



山豆根叶片光合特性对光强和干旱的响应

刘西, 牛正文, 徐佳鑫, 雷祖培, 潘向东, 彭春菊, 康华靖, 叶子飘

引用本文:

刘西,牛正文,徐佳鑫,雷祖培,潘向东,彭春菊,康华靖,叶子飘. 山豆根叶片光合特性对光强和干旱的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(3): 427–434.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4733>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[遮阳对白花前胡叶片光合特性的影响](#)

Effect of Shading on Photosynthetic Characteristics of *Peucedanum praerupterum* Leaves

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 530–538 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4353>

[遮阴对四季桂生理生态特性的影响](#)

Effect of Shading on Physiological and Ecological Characteristics of *Osmanthus fragrans*

热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 57–64 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3634>

[遮荫处理对梅叶冬青叶片形态、光合特性和生长的影响](#)

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 25–34 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4077>

[盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响](#)

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

[温州地区主栽蓝莓品种叶片饱和光强的研究](#)

Studies on Light Saturation Point of Main Blueberry Cultivars in Wenzhou

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 399–406 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3845>

[向下翻页，浏览PDF全文](#)

山豆根叶片光合特性对光强和干旱的响应

刘西¹, 牛正文², 徐佳鑫³, 雷祖培¹, 潘向东¹, 彭春菊², 康华靖^{2,4}, 叶子飘^{5*}

(1. 浙江乌岩岭国家级自然保护区管理中心, 浙江 泰顺 325500; 2. 温州科技职业学院, 浙江 温州 325006; 3. 温州大学, 浙江 温州 325000; 4. 浙南作物育种重点实验室, 浙江 温州 325006; 5. 井冈山大学, 江西 吉安 343009)

摘要: 山豆根(*Euchresta japonica*)为我国 II 级重点保护野生植物。该研究通过设置不同遮阴网的层数和采用不同浓度的聚乙二醇溶液浇灌, 探讨了山豆根光合特性对光强和干旱的响应。结果表明, 山豆根叶片的饱和光强为 683.06~907.07 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 单层遮阴处理叶片的最大电子传递速率和最大净光合速率整体高于双层遮阴处理, 其中单层遮阴且未进行干旱处理的叶片最大电子传递速率和最大净光合速率最高, 分别为 55.36 和 6.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 相同遮阴条件下, 叶片的最大净光合速率及其对应的饱和光强均随干旱程度增加整体呈下降趋势; 单层遮阴条件下的蒸腾速率和水分利用效率均整体高于双层遮阴条件下的。不同处理下叶片光系统 II 的实际光化学效率、光化学猝灭系数以及非光化学猝灭系数等整体上均无显著差异($P>0.05$)。山豆根属半阳生植物, 其叶片利用弱光能力较强, 植株具有较强的耐干旱能力。因此, 建议在开展野外回归、迁地保护、人工栽培等工作时, 进行适当遮阴处理并保持充足的土壤含水量。

关键词: 山豆根; 光合特性; 光强; 干旱; 遮阴

doi: 10.11926/jtsb.4733

Response of Photosynthetic Characteristics to Light Intensity and Drought of *Euchresta japonica* Leaves

LIU Xi¹, NIU Zhengwen², XU Jiabin³, LEI Zupei¹, PAN Xiangdong¹, PENG Chunju², KANG Huajing^{2,4}, YE Zipiao⁵

(1. Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve Management Center, Taishun 325500, Zhejiang, China; 2. Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 25006, Zhejiang, China; 3. Wenzhou University, Wenzhou 25006, Zhejiang, China; 4. South Zhejiang Key Laboratory of Crop Breeding, Wenzhou 25006, Zhejiang, China; 5. Jinggangshan University, Ji'an 343009, Jiangxi, China)

Abstract: *Euchresta japonica* is a Class II key protected wild plant in China. The response of photosynthetic characteristics to light intensity and drought was studied by setting different layers of shade nets and watering with different concentrations of polyethylene glycol solution. The results showed that the saturated light intensity of *E. japonica* leaves was 683.06~907.07 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. The maximum electron transfer rates (ETR_{max}) and the maximum net photosynthetic rate (P_{nmax}) under single layer shading were higher than those under double layer shading. The ETR_{max} and P_{nmax} under single layer shading without drought were the highest of 55.36 and 6.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, respectively. Under the same shading condition, the P_{nmax} and the corresponding saturated light intensity of *E. japonica* decreased with the increase of drought degree. The transpiration rate and water use efficiency under single layer shading were higher than those under double layer shading. The actual photochemical efficiency, photochemical quenching coefficient and non-photochemical quenching coefficient of photosystem II of *E. japonica* leaves showed no significant difference among different treatments ($P>0.05$).

收稿日期: 2022-10-13 接受日期: 2022-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(31960054)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 31960054).

作者简介: 刘西(1985年生), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事植物多样性保护. E-mail: liuxiliushi@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yezp@jgsu.edu.cn

Euchresta japonica is a semi-sunny plant, whose leaves whose leaves can take advantage of weak light and its plants have strong drought tolerance. Therefore, it is suggested that proper shading and adequate soil water content should be maintained during field return, *ex situ* conservation and artificial cultivation.

