

引用格式: 张丽丽, 田丹青, 万晓, 等. 11 种彩叶植物的耐荫性综合评价[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(5): 1078–1089.
ZHANG Lili, TIAN Danqing, WAN Xiao, et al. Comprehensive evaluation of shade tolerance of 11 colorful-leaf plants[J].
Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(5): 1078–1089.

11 种彩叶植物的耐荫性综合评价

张丽丽, 田丹青, 万 晓, 曹群阳, 葛亚英

(浙江省农业科学院 浙江省园林植物与花卉研究所, 浙江 杭州 311202)

摘要: 【目的】耐荫能力直接影响彩叶植物在室内弱光环境下的观赏价值与应用潜力。建立科学高效的耐荫性评价体系并筛选关键耐荫指标, 为耐荫植物的快速鉴定与推广应用提供理论依据。【方法】以海芋属 *Alocasia* 2 个品种、彩叶芋属 *Caladium* 3 个品种和秋海棠属 *Begonia* 6 个品种共 11 个畅销高观赏性彩叶植物为材料, 设置 0(对照)、50%、75% 和 90% 共 4 个遮光度, 测定植株形态、叶绿素质量分数和叶色参数等指标。采用主成分分析和隶属函数法综合评价植物耐荫性, 并通过逐步回归分析建立不同遮光条件下的预测模型, 筛选关键耐荫性鉴定指标。【结果】遮光胁迫下, 多数测试植物通过增加株高、叶柄长、叶长、叶片 L^* (明度) 和叶绿素 b 质量分数以适应弱光环境。耐荫性综合评价表明: 彩叶芋 ‘胭脂红’ C. ‘Yanzhihong’ 和 ‘粉色和声’ C. ‘Fense Hesheng’ 耐荫性最强, 秋海棠 ‘珊瑚’ B. ‘Shanhu’ 和 ‘冬云’ B. ‘Dongyun’ 耐荫性最弱。逐步回归分析表明: 不同遮光度的关键耐荫性鉴定指标存在差异。50% 遮光时主要指标为株高和叶片 L^* ; 75% 遮光时为株高、叶片 L^* 、叶绿素总量和叶长; 90% 遮光时则为叶绿素 a 质量分数、冠幅和叶绿素 b 质量分数。【结论】本研究构建了彩叶植物耐荫性综合评价体系, 确立了不同遮光度特异性的关键鉴定指标, 可为彩叶植物的耐荫性鉴定和室内园艺应用提供理论依据与方法参考。表 4 参 39

关键词: 彩叶植物; 海芋属; 彩叶芋属; 秋海棠属; 耐荫性; 主成分分析

中图分类号: S68 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)05-1078-12

Comprehensive evaluation of shade tolerance of 11 colorful-leaf plants

ZHANG Lili, TIAN Danqing, WAN Xiao, CAO Qunyang, GE Yaying

(Zhejiang Institute of Landscape Plants and Flowers, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 311202, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The shade tolerance of colorful-leaf plants directly influences their ornamental value and application potential in indoor low-light environments. Establishing a scientific and efficient shade tolerance evaluation system and identifying key indicators are of great significance for the rapid identification and widespread application of shade-tolerant germplasm. [Method] This study utilized 11 popular and highly ornamental colorful-leaf plants, including 2 *Alocasia* cultivars, 3 *Caladium* cultivars, and 6 *Begonia* cultivars. 4 shading gradients 0(ck), 50%, 75%, and 90%, were established to evaluate plant morphology, chlorophyll content, and leaf color parameters. Principal component analysis and membership function method were employed to comprehensively assess shade tolerance, while stepwise regression analysis was applied to develop predictive models under different shading conditions and identify key indicators for shade tolerance evaluation. [Result] Under shading stress, most tested plants adapted to the low-light environment by increasing plant height, petiole length, leaf length, leaf L^* value (lightness), and chlorophyll b content. Comprehensive shade

收稿日期: 2025-07-29; 修回日期: 2025-09-06

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划 (2022SNJF051)

作者简介: 张丽丽 (ORCID: 0009-0004-9099-0294), 从事花卉栽培生理及分子机制研究。E-mail: lilizhang2020@163.com。通信作者: 葛亚英 (ORCID: 0009-0004-6431-4743), 副研究员, 从事花卉栽培生理与育种研究。E-mail: gyy954002@126.com

tolerance evaluation indicated that *C.* ‘Yanzhihong’ and *C.* ‘Fense Hesheng’ exhibited the strongest shade tolerance, while *B.* ‘Shanhu’ and *B.* ‘Dongyun’ showed the weakest. Stepwise regression analysis revealed that key identification indicators varied under different shading intensities: at 50% shading, the main indicators were plant height and leaf L^* value; at 75% shading, they were plant height, leaf L^* value, total chlorophyll content, and leaf length; and at 90% shading, the key indicators were chlorophyll a, crown width, and chlorophyll b. [Conclusion] This study established a comprehensive evaluation system for shade tolerance in colorful-leaf plants and identified shade-intensity-specific key indicators, which can provide a theoretical foundation and methodological reference for both shade tolerance assessment and indoor horticultural applications of these plants. [Ch, 4 tab. 39 ref.]

