

4 个杜鹃花品种的耐荫性

胡肖肖¹, 段玉侠¹, 金荷仙¹, 唐宇力², 庄晓林¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 杭州西湖风景名胜区(杭州市园文局)灵隐管理处(杭州花圃), 浙江 杭州 310013)

摘要: 以杜鹃花 *Rhododendron* 4 个品种 ‘琉球红’ ‘Liuqiu Hong’ ‘胭脂蜜’ ‘Yanzhi Mi’ ‘紫萼’ ‘Zi E’ 和 ‘状元红’ ‘Zhuangyuan Hong’ 为试验材料, 研究了不同遮光处理(全光照、55%遮光和 90%遮光)对杜鹃花植株形态、生理特性和光合特性的影响。结果表明: 随着遮光程度的增加, 各杜鹃品种的株高、叶长、叶宽、叶绿素质量分数等呈增加趋势, 遮光处理与全光照对比差异显著($P<0.05$), 而叶片厚度, 叶绿素 a/b, 比叶质量和单位面积含水量等呈下降趋势, 与全光照对比差异显著($P<0.05$); 4 个杜鹃花品种的光饱和点为 800.0~1 200.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光补偿点为 10.0~25.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 暗呼吸速率为 0.3~0.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着遮光程度的增加, 三者均呈下降趋势, 而表观量子效率并无明显下降。且在 55%遮光处理表观量子效率增大, 说明所参试的杜鹃花品种有一定的耐荫性, 不同品种对光的适应能力存在差异性。通过隶属函数分析法对 4 个杜鹃花品种的耐荫性强弱进行综合排序, 其顺序依次为 ‘状元红’ > ‘胭脂蜜’ > ‘紫萼’ > ‘琉球红’。图 4 表 5 参 21

关键词: 植物学; 杜鹃花; 遮光; 生理特性; 光合特性; 耐荫性

中图分类号: S718.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)01-0088-08

Shade tolerance of four *Rhododendron* cultivars

HU Xiaoxiao¹, DUAN Yuxia¹, JIN Hexian¹, TANG Yuli², ZHUANG Xiaolin¹

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. The Lingyin Management Office (Hangzhou Flower Nursery) of West Lake Scenic Spots in Hangzhou (Municipal Bureau of Parks and Gardens), Hangzhou 310013, Zhejiang, China)

Abstract: Different shading treatments (full light, 55% shading, and 90% shading) on the morphology, physiological characteristics, and photosynthetic characteristics of four *Rhododendron* cultivars, (‘Liuqiu Hong’, ‘Yanzhi Mi’, ‘Zi E’, and ‘Zhuangyuan Hong’) were studied. Results showed significant differences between shading treatments and full illumination ($P<0.05$). With an increasing degree of shade, the *Rhododendron* plant height, leaf length, leaf width, and chlorophyll content increased significantly ($P<0.05$), but leaf thickness, chlorophyll a/b, specific leaf weight per unit area, and water content decreased significantly ($P<0.05$). The light saturation point for the four cultivars was in the range of 800.0–1 200.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, the light compensation was 10.0–25.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and the dark respiration rate was 0.3–0.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Comparing shade tolerance for these cultivars of *Rhododendron*, the membership functions order from strong to weak was ‘Zhuangyuan Hong’ > ‘Yanzhi Mi’ > ‘Zi E’ > ‘Liuqiu Hong’. Overall, shade tolerance of *Rhododendron* was favorable with light adaptation for these different cultivars of *Rhododendron* variable. [Ch, 4 fig. 5 tab. 21 ref.]

Key words: botany; *Rhododendron*; shading; physiological characteristics; photosynthetic characteristics; shade

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-01-08

基金项目: 杭州西湖风景名胜区(杭州市园文局)科研计划项目(2014-005); 国家自然科学基金重点资助项目(51338007); 浙江农林大学人才启动基金资助项目(2014FR080)

作者简介: 胡肖肖, 从事园林植物及其应用研究。E-mail: 1315436449@qq.com。通信作者: 金荷仙, 教授, 博士, 从事风景园林历史与理论、植物景观设计研究。E-mail: 172682295@qq.com

tolerance

杜鹃花属 *Rhododendron* 为杜鹃花科 Ericaceae 中最大的属, 全世界有 1 000 余种, 中国约有 562 种, 为世界杜鹃分布中心之一^[1]。根据杜鹃的产地来源、亲缘关系、形态习性和观赏特征, 把栽培的杜鹃花属品种分成东鹃、毛鹃、西鹃、夏鹃等 4 个类型^[2]。中国每种类型的杜鹃花园艺品种数都在 200 种以上, 因此, 将更多不同类型的杜鹃花品种应用到园林绿地中, 对丰富园林景观, 打破一直以来都以栽植毛鹃为主的现状具有重要意义。目前, 对杜鹃花的研究多集中在生长发育、生理生态和分子水平等方面^[3-6], 而光照对杜鹃花产生的影响却鲜有人研究, 尤其是对杜鹃花园艺品种的研究。因此, 借鉴前人对不同植物遮光处理的成功经验, 选用 4 个观赏价值好且较耐荫的品种为试材, 通过人工设置不同遮光梯度, 了解不同光照对杜鹃花植株形态、生理、光合特性的影响, 旨在分析明确不同遮光处理下杜鹃花的耐荫性机制, 探讨不同杜鹃花品种的耐荫性, 寻求耐荫性强的品种应用于林下绿化, 为杜鹃花引种驯化、抚育管理、园林应用提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于杭州植物园科研中心内。该地区属亚热带季风气候, 年平均气温为 16.2 ℃, 无霜期为 230~260 d, 年平均降水量为 1 435.0 mm 左右, 年平均日照为 1 902.1 h, 平均相对湿度为 74%~85%。