Key words: *Euchresta japonica*; Photosynthetic characteristics; Light intensity; Drought; Sunshade

山豆根(*Euchresta japonica*)属蝶形花科(Fabaceae)山豆根属藤状常绿灌木, 分布于我国广西、广东、四川、贵州、湖南、江西、浙江, 日本和朝鲜半岛也有分布^[1]。然而, 山豆根异物同名者甚多, 且隶属于不同的科、属。中药名山豆根, 产我国南方的叫广豆根, 其原植物为越南槐(*Sophora tonkinensis*)^[2]; 产北方的叫北豆根, 其原植物为蝙蝠葛(*Menispermum dahu-ricum*)。现有文献涉及的山豆根主要为越南槐^[3-5]。由于山豆根对生境要求非常高, 一般只分布在较高海拔的原始林中; 又因其生长缓慢、开花率低、结果率低等因素, 其有性繁殖率极低^[6], 整体数量稀少, 因此被列为我国 II 级重点保护野生植物名录。因为山豆根研究材料较难获取, 所以目前相关的研究鲜见报道。

土壤含水量不仅是影响土壤水文过程的重要指标, 同时也是影响植物生长的重要因素。目前, 全球性的水资源缺乏问题已经越来越突出。这必将影响植物个体的生长、发育和繁殖。因此, 对植物与土壤水分关系的探讨已成为植物生理生态学研究领域的热点^[7]。同样, 光是植物光合作用的驱动力, 是碳同化的能量最终来源。光强是植物生长发育、形态建成中重要的环境调控因子之一, 对植物的光合特性^[8]、生理代谢^[9]、品质形成^[10]等具有重要的影响。植物只有在合适的光强下才能更好地生长, 光强过弱, 植物会出现徒长、叶片变大、变薄等不良症状^[11]; 光强过强, 植物则会出现萎蔫、叶片变小、变厚等不良症状^[12]。

近年来, 在浙江乌岩岭国家级自然保护区海拔 800~1 350 m 的密林下溪沟旁发现多个山豆根分布点, 推测该生境一方面有水源保证, 另一方面由于存在林窗, 光照强度较好; 同时观察到在光强较弱的分布地长势整体较差, 开花少, 不结果。为此, 本文探讨山豆根对不同光强和干旱处理的光合生理响应, 以期弄清其适宜生境, 进而为其繁育、人工栽培驯化和合理保护等提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

乌岩岭国家级自然保护区为中国濒临东海最近

的森林生态与野生动物类型国家级自然保护区, 位于浙江省温州市泰顺县西北部, 总面积 18 861.5 hm², 森林覆盖率 92.8%, 动植物种类非常丰富。保护区属南岭闽瓯中亚热带气候区, 温暖湿润、四季分明、雨水充沛, 具中亚热带海洋性季风气候特征, 年均降水量为 2 195.8 mm, 年平均气温 15.2 °C, 空气相对湿度平均在 85%以上。乌岩岭是浙江省第四大河飞云江的发源地, 原生植被保存完整, 物种丰富^[13]。

1.2 材料和处理

试验在浙江乌岩岭国家级自然保护区上芳香保护点的科研大棚(海拔 1 050 m)中进行。幼苗为 2018 年统一育苗。2020 年 5 月中旬统一移植在口径为 20 cm, 底直径为 15 cm, 高 20 cm 的塑料盆中。每盆 1 株。基质为草炭和珍珠岩按体积 5:1 配比, 充分混匀并浇水后, 每盆装基质 1.5 kg。

2020 年 6 月上旬进行统一遮阴和干旱处理。遮阴处理通过设置不同遮阴网层数实现, 分别为单层遮阴(D)和双层遮阴(S), 前者约为全光下光照强度的 55%~60%, 后者约为全光下光照强度的 30%~40%。干旱处理采用聚乙二醇(PEG-2000)溶液浇灌进行模拟, 聚乙二醇购买自无锡市亚秦联合化工有限公司, 配制为 10%和 20% (m/V)的溶液, 以清水作为对照。干旱处理前, 先用清水浇透; 每 3 d 浇灌 1 次, 连续处理 3 次; 之后统一使用等量清水浇灌。7 月上旬、中旬分别采用 WP4C 水势仪(METER 公司)测定基质水势, 清水对照、10%和 20% PEG 处理的基质水势分别为(-0.061±0.007)、(-0.088±0.013)和(-0.179±0.022) MPa。每处理 10 盆, 共 3 个重复。

1.3 方法

2020 年 7 月 26 日至 8 月 2 日, 用便携式光合仪(LI-6400-40, LI-COR INC., USA)于晴天 9:00—16:30 进行测量, 测量前进行开机预热及各项检查。在自然光下诱导 1.5~2 h 后, 采用开放式气路, 流速为 400 μmol/s。根据预测量仪器中叶室温度(T_{block})的动态变化, 设定叶室温度为 30.5 °C, 空气相对湿度控制在 45%~70%, 应用 CO₂ 注入系统提供稳定的 CO₂ 浓度(400 μmol/mol), 光合有效辐射强度(PAR)

设置为 1 100、1 000、800、600、400、200、150、100、80、50、25 和 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 应用自动测量程序进行测量, 每次程序记录最小等待时间为 2 min, 最大等待时间为 3 min, 数据记录前仪器均自动进行参比室和样品室之间的匹配。