Key words: colorful-leaf plants; *Alocasia*; *Caladium*; *Begonia*; shade tolerance; principal component analysis

室内摆放绿植不仅能够美化环境、净化空气,还能消除人们的疲劳感。其中,彩叶植物不仅可以增加室内色彩的丰富度,还能增添趣味性,提高视觉体验感^[1]。然而,光照作为影响植物生长发育的关键环境因子,在室内环境中往往较为有限,成为制约彩叶植物健康生长和叶片呈色的主要因素^[2-3]。因此,了解彩叶植物的耐荫性并筛选出耐荫性强的彩叶植物品种,对推动室内园艺发展具有重要意义。

植物耐荫性是一种复合性状,涉及形态结构、生理和光合特性等多方面的适应性变化^[4-6]。近年来,随着城市园林绿化需求的增加,观赏植物耐荫性研究逐渐受到关注。已有研究表明:不同植物种类乃至品种间对遮光的响应存在明显差异。例如,潘远智等^[7]发现一品红 *Euphorbia pulcherrima* 可适应适度的遮光,但过度遮光会抑制其生长;胡肖肖等^[8]不仅分析了不同遮光处理对杜鹃花 *Rhododendron simsii* 植株形态、生理特性和光合特性的影响,还通过隶属函数法对 4 个杜鹃花品种的耐荫性强弱进行了综合排序。同样,刘光杨等^[9]通过主成分分析和隶属函数法对 11 个睡莲 *Nymphaea tetragona* 品种的耐荫性进行排序,排序结果与它们在 3 种遮光情况下的生长和生理指标响应变化基本一致,证实了该评价方法的可靠性。

植物的耐荫性虽由多种指标共同决定,但并非所有指标均具有同等重要性。丁爱萍等^[10]通过主成分和逐步回归分析,提出植物生长增量、比叶面积、叶绿素 a/b、过氧化物酶活性和日平均净光合速率等 5 个指标可作为园林植物耐荫性鉴定的关键指标。朱萱等^[11]则基于隶属函数与灰色关联度分析,发现仅依靠地上干质量、花序数量、分蘖数、株高和地上鲜质量等 7 个关键指标就可快速预测草坪草的耐荫性。不同类别植物的耐荫性主导因子存在差异,因此,针对不同类别的植物,筛选关键的耐荫性指标并建立可靠的数学预测模型对简化耐荫性评价流程十分重要。

目前彩叶植物耐荫性的研究多集中于遮光响应方面^[12-14],有关室内观赏彩叶植物的耐光性综合评价和指标筛选的报道却相对较少,更未见可靠的数学预测模型。海芋属 *Alocasia*、彩叶芋属 *Caladium* 和秋海棠属 *Begonia* 的大部分栽培品种叶色多样且观赏价值高,广泛应用于室内环境的绿化和装饰^[15-16]。本研究选择了这 3 个属市面上畅销的品种为试验材料,设置 4 个遮光梯度,系统分析植株形态、叶绿素质量分数和叶色等指标的响应变化,结合主成分分析、隶属函数和逐步回归分析进行耐荫性综合评价,旨在明确各品种的耐荫性强弱,筛选关键鉴定指标,建立适用于彩叶植物的耐荫性评价体系,为彩叶植物的盆花生产和室内应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验地点在浙江省杭州市萧山区浙江省园林植物与花卉研究所苗圃基地的温室大棚。

共使用 11 种观叶植物,包括 2 个观赏海芋品种(‘黑天鹅’ *A.* ‘Heitiane’ 和 ‘白犀牛’ *A.* ‘Baixiniu’), 3 个彩叶芋品种(‘胭脂红’ *C.* ‘Yanzhihong’、‘红金灿’ *C.* ‘Hongjincan’ 和 ‘粉色和声’ *C.* ‘Fense Hesheng’) 和 6 个秋海棠品种(‘加仑虎斑’ *B.* ‘Jialun Huban’、‘青柠’ *B.* ‘Qingning’、‘黑天鹅’ *B.* ‘Heitiane’、‘圣火’ *B.* ‘Shenghuo’、‘珊瑚’ *B.* ‘Shanhu’ 和 ‘冬

云' B. 'Dongyun')。所有供试植株均为统一栽培管理的3年生苗,生长健壮且无病虫害。

1.2 试验处理

试验于2023年4月19日开始,挑选11个品种生长一致的植株定植在直径为14~18 cm的花盆中,随后分别放置4个区域中,4个区域的光照条件分别是:大棚常规光照(3 500~4 000 lx, ck)、50%遮光(1 700~2 000 lx)、75%遮光(1 000~1 400 lx)、90%遮光(500 lx)。每处理15盆,根据基质水分状况,每周浇水2~3次。连续遮光处理6个月,于2023年10月19日结束。处理期间大棚温度为28(昼)/22(夜)℃,湿度为50%~65%。常规统一管理,试验期间多次测量光照强度及光合有效辐射日变化。