1.2 试验材料与处理

实验于 2016 年 6~8 月在杭州植物园 (30°15'N, 120°16'E) 进行, 以长势一致的 5 年生杜鹃花品种‘紫萼’‘Zi E’‘状元红’‘Zhuangyuan Hong’‘胭脂蜜’‘Yanzhi Mi’‘琉球红’‘Liuqiu Hong’为试验材料, 定植于高 25 cm, 上口径 38 cm, 底径 26 cm 的普通塑料花盆内, 1 株·盆⁻¹, 盆土为普通园土, 各盆盛土量一致, 约 15 kg。同一品种的植株大小、株型生长基本一致。缓苗 1 周后, 在 2015 年遮光处理的基础上, 2016 年 6 月 21 日继续选用不同遮光率的黑色遮阳网进行遮光处理。遮光棚南北向, 高 1.5 m, 宽 3.0 m, 长 18.0 m。试验共设 3 个处理(全光照、55%遮光率和 90%遮光率), 不同遮光后的光合有效辐射值参照 2015 年测定值, 其中全光照为对照, 各处理间隔 1.5 m, 苗木统一栽培管理。试验采用完全随机区组设计, 设重复 3 个·品种⁻¹·处理⁻¹, 3 株·重复⁻¹, 15 d 后对各项指标进行测定。

1.3 测定指标与方法

经过遮光处理后, 用卷尺测定植株高度、冠幅、叶长和叶宽, 被测株选取植株中段位置 5 片成熟完整的叶片测量, 同时用游标卡尺测定叶片厚度^[7]; 使用打孔器($d = 0.6$ cm)钻取叶片小圆片, 测定叶片单位面积干质量、鲜质量和含水量^[8-9]; 按参考文献[9]中的 LICHTENTHALER 公式计算叶绿素 a, 叶绿素 b 及叶绿素总量; 选取同一叶位、完整成熟的叶片为材料, 利用 Li-6400XT 型便携式光合仪(Li-COR, 美国)的发光二极管(LED)红蓝光源测定不同遮光梯度下 4 个杜鹃花品种的光合—光响应曲线, 根据双曲线修正模型^[10-11]计算公式绘制光合—光响应(P_n-P_r)曲线, 并根据 YE 等^[10]研究开发的光合计算软件分析求得光补偿点(P_{LC}), 光饱和点(P_{LS}), 暗呼吸速率(R_D), 表观量子效率(A_{QY})及最大净光合速率(P_{max})。

1.4 数据统计与分析

隶属函数法综合各项指标进行耐荫性评价^[13], 与耐荫性正相关的指标直接采用公式(1), 负相关的则用 $1-\mu(x_i)$ 表示:

$$\mu(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1)$$

式(1)中: x_i 表示第 i 个综合指标, $x_{\min}$ 表示第 i 个综合指标的最小值, $x_{\max}$ 表示第 i 个综合指标的最大值。采用 SPSS 16.0 统计软件进行单因素方差分析, 采用双曲线修正模型计算光合特性参数, Excel 散点图拟合光响应曲线, 同类数据显著性差异运用 Duncan 检验法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同遮光处理对各杜鹃花品种形态特征的影响

由表 1 可知: 遮光处理对杜鹃花植株的叶长、叶宽、叶片厚度均产生显著影响, 并呈现出一定的规

律性。叶长和叶宽均随着遮光程度的增加，呈上升趋势，而叶片厚度则随着遮光率的增大而呈下降趋势。同样遮光对植株的株高、冠幅均产生影响，‘状元红’和‘琉球红’株高在 55%遮光率条件下达到最大，与全光照对比，增幅为 48.31%和 24.52%，且不同处理之间差异显著($P<0.05$)；‘紫萼’冠幅在不同处理之间差异显著($P<0.05$)，且在 90%遮光率条件下最大，而其余 3 个品种在 55%和 90%遮光率条件下差异不显著，且‘状元红’和‘胭脂蜜’在 55%遮光条件下冠幅最大。可见，在遮光处理下，杜鹃花通过增加叶长和叶宽，间接增大单位生物量的叶面积来捕获足够的光来提供给植物进行光合作用，制造出能满足生命活动的所需的有机物，以适应弱光环境。在 55%遮光率下，对比全光照株高增加，冠幅增大，说明遮光利于杜鹃花生长。

表 1 遮光处理对杜鹃花品种形态特征的影响

Table 1 Effects of shading treatment on the morphological characteristics of *Rhododendron* cultivars