1.4 数据的统计分析

根据光合模型拟合软件(<http://photosynthetic.sinaapp.com/index.html>)(井冈山大学), 应用光响应机理模型分别拟合了山豆根叶片的电子传递速率和光合速率对光强的响应曲线。运用 SPSS 软件(Chicago, IL, v19.0)进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)。数据经过剔除极值后, 每处理选取 7 个相对一致的数据作为重复, 取平均值进行分析, 采用 Excel 2010 作图。

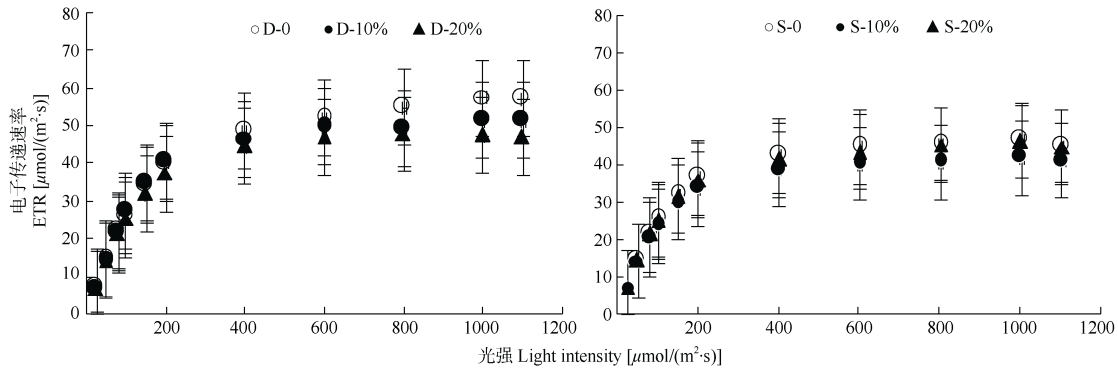


图1 山豆根叶片的电子传递速率对光的响应曲线。 $n=7$; D: 单层遮阴; S: 双层遮阴; 0: 未经干旱处理; 10%: +10% PEG 溶液; 20%: +20% PEG 溶液。下同
Fig. 1 Light Response curves of electron transfer rate of *Euclea japonica* leaves. $n=7$; D: Single layer shading; S: Double layer shading; 0: Without drought; 10%: +10% PEG; 20%: +20% PEG. The same below

叶片最大电子传递速率及其饱和光强均最高, 分别为 (55.36 ± 6.46) 和 (907.90 ± 169.91) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。不同处理的叶片饱和光强为 $692.07\sim 907.90$ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。相同遮阴处理下, 未干旱处理的叶片初始斜率均显著高于干旱处理, 且单层遮阴未经干旱处理的叶片饱和光强显著高于干旱处理; 双层遮阴下, 不同干旱处理间的电子传递速率及其饱和光强值均无显著差异。这说明山豆根属于半阳生植物, 且土壤含水量高有利于其光合作用。

2.2 净光合作用对光的响应曲线

由图 2 可见, 在低光强[小于 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]下, 叶片的净光合速率均随 PAR 的升高几乎呈直线增加; 在高光强[大于 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]下, 除 D-0 处理外, 其余处理的叶片净光合速率均呈明显下降趋势, 说明叶片均出现光抑制现象。这与电子传递速率的变化一致。

2 结果和分析

2.1 电子传递速率对光的响应曲线

从图 1 可见, PAR 低于 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 山豆根叶片的电子传递速率均随 PAR 的升高几乎呈直线上升; 当 PAR 高于 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 则随 PAR 的升高呈缓慢增长, 不同处理的山豆根叶片电子传递速率均在达到最大后发生较为明显的 PSII 动力学下调现象。单层遮阴下的山豆根叶片电子传递速率整体高于双层遮阴处理, 尤其是在高光强下其差异更为明显; 相同遮阴条件下山豆根叶片电子传递速率整体上较为接近。

利用光响应机理模型拟合电子传递速率对光强的响应曲线(表 1), 单层遮阴下, 未干旱处理(D-0)的

利用光响应机理模型拟合叶片光合作用的光响应曲线(表 2), 结果表明拟合曲线的拟合值与实测值高度符合, 确定系数均大于 0.90。双层遮阴的初始斜率明显高于单层遮阴; 未干旱处理(D-0 和 S-0)的光合速率最高, 分别为 6.73 和 6.28 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 同样, 其饱和光强(I_{sat})也较高, 分别为 907.07 和 802.91 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 且均与相同遮阴条件下干旱处理的差异显著。饱和光强为 $683.064\sim 907.067$ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 与电子传递速率对光强响应的变化一致。另外, 所有处理叶片的光补偿点均低, 说明山豆根利用弱光的能力较强。这也印证了双层遮阴下叶片的初始斜率较高。

2.3 光能利用效率(LUE)对光的响应曲线

由图 3 可见, 在低光强[PAR<200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]下, LUE 均随 PAR 的升高而快速上升并达到峰值;

表 1 山豆根叶片光合电子传递速率对光响应曲线的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of electron transfer rate to light response curves in leaves of *Euchresta japonica*

光合参数 Photosynthesis parameter	D			S		
	0	10%	20%	0	10%	20%
α_c ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$)	0.521±0.261a	0.417±0.020b	0.412±0.013b	0.566±0.086a	0.416±0.039b	0.433±0.026b
ETR_{max} [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	55.36±6.46a	50.74±5.83b	48.92±1.52bc	47.99±1.98bc	43.69±5.78c	45.88±3.33bc
PAR_{sat} [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	907.90±169.91a	791.78±86.79b	723.23±43.56c	724.20±92.35c	692.07±88.58c	732.72±115.44c
R^2	0.918±0.171	0.993±0.003	0.993±0.002	0.996±0.002	0.985±0.010	0.991±0.006

$n=7$; α_c : 初始斜率; ETR_{max} : 最大电子传递速率; PAR_{sat} : 饱和光强; R^2 : 确定系数; 同行数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同

$n=7$; α_c : Initial slope; ETR_{max} : Maximum net electron transport rate; PAR_{sat} : Saturation light intensity of electron transport rate; R^2 : Determination coefficient.

