

李慧娥, 郭其强, 杨菊, 等. 马缨杜鹃与映山红光合特性及其影响因子分析[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(2): 226–233.



马缨杜鹃与映山红光合特性 及其影响因子分析

李慧娥¹, 郭其强^{2*}, 杨菊², 刘健³

(1. 贵州大学 农学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 贵州省森林资源与环境研究中心, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州纳雍县农牧局土肥站, 贵州 毕节 553300)

摘要: 主要探讨杜鹃花属两种植物光合特性及其影响因子, 为野生杜鹃资源的人工繁育和栽培提供重要参考。以贵州人工培育的马缨杜鹃和映山红 2 年生实生苗为研究对象, 利用 Li-6400 光合仪测定了植株叶片光合——光响应曲线及光合参数日变化, 并分析其主要影响因子。结果表明: 两种杜鹃均对弱光区有较好的适应性且表观量子效率(α)均较低。而马缨杜鹃最大净光合速率($P_{\max}$)显著高于映山红, 且对中等光强也有较好的适应性; 马缨杜鹃净光合速率(P_n)日变化因气孔限制为“双峰”曲线而映山红为单峰曲线。中午时段, 两种杜鹃均能通过提高蒸腾作用(T_r)来应对高温环境; 叶片气孔导度(G_s)是影响两种杜鹃 P_n 的主要因素, 而环境因子中空气温度(T_{air})对两种杜鹃 P_n 影响最为显著。

关键词: 马缨杜鹃; 映山红; 光合特性; 环境因子

中图分类号: S663.4; S685.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2019)02-0226-08

An Analysis of the Photosynthetic Characteristics of *Rhododendron delavayi* and *R. simsii* and Their Influencing Factors

LI Hui-e¹, GUO Qi-qiang^{2*}, YANG Ju², LIU Jian³

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou Province, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Soil and Fertilizer Station of the Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Nayong County, Guizhou Province, Bijie, Guizhou 553300, China)

Abstract: The photosynthesis characteristics of two *Rhododendron* species and their influencing factors were studied, which is very valuable for the artificial cultivation and breeding of wild *Rhododendron* species. The artificially cultured two-year old seedlings of the two *Rhododendron* species were used to measure their photosynthesis-light response curves and the diurnal change in photosynthetic parameters by li-6400 photosynthetic apparatus, and their main influencing factors were analyzed. The results showed that: both of the *Rhododendron* species had excellent adaptability under the weak light condition, and the apparent quantum efficiency of them

收稿日期: 2018-10-15 **修回日期:** 2018-11-29

基金项目: 贵州省科技计划项目[(2018)1040]和贵州大学引进人才科研项目(2016-43)

Project supported by Science and Technology Planning Projects of Guizhou Province [(2018)1040] and Introducing Talent Research Projects of Guizhou University (2016-43)

作者简介: 李慧娥(1979—), 女, 副教授, 主要从事观赏园艺植物种质资源研究, lihuiesh@126.com; *通信作者: 郭其强, 副教授, hnguoqiqiang@126.com。

was low; the maximum value of net photosynthesis rate ($P_{\max}$) of *R. delavayi* was significantly higher than that of *R. simsii*, and the former had better adaptability to medium light; the diurnal variation of net photosynthetic rate (P_n) of *R. delavayi* was of a bimodal curve due to the limitation of stomata, while it was of a single peak curve in *R. simsii*; both of the species could cope with the high temperature environment by increasing transpiration rate (T_r) at noon; stomatal conductance (G_s) was the main factor affecting P_n of the two species. Among the main environmental factors, the air temperature (T_{air}) had the most remarkable influence on P_n of the two species.

Keywords: *Rhododendron delavayi*; *R. simsii*; photosynthesis characteristics; environment factor

光合作用是绿色植物进行气体交换和物质生产的重要途径^[1-2],它对植物的生长发育影响显著^[3]。植物光合作用特性系物种在长期进化过程中形成的重要生理特性之一^[4],不但与自身特性有关^[5],也受外界不同环境因子的影响^[6-7]。通过测量植物光合作用-光响应曲线,可估算植物表观光合参数及其对不同光强的适应性^[3,8];通过测定植物光合作用日变化,能够了解一天中植物光合作用变化趋势及受各环境因子的影响程度^[9]。对于园艺工作者而言,明确了植物光合特性及其影响因子,可为人工栽培过程中采取合理技术措施提供重要参考。