品种	处理	叶长/cm	叶宽/cm	叶片厚度/ μm	株高/cm	冠幅/cm
‘紫萼’	全光照	5.90 $\pm$ 0.30 a	2.11 $\pm$ 0.08 a	176.67 $\pm$ 3.33 c	67.67 $\pm$ 1.84 a	65.50 $\pm$ 2.31 a
	55%遮光率	7.27 $\pm$ 0.16 b	2.57 $\pm$ 0.08 b	151.11 $\pm$ 7.54 b	73.17 $\pm$ 1.25 ab	73.17 $\pm$ 1.88 b
	90%遮光率	9.12 $\pm$ 0.20 c	3.31 $\pm$ 0.10 c	125.56 $\pm$ 4.45 a	75.83 $\pm$ 2.59 b	78.89 $\pm$ 1.19 c
‘状元红’	全光照	3.29 $\pm$ 0.07 a	1.40 $\pm$ 0.04 a	188.89 $\pm$ 3.09 c	59.00 $\pm$ 1.37 a	73.31 $\pm$ 2.12 a
	55%遮光率	4.33 $\pm$ 0.15 b	1.97 $\pm$ 0.04 b	167.67 $\pm$ 6.67 b	87.50 $\pm$ 2.09 c	86.22 $\pm$ 2.41 b
	90%遮光率	5.16 $\pm$ 0.09 c	2.13 $\pm$ 0.06 c	116.67 $\pm$ 4.08 a	76.54 $\pm$ 2.55 b	84.28 $\pm$ 3.49 b
‘胭脂蜜’	全光照	3.31 $\pm$ 0.08 a	1.41 $\pm$ 0.05 a	170.00 $\pm$ 6.67 c	59.33 $\pm$ 1.91 a	56.12 $\pm$ 1.04 a
	55%遮光率	4.77 $\pm$ 0.21 b	2.12 $\pm$ 0.07 b	123.33 $\pm$ 8.50 b	66.83 $\pm$ 1.38 b	65.61 $\pm$ 1.67 b
	90%遮光率	6.62 $\pm$ 0.26 c	2.88 $\pm$ 0.09 c	100.00 $\pm$ 2.89 a	63.33 $\pm$ 2.16 ab	61.06 $\pm$ 2.12 b
‘琉球红’	全光照	3.37 $\pm$ 0.14 a	1.56 $\pm$ 0.05 a	137.78 $\pm$ 6.41 b	103.33 $\pm$ 4.92 a	56.11 $\pm$ 1.23 a
	55%遮光率	3.76 $\pm$ 0.06 b	1.79 $\pm$ 0.02 b	121.11 $\pm$ 3.09 a	128.67 $\pm$ 1.31 c	61.78 $\pm$ 1.55 b
	90%遮光率	4.81 $\pm$ 0.11 c	2.26 $\pm$ 0.07 c	112.22 $\pm$ 3.64 a	115.50 $\pm$ 1.52 b	63.44 $\pm$ 1.64 b

说明：同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同遮光处理对杜鹃花比叶质量、单位叶面积鲜质量及单位叶面积含水量的影响

由表 2 可知：经遮光处理后，4 个杜鹃花品种的比叶质量、单位叶面积鲜质量、单位叶面积含水量差异显著($P<0.05$)，其值均随着遮光程度的加重而下降，但下降幅度不一。比叶质量在 90%遮光率下与全光照对比，‘紫萼’‘状元红’‘胭脂蜜’和‘琉球红’4 个品种分别下降了 42.86%，42.11%，49.83%，41.81%；单位叶面积鲜质量则分别下降了 36.73%，31.45%，22.69%，35.99%；单位面积含水量分别下降了 34.19%，22.89%，8.90%，30.04%。由此可见：‘胭脂蜜’在 90%遮光处理后，单位面积鲜质量及单位面积含水量较其他 3 个品种值变化不大，这可能与其本身叶片结构有关，‘胭脂蜜’较其他品种叶片更薄、更轻。

表 2 遮光处理对杜鹃花品种叶片质量的影响

Table 2 Effects of shading treatments on leaf quality of *Rhododendron* cultivars

