种生境的昼夜温度变化均呈明显的单峰变化(图 1),山顶空气、土壤以及裸露岩石温度均在午间 13:00 达到最高,分别为 37.1、30.8、50.4 ;而山脚空气、土壤温度到 15:00 达到峰值,分别为 32.0、28.7 。山顶空气日均温 32.0 ,裸露岩石表面日均温 38.6 ,山脚空气日均温 28.6 ;山顶、山脚土壤日均温度分别为 28.9、27.8 ,山顶土壤昼夜温差小于 6 ,而山脚土壤昼夜温差不到 3 。两种生境白昼空气温差可达 8 ,夜间空气温差可

PS 电子传递量子产率 (PS):

$$PS = (F_m' - F_s)/F_m'$$

(4)叶片水势:用美国 WESCOR 露点水势仪采用 L-5A 样品室,早上 8:00 到次日 8:00,不离体测定,每 2 h 平衡 1 次,每次 20 min,仪器自动记录叶片水势。

(5)环境温度参数的测定:测定以上参数的同时,利用水银温度计测定空气温度,弯管温度计测定土壤 (5 cm 深处)温度和裸露岩石的表面温度。

2.2 数据分析

文中数据均为 4~6 个重复测定的平均值,采用 SPSS 软件和 Excel 进行数据分析和绘图。光响应曲线采用以下的非直线双曲线模型^[8-9]进行计算和拟合:

达 6 ,山顶裸露的岩石表面昼夜温差可达 20 以上。同一生境的土壤、空气、裸露岩石表面之间的温度差别也较大,尤其是裸露岩石表面,其温度随着空气温度的升高急剧升高,温度日变化均显著高于空气及土壤温度,其可能是由于裸露岩石强烈吸收太阳光辐射和释放长波辐射造成的。

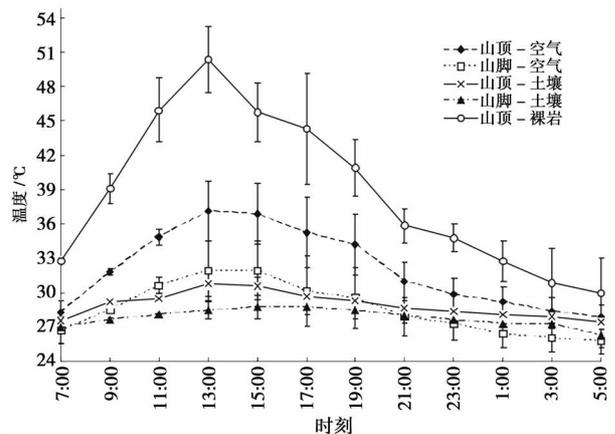


图 1 2种生境温度的日变化

3.2 青檀光合特性对不同生境的响应

3.2.1 青檀净光合速率的光响应曲线 2种生境下,青檀的光合-光强拟合方程为:

$$\text{山顶: } A = \frac{0.056 \times Q + 9.942 - \sqrt{(0.056 \times Q + 9.942)^2 - 4 \times 0.056 \times Q \times 0.737 \times 9.942}}{2 \times 0.737} - 0.511 \quad R^2 = 0.966$$

$$\text{山脚: } A = \frac{0.050 \times Q + 7.450 - \sqrt{(0.050 \times Q + 7.450)^2 - 4 \times 0.050 \times Q \times 0.899 \times 7.450}}{2 \times 0.899} - 0.064 \quad R^2 = 0.990$$

200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的 PPFD 符合以下线性回归:

山顶: $P_n = 0.032Q - 0.3499 \quad R^2 = 0.92$

山脚: $P_n = 0.028Q - 0.0897 \quad R^2 = 0.87$

从图 2、3 可知:在弱光 (PPFD < 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 条件下,青檀的净光合速率随 PPFD 的增加呈显著的线性增大趋势,山脚净光合速率较山顶的大,最大可达山顶的 2.7 倍;随着光照强度的进一步增大,山顶青檀对光强响应较山脚强烈,山顶的 Pn 增加幅度较山脚大;当 PPFD > 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,青檀叶片净光合速率升幅缓和;PPFD > 1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,山脚青檀首先受到抑制,光合速率下降较快;PPFD > 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,山顶青檀受到抑制,光合速率开始缓慢下降。模拟值与实测值的变化趋势基本一致,模拟方程的相关系数 R² 均在 0.95 以上,说明模型可以较准确地模拟叶片光合速率的光响应规律 (图 2)。模拟方程的山顶青檀的最大净光合速率为 9.942 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比山脚的大 25%;山顶青檀的光饱和点为 336 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比山脚的大 20%;光补偿点山顶为 10.93 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,是山脚的 3 倍多。这表明山脚青檀具有一定的耐荫性,可利用较弱的光进行光合作用,维持正常生长;山顶青檀能适应山顶强光形成高的光合产物。