马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi* Franch.)和映山红(*R. simsii* Planch.)均为杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃花属(*Rhododendron*)物种,在贵州省野生杜鹃花分布区为数量较多的杜鹃花种类^[10]。前者又名马樱花,为常绿灌木或小乔木,生于常绿阔叶林或灌木丛中,圆形顶生伞形花序,有颜色鲜艳的国旗红小花10~20朵,花期为4月中下旬;后者又名杜鹃,为常绿灌木,花冠漏斗形,每簇花2~6朵,颜色有红、淡红、白色等,花色繁茂艳丽,花期为5月中旬;二者均有较高的观赏价值和开发潜力^[11]。近年来,随着城镇绿化面积扩大和人们对盆花需求数量加剧,市场多被进口杜鹃品种占据^[12],而马缨杜鹃和映山红作为本土花卉市场的高端产品,长期处于供不应求的局面^[13]。国内针对这两种杜鹃开展了较多分子生物学特性的相关研究^[14-15],而对其生理生态学特性研究仍较为欠缺。因此,长期以来因对这两种杜鹃的生理特性不够了解——尤其是光环境调控,导致苗木培育成功率和出圃量均较低,这也是市场上苗木资源缺乏的主要原因之一。鉴于此,本研究以人工培育的马缨杜鹃和映山红幼苗为研究对象,通过测定植株叶片光合——光响应曲线和光合作用日变化,明确其光合作用特性及主要影响因子,以期在马缨杜鹃和映山红的苗期管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为贵州省纳雍县阳长镇杜鹃培育基地2年生马缨杜鹃和映山红实生苗,于2018年2月选择健壮幼苗移栽至花盆(规格为:上口径28 cm×下口径19 cm×高度29 cm的底部有孔塑料盆)中,每盆装过筛拌匀的黄壤土10 kg,每种杜鹃花各栽植30盆。盆栽土壤pH值约为5.6,有机质含量为16.5 mg/g,全氮、全磷、全钾含量分别为3,0.28,7.45 mg/g,每盆栽1株幼苗,移栽后置于温室内进行适当管理,定期浇水、除草,并适时进行病虫害防治。2018年4月将盆栽植株移至贵州大学农学院实验地继续正常管理,待其在新环境恢复正常生长后于当年9月每种各选择5盆植株大小基本一致且无病虫害的个体[苗高(35±5)cm,地径(8±1)mm],每个植株选择一片正常生长且无病虫害的功能叶挂上标签,在晴朗无风天气的空旷地进行光合作用测定。

1.2 光合作用测定方法

1.2.1 光合——光响应曲线 于2018年9月12—13日的09:30—11:00,利用便携式光合仪(Li-6400XT)及配套的LED红蓝光源进行测定,设定叶室内光合有效辐射(PAR)分别为:1 800,1 500,1 200,900,600,400,200,100,50,0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,测定叶片对不同PAR的响应特征。测量过程中,仪器控制空气流速为500 $\mu\text{mol}/\text{s}$,空气温度和相对湿度分别为(25±1)℃和60%,CO₂浓度为(380±5) $\mu\text{mol}/\text{mol}$,每个叶片重复测定3次,取平均值,作为计算两种杜鹃光合——光响应曲线的基础数据。

以 PAR 为横轴, P_n 为纵轴绘出光合作用光响应曲线, 并依据非直角双曲线拟合曲线方程^[16-17]:

$$P_n = \frac{\alpha PAR + P_{\max} - \sqrt{(\alpha PAR + P_{\max})^2 - 4\alpha PAR P_{\max}}}{2K} - R_{\text{day}} \quad (1)$$

式中 P_n 为净光合速率, $P_{\max}$ 为最大净光合速率, R_{day} 为暗呼吸速率, PAR 为光合有效辐射, α 为表观量子效率, K 为曲角。在拟合曲线中, 当 $P_n = 0$ 时的 PAR 值为光补偿点 (L_{cp}); $P_n = P_{\max}$ 时的 PAR 值为光饱和点 (L_{sp}); 水分利用效率 (WUE) 为 P_n 与蒸腾速率 (T_r) 的比值^[18]。

1.2.2 光合参数及主要环境因子的日变化测定 选择晴朗的天气 (2018 年 9 月 20 日), 利用便携式光合仪 (Li-6400XT) 及配套的标准叶室, 以自然光为光源, 空气流速设定为 $500 \mu\text{mol/s}$, 每隔 1 h 测定一次标记功能叶的 P_n 、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、 T_r 等光合作用参数, 并计算 WUE ; 测定时段为当天 08:00—18:00。测定过程中, 仪器自动记录 PAR 、空气温度 (T_{air}) 和相对湿度 (RH), 以及空气中 CO_2 浓度 (C_a) 等环境因子。取每一时间段测定数据某一参数的平均值作为该次测定结果。