品种	处理	比叶质量/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	单位面积鲜 质量/($\text{mg}\cdot$ cm^{-2})	单位面积含 水量/($\text{mg}\cdot$ cm^{-2})	品种	处理	比叶质量/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	单位面积鲜 质量/($\text{mg}\cdot$ cm^{-2})	单位面积含 水量/($\text{mg}\cdot$ cm^{-2})
‘紫萼’	全光照	7.14 $\pm$ 0.03 c	18.08 $\pm$ 0.27 c	10.88 $\pm$ 0.14 c	‘胭脂蜜’	全光照	5.84 $\pm$ 0.42 c	13.18 $\pm$ 0.67 b	7.46 $\pm$ 0.38 a
	55%遮光率	5.46 $\pm$ 0.06 b	14.01 $\pm$ 0.46 b	8.42 $\pm$ 0.38 b		55%遮光率	3.82 $\pm$ 0.10 b	11.17 $\pm$ 0.60 a	6.91 $\pm$ 0.35 a
	90%遮光率	4.08 $\pm$ 0.10 a	11.44 $\pm$ 0.12 a	7.16 $\pm$ 0.12 a		90%遮光率	2.93 $\pm$ 0.04 a	10.19 $\pm$ 0.21 a	6.79 $\pm$ 0.15 a
‘状元红’	全光照	7.10 $\pm$ 0.23 c	18.89 $\pm$ 0.28 c	11.27 $\pm$ 0.34 b	‘琉球红’	全光照	6.29 $\pm$ 0.08 c	18.34 $\pm$ 0.16 c	11.25 $\pm$ 0.13 c
	55%遮光率	4.88 $\pm$ 0.03 b	14.96 $\pm$ 0.58 b	10.70 $\pm$ 0.71 b		55%遮光率	4.46 $\pm$ 0.14 b	14.60 $\pm$ 0.12 b	9.34 $\pm$ 0.03 b
	90%遮光率	4.11 $\pm$ 0.07 a	12.95 $\pm$ 0.65 a	8.69 $\pm$ 0.49 a		90%遮光率	3.66 $\pm$ 0.06 a	11.74 $\pm$ 0.18 a	7.87 $\pm$ 0.14 a

说明：同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同遮光处理对杜鹃花品种叶绿素质量分数的影响

由表 3 可知：4 个杜鹃花品种的叶绿素质量分数呈相同的变化趋势。随着遮光程度的增加，叶绿素 a，叶绿素 b 和叶绿素总质量分数逐渐升高，在 90%遮光率下达到最大，且与对照相比差异显著($P<0.05$)。但因品种的不同，增加幅度不一。遮光后，叶绿素 a/b 呈下降趋势，4 个杜鹃花品种均在 90%遮光下达到最低值，且与全光照相比，差异显著($P<0.05$)。由此说明：遮光处理在一定程度上提高了杜鹃花的叶绿素 a，叶绿素 b 和叶绿素总量，而且叶绿素 b 比叶绿素 a 增加幅度大。这是植物对弱光环境表现出的生态适应，保证植物在弱光环境中能更好地利用散射光，从而提高植物的光能利用率，同时降低了叶绿素 a/b，来适应弱光环境。

表 3 遮光处理对杜鹃花品种叶绿素质量分数的影响

Table 3 Effects of shading treatments on chlorophyll content of <i>Rhododendron</i> cultivars					
品种	处理	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素总量/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b
‘紫萼’	全光照	0.522 ± 0.076 a	0.234 ± 0.031 a	0.726 ± 0.107 a	2.561 ± 0.094 a
	55%遮光率	0.968 ± 0.065 b	0.440 ± 0.046 b	1.408 ± 0.110 b	2.217 ± 0.090 b
	90%遮光率	1.264 ± 0.006 c	1.149 ± 0.079 c	2.413 ± 0.079 c	1.111 ± 0.082 c
‘状元红’	全光照	1.171 ± 0.035 a	0.565 ± 0.010 a	1.736 ± 0.045 a	2.095 ± 0.007 a
	55%遮光率	1.208 ± 0.034 a	0.693 ± 0.073 a	1.901 ± 0.106 a	1.771 ± 0.141 b
	90%遮光率	1.254 ± 0.005 a	1.170 ± 0.062 b	2.425 ± 0.057 b	1.078 ± 0.060 c
‘胭脂蜜’	全光照	0.956 ± 0.046 a	0.387 ± 0.031 a	1.343 ± 0.078 a	2.481 ± 0.088 a
	55%遮光率	0.960 ± 0.154 a	0.398 ± 0.165 a	1.459 ± 0.319 a	1.771 ± 0.141 b
	90%遮光率	1.272 ± 0.005 b	1.047 ± 0.021 b	2.319 ± 0.019 b	1.216 ± 0.027 c
‘琉球红’	全光照	1.118 ± 0.040 a	0.500 ± 0.045 a	1.618 ± 0.084 a	2.256 ± 0.116 a
	55%遮光率	1.251 ± 0.003 b	1.129 ± 0.027 b	2.380 ± 0.024 b	1.110 ± 0.028 b
	90%遮光率	1.206 ± 0.006 b	1.415 ± 0.053 c	2.621 ± 0.048 c	0.858 ± 0.036 c

说明：同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 遮光处理对 4 个杜鹃花品种光合一光响应曲线的影响