1.3 指标的测定方法

1.3.1 形态指标测定 遮光试验结束后,所有测试植物各处理组随机选取10株植物,测量其株高、冠幅和叶片形态指标。用直尺测量植株的株高(cm)和冠幅(cm)。选取植株中部3片完全展开的功能叶,用游标卡尺测量叶柄长(cm)、叶柄粗(cm)、叶宽(cm)、叶长(cm)。随机选3株进行叶色测定。选取植株中部3片完全展开的功能叶,使用色差仪(NF333, Nippon)读取各处理下植物叶片的 L^* (明度,值越大亮度越高,越小颜色越暗)、 a^* (红绿色度,值越大代表红色越深,反之绿色越深)和 b^* (黄蓝色度,值越大,代表黄色越深,反之代表蓝色越深)。叶片 C^* (彩度,数值越大代表植物色彩越艳丽)由如下公式计算: $C^*=(a^{*2}+b^{*2})^{1/2}$ 。

1.3.2 叶片叶绿素质量分数测定 选取植物中段位置3片完全展开的功能叶用于叶绿素质量分数的测定,用丙酮乙醇混合液浸提法提取叶片色素,测定提取液在波长665和649 nm处的吸光度,根据公式^[17]计算各样品中叶绿素a和叶绿素b质量分数。每个处理均包含3个重复。并计算叶绿素总量及叶绿素a/b。

1.4 数据处理

采用Excel整理数据,利用SPSS 20.0进行统计,并利用Duncan's多重比较、单因素方差分析、主成分分析和隶属函数分析对数据进行分析。为了保证综合评价结果的可靠性,采用耐荫系数(β)将各指标的原始数据进行量纲化处理,计算公式为: $\beta=\text{某遮光处理下某指标测量值}/\text{全光照下该指标的测量值}$ 。根据累计贡献率确定主成分个数并进行隶属函数分析,计算出不同遮光处理下11个植物的耐荫性综合评价值(D)。之后将各单项指标的耐荫系数作为自变量,耐荫性综合评价值(D)作为因变量,采用逐步回归方程,建立耐荫性评价回归模型。

隶属函数值计算公式如下: $u(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$;

各综合指标值的权重如下: $W_i=P_i/\sum_{i=1}^n P_i$;

耐荫性综合评价值如下: $D=\sum_{i=1}^n [u(X_i)\times W_i]$ 。

其中: $u(X_i)$ 为某参试植物在某遮光处理下第 i 个主成分的隶属函数值($i=1, 2, \dots, n$); X_i 为该植物在该遮光处理下第 i 个主成分的综合指标值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为所有参试植物在该遮光处理下第 i 个主成分的综合指标值中的最大值和最小值; W_i 表示该遮光处理下第 i 个主成分的权重; P_i 表示第 i 个主成分所对应的贡献率; D 为该遮光处理下某参试植物各主成分隶属函数值和对应权重进行线性加权而得的耐荫性综合评价值。

2 结果与分析

2.1 不同遮光度对彩叶植物株形的影响

由表1可知:除了个别植物外,多数彩叶植物株高在遮光后增加。11个品种中,‘圣火’‘珊瑚’‘冬云’3个秋海棠品种遮光后株高显著下降($P<0.05$),说明耐弱光性能较差。‘红金灿’彩叶芋株高虽下降但不显著。其他7个品种株高均增加,其中‘白犀牛’海芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘青柠’秋海棠和‘黑天鹅’秋海棠的株高随着遮光增强呈现先升后降的趋势。而‘胭脂红’彩叶芋、‘黑天鹅’海芋和‘粉色和声’彩叶芋的株高随着遮光增强而持续上升,在90%遮光时株高分别是ck的1.24、1.21和1.30倍,显示较强的耐弱光性。