1.3 数据处理与绘图

用 SPSS20.0 软件包进行数据处理和统计分析; 用 Origin9.0 软件包进行曲线拟合及绘图。

2 结果与分析

2.1 两种杜鹃光合——光响应曲线

由图 1 可知, 两种杜鹃叶片 P_n 随 PAR 增加变化异同点明显。当 PAR 处于 $0 \sim 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 马缨杜鹃和映山红 P_n 几乎相等; 当 PAR 处于 $100 \sim 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 马缨杜鹃 P_n 值继续快速升高, 而映山红 P_n 增加速度慢于马缨杜鹃, 且上升态势趋于平缓; 此后当 PAR 升高至 $350 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右时, 映山红 P_n 值基本达到最高, 而马缨杜鹃在 PAR 为 $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右时才达到最高。

由表 1 两种杜鹃光合——光响应曲线拟合相关参数可知, 马缨杜鹃比映山红具有更强的碳同化速率和光适应能力。具体表现为: 马缨杜鹃 $P_{\max}$ 极显著高于映山红, 且较低的 L_{cp} 和较高的 L_{sp} 使其具有更广泛光能利用阈值; 较低的 R_{day} 值使得马缨杜鹃幼苗更能忍耐荫蔽的生境; 无差异的 α 说明二者在高原生境下量子效率均偏低^[19]。

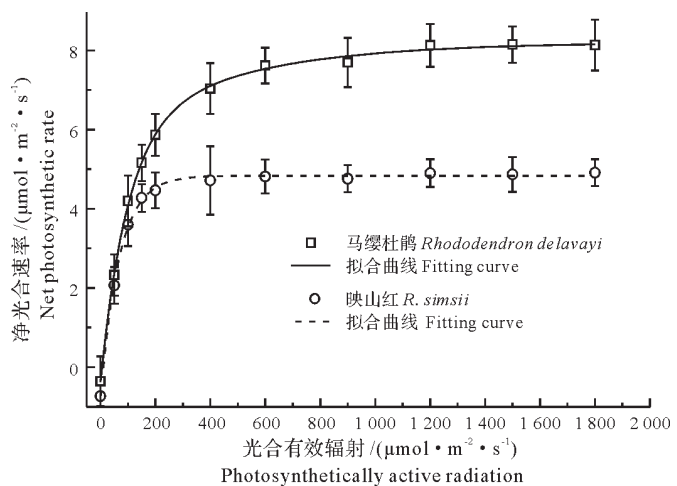


图 1 贵州两种杜鹃光合——光响应拟合曲线
Fig.1 Photosynthesis-light response curves of two Rhododendron in Guizhou Province

表 1 贵州两种杜鹃花光合——光响应曲线拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of photosynthesis-light response curves of two Rhododendron in Guizhou Province

物种 Species	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $P_{\max}$	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) L_{sp}	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) L_{cp}	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) R_{day}	表观量子效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) α
马缨杜鹃 <i>Rhododendron delavayi</i>	7.86**	876**	8.57	0.37	0.047
映山红 <i>R. simsii</i>	4.43	386	11.93*	0.73*	0.042

*和**分别表示同列在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

“*”, “**” mean significant difference at 0.05 and 0.01, respectively

2.2 主要环境因子及光合参数日变化

2.2.1 主要环境因子日变化 不同环境因子的日变化是影响植物叶片光合参数的重要因素之一^[20]。由图 2 可知: 一天中 PAR 基本呈倒“V”形变化, 最高点出现在 14:00 左右, 为 $1978 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 光照增加使