从图 1~4 可知：经遮光处理后，4 个杜鹃花品种对光强的响应基本与全光照一致，各处理下净光合速率均随着光合有效辐射(P_{ar})的增加而逐渐上升，当光合有效辐射升高到一定程度后，净光合速率(P_n)有稍微下降的趋势，即达到光饱和点(P_{ls})后，净光合速率开始下降。‘紫萼’在 55%遮光率条件下，最大净光合速率值比全光照条件下增加了 17.36%，而‘状元红’‘胭脂蜜’和‘琉球红’则分别降低了 44.6%、26.34%和 27.64%，说明‘紫萼’在 55%遮光条件吸收二氧化碳能力更强。光饱和点(P_{ls})，光补偿点(P_{lc})和暗呼吸速率(R_D)均随着遮光程度的提高而降低。‘紫萼’‘状元红’‘胭脂蜜’和‘琉球红’4 个杜鹃花品种遮光 90%时光饱和点比全光照条件下分别降低了 14.26%、27.65%、14.72%和 34.01%，光补偿点降低了 66.34%、49.95%、60.42%和 56.48%，暗呼吸速率降低了 10.05%、26.75%、47.14%和 43.78%，且差异显著($P<0.05$)。这说明在弱光环境下，杜鹃花可通过降低光补偿点和光饱和点来提高对弱光的利用能力并降低呼吸消耗，维持正常的植株生长，从而表现出较强的适应能力。表观量子效率(A_{qv})是光合作用中光能转换最大效率的一种度量，可以正确反映光合机构机能的变化，也可以作为反映叶片对弱光的利用能力的重要指标^[13]。由表 4 可知：表观量子效率随着遮光程度的加重并没有下降，且在 55%遮光率下，所有的杜鹃花品种表观量子效率均高于全光照条件下的，说明杜鹃花对弱光的适应和利用能力较强，适当遮光下的杜鹃花通过增加光能利用率，从而提高光合效率。但在 90%遮光率下，‘胭脂蜜’的表观量效率比全光照条件下的低，说明其不能很好地利用弱光，过度遮光可能会影响‘胭脂蜜’的生长。

2.5 4 个杜鹃花品种的耐荫性综合评价

根据公式(1)求得 4 个杜鹃花品种各个指标的隶属函数值，求平均值。根据隶属函数值对其进行耐荫性排序(表 5)。通过隶属函数分析可知，4 个杜鹃花品种的耐荫性由强到弱依次为‘状元红’>‘胭脂蜜’>‘紫萼’>‘琉球红’。

表 4 遮光处理对杜鹃花品种光合生理参数的影响

Table 4 Effects of shading treatments on photosynthetic parameters of *Rhododendron* cultivars

品种	处理	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	表观量子效率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
‘紫萼’	全光照	4.281 ± 0.281 a	1 089.438 ± 13.849 c	20.916 ± 0.579 c	0.021 ± 0.004 a	0.408 ± 0.007 b
	55%遮光率	5.024 ± .0246 b	1 025.126 ± 21.024 b	11.439 ± 0.682 b	0.035 ± 0.006 a	0.379 ± 0.034 a
	90%遮光率	3.727 ± .7279 a	934.075 ± 5.629 a	7.040 ± 0.206 a	0.057 ± 0.029 b	0.367 ± 0.078 a
‘状元红’	全光照	7.657 ± 0.453 b	1 209.278 ± 31.126 b	21.468 ± 0.872 b	0.041 ± 0.019 a	0.643 ± 0.078 c
	55%遮光率	4.242 ± 0.121 a	882.314 ± 10.989 a	14.397 ± 0.354 a	0.044 ± 0.026 a	0.580 ± 0.027 b
	90%遮光率	3.103 ± 0.087 a	874.867 ± 12.354 a	10.744 ± 0.763 a	0.045 ± 0.009 a	0.471 ± 0.123 a
‘胭脂蜜’	全光照	7.469 ± 0.238 c	1 168.062 ± 50.246 c	22.785 ± 1.023 b	0.039 ± 0.005 a	0.823 ± 0.037 c
	55%遮光率	5.502 ± 0.897 b	1 027.768 ± 12.094 bc	18.052 ± 0.587 ab	0.049 ± 0.012 b	0.798 ± 0.102 bc
	90%遮光率	4.578 ± 0.364 a	996.083 ± 18.720 a	16.961 ± 0.249 a	0.036 ± 0.029 a	0.556 ± 0.583 a
‘琉球红’	全光照	9.766 ± 0.874 c	1 232.755 ± 39.830 c	23.627 ± 1.207 c	0.045 ± 0.138 a	0.893 ± 0.193 b
	55%遮光率	7.067 ± 0.680 bc	1 172.018 ± 60.902 b	18.492 ± 0.760 b	0.052 ± 0.079 b	0.814 ± 0.063 b
	90%遮光率	4.505 ± 0.401 a	813.451 ± 36.435 a	10.282 ± 1.024 a	0.049 ± 0.008 a	0.502 ± 0.204 a

说明：同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

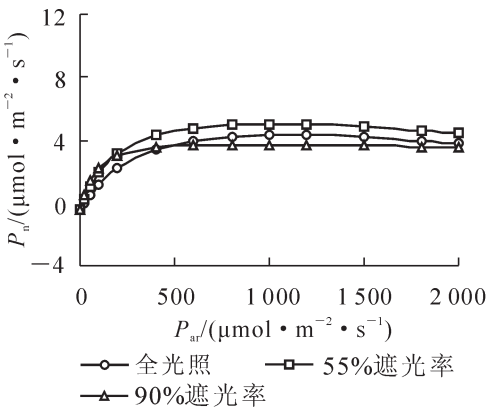


图 1 ‘紫萼’ 光合—光响应曲线
Figure 1 Net photosynthetic rate–light response curves in leaves of ‘Zi E’