Different letters within line indicate significant differences at 0.05 level. The same below

表 2 山豆根叶片光合速率对光响应曲线的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of photosynthetic rate to light response curves in leaves of *Euchresta japonica*

光合参数 Photosynthesis parameter	D			S		
	0	10%	20%	0	10%	20%
α_p ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$)	0.045±0.010c	0.049±0.019c	0.043±0.008c	0.068±0.020b	0.066±0.020b	0.087±0.008a
P_{max} [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	6.73±0.64a	6.13±0.66ab	5.29±0.84b	6.28±1.18 ab	4.97±0.44bc	4.79±0.80c
I_{sat} [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	907.07±78.87a	710.86±128.24c	683.06±59.78c	802.91±76.27b	744.59±124.96c	721.37±34.13c
I_c [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	17.47±3.92b	12.72±2.34c	20.55±3.18a	15.34±4.04b	7.99±2.16d	6.12±0.05d
R_d [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	0.65±0.13b	0.65±0.14b	0.85±0.07a	1.02±0.43a	0.66±0.12b	0.75±0.10b
R^2	0.999±0.005	0.918±0.110	0.966±0.024	0.970±0.022	0.961±0.020	0.947±0.019

α_p : 初始斜率; P_{max} : 最大净光合速率; I_{sat} : 饱和光强; I_c : 光补偿点; R_d : 暗呼吸速率。

α_p : Initial slope; P_{max} : Maximum net photosynthetic rate; I_{sat} : Saturation light intensity; I_c : Light compensation point; R_d : Dark respiration rate.

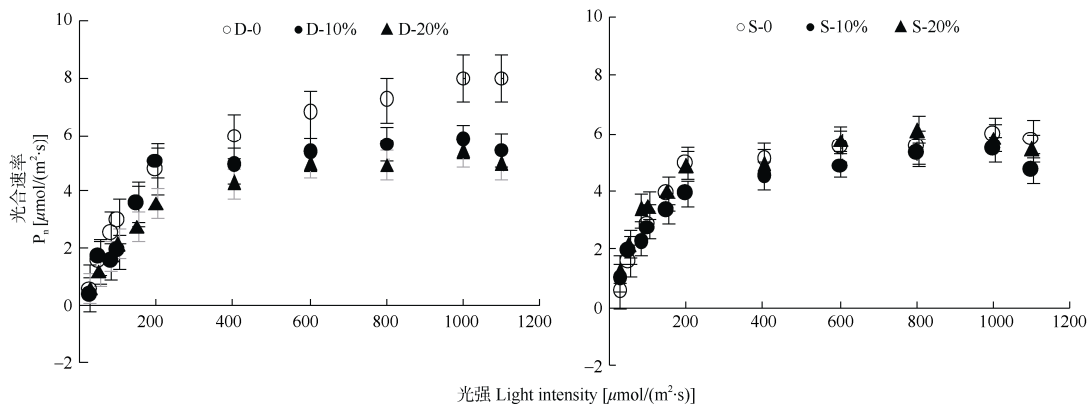


图 2 山豆根叶片的光合速率对光强的响应曲线

Fig. 2 Light response curve of photosynthetic rate of *Euchresta japonica* leaves

此后 LUE 基本上呈直线下降。同时, 除 D-0 处理的 LUE 较高外, 相同遮阴处理下的 LUE 均较为接近。

2.4 蒸腾速率对光的响应曲线

由图 4 可见, 随着光强的升高, 叶片蒸腾速率整体上呈先上升后下降的趋势, 蒸腾速率最高时的光强为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。单层遮阴下, 20% 干旱处理的叶片蒸腾速率相对较低, 尤其在高光强下[大于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]差异显著 ($P<0.05$); 而双

层遮阴下, 20% 干旱处理的叶片蒸腾速率则相对较高。另外, 单层遮阴的蒸腾速率高于双层遮阴的。

2.5 水分利用效率(WUE)对光的响应曲线

由图 5 可见, 较低光强下 WUE 随 PAR 的升高快速上升, 约在 150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光强下达到最大; 此后随 PAR 升高叶片 WUE 均呈下降趋势。单层遮阴下的 WUE 高于双层遮阴的; 相同遮阴处理下, 不同干旱处理的叶片 WUE 较为接近。