得空气温度从早上逐渐升高,到中午 14:00 达到最高点,后又趋于降低,这与空气相对湿度日变化正好相反;空气中 CO_2 的浓度呈早晚高、中午低的日变化格局。

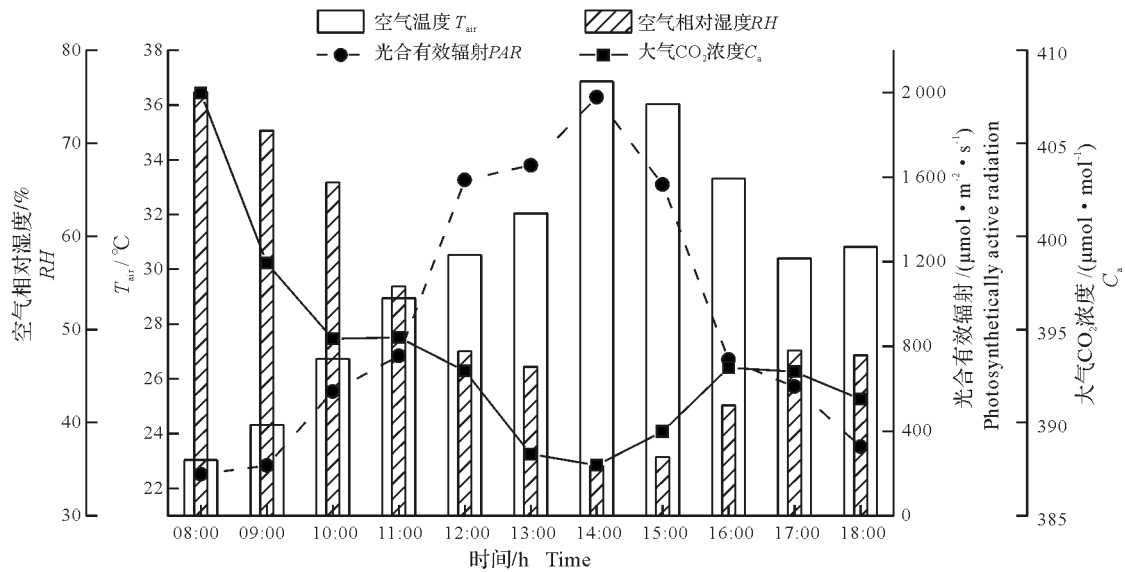


图2 主要环境因子日变化

Fig.2 Diurnal change of mainly environment factors

2.2.2 两种杜鹃光合参数日变化特性 (1) P_n 、 G_s 、 C_i 日变化。由图 3-A 可知两种杜鹃 P_n 日变化为:马缨杜鹃和映山红在 08:00—11:00 时间段均呈上升趋势,且在 11:00 达到一天中的最大值;后随时间延续,二者均趋于降低,到 14:00 时马缨杜鹃降至谷底;此后马缨杜鹃有小幅升高而映山红则继续呈缓慢降低趋势。由此可见,马缨杜鹃 P_n 日变化呈双峰曲线,即存在明显的“午休”现象,而映山红则为单峰曲线;一天中马缨杜鹃 P_n 始终高于映山红。由图 3-B 可知,两种杜鹃 G_s 在 08:00—11:00 变化趋势大致相同,其最大值出现在 11:00 左右,此后均趋于降低;而映山红在 14:00 降至最低点后又逐渐升高。这说明映山红的气孔在中午时刻会部分关闭,导致 G_s 显著降低。图 3-C 表明两种杜鹃 C_i 值在 10:00 前均呈上升趋势并达到一天中的最高;此后映山红一直保持缓慢降低,直到 18:00 降至最低,而马缨杜鹃在 12:00 降至低谷后,又维持缓慢升高趋势,且一直保持到 18:00;全天中映山红 C_i 值始终高于马缨杜鹃。

(2) T_r 、 WUE 、 L_s 日变化。由图 3-D 可知,两种杜鹃 T_r 变化趋势基本相同,由 08:00 开始,二者均在波动中升高,马缨杜鹃和映山红 T_r 值达到最大的时间分别为 15:00 和 14:00,此后二者均迅速降低。在图 3-E, F 中可以看出两种杜鹃 WUE 和 L_s 日变化特性。在 08:00—14:00,两种杜鹃 WUE 均呈波动式降低,在 14:00 降低最小值,后缓慢升高。马缨杜鹃 L_s 值一天中总体趋于降低,但在 10:00—12:00 间有个“V”形起伏;而映山红由早上 08:00 开始降低,直到 10:00 达到最低值,后直到 14:00 基本维持不变,且在 14:00—18:00 阶段仅由 0.24 升高到 0.30。

2.2.3 两种杜鹃光合参数与主要环境因子相关性 为进一步明确两种杜鹃自身光合特性及受哪些环境因子的影响,利用 Pearson 相关系数法分析两种杜鹃不同光合参数之间及其与主要环境因子的相关性。由表 2 可知马缨杜鹃光合参数与主要环境因子关系表现为:(1) P_n 与 G_s 呈极显著正相关,而 G_s 与 C_i 呈极显著正相关却与 L_s 呈极显著负相关; C_i 分别于与 L_s 和 WUE 、 C_a 、 RH 呈极显著和显著负相关;(2) T_r 与 T_{air} 呈极显著正相关,而与 WUE 、 C_a 、 RH 呈极显著负相关。此外,它还与 PAR 和 L_s 分别呈显著正、负相关。(3) WUE 与 C_a 、 RH 和 T_{air} 分别呈极显著正、负相关,而与 L_s 、 PAR 分别呈显著正、负相关; L_s 与 RH 和 C_a 分别呈极显著和显著正相关,而与 T_{air} 呈显著负相关。同时,映山红光合参数与主要环境因子关系表现为:(4) P_n 与 G_s 、 C_i 均呈极显著正相关,而与 L_s 、 T_{air} 呈显著负相关; G_s 则与 C_i 和 L_s 分别呈极显著正、负相关。(5) C_i 和 C_a 分别与 L_s 呈显著正相关和极显著负相关。不同环境因子间相关性表现为:(6) PAR 与 T_{air} 呈显著正相关,而与 C_a 和 RH 相反,呈显著负相关;同时, T_{air} 与 RH 、 C_a 均呈极显著负相关,而且 RH 与 C_a 呈极显著正相关。以上结果也说明,两种杜鹃生长过程中,不但物种内部不同光合参数间存在相互作用,同时也会受到外界各环境因子的影响。