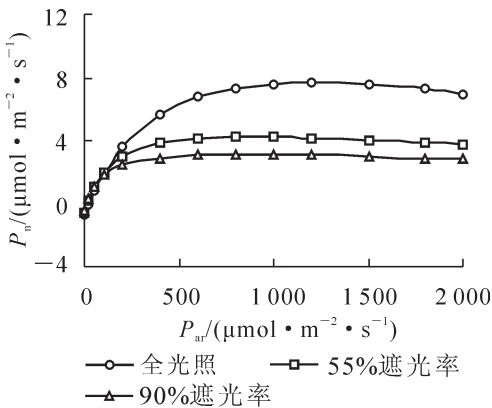


图 2 ‘状元红’ 光合—光响应曲线
Figure 2 Net photosynthetic rate–light response curves in leaves of ‘Zhuangyuan Hong’

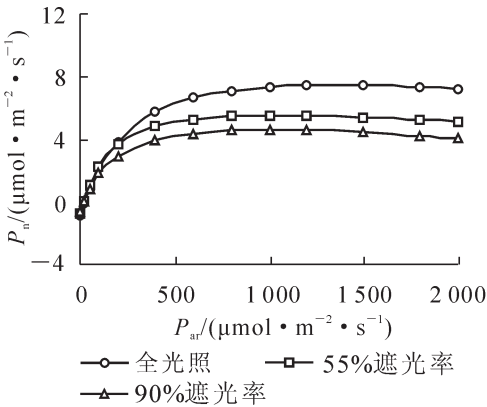


图 3 ‘胭脂蜜’ 光合—光响应曲线
Figure 3 Net photosynthetic rate–light response curves in leaves of ‘Yanzhi Mi’

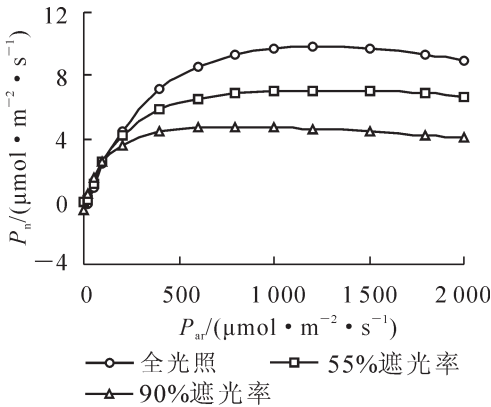


图 4 ‘琉球红’ 光合—光响应曲线
Figure 4 Net photosynthetic rate–light response curves in leaves of ‘Liuqiu Hong’

表 5 杜鹃花品种各指标的耐荫性综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of the shade tolerant ability of various indexes of the <i>Rhododendron</i> cultivars									
指标	‘紫萼’	‘状元红’	‘胭脂蜜’	‘琉球红’	指标	‘紫萼’	‘状元红’	‘胭脂蜜’	‘琉球红’
叶长	0.487	0.497	0.408	0.493	单位面积鲜质量	0.548	0.562	0.620	0.514
叶宽	0.454	0.529	0.446	0.459	单位面积含水量	0.496	0.601	0.647	0.564
叶片厚度	0.403	0.546	0.615	0.531	光饱和点	0.485	0.659	0.605	0.335
株高	0.556	0.481	0.535	0.657	光补偿点	0.561	0.553	0.604	0.462
冠幅	0.624	0.526	0.446	0.426	最大净光合速率	0.524	0.583	0.560	0.504
叶绿素 a	0.607	0.678	0.588	0.587	表观量子效率	0.463	0.583	0.410	0.524
叶绿素 b	0.412	0.356	0.438	0.349	暗呼吸速率	0.569	0.455	0.365	0.401
叶绿素总量	0.500	0.489	0.501	0.489	平均隶属值	0.512	0.528	0.526	0.496
叶绿素 a/b	0.450	0.404	0.564	0.614	排序	3	1	2	4
比叶质量	0.557	0.480	0.645	0.519					

3 讨论

3.1 遮光对 4 个杜鹃花品种形态特征的影响

光环境是影响植物生长发育最重要的环境因子。随着光环境的变化，植物能够在形态方面发生可塑性响应来适应变化的光环境^[14]。从本试验结果与分析可知：随着遮光程度的增加，杜鹃花 4 个参试品种的叶片厚度降低，差异显著，这与雷燕等^[9]对遮光条件下叶片厚度减小规律一致，而叶长、叶宽、株高、冠幅均呈上升趋势，说明其在弱光环境下会增加叶片大小，减小叶片厚度，通过最大限度增加单位生物量的叶面积与光量子的接触面积，来提高植株的整体光合能力。由此可知：参试的 4 个杜鹃花品种具有一定的耐荫性，能通过自身形态结构的调整以维持生命活动。