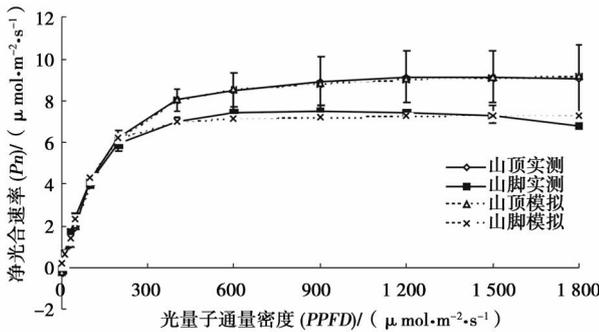


图 2 不同生境青檀叶片光合-光强响应曲线

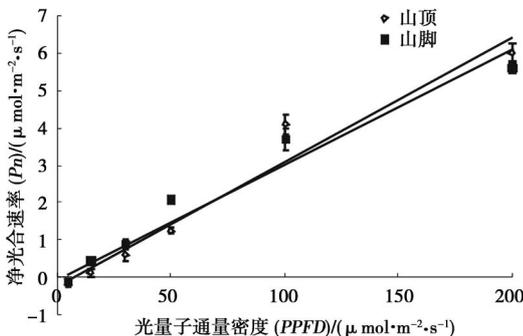


图 3 弱光 (PPFD < 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 下不同生境青檀叶片光合-光强响应直线

由回归直线 知:山顶和山脚青檀的 AQY 分别为 0.032 和 0.028,基本在自然条件下一般植物的表观量子效率范围 (0.03 ~ 0.06^[10]) 内,说明青檀在这 2 种生境下均能正常生长。

3.2.2 不同生境下青檀蒸腾速率对光照强度的响应 光照强度是影响蒸腾作用最主要的外界条件,光照强度和蒸腾速率呈线性关系:

山顶: $T_r = 0.0003Q + 1.6516 \quad R^2 = 0.9296$

山脚: $T_r = 0.0001Q + 1.1681 \quad R^2 = 0.8152$

由图 4 可见: Tr 和 PPFD 呈显著线性关系, Tr 随着 PPFD 的递增而迅速的增大,但山顶青檀的 Tr 始终高于山脚青檀,随着 PPFD 的增加山顶青檀 Tr 增加较山脚快,当 PPFD 达到 1 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,山顶青檀的 Tr 高出山脚 65.8%。

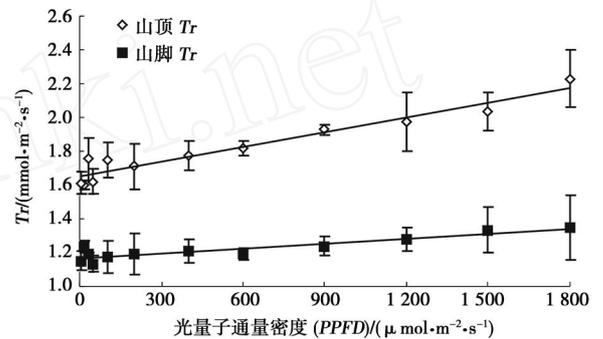


图 4 蒸腾速率 (Tr) 对光照强度 (Q) 的响应

3.2.3 不同生境下青檀水分利用效率对光照强度的响应 由图 5 可以看出:当 PPFD < 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,水分利用效率 WUE 随 PPFD 的增加而急剧上升,特别是在弱光条件下 (PPFD < 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 几乎是线性性上升;PPFD 达到 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,山脚和山顶的 WUE 达到最大,分别为 6.2、4.7 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$;随后,随着 PPFD 的增大,山脚青檀 WUE 开始缓慢下降,而山顶青檀 WUE 变化平缓;当 PPFD 上升到 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,山顶 WUE 呈现明显下降趋势。