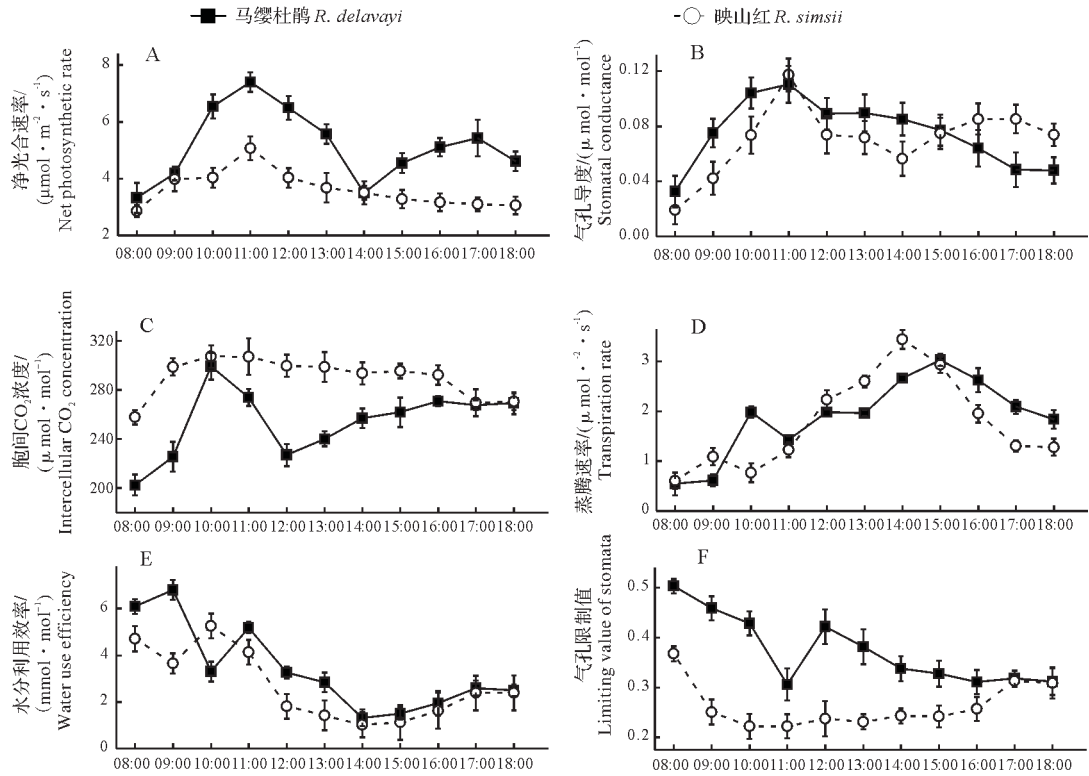


图3 马缨杜鹃和映山红光合作用参数日变化

Fig.3 Diurnal change of photosynthetic parameters of *Rhododendron delavayi* and *R. simsii*

表2 马缨杜鹃和映山红光合参数及其主要环境因子的相关性
Tab.2 Correlation between photosynthesis parameters of *R. delavayi* and *R. simsii* and the mainly environment factors