3.2 遮光对 4 个杜鹃花品种生理特性的影响

比叶质量是指植物叶片单位面积干质量(或鲜质量)。它是衡量植物叶片光合特性的一个重要参数，可以反映植物叶片在不同光环境下同化产物量的变化情况^[15]。在本试验中，4 个杜鹃花品种经遮光处理后，比叶质量(单位面积干质量)、单位面积鲜质量、单位面积含水量差异显著，三者变化趋势一致，即随着遮光程度的增加，三者的值均逐渐降低。遮光条件下，杜鹃花叶片变薄、比叶质量降低，可能是因为光照减弱会使叶片结构发生变化，即叶肉细胞层数减少，叶肉内栅栏组织变薄，海绵组织会增加^[16]。由此可知：杜鹃花品种在弱光环境中，会主动在叶片结构上作出一些调整，以适应弱光环境。

叶绿素在光合作用中的主要功能是吸收和传递光量子，植物叶绿素质量分数的高低，可以在一定程度上反映植物光合能力的大小^[17-18]。经遮光处理后，4 个杜鹃花品种的叶绿素质量分数显著高于对照组(全光照)。叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总量随着遮光程度的增加逐渐增大；而叶绿素 a/b 值则在叶绿素总量增加的情况下逐渐减小，这说明了叶绿素 b 的增加幅度比叶绿素 a 大，这是植物对弱光环境表现出的生态适应。试验时间正直夏季高温季节，光照强度高且强光时间长，在全光照下，高温、高光照使蒸腾速率减小，蒸腾拉力减小^[19]，影响叶绿素合成必需物质如镁离子(Mg²⁺)和氮营养等的吸收和运输，抑制了叶绿素的合成，导致叶片黄化。从植物形态观察，保证供试材料水分充足的情况下，在全光照条件下‘紫萼’叶片出现黄化现象。试验结果表明：‘紫萼’叶片叶绿素总量低于其他 3 个杜鹃花品种，与观察结果一致。

3.3 遮光对 4 个杜鹃花品种光合特性的影响

植物光饱和点、光补偿点和暗呼吸速率是衡量植物光合能力强弱的重要指标。一般来说，耐荫能力较强的植物具有较低的光补偿点和较小的暗呼吸速率，这是因为在弱光环境中，植物为保证自身最大量的积累有机物，满足正常生命活动的进行，会降低光补偿点以提高利用弱光的能力，同时降低呼吸速率，以减少因呼吸消耗引起的有机物的减少。4 个杜鹃花品种的光饱和点为 800.0~1 200.0 μmol·m⁻²·s⁻¹，光补偿点为 10.0~25.0 μmol·m⁻²·s⁻¹，暗呼吸速率为 0.3~0.9 μmol·m⁻²·s⁻¹，随着遮光程度的增加，三者均呈下降趋势。由此可知，杜鹃花在弱光环境下会通过降低自身的光补偿点、光饱和点和暗呼吸速率来适应弱光环境，但在全光照下，杜鹃花各品种的光补偿点、光饱和点、暗呼吸速率相对遮光条件下的值要

高,这说明杜鹃花是喜光耐荫植物。

表观量子效率是光能利用率的一个重要指标,反映植物在弱光条件下对光的利用能力^[20]。LEE等^[21]研究认为:耐荫植物具有较高表观量子效率,自然状态下捕获光量子用于光合作用的能力较强,叶片光合的量子效率通常为0.02~0.05。本研究结果表明:随着遮光程度的增加,表观量子效率并无明显下降,且在遮光程度55%条件下,表观量子效率均高于全光照条件下的,说明适度遮光利于杜鹃花的生长。

4 结论

4个杜鹃花品种在遮光处理下,可通过降低叶片厚度、比叶质量、单位面积鲜质量、单位面积含水量、叶绿素a/b和升高叶长、叶宽、株高、冠幅、叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量来适应弱光环境。光合—光响应曲线的测定从光合作用内部变化角度进一步揭示了杜鹃花对弱光环境的适应性。试验表明:4个品种杜鹃花是喜光耐荫性观赏植物,在遮光率为55%的光环境中可促进其生长,但90%遮光率下,表观量子效率相对于55%遮光率降低,说明过度的遮光环境超过了杜鹃花的耐受性。比较4个杜鹃花品种的耐荫性大小,综合所测指标,采用隶属函数分析结果表明其耐荫性强弱依次为‘状元红’>‘胭脂蜜’>‘紫萼’>‘琉球红’。本研究没有在遮光期间对杜鹃的成花量、花径、花芽量等指标性状进行综合分析,是本研究的一大缺陷。在园林植物应用中,应结合植物观赏特性,合理进行植物配置,择优选择耐荫性强的杜鹃花品种应用于实际中。