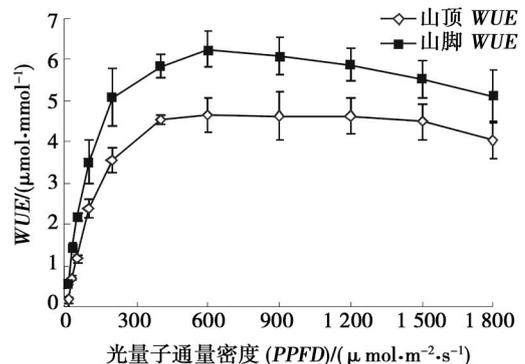


图 5 水分利用效率 (WUE) 光响应曲线

3.3 不同生境下青檀叶片水势的日变化

图 6 表明:在山脚,青檀叶水势日变化呈单峰状分布,叶水势昼夜变化相对较小,7:00 开始缓慢下降至,15:00 达到最小水势,此后缓慢上升,夜间 21:00 到次日 7:00 变化不大。在山顶,青檀叶水势变化呈高低明显的双峰状分布,最大叶水势出现在上午 9:00,而后逐渐下降,到 15:00 水势达到最小;此后叶水势开始逐渐上升;21:00 到次日 7:00 左右叶水势变化不大。不同生境青檀的叶水势存在一定的差异:山脚的青檀叶水势始终高于山顶,说明山脚青檀叶片含有较多的水分,其生理代谢活动较旺盛^[11-12];山顶青檀通过渗透调节降低自身的水势以便能适应山顶高温干旱的生境,土壤水势低可能也是导致山顶青檀叶水势低的一个重要原因。

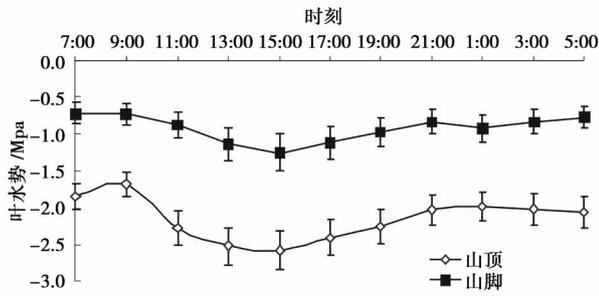


图 6 青檀叶片水势的日变化曲线

3.4 不同生境下青檀叶绿素荧光特性

由表 1 知:2 种生境条件下,山顶青檀的荧光参数 F_m 、 F_v 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 均低于山脚。PS 最大光化学效率 F_v/F_m 与 F_m 变化一致,表明 F_v/F_m 的降低主要是由于 F_m 的降低。 F_m 和 F_v/F_m 下降是植物叶片发生光抑制的重要特征^[13], F_v/F_m 可以判断植物是否处在胁迫状态。在正常情况下,健康的 C_3 植物叶片的 F_v/F_m 值一般为 0.75 ~ 0.85^[14-15],

说明本研究中 2 种生境的青檀均处于正常生长状态。

表 1 2 种生境下青檀叶绿素荧光参数的比较

地点	F_m	F_v	F_v/F_0	F_v/F_m
山顶	756.2 ± 55.8	599.8 ± 0.015	3.862 ± 0.015	0.793 ± 0.015
山脚	910.1 ± 42.6	741.7 ± 35.8	4.409 ± 0.180	0.815 ± 0.006

由图 7 - a 可知:与光合 - 光照强度响应曲线变化相反,两种不同生境下,青檀的 F_v'/F_m 均随着 $PPFD$ 的增大而下降,分为 2 个阶段: $PPFD < 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时几乎为直线下下降阶段, $PPFD > 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为平缓变化阶段。2 种生境对比,山顶青檀较山脚青檀的 F_v'/F_m 小,而且随着 $PPFD$ 的增加,2 种生境下 F_v'/F_m 的差距越来越大。表明山顶青檀较山脚通过天线色素耗散较多的能量,PS 的光化学能转换率下降快,而 PS 天线的热耗散增加会导致 F_0 降低^[16]。

由图 7 - b 可知:2 种不同生境下的 qP 均随着光强的增大而迅速降低。 $PPFD < 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,山脚青檀的 qP 比山顶的大,说明低光生境下山脚青檀叶片有较强的 PSII 电子传递活性和光化合碳同化能力,表现出一定的耐荫性; $PPFD > 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,山顶青檀的 qP 较山脚大,说明强光环境下山顶青檀的电子传递活性和光化合碳同化能力较强,表现出一定的喜光性。

由图 7 - c 可知:随着 $PPFD$ 的增强,2 种生境下青檀的 Φ_{PSII} 均下降。 $PPFD < 900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,山脚青檀叶片细胞的电子传递能力强,吸收光能被用于光化学反应的份额大,说明低光环境下山脚青檀叶肉细胞的光合能力较高。 $PPFD > 900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,山顶和山脚青檀保持相近的 PS 效率,两种生境下叶肉细胞光合能力基本没有差别。