项目 Items	P_n	G_s	C_i	T_r	WUE	L_s	T_{air}	C_a	RH	PAR
P_n	—	0.863**	0.785**	-0.078	0.317	-0.719*	-0.757*	-0.105	0.309	0.120
G_s	0.798**	—	0.951**	0.276	0.045	-0.939**	-0.051	-0.439	0.047	0.469
C_i	0.244	0.774**	—	0.315	-0.049	-0.983**	0.043	-0.449	-0.053	0.438
T_r	0.101	0.468	0.645	—	-0.882**	-0.442	0.890**	-0.753**	-0.838**	0.932**
WUE	0.007	-0.365	-0.622*	-0.957**	—	0.197	-0.961**	0.742**	0.960**	-0.729*
L_s	-0.243	-0.772**	-0.996**	-0.688*	0.668*	—	-0.194	0.605*	0.205	-0.545
T_{air}	-0.311	0.156	0.561	0.801**	-0.805**	-0.606*	—	-0.749**	-0.985**	0.702*
C_a	-0.238	-0.565	-0.655*	-0.819**	0.811**	0.716*	-0.749**	—	0.771**	-0.713*
RH	0.218	-0.251	-0.623*	-0.792**	0.792**	0.665**	-0.985**	0.771**	—	-0.649*
PAR	0.056	0.184	0.210	0.673*	-0.627*	-0.275	0.702*	-0.713*	-0.649*	—

*和**分别表示在 0.05、0.01 水平显著相关;左下加粗字体为马缨杜鹃,右上普通字体为映山红

“*”, “**” mean significant correlation at 0.05 and 0.01, respectively; blod fonts at the bottom left belong to *R. delavayi*, normal fonts at top right belong to *R. simsii*

3 结论与讨论

野生杜鹃多生长于林中乔木层下灌丛中,表现出一定的耐阴性^[21],但不同种类杜鹃花对光环境的适应力各异^[22]。本研究,马缨杜鹃和映山红均具有较低的 L_{cp} ,该结果与人参、箭叶淫羊藿的 L_{cp} 值较为接近^[23-24],这充分体现了耐阴植物的共性。马缨杜鹃较高的 L_{sp} 说明其对强光也具有一定的生态适应性,这

是映山红所不具有的,该特性与二者在天然生境的分布情况相吻合。野外踏查发现,马缨杜鹃个体较映山红高大,多与其它树种伴生,较少量孤立生长;而映山红均为矮生灌木,且仅在其它树种的遮阴下才能生长良好。二者同为贵州高原山区的杜鹃花属植物,较低的 α 说明叶片中 Rubisco 酶活性较低,限制了光合作用的羧化效率。由此可见,两种杜鹃相同的 α 与迥异的 $P_{\max}$ 进一步说明了植物叶片表观量子效率并不能决定其最大碳同化能力^[25]。

两种杜鹃光合参数日变化说明二者对相同生境区的响应机制并不完全相同。马缨杜鹃 P_n 日变化呈双峰曲线,即存在“午休”现象,而映山红则为单峰曲线。以往研究表明,植物“午休”主要有两种原因,一种是因为中午强光和高温下,植物为保存水分,会关闭部分气孔,导致其 P_n 下降,即为气孔限制;后者是因为强光、高温下叶片中催化光合作用的 Rubisco 酶活性降低导致 P_n 下降,此时 L_s 减小而 C_i 不降低,即为非气孔限制^[26]。本研究中马缨杜鹃中午时分(12:00左右) G_s 和 C_i 均明显降低,说明其“午休”主要是由气孔限制引起的,且“午休”现象出现在14:00左右说明其 P_n 变化滞后于 G_s 变化。映山红 G_s 在中午虽稍有降低但 C_i 较高,可见充足的碳供给并未对造成 P_n 的大幅降低。两种杜鹃在14:00—15:00 T_r 均最高,其原因主要是由于环境中空气温度较高所致,植物通过叶表面的水分散失带走多余热量以避免高温伤害^[27],这种通过牺牲体内水分来调控叶面温度的特性使得植株 WUE 值较低。虽然马缨杜鹃的 G_s 总体高于映山红,但与映山红相比仍存在一定的的气孔限制,主要是因为前者光合碳同化速率较高,使得进入叶肉细胞的 CO_2 浓度降低较快所致。

两种杜鹃光合参数与主要环境因子关系反映了其适宜的生境条件。环境中 PAR 和 RH 与两种杜鹃 P_n 均呈不显著的正相关关系,说明两种杜鹃均有喜阴的生物学特性;而 T_{air} 与其 T_r 和 WUE 的极显著正、负相关性说明高温会增加两种杜鹃体内的水分散失和降低水分利用效率,这显然是对不利生境的一种适应性调控^[28]。环境中 CO_2 浓度升高有利于两种杜鹃 T_r 降低和 WUE 升高,说明增加碳供给能提高两种杜鹃对体内水分的高效利用。