表 1 不同遮光度处理下植株株形与叶形变化

Table 1 Changes in plant shape and leaf shape under different shading treatments

品种	遮光度/%	株高/cm	冠幅/cm	叶柄长/cm	叶柄粗/cm	叶长/cm	叶宽/cm
‘胭脂红’彩叶芋	0	9.64±0.72 b	28.64±1.59 a	5.28±0.27 c	2.45±0.08 a	9.71±0.29 b	8.73±0.08 a
	50	10.93±0.73 ab	25.29±0.75 bc	4.92±0.20 c	1.92±0.08 b	10.38±0.20 ab	8.22±0.19 a
	75	10.64±0.37 ab	27.94±0.61 ab	7.52±0.33 b	2.37±0.17 a	10.44±0.25 a	8.61±0.19 a
	90	11.91±0.76 a	23.98±0.93 c	8.63±0.35 a	1.89±0.06 b	8.56±0.21 c	7.26±0.28 b
‘黑天鹅’海芋	0	12.75±0.48 b	36.54±1.46 a	6.49±0.23 c	3.61±0.11 b	20.17±0.84 a	11.70±0.26 a
	50	12.55±0.65 b	35.41±0.77 a	6.73±0.30 c	3.21±0.19 c	19.59±0.63 a	10.78±0.40 a
	75	13.77±0.67 ab	35.92±0.83 a	8.90±0.34 b	4.21±0.13 a	18.93±0.97 a	11.65±0.35 a
	90	15.43±0.63 a	31.70±0.62 b	10.46±0.28 a	3.80±0.09 b	12.89±0.33 b	9.53±0.24 b
‘白犀牛’海芋	0	17.63±0.74 a	37.76±0.89 a	11.51±0.37 c	4.54±0.22 a	15.16±0.50 a	10.46±0.47 b
	50	19.99±1.52 a	34.83±1.66 ab	12.95±0.44 b	4.57±0.13 a	14.91±0.40 a	11.14±0.43 ab
	75	18.72±1.08 a	33.98±0.92 b	13.84±0.51 ab	4.39±0.09 a	14.63±0.40 a	11.91±0.39 a
	90	16.90±0.97 a	32.67±0.65 b	14.68±0.62 a	4.16±0.22 a	14.58±0.54 a	9.00±0.22 c
‘红金灿’彩叶芋	0	26.16±1.26 a	52.93±1.31 a	21.23±0.95 ab	4.16±0.13 a	21.04±0.50 a	17.69±0.59 a
	50	24.89±1.00 a	41.74±1.67 bc	21.45±1.18 ab	3.67±0.14 b	19.69±0.86 a	15.37±0.64 b
	75	23.87±1.08 a	43.57±1.30 b	22.26±1.02 a	3.58±0.22 b	19.47±0.81 a	14.80±0.73 b
	90	23.94±0.93 a	38.17±1.59 c	18.43±1.08 b	2.98±0.14 c	14.79±0.74 b	11.54±0.56 c
‘粉色和声’彩叶芋	0	35.47±0.64 b	69.24±3.09 a	33.24±1.25 b	5.18±0.12 a	22.26±0.69 a	12.58±0.36 a
	50	37.33±1.04 b	69.94±1.73 a	36.75±1.39 ab	4.95±0.23 ab	21.92±0.46 a	12.10±0.31 a
	75	42.64±1.41 a	68.32±2.59 a	41.14±1.44 a	4.55±0.16 bc	21.66±0.59 a	12.93±0.87 a
	90	46.17±1.74 a	66.81±3.40 a	39.59±1.88 a	4.15±0.11 c	17.93±0.41 b	10.49±0.43 b
‘加仑虎斑’秋海棠	0	22.52±0.87 a	54.49±1.87 a	17.88±0.56 bc	2.32±0.09 ab	3.47±0.07 a	8.45±0.09 b
	50	22.61±0.50 a	53.35±1.68 a	19.07±0.52 ab	2.16±0.08 ab	3.67±0.14 a	8.77±0.16 ab
	75	23.43±0.66 a	56.76±1.34 a	20.08±0.68 a	2.43±0.11 a	3.69±0.10 a	9.03±0.10 a
	90	21.87±0.40 a	44.68±0.99 b	16.39±0.42 c	2.07±0.09 b	3.45±0.10 a	8.44±0.21 b
‘青柠’秋海棠	0	21.36±0.67 a	51.67±0.95 ab	16.81±0.89 a	2.10±0.06 a	4.18±0.10 c	6.98±0.41 c
	50	22.2±0.26 a	55.75±1.82 a	17.99±0.47 a	2.20±0.05 a	5.57±0.15 a	10.21±0.29 a
	75	21.92±0.84 a	54.14±2.07 a	18.13±0.52 a	2.14±0.06 a	5.28±0.15 a	9.06±0.45 b
	90	20.47±2.36 a	47.37±1.18 b	16.56±0.39 a	1.84±0.09 b	4.89±0.10 b	8.20±0.25 b
‘黑天鹅’秋海棠	0	25.68±0.50 b	56.36±2.44 a	20.40±0.49 b	3.49±0.08 a	6.66±0.15 ab	11.43±0.30 a
	50	28.31±0.88 a	61.68±3.35 a	22.12±0.89 ab	3.08±0.18 b	6.92±0.22 a	10.60±0.39 ab
	75	28.51±0.59 a	63.37±2.82 a	23.60±0.56 a	2.87±0.09 b	6.45±0.13 ab	10.40±0.27 b
	90	21.33±0.45 c	43.98±1.82 b	18.13±0.41 c	2.36±0.10 c	6.26±0.12 b	10.32±0.22 b
‘圣火’秋海棠	0	21.28±0.55 a	48.92±1.15 a	19.74±0.59 a	4.72±0.22 a	10.85±0.33 a	14.75±0.45 a
	50	20.84±0.89 a	46.66±1.20 a	18.12±0.46 ab	4.19±0.19 b	10.99±0.45 a	14.21±0.47 a
	75	20.34±0.56 ab	46.11±0.81 a	18.51±0.84 ab	4.08±0.14 b	10.30±0.35 a	13.60±0.58 a
	90	17.76±1.53 b	42.09±0.58 b	16.90±0.81 b	3.45±0.14 c	9.08±0.31 b	12.23±0.35 b
‘珊瑚’秋海棠	0	20.16±0.66 a	50.12±2.51 a	14.32±0.58 a	3.22±0.19 a	8.84±0.30 bc	6.97±0.26 a
	50	20.75±0.92 a	47.03±2.18 a	13.11±0.52 a	2.60±0.12 b	8.36±0.40 c	6.88±0.23 a
	75	15.05±0.68 b	39.51±1.95 b	9.52±0.45 b	2.68±0.11 b	9.50±0.28 ab	6.83±0.19 a
	90	15.90±0.71 b	36.48±2.19 b	9.43±0.54 b	2.61±0.15 b	9.88±0.38 a	7.42±0.17 a
‘冬云’秋海棠	0	24.63±0.93 a	66.24±2.56 a	16.68±0.67 a	2.91±0.06 a	9.46±0.39 a	6.77±0.29 a
	50	21.27±0.49 b	57.02±2.63 b	16.72±0.56 a	2.57±0.11 b	9.95±0.36 a	6.75±0.14 a
	75	19.71±0.61 bc	51.51±2.39 b	14.45±0.76 b	2.51±0.12 b	9.77±0.22 a	6.82±0.24 a
	90	19.11±0.43 c	43.34±1.73 c	12.66±0.50 b	2.20±0.08 c	8.48±0.21 b	5.81±0.14 b