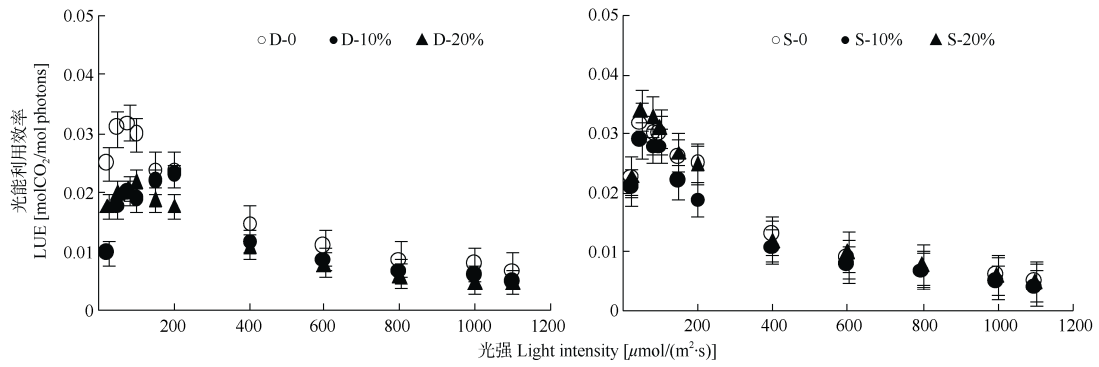


图3 山豆根叶片的光能利用效率对光的响应曲线

Fig. 3 Light response curve of light energy utilization efficiency of *Euchresta japonica* leaves

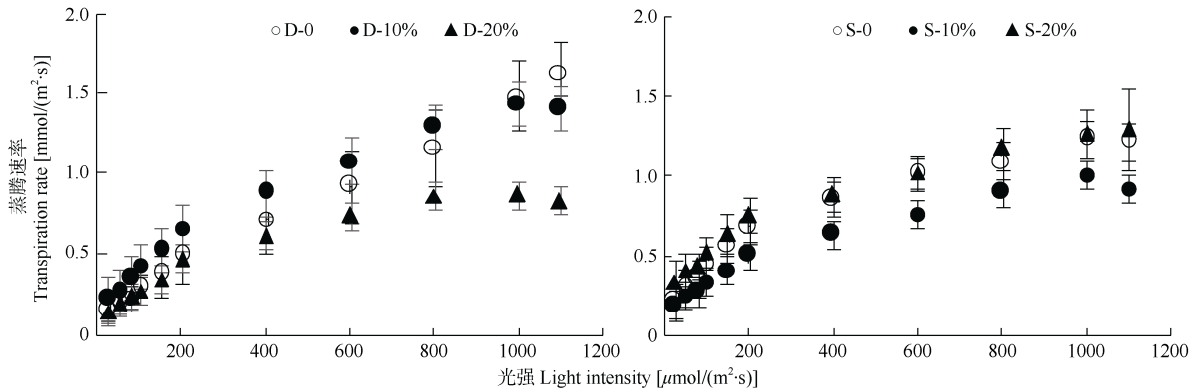


图4 山豆根叶片蒸腾速率的光响应曲线

Fig. 4 Light response curve of transpiration rate of *Euchresta japonica* leaves

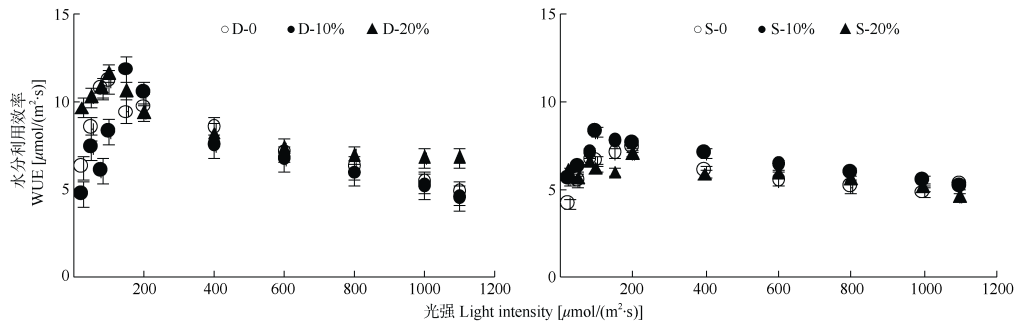


图5 山豆根叶片的瞬时水分利用效率的光响应曲线

Fig. 5 Light response curve of WUE of *Euchresta japonica* leaves

2.6 光系统 II 的实际光化学效率对光的响应曲线

实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 是植物光抑制的一种快速、非损伤性的指标。由图 6 可见, 叶片 Φ_{PSII} 均随着光强的升高而下降。相同遮阴条件下, 不同干旱处理的叶片 Φ_{PSII} 极为接近; 且不同遮阴条件下的 Φ_{PSII} 也无显著差异。这说明山豆根具有较

强的光强适应性, 也对土壤干旱环境有较好的适应性。

2.7 光化学淬灭系数对光的响应曲线

光化学淬灭系数 (qP) 反映 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额, 并进一步反映 PSII 反应中心的开放程度和电子传递活性的大小。

由图 7 可见, 叶片 qP 均随光强的升高呈直线下降。相同遮阴条件下, 不同干旱处理的叶片 qP 均极为接近; 且不同遮阴条件下的 qP 也无显著差异。这说明遮阴和干旱处理对叶片 PSII 反应中心的开放程度和电子传递活性影响小, 这与电子传递速率和光合速率的变化趋势一致。