综上所述,马缨杜鹃和映山红的共性是喜阴生、温凉和湿润空气的生境条件;但前者碳同化速率更高且能适应弱、中等强度的光照条件,而后者仅对弱光生境适应性较好;增加蒸腾是二者减少中午高温损害的共有措施。人工育苗和栽培过程中,尤其注意调控好光照和温度,中午时段强光、高温时需增加遮阴网和降温设备避免植株受伤害,并可设置喷雾装置,降温同时增加空气湿度^[29]。通过以上措施尽量营造有利于苗木生长的环境条件,提高两种杜鹃苗木培育的数量和质量,最终为实现两种杜鹃的产业化和市场化奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 裴斌,张光灿,张淑勇,等.土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1386-1396.
Pei B, Zhang G C, Zhang S Y, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [2] Liu C, Colón B C, Ziesack M, et al. Water splitting-biosynthetic system with CO_2 reduction efficiencies exceeding photosynthesis[J]. Science, 2016, 352(6290): 1210-1213.
- [3] 梁文斌,聂东伶,吴思政,等.遮荫对短梗大参苗木光合作用及生长的影响[J].生态学杂志,2015,34(2):413-419.
Liang W B, Nie D L, Wu S Z, et al. Effects of shading on the growth and photosynthesis of *Macropanax rosthornii* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 413-419.
- [4] 帕提古力·麦麦提,巴特尔·巴克,海利力·库尔班.沙尘胁迫对阿月浑子光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J].生态学报,2014,34(22):6450-6459.
Patigul mamat, Batur bake, Halil kurban. Influence of dust stress on the photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pistacia vera* L.[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6450-6459.
- [5] 梅冥相,高金汉.光合作用的起源:一个引人入胜的重大科学命题[J].古地理学报,2015,17(5):577-592.
Mei J X, Gao H J. Origin of photosynthesis: an enchanting and important scientific theme[J]. Journal of Palaeogeography,

- 2015, 17(5): 577-592.
- [6] 庞杰, 张凤兰, 郝丽珍, 等. 沙芥幼苗叶片解剖结构和光合作用对干旱胁迫的响应[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 575-581.
- Pang J, Zhang F L, Hao L Z, et al. Effect of drought stress on anatomical structure and photosynthesis of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. leaves in seedling[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4): 575-581.
- [7] Siddiqui H, Hayat S, Bajguz A. Regulation of photosynthesis by brassinosteroids in plants[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(3): 59.
- [8] 李宏宇, 张强, 王春玲, 等. 空气热储存、光合作用和土壤垂直水分运动对黄土高原地表能量平衡的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(15): 537-547.
- Li H Y, Zhang Q, Wang C L, et al. The influences of air heat storage, plant photosynthesis and soil water movement on surface energy balance over the loss plateau[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 537-547.
- [9] 徐春华, 张华, 张兰, 等. 基于通径分析的兰州北山三种典型植物光合作用影响因子[J]. 生态学杂志, 34(5): 1289-1294.
- Xu C H, Zhang H, Zhang L, et al. Factors influencing photosynthesis of three typical plant species in Beishan Mountain of Lanzhou based on path analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 34(5): 1289-1294.
- [10] 杨成华, 李贵远, 邓伦秀, 等. 贵州百里杜鹃保护区的杜鹃属植物种类及其观赏特性研究[J]. 西部林业科学, 2006, 35(4): 14-18.
- Yang C H, Li G Y, Deng L X, et al. A study on *Rhododendron* species and ornamental characteristics in Baili Dujuan Nature Reserve of Guizhou[J]. Journal of West China Forestry Science, 2006, 35(4): 14-18.
- [11] 张长芹, 黄承玲, 黄家勇, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃花属种质资源的调查[J]. 植物分类与资源学报, 37(3): 357-364.
- Zhang C Q, Huang C L, Huang J Y, et al. Investigation of germplasm resources of the genus *Rhododendron* in Baili Nature Reserve in Guizhou[J]. Plant Diversity and Resources, 37(3): 357-364.
- [12] 张敬丽, 赵海洲, 吴雅文, 等. 杜鹃属植物在昆明市园林绿化中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(29): 14341-14344.
- Zhang J L, Zhao H Z, Wu Y W, et al. Application of *Rhododendron* species in garden landscaping of Kunming City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(29): 14341-14344.
- [13] 王晓红, 陈训, 陈月华, 等. 贵州百里杜鹃风景区植物景观资源调查与营造建议[J]. 北方园艺, 2008, (9): 137-140.
- Wang X H, Chen X, Chen Y H, et al. Investigation and building of plant landscape resources in the one hundred mile azalea forest in Guizhou[J]. Northern Horticulture, 2008, (9): 137-140.
- [14] Zhang J, Ma Y P, Wu Z K, et al. Natural hybridization and introgression among sympatrically distributed *Rhododendron* species in Guizhou, China[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2017, 70: 268-273.
- [15] Sharma A, Poudel R C, Li A, et al. Genetic diversity of *Rhododendron delavayi* var. *delavayi* (CB Clarke) Ridley inferred from nuclear and chloroplast DNA: implications for the conservation of fragmented populations[J]. Plant Systematics and Evolution, 2014, 300(8): 1853-1866.
- [16] 冷寒冰, 秦俊, 叶康, 等. 不同光照环境下荷花叶片光合光响应模型比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2855-2860.
- Leng H B, Qing J, Ye K, et al. Comparison of light response models of photosynthesis in *Nelumbo nucifera* leaves under different light conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2855-2860.
- [17] 蒋冬月, 钱永强, 费英杰, 等. 柳属植物光合-光响应曲线模型拟合[J]. 核农学报, 2015, 29(1): 169-177.
- Jiang D Y, Qian Y Q, Fei Y J, et al. Modeling photosynthetic light-response curve in *Salix* L.[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(1): 169-177.
- [18] 李慧娥, 郭其强, 权红, 等. 大田栽培条件下铃铛子光合特性与主要环境因子的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 186-192.
- Li H E, Guo Q Q, Quan H, et al. Relationship between photosynthetic characteristics of field cultivated *Anisodus luridu* and main environment factors[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(9): 186-192.
- [19] 师生波, 李惠梅, 王学英, 等. 青藏高原几种典型高山植物的光合特性比较[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 40-46.
- Shi S B, Li H M, Wang X Y, et al. Comparative studies of photosynthesis characteristics in typical alpine plants of the Qing-