说明：遮光度0指大棚常规光照(ck)；不同小写字母表示同一品种不同遮光度处理间差异显著($P<0.05$)。

所有品种冠幅均随遮光加强而不同程度地下降。其中,‘粉色和声’彩叶芋和‘青柠’秋海棠的冠幅虽下降但不显著;‘黑天鹅’海芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘黑天鹅’秋海棠和‘圣火’秋海棠的冠幅仅在90%遮光时才显著低于ck ($P<0.05$);而‘胭脂红’彩叶芋、‘白犀牛’海芋、‘红金灿’彩叶芋、‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海棠等品种在遮光50%或75%时,冠幅开始不同程度地下降;90%遮光下,‘冬云’秋海棠冠幅的降幅最大(34.6%),‘粉色和声’彩叶芋和‘青柠’秋海棠的降幅最小(3.5%和8.3%),说明‘粉色和声’彩叶芋和‘青柠’秋海棠耐荫性较好,高遮光情况下,还能维持较大的冠幅,而‘冬云’秋海棠的耐荫性较差,过度遮光会抑制其生长,冠幅显著下降。

2.2 不同遮光度对彩叶植物叶片形态的影响

如表1所示:随着遮光加强,不同植物品种叶柄长变化各异。海芋和彩叶芋品种中,‘粉色和声’彩叶芋和‘红金灿’彩叶芋在75%遮光时叶柄长达峰值后逐渐下降;‘胭脂红’彩叶芋、‘黑天鹅’海芋和‘白犀牛’海芋叶柄长随遮光加强持续上升,90%遮光时‘胭脂红’彩叶芋和‘黑天鹅’海芋叶柄长分别是ck的1.64和1.61倍。秋海棠品种中,‘加仑虎斑’‘青柠’和‘黑天鹅’的叶柄长呈先升后降的趋势,在75%遮光时最长;‘圣火’‘珊瑚’和‘冬云’叶柄长则随遮光加强持续下降,90%遮光时分别为ck的85.6%,65.9%和75.9%。遮光使多数品种叶柄粗度下降,‘黑天鹅’秋海棠降幅最大,90%遮光处理时叶柄粗度降低32.4%,而‘白犀牛’海芋和‘青柠’秋海棠受遮光影响较小。

在叶长方面,‘胭脂红’彩叶芋、‘青柠’秋海棠和‘黑天鹅’秋海棠均随着遮光加强而先升后降,分别在75%、50%和50%遮光下达到最大值。‘黑天鹅’海芋、‘红金灿’彩叶芋、‘粉色和声’彩叶芋、‘圣火’秋海棠和‘冬云’秋海棠的叶长在50%和75%遮光下与ck无显著差异,仅在90%遮光时显著降低($P<0.05$)。‘白犀牛’海芋和‘加仑虎斑’秋海棠的叶长则在各遮光下均无变化。与其他品种不同,‘珊瑚’秋海棠叶长随遮光增强而整体上升,90%遮光下是ck的1.12倍。就叶宽而言,‘胭脂红’彩叶芋、‘黑天鹅’海芋、‘粉色和声’彩叶芋、‘圣火’秋海棠和‘冬云’秋海棠的叶宽在50%和75%遮光下与ck无显著差异,仅在90%遮光时显著下降($P<0.05$)。‘白犀牛’海芋、‘加仑虎斑’秋海棠和‘青柠’秋海棠叶宽随遮光增强呈现先升后降的变化趋势。‘珊瑚’秋海棠的叶宽则不受遮光影响。‘红金灿’彩叶芋受遮光影响最大,叶宽随着遮光加强而持续下降,90%下仅为ck的65%。