2.8 非光化学效率对光的响应曲线

由图 8 可见, 叶片的非光化学猝灭系数(qN)均随光强的升高先直线下降, 当大于 $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时趋于稳定。相同遮阴条件下, 不同干旱处理的叶片 qN 均极为接近, 且不同遮阴条件下的 qN 也无显著差异, 说明山豆根幼苗叶片具有良好的耗散过量能量的能力。

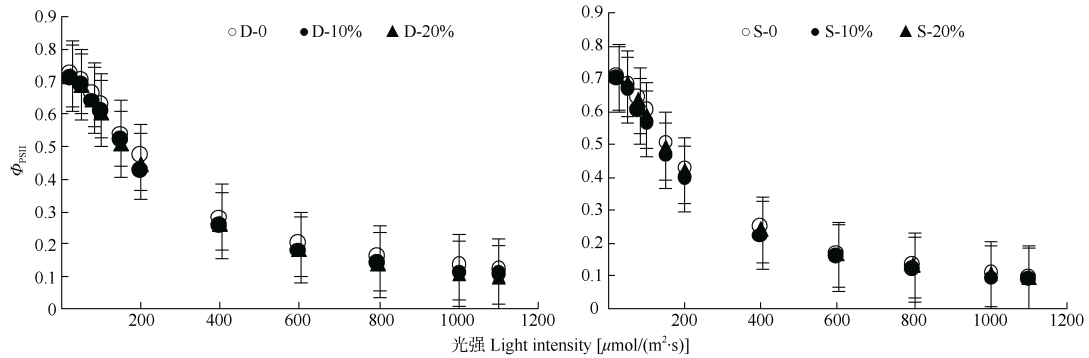


图 6 山豆根叶片的实际光化学效率的光响应曲线

Fig. 6 light response curve of Φ_{PSII} of *Euchresta japonica* leaves

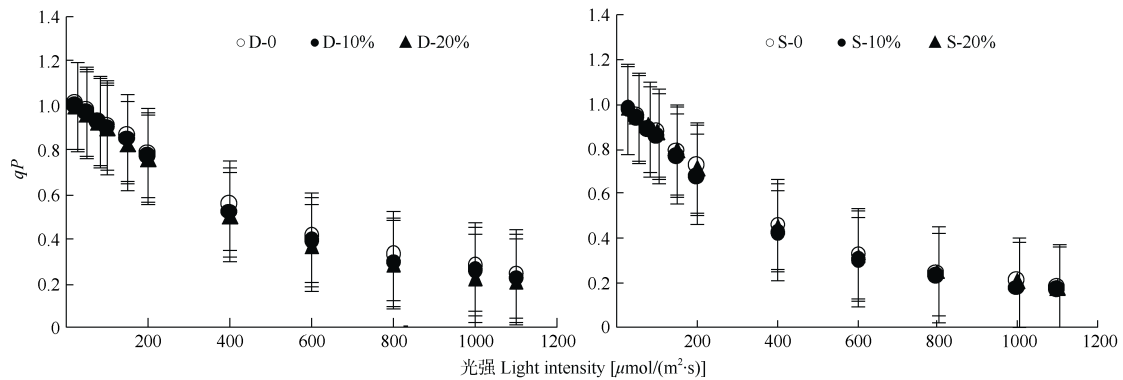


图 7 山豆根叶片光化学猝灭系数的光响应曲线

Fig. 7 light response curve of photochemical quenching coefficient of *Euchresta japonica* leaves

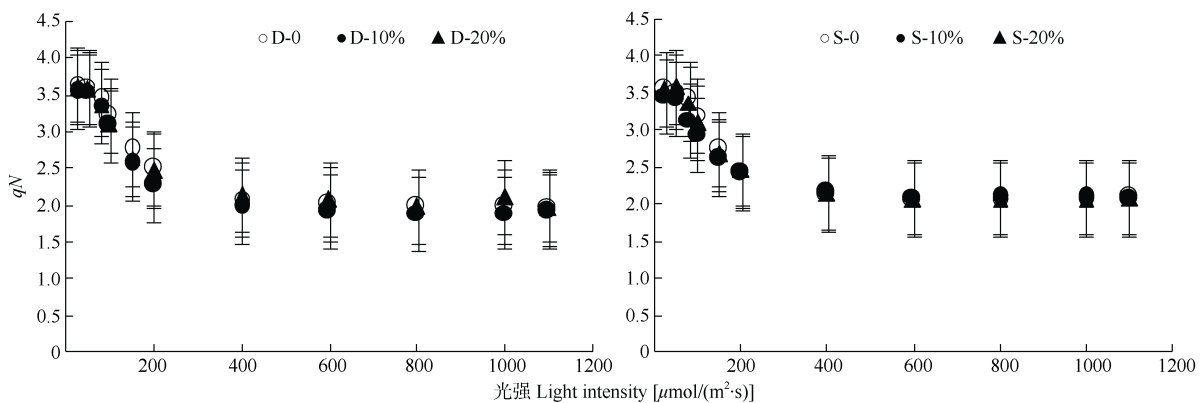


图 8 山豆根叶片非光化学猝灭系数的光响应曲线

Fig. 8 Light response curves of non-photochemical quenching coefficients of *Euchresta japonica* leaves

3 结论和讨论

光强是影响植物光合作用的主导生态因子, 光强过强时植物容易受到伤害, 过弱时植物不能发挥最大光合潜力。光饱和点是植物光合能力的重要体现^[14], 是植物耐受光强的度量。饱和光强越大, 表明植物耐受强光的能力越强。因此, 确定植物的饱和光强对其资源保护、繁育、人工栽培等具有重要的意义。