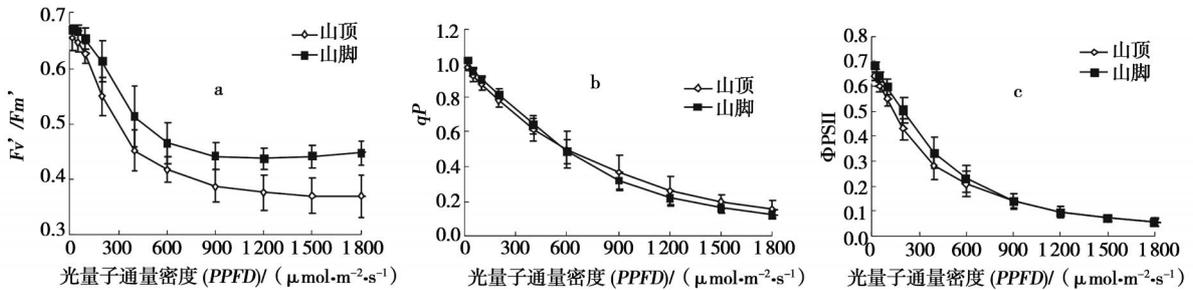


图 7 2 种生境青檀叶绿素荧光响应曲线

3.5 不同生境下青檀的暗呼吸速率

夜间 21:00—次日 5:00 山顶和山脚空气温度逐

渐呈下降趋势,山脚空气温度下降趋势较缓和,而山顶空气温度开始下降较快随后平缓(图 8)。由图 8、9

可知:2种生境下青檀的暗呼吸速率均随着温度的下降而降低,可能是因为暗反应是由酶所催化的化学反应,而温度直接影响酶的活性。2种生境下的青檀叶

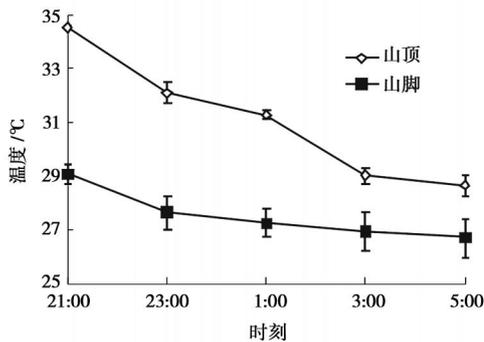


图 8 山顶和山脚夜间气温的变化

片夜间 21:00 到凌晨 1:00 呼吸速率下降较迅速;但到凌晨 1:00—5:00,二者下降趋势均相对缓和;相同温度下山顶青檀始终保持较低的呼吸速率。

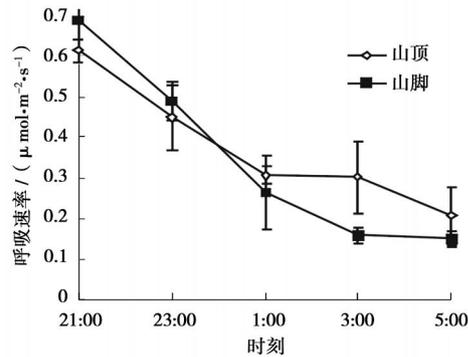


图 9 青檀夜间呼吸速率的变化

4 结论与讨论

为了适应复杂多变的环境,植物要进行自身调节,以保证能够维持正常的生长^[17-18]。光合能力的大小是衡量植物适应生境的重要指标^[19-20]。岩溶区特殊的地貌、不同的地面岩土结构、复杂的群落结构,使得该区同一种植物在不同生境中受土层厚度、光照强度及时长、温度、水分等多种不同综合因子的影响。严重的水分胁迫和高光强能导致植物光合机构发生破坏,使 P_n 、 LUE (光能利用效率) 及 WUE 明显下降,严重影响植物的生长发育^[21]。

本研究表明,青檀在 2 种不同生境中的光合特性存在较大的差异:生长在山顶的青檀具有较高的光合速率、蒸腾速率、光饱和点,较低的水势和水分利用效率,这些光合特性有利于植物对强光高温干旱环境的适应,相对较低的呼吸速率减少消耗、提高了青檀的生产力;生长在山脚的青檀具有较低的光补偿点,且在弱光条件下能形成相对较多的光合产物,表现出对庇荫环境的适应性。2 种生境下青檀叶绿素荧光参数比较,山脚青檀具有较高的 F_v/F_m , F_v'/F_m 也较高且随着 $PPFD$ 的升高 2 种生境的 F_v'/F_m 差距加大;山脚青檀在低光 ($PPFD < 600 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 环境下具有较大的 qP , 山顶青檀在强光 ($PPFD > 600 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 环境下具有较高的 qP ;在 $PPFD < 900 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,山脚青檀 PS 略高于山顶, $PPFD$ 继续升高时 2 种生境下的变化基本无差异。荧光参数的光响应再次说明山脚青檀对低光生境具有较好的适应性和利用能力,而山顶青檀对高光环境具有很好的适应性和利用