2.3 不同遮光度对彩叶植物叶片叶绿素质量分数的影响

从表2可知:多数植物叶片中的叶绿素a质量分数在不同遮光度处理下与ck无显著差异。‘黑天鹅’秋海棠的叶绿素a质量分数在遮光后显著上升($P<0.05$),而‘冬云’秋海棠的叶绿素a质量分数在75%和90%遮光下显著低于ck ($P<0.05$)。叶绿素b质量分数在不同植物品种中的变化趋势不同,遮光使‘胭脂红’彩叶芋、‘白犀牛’海芋、‘红金灿’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋叶片的叶绿素b质量分数上升,分别在90%、50%、90%和90%遮光下达到最大值,比ck分别高出133.3%、44.0%、180.0%和225.0%。‘黑天鹅’海芋和‘冬云’秋海棠的叶绿素b质量分数则不同程度地下降,其余品种不同遮光下变化不大。

在不同遮光度处理下,叶绿素总量‘胭脂红’彩叶芋、‘粉色和声’彩叶芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘圣火’秋海棠和‘珊瑚’秋海棠与ck差异不显著,而‘白犀牛’海芋和‘红金灿’彩叶芋的叶绿素总量仅在50%和90%遮光下显著高于ck ($P<0.05$)。与ck相比,遮光显著降低了‘冬云’秋海棠的总叶绿素质量分数($P<0.05$),且遮光度越高,降幅越大。‘黑天鹅’秋海棠是唯一在不同遮光度下叶绿素总量显著上升的品种,为ck的1.15~1.18倍。

遮光处理对‘黑天鹅’‘圣火’‘珊瑚’和‘冬云’等秋海棠的叶绿素a/b无显著影响。相较于ck,90%遮光显著降低了‘胭脂红’、‘红金灿’和‘粉色和声’等彩叶芋的叶绿素a/b ($P<0.05$),其中‘粉色和声’的下降幅度最大,下降了59.0%。

2.4 不同遮光度对彩叶植物叶色的影响

如表2所示:遮光处理显著提高了‘胭脂红’彩叶芋、‘黑天鹅’海芋和‘青柠’秋海棠叶片的 L^* 值($P<0.05$),90%遮光下分别比ck高出37.7%、49.5%和10.9%,表明叶色变浅。而遮光处理显著降