5 参考文献

- [1] 余树勋. 杜鹃花[M]. 北京: 金盾出版社, 1992.
- [2] 黄茂如. 杜鹃花[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [3] 兰熙, 张乐华, 张金政, 等. 杜鹃花属植物育种研究进展[J]. 园艺学报, 2012, **39**(9): 1829 – 1838.
LAN Xi, ZHANG Lehua, ZHANG Jinzheng, *et al.* Research progress of *Rhododendron* breeding [J]. *Acta Horti Sin*, 2012, **39**(9): 1829 – 1838.
- [4] 刘冰, 曹莎, 周泓, 等. 杜鹃花品种耐寒性比较及其机制研究[J]. 园艺学报, 2016, **43**(2): 295 – 306.
LIU Bing, CAO Sha, ZHOU Hong, *et al.* A study on cold tolerance difference and its mechanisms in azalea cultivars [J]. *Acta Horti Sin*, 2016, **43**(2): 295 – 306.
- [5] KOBAYASHI N, MATSUNAGA M, NAKATSUKA A, *et al.* Chimeric inheritance of organelle DNA in variegated leaf seedlings from inter-subgeneric crossing of azalea [J]. *Euphytica*, 2013, **191**(1): 121 – 128.
- [6] 黄承玲, 陈训, 高贵龙. 3种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 林业科学, 2011, **47**(6): 48 – 55.
HUANG Chengling, CHEN Xun, GAO Guilong. Physiological response of seedlings of three azalea species of drought stress and evaluation of drought resistance [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(6): 48 – 55.
- [7] 孙艳, 高海顺, 管志勇, 等. 菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定[J]. 生态学报, 2012, **32**(6): 1908 – 1916.
SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, *et al.* Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of *Chrysanthemum grandiflorum* and its closely related genera [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(6): 1908 – 1916.
- [8] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 雷燕, 李庆卫, 李文广, 等. 2个地被菊品种对不同遮光处理的生理适应性[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(5): 708 – 715.
LEI Yan, LI Qingwei, LI Wenguang, *et al.* Physiological characteristics of adaptability for two ground-cover chrysanthemum cultivars with shading [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(5): 708 – 715.
- [10] YE Zipiao, YU Qiang. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat [J]. *Photosynthetic*, 2008, **46**(4): 637 – 640.
- [11] 叶子飘, 康华靖. 植物光响应修正模型中系数的生物学意义研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2012, **33**(2): 51 – 57.
YE Zipiao, KANG Huajing. Study on biological significance of coefficients in modified model of photosynthesis-irradiance [J]. *J Yangzhou Univ Agric Life Sci Ed*, 2012, **33**(2): 51 – 57.

- [12] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学, 2003, **36**(11): 1378 – 1382.
ZHOU Guangsheng, MEI Fangzhu, ZHOU Zhuqing, *et al.* Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties [J]. *Sci Agric Sin*, 2003, **36**(11): 1378 – 1382.
- [13] 张永霞, 李国旗, 张琦, 等. 不同遮荫条件下罗布麻光合特性的初步研究[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(12): 2555 – 2558.
ZHANG Yongxia, LI Guoqi, ZHANG Qi, *et al.* The preliminary research on photosynthetic characteristics of *apocynum venetum* under different shading [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2007, **27**(12): 2555 – 2558.
- [14] 张兴旺, 张小平, 杨开军, 等. 珍稀植物青檀叶的解剖结构及其生态适应性特征[J]. 植物研究, 2007, **27**(1): 38 – 42.
ZHANG Xingwang, ZHANG Xiaoping, YANG Kaijun, *et al.* Study on anatomical structure of leaf and ecological adaptability of *Pteroceltis tartarinowii* Maxim [J]. *Bull Bot Res*, 2007, **27**(1): 38 – 42.
- [15] 王凯. 蓝百合耐荫性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
WANG Kai. *Study on Shade Tolerance of Agapanthus* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007.
- [16] 王雁, 苏雪痕, 彭镇华. 植物耐荫性研究进展[J]. 林业科学研究, 2002, **15**(3): 349 – 355.
WANG Yan, SU Xueheng, PENG Zhenhua. Review of studies on plant shade tolerance [J]. *For Res*, 2002, **15**(3): 349 – 355.
- [17] 姜武, 姜卫兵, 李志国. 园艺作物光合性状种质差异及遗传表现研究进展[J]. 经济林研究, 2007, **25**(4): 102 – 105.
JIANG Wu, JIANG Weibing, LI Zhiguo. Advance of researches on germplasm differences and genetic expression of photosynthetic traits in horticultural crops [J]. *Nonwood For Res*, 2007, **25**(4): 102 – 105.
- [18] 张斌斌, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 遮荫对红叶桃叶片光合生理的影响[J]. 园艺学报, 2010, **37**(8): 1287 – 1294.
ZHANG Binbin, JIANG Weibing, WENG Mangling, *et al.* Effects of shading on photosynthetic characteristics of red-leaf peach [J]. *Acta Horti Sin*, 2010, **37**(8): 1287 – 1294.
- [19] 吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等. 遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(19): 6033 – 6043.
LÜ Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, *et al.* Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(19): 6033 – 6043.
- [20] 朱延姝, 樊金娟, 冯辉. 弱光胁迫对不同生育期番茄光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(12): 3141 – 3146.
ZHU Yanshu, FAN Jinjuan, FENG Hui. Effects of low light on photosynthetic characteristics of tomato at different growth stages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(12): 3141 – 3146.
- [21] LEE D W, BONE R A, TARSIS S L, *et al.* Correlates of leaf optical properties in tropical forest sun and extreme-shade plants [J]. *Am J Bot*, 1990, **77**(3): 370 – 380.