基于光合速率对光强的响应曲线, 结合光响应模型可精确给出饱和光强, 并同时给出其他相关光合参数等。因此, 植物光合作用对光响应曲线模拟已被广泛应用在植物生理研究中^[15]。目前, 光合作用光响应模型主要有直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数方程模型和光响应机理模型等。由于光响应机理模型涉及叶绿素分子光能的吸收、激发、退激发和电子传递等过程, 并可拟合光抑制部分^[16-17], 因此被研究者广泛接受并应用。本研究应用光响应机理模型分别拟合了不同处理下山豆根叶片的电子传递速率和光合速率对光强的响应曲线。从拟合的匹配度来看, 其确定系数(R^2)均大于 0.9, 说明光响应机理模型可很好地拟合山豆根叶片的电子传递速率和光合速率对光强的响应曲线, 其拟合的参数值具较高可信度。从电子传递速率对光响应的拟合结果来看, 山豆根叶片的饱和光强为 692.07~907.90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 从光合速率对光响应 r 拟合结果来看, 其饱和光强为 683.06~907.07 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 两者间极为吻合。单层遮阴处理下山豆根叶片的最大电子传递速率和最大光合速率整体高于双层遮阴处理, 其中 D-0 处理下的最大电子传递速率和最大光合速率最高, 分别为 55.36 和 6.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 前者显著高于其他处理($P<0.05$)。

植物光补偿点较低, 说明植物可很好地利用弱光, 这类植物属典型的阴生植物。本试验的拟合结果表明, 单层遮阴下山豆根叶片的光补偿点为 12.72~20.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 双层遮阴为 6.12~15.34 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 说明山豆根叶片利用弱光的能力较强。PAR 低于 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时双层遮阴下的山豆根叶片光能利用效率整体较高。弱光环境下的光能利用效率显著提高, 与山豆根光补偿点较低, 利用弱光能力较强一致。

另外, 单层遮阴下的蒸腾速率和水分利用效率均高于双层遮阴的, 说明山豆根属于半阳生植物, 野外调查表明, 山豆根往往分布于林窗, 在光强过

高或太低的生境中长势均较差。

土壤水分状况是影响植物分布、生长的关键因素之一^[18-19]。土壤含水量对植物光合和蒸腾作用的影响十分明显, 土壤含水量不足或过高都会影响植物的光合和蒸腾作用^[20]。本试验结果表明, 单层遮阴下, 山豆根叶片最大电子传递速率及其对应的饱和光强均随着干旱程度的增加而降低; 而双层遮阴条件下的最大电子传递速率及其对应的饱和光强随着干旱程度的增加而变化不大。同样, 相同遮阴条件下, 山豆根叶片的最大光合速率及其对应的饱和光强均随干旱程度的增加而呈整体下降趋势。蒸腾速度的大小会影响到作物根系的吸水能力。在土壤含水率高时, 作物会增加蒸腾以降低水势, 形成水势梯度从而促进根系吸水^[21]; 在土壤含水率低时, 作物会减少蒸腾, 维持本体水分以保持作物自身的生命体征。本试验结果显示, 在单层遮阴条件下山豆根叶片蒸腾速率也有所下降, 以适应干旱生境; 而双层遮阴条件下, 20% 干旱处理下山豆根叶片蒸腾速率则整体相对较高。另外, 相同遮阴处理下, 不同干旱处理的山豆根叶片水分利用效率较为接近。全部处理下山豆根叶片的光系统 II 的实际光化学效率、光化学猝灭系数以及非光化学猝灭系数等整体上均无显著差异($P>0.05$)。说明山豆根具有较强的耐干旱能力, 这与山豆根的肉质根、厚纸质叶片等特点相关。

综上, 山豆根属于半阳生植物, 山豆根叶片利用弱光能力较强, 光补偿点相对较低。不同干旱处理下的光合指标以及野外调查结果表明, 山豆根在较高土壤含水量条件下具有较高的光合速率, 且其本身具有较强的耐干旱能力。因此, 建议在开展回归引种、人工栽培等工作时, 进行适当遮阴处理并保持充足的土壤含水量。

参考文献

- [1] Editorial Committee of Flora of Zhejiang (New Edition). Flora of Zhejiang New Edition, Vol. 5 [M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2021: 233-234. [《浙江植物志(新编)》编辑委员会. 浙江植物志新编, 第5卷 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2021: 233-234.]
- [2] LI M H, QIU R L, DAI B A, et al. Study on matrine injection, an anticancer component of *Sophora tonkinensis* [J]. Chin Trad Patent Med, 1981(3): 36-38. [何明焕, 邱荣梁, 戴保安, 等. 广豆根抗癌成分苦参碱注射液的研究 [J]. 中成药研究, 1981(3): 36-38.]