表 2 不同遮光度处理下植株叶片叶绿素质量分数及叶色变化

Table 2 Changes in chlorophyll content and color of plant leaves under different shading treatments							
品种	遮光度/%	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	L*	C*
‘胭脂红’彩叶芋	0	0.07±0.02 a	0.03±0.01 c	0.11±0.03 a	2.17±0.03 a	49.92±1.80 b	29.60±2.96 a
	50	0.10±0.03 a	0.06±0.01 ab	0.16±0.03 a	1.78±0.30 ab	66.79±2.53 a	10.84±1.42 b
	75	0.09±0.00 a	0.04±0.00 bc	0.14±0.00 a	2.25±0.04 a	72.33±1.37 a	8.97±0.51 b
	90	0.09±0.00 a	0.07±0.00 a	0.16±0.00 a	1.35±0.07 b	68.74±1.18 a	12.42±1.44 b
‘黑天鹅’海芋	0	0.51±0.00 a	0.57±0.05 a	1.09±0.05 a	0.91±0.08 b	14.74±0.60 c	3.39±0.49 a
	50	0.52±0.01 a	0.54±0.05 ab	1.05±0.04 ab	0.98±0.10 ab	13.56±0.75 c	2.87±0.35 a
	75	0.51±0.01 a	0.39±0.05 b	0.91±0.06 b	1.34±0.13 a	17.18±0.35 b	2.74±0.22 a
	90	0.51±0.01 a	0.49±0.05 ab	1.01±0.04 ab	1.07±0.12 ab	22.03±1.09 a	3.52±0.32 a
‘白犀牛’海芋	0	0.52±0.01 a	0.50±0.02 b	1.02±0.01 b	1.04±0.04 a	48.21±0.69 a	7.38±0.16 a
	50	0.49±0.02 a	0.72±0.05 a	1.21±0.03 a	0.69±0.07 b	49.73±1.22 a	6.20±0.13 b
	75	0.50±0.01 a	0.66±0.08 ab	1.16±0.07 ab	0.79±0.12 ab	50.27±0.40 a	6.51±0.27 b
	90	0.50±0.01 a	0.69±0.08 ab	1.19±0.07 ab	0.75±0.10 ab	50.41±0.27 a	5.29±0.09 c
‘红金灿’彩叶芋	0	0.15±0.01 a	0.05±0.00 b	0.20±0.01 b	2.96±0.09 a	30.24±1.60 a	28.65±2.00 a
	50	0.17±0.02 a	0.06±0.01 b	0.23±0.03 b	2.70±0.11 a	28.89±1.21 a	24.29±1.35 ab
	75	0.18±0.01 a	0.07±0.01 b	0.25±0.02 b	2.82±0.22 a	35.15±3.23 a	25.11±1.43 a
	90	0.18±0.01 a	0.14±0.04 a	0.32±0.03 a	1.46±0.39 b	31.28±0.34 a	18.39±2.67 b
‘粉色和声’彩叶芋	0	0.08±0.03 a	0.04±0.01 b	0.11±0.04 a	2.17±0.12 a	50.58±1.92 a	13.64±3.36 a
	50	0.11±0.02 a	0.05±0.01 b	0.16±0.03 a	2.11±0.04 a	55.62±0.68 a	6.43±1.21 a
	75	0.12±0.04 a	0.05±0.02 b	0.17±0.06 a	2.20±0.03 a	56.01±2.68 a	6.02±2.83 a
	90	0.12±0.04 a	0.13±0.02 a	0.24±0.06 a	0.89±0.21 b	54.99±1.75 a	12.84±1.82 a
‘加仑虎斑’秋海棠	0	0.14±0.01 a	0.04±0.00 a	0.18±0.01 a	4.02±0.07 b	23.10±1.83 a	11.89±1.14 a
	50	0.15±0.01 a	0.03±0.00 a	0.18±0.01 a	4.58±0.11 a	25.62±3.96 a	15.61±4.42 a
	75	0.15±0.01 a	0.03±0.00 a	0.18±0.01 a	4.56±0.03 a	24.19±2.86 a	15.56±3.63 a
	90	0.15±0.01 a	0.04±0.00 a	0.18±0.01 a	4.14±0.16 b	22.24±0.38 a	10.38±0.62 a
‘青柠’秋海棠	0	0.13±0.00 a	0.04±0.00 a	0.17±0.00 a	3.61±0.12 b	36.48±0.86 b	30.64±1.18 b
	50	0.13±0.00 a	0.03±0.00 b	0.16±0.00 ab	4.55±0.14 a	40.06±0.44 a	39.64±1.16 a
	75	0.12±0.01 a	0.03±0.00 b	0.15±0.01 b	4.34±0.08 a	39.51±1.14 a	38.64±1.16 a
	90	0.12±0.01 a	0.04±0.00 a	0.16±0.01 ab	3.45±0.23 b	40.44±0.94 a	36.7±0.31 a
‘黑天鹅’秋海棠	0	0.27±0.00 b	0.07±0.00 a	0.34±0.01 b	4.07±0.09 a	16.37±1.25 a	2.12±0.21 a
	50	0.31±0.01 a	0.09±0.01 a	0.40±0.02 a	3.67±0.44 a	15.55±1.70 a	4.11±2.08 a
	75	0.31±0.00 a	0.09±0.00 a	0.40±0.00 a	3.43±0.05 a	14.78±1.10 a	3.28±0.44 a
	90	0.31±0.00 a	0.09±0.00 a	0.39±0.01 a	3.49±0.18 a	14.82±1.51 a	2.47±0.59 a
‘圣火’秋海棠	0	0.24±0.01 a	0.08±0.00 a	0.32±0.01 ab	3.25±0.03 a	31.86±6.77 a	13.88±4.68 a
	50	0.23±0.01 a	0.07±0.00 a	0.30±0.02 b	3.03±0.06 a	34.21±3.02 a	9.69±1.86 a
	75	0.26±0.01 a	0.08±0.00 a	0.34±0.01 ab	3.28±0.01 a	32.30±5.41 a	7.35±3.77 a
	90	0.26±0.01 a	0.08±0.00 a	0.34±0.01 a	3.10±0.25 a	36.10±0.72 a	12.56±1.66 a
‘珊瑚’秋海棠	0	0.24±0.01 a	0.06±0.00 a	0.30±0.01 a	3.65±0.26 a	54.74±1.28 a	8.76±0.56 a
	50	0.25±0.02 a	0.07±0.00 a	0.32±0.02 a	3.72±0.18 a	32.67±5.19 b	6.02±3.17 ab
	75	0.23±0.01 a	0.06±0.00 a	0.29±0.01 a	3.65±0.14 a	34.58±6.88 b	2.35±0.75 b
	90	0.23±0.01 a	0.06±0.01 a	0.30±0.00 a	3.69±0.57 a	32.39±1.09 b	5.40±0.60 ab
‘冬云’秋海棠	0	0.28±0.01 a	0.09±0.00 a	0.37±0.01 a	3.31±0.08 a	46.66±1.24 a	7.33±0.63 a
	50	0.27±0.00 a	0.08±0.00 a	0.35±0.00 b	3.16±0.10 a	45.43±1.63 a	5.95±0.95 ab
	75	0.21±0.01 b	0.07±0.00 b	0.28±0.01 c	3.14±0.02 a	45.74±2.55 a	4.47±0.27 b
	90	0.21±0.01 b	0.06±0.01 b	0.27±0.00 c	3.31±0.34 a	40.15±2.80 a	4.74±0.05 b