能力。

总之,青檀是一种具有较高光合能力的阳性树种,适度的高温强光环境增强了青檀的耐高光辐射抑制能力,形成了较高的光合产物,提高了生产力;一定程度的庇荫环境,能增强青檀对低光的利用和适应性;表明青檀具有较宽的光照生态幅,对逆境具有较高的潜在适应能力。

参考文献:

- [1] 李阳兵, 谭秋, 王世杰. 喀斯特石漠化研究现状、问题分析与基本构架 [J]. 中国水土保持科学, 2005, 3 (3): 27 - 34
- [2] Holmgren M. Combined effects of shade and drought on tulip poplar seedlings: trade-off in tolerance or facilitation [J]. Oikos, 2000, 90: 67 - 78
- [3] Valladares F, Pearcy R. Drought can be more critical in the shade than in the sun: a field study of carbon gain and photo inhibition in a Californian shrub during a dry El Niño year [J]. Plant Cell Environ, 2002, 25: 749 - 759
- [4] 夏江宝, 张光灿, 刘刚, 等. 不同土壤水分条件下紫藤叶片生理参数的光响应 [J]. 应用生态学报, 2007, 18 (1): 30 - 34
- [5] 何成新, 黄玉清, 李先琨, 等. 岩溶石漠化地区几种生态恢复植物的生理生态学特征 [J]. 广西植物, 2007, 27 (1): 53 - 61
- [6] 黄玉清, 王晓英, 陆树华, 等. 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]. 广西植物, 2006, 26 (2): 171 - 177
- [7] Kitao M, Utsugi H, Kuramoto S, et al. Light-dependent photosynthetic characteristics indicated by chlorophyll fluorescence in five mangrove species native to Pohnpei Island, Micronesia [J]. Physiol Plant, 2003, 117: 376 - 382
- [8] Walker D A. Automated measurement of leaf photosynthetic O_2 evolution as a function of photon flux density [J]. Philosophical transactions of the Royal Society London B. 1989, 323: 313 - 326
- [9] Takahiro E, Toshinori O, Masasyuki T, et al. Estimation of net pho-

- to synthetic rate based on in-situ hyperspectral data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 41: 564 - 570
- [10] 蹇洪英, 邹寿青. 地毯草的光合特性研究 [J]. *广西植物*, 2003, 23 (2): 181 - 184
- [11] Selles G, Berger A. Physiological Indicators of Plant Water Status as Criteria for Irrigation Scheduling [J]. *Acta Hort*, 1990, 278: 87 - 100
- [12] Shackel KA, Ahmadi H. Plant Water Status as an Index of Irrigation need in Deciduous Fruit Trees [J]. *Hort Technology*, 1997, (7): 23 - 29
- [13] Dodd IC, Critchley C, Woodall G S, *et al* Photoinhibition in differently colored juvenile leaves of *Syzgium* species [J]. *J Exper Bot*, 1998, 49 (325): 1437 - 1445
- [14] 肖春旺. 施水量变化对毛乌素沙地 4 种优势植物叶绿素荧光的影响 [J]. *草业学报*, 2002, 11 (2): 85 - 90
- [15] 赵会杰, 邹琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用 [J]. *河南农业大学学报*, 2000, 34 (3): 248 - 251
- [16] 郭春芳, 孙云. 叶绿素光动力学在植物抗性生理研究中的应用 [J]. *福建教育学院学报*, 2006 (7): 120 - 123
- [17] 马淼, 李博, 陈家宽. 植物对荒漠生境的趋同适应 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (11): 3862 - 3863
- [18] Chazdon R L, Pearcy R, Lee D, *et al* Tropical forest plant ecology [C]. New York: Chapman and Hall, 1996: 5 - 55
- [19] Kitao M, Lei T T, Koike T, *et al* Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes [J]. *Plant Cell and Environment*, 2000, 23: 81 - 89
- [20] Schurr U, Walter A, Rascher U. Functional dynamics of plant growth and photosynthesis from steady-state to dynamics-from homogeneity to heterogeneity [J]. *Plant Cell and Environment*, 2006, 29: 340 - 352
- [21] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27 (12): 2514 - 2521

www.cnki.net