- [3] LI X X. A survey of the research on *Sophora tonkinensis* [J]. J Shandong Univ Trad Chin Med, 2000, 24(3): 235. [李希新. 广豆根的研究概况 [J]. 山东中医药大学学报, 2000, 24(3): 235.]
- [4] LING Z Z, QIN W L, ZHAO W H, et al. Cutting propagation of *Sophora tonkinensis* [J]. J Chin Med Mat, 2005, 28(9): 750–751. [凌征柱, 覃文流, 赵维合, 等. 山豆根扦插繁殖 [J]. 中药材, 2005, 28(9): 750–751. doi: 10.3321/j.issn:1001-4454.2005.09.003.]
- [5] LI X, GAO J M, GONG Q H. Advances in pharmacological effects and toxicity of *Subprostrate sophorais* [J]. World Chin Med, 2022, 17(5): 743–747. [李曦, 高健美, 龚其海. 山豆根药理作用及毒性研究进展 [J]. 世界中医药, 2022, 17(5): 743–747. doi: 10.3969/j.issn.1673-7202.2022.05.025.]
- [6] Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Vol. 42 [M]. Beijing: Science Press, 1998: 384. [中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第 42 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 384.]
- [7] JI L Z, XIAO D M, WANG M. Effects of simulated water stress on photosynthesis rate and WUE of *Fraxinus mandshurica* [J]. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(3): 408–412. [姬兰柱, 肖冬梅, 王淼. 模拟水分胁迫对水曲柳光合速率及水分利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 408–412.]
- [8] REZAI S, ETEMADI N, NIKBAKHT A, et al. Effect of light intensity on leaf morphology, photosynthetic capacity, and chlorophyll content in sage (*Salvia officinalis* L.) [J]. Kor J Hort Sci Technol, 2018, 36(1): 46–57. doi: 10.12972/kjhst.20180006.
- [9] HIGASHIUCHI K, UNO Y, KUROKI S, et al. Effect of light intensity and light/dark period on iridoids in *Hedyotis diffusa* [J]. Environ Control Biol, 2016, 54(2): 109–116. doi: 10.2525/ecb.54.109.
- [10] LI A M, LI S H, WU X J, et al. Effect of light intensity on leaf photosynthetic characteristics and accumulation of flavonoids in *Lithocarpus litseifolius* (Hance) Chun. (Fagaceae) [J]. Open J For, 2016, 6(5): 445–459. doi: 10.4236/ojf.2016.65034.
- [11] ZHAN J C, HUANG W D, WANG L J. Research of weak light stress physiology in plants [J]. Chin Bull Bot, 2003, 20(1): 43–50. [战吉宸, 黄卫东, 王利军. 植物弱光逆境生理研究综述 [J]. 植物学通报, 2003, 20(1): 43–50. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2003.01.005.]
- [12] MATOS F S, WOLFGAMM R, GONÇALVES F V, et al. Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree [J]. Environ Exp Bot, 2009, 67(2): 421–427. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.06.018.
- [13] Compilation Committee of Records of Wuyanling Nature Reserve. District Annals of Wuyanling Nature Reserve [M]. Beijing: China Times Economic Press, 2014: 46–146. [《乌岩岭自然保护区志》编纂委员会. 乌岩岭自然保护区志 [M]. 北京: 中国时代经济出版社, 2014: 46–146.]
- [14] LIU L, LIU S M, SUN B Y. Research of the photosynthetic characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* seedlings in different producing areas [J]. Acta Agric Boreali-Occid Sin, 2009, 18(3): 160–165. [刘玲, 刘淑明, 孙丙寅. 不同产地花椒幼苗光合特性研究 [J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 160–165. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2009.03.036.]
- [15] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637–640. doi: 10.1007/s11099-007-0110-5.
- [16] YE Z P, ROBAKOWSKI P, SUGGETT D J. A mechanistic model for the light response of photosynthetic electron transport rate based on light harvesting properties of photosynthetic pigment molecules [J]. Planta, 2013, 237(3): 837–847. doi: 10.1007/s00425-012-1790-z.
- [17] YE Z P, SUGGETT D J, ROBAKOWSKI P, et al. A mechanistic model for the photosynthesis-light response based on the photosynthetic electron transport of photosystem II in C₃ and C₄ species [J]. New Phytol, 2013, 199(1): 110–120. doi: 10.1111/nph.12242.
- [18] LIU J L, XIA L Z, ZHENG W C, et al. Response of photosynthetic physiology of *Bretschneidera sinensis* seedlings to different soil water contents [J]. J CS Univ For Technol, 2015, 35(6): 15–19. [刘菊莲, 夏丽芝, 郑伟成, 等. 伯乐树幼苗对不同土壤含水量的生理生态响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(6): 15–19. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.06.004.]
- [19] DING Y H. Prediction of Environmental Change in Western China, Vol. 2 [M]. Beijing: Science Press, 2002: 16–44. [丁一汇. 中国西部环境演变评估, 第 2 卷 中国西部环境变化的预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 16–44.]
- [20] WANG H, WANG B T, WANG T, et al. Effects of different water moisture on photosynthesis and transpiration of potted *Prunus sibirica* seedlings [J]. N Hort, 2010(2): 1–5. [王红, 王百田, 王婷, 等. 不同土壤含水量对山杏盆栽幼苗蒸腾速率和光合速率的影响 [J]. 北方园艺, 2010(2): 1–5.]
- [21] ZHANG Q, ZHANG H S, LIU S M, et al. Identification of drought resistance of different high-yield maize cultivars [J]. Chin Agric Sci Bull, 2012, 28(30): 125–130. [张倩, 张洪生, 刘淑梅, 等. 不同高产玉米品种抗旱性的比较研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(30): 125–130. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.30.023.]