- hai- Tibet Plateau[J].Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 40-46.
- [20] 郭其强, 权红, 兰小中, 等. 药用植物喜马拉雅紫茉莉光合特性及影响因子分析[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(14): 2769-2773.
- Guo Q Q, Quan H, Lan X Z, et al. analysis of photosynthesis characteristics and its influencing factors of medical plant *Mirabilis himalaica* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(14): 2769-2773.
- [21] 汤飞洋. 4个杜鹃品种的光合特性及其抗旱性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- Tang F Y. Studies on the photosynthetic characteristics and drought tolerance of four *Rhododendron* cultivars [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [22] 杨婷, 许琨, 严宁, 等. 三种高山杜鹃的光合生理生态研究[J]. 植物分类与资源学报, 2013, 35(1): 17-25.
- Yang T, Xu K, Yan N, et al. Photosynthetic ecophysiology of three species of genus *Rhododendron* [J]. Plant Diversity and Resources, 2013, 35(1): 17-25.
- [23] 徐克章, 曹正菊, 张为群, 等. 人参叶片光合作用特性的研究[J]. 中国农业科学, 1990, (6): 69-74.
- Xu K Z, Cao Z J, Zhang W Q, et al. Studies on the photosynthesis characteristics of Chinese *Panax ginseng* leaves [J]. Scientia Agriculture Sinica, 1990(6): 69-74.
- [24] 刘菊莲, 叶飞英, 季国华, 等. 箭叶淫羊藿叶片光合作用对光强的响应[J]. 浙江林业科技, 2015, 35(2): 27-31.
- Liu J L, Ye F Y, Ji G H, et al. Response of *Epimedium sagittatum* leaf to illumination [J]. [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2015, 35(2): 27-31.
- [25] 许大全. 光合速率、光合效率与作物产量[J]. 生物学通报, 1999, 34(8): 11-13.
- Xu D Q. Photosynthesis rate, photosynthetic efficient and crop yield [J]. Bulletin of Biology, 1999, 34(8): 11-13.
- [26] Yin C, Pang X, Peuke A, et al. Growth and photosynthetic responses in *Jatropha curcas* L. seedlings of different provenances to watering regimes [J]. Photosynthetica, 2016, 54(3): 367-373.
- [27] 周洁, 张志强, 孙阁, 等. 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1465-1474.
- Zhou J, Zhang Z Q, Sun G, et al. Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1465-1474.
- [28] 赵琴, 潘静, 曹兵, 等. 气温升高与干旱胁迫对宁夏枸杞光合作用的影响[J]. 生态学报, 35(18): 6016-6022.
- Zhao Q, Pan J, Cao B, et al. Effects of elevated temperature and drought stress on photosynthesis of *Lycium barbarum* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): 6016-6022.
- [29] 邝作玉, 张严君. 比利时杜鹃花智能温室栽培技术[J]. 现代农业科技, 2007, (22): 33.
- Qi Z Y, Zhang Y J. Cultivation techniques of Belgian azalea in intelligent greenhouse [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007(22): 33.