说明：遮光度0指常规大棚光照(ck)；不同小写字母表示同一品种不同遮光度处理间差异显著($P<0.05$)。

低了‘珊瑚’秋海棠叶片的 L^* 值 ($P<0.05$), 在 50%、75% 和 90% 遮光下, 其 L^* 值分别比 ck 低了 40.3%、36.8% 和 40.8%, 说明遮光使‘珊瑚’秋海棠叶色变深。其余品种叶片 L^* 值无显著变化。

遮光对‘黑天鹅’海芋、‘粉色和声’彩叶芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘黑天鹅’秋海棠和‘圣火’秋海棠叶片的 C^* 值影响不显著, 但使‘胭脂红’彩叶芋、‘白犀牛’海芋、‘红金灿’彩叶芋、‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海棠叶片的 C^* 值出现不同程度下降, 其中‘胭脂红’彩叶芋在 50%、75% 和 90% 遮光下的叶片 C^* 值仅为 ck 的 36.6%、30.3% 和 42.0%。‘青柠’秋海棠叶片 C^* 值在遮光后出现不同程度上升, 较 ck 高 19.8%~29.4%, 表明遮光使得该品种色彩更为艳丽。

2.5 不同遮光度处理下各指标耐荫系数变化分析

由表 3 所示: 50% 和 75% 遮光处理下, 株高、叶柄长、叶长、叶宽、叶片 L^* 、叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a/b 的变异系数均大于 1。这表明为了适应弱光, 植物在株形、叶形和叶片叶绿素质量分数上均进行了相应调整。从最大值、最小值和极差上可看出, 同一指标不同植物的遮光系数存在差异, 如叶柄长, 在遮光 75% 和 90% 状态下, 极差分别达 0.76 和 0.98。90% 遮光下, 叶绿素 b 质量分数的极差达 2.89。另外, 随着遮光增强, 各指标变异系数逐渐上升, 反映了不同植物耐荫性差异加剧, 对弱光胁迫的适应能力分化更加显著。

表 3 不同遮光度处理下各指标耐荫系数变化分析

Table 3 Analysis of changes in shade tolerance coefficients of various indicators under different shading treatments													
指标	遮光度/%	平均值	最小值	最大值	极差	变异系数	指标	遮光度/%	平均值	最小值	最大值	极差	变异系数
株高	50	1.02	0.86	1.13	0.27	0.08	L^*	50	1.01	0.60	1.34	0.74	0.18
	75	1.00	0.75	1.20	0.46	0.14		75	1.05	0.63	1.45	0.82	0.19
	90	0.98	0.78	1.30	0.53	0.19		90	1.05	0.59	1.49	0.90	0.23
冠幅	50	0.95	0.79	1.09	0.31	0.09	C^*	50	0.92	0.37	1.94	1.58	0.48
	75	0.94	0.78	1.12	0.35	0.12		75	0.8	0.27	1.55	1.28	0.53
	90	0.82	0.65	0.96	0.31	0.11		90	0.83	0.42	1.20	0.78	0.30
叶柄长	50	1.02	0.92	1.13	0.21	0.07	叶绿素a	50	1.08	0.93	1.39	0.46	0.15
	75	1.10	0.66	1.42	0.76	0.20		75	1.07	0.74	1.48	0.74	0.19
	90	1.06	0.66	1.63	0.98	0.31		90	1.07	0.74	1.48	0.74	0.19
叶柄粗	50	0.9	0.78	1.05	0.27	0.09	叶绿素b	50	1.15	0.76	1.65	0.89	0.24
	75	0.93	0.82	1.17	0.34	0.12		75	1.08	0.69	1.50	0.82	0.25
	90	0.82	0.68	1.05	0.38	0.13		90	1.54	0.75	3.64	2.89	0.61
叶长	50	1.04	0.94	1.33	0.40	0.11	总叶绿素	50	1.11	0.92	1.47	0.55	0.17
	75	1.02	0.93	1.26	0.34	0.10		75	1.07	0.75	1.49	0.74	0.20
	90	0.90	0.64	1.17	0.53	0.18		90	1.21	0.74	2.15	1.40	0.34
叶宽	50	1.01	0.87	1.46	0.59	0.16	叶绿素a/b	50	0.97	0.67	1.26	0.59	0.16
	75	1.02	0.84	1.30	0.46	0.12		75	1.03	0.76	1.47	0.71	0.18
	90	0.89	0.65	1.17	0.52	0.16		90	0.84	0.41	1.17	0.76	0.29

2.6 耐荫性综合评价及耐荫指标筛选

以主成分特征值大于 1 为标准进行主成分提取。由表 4 可知: 50%、75% 和 90% 遮光下各指标耐荫系数信息被分别转换为 4、4 和 3 个新的相互独立成分, 累计贡献率均大于 80%, 表明提取结果代表性良好, 可用于综合耐荫性评价。依据不同遮光处理下各主成分分析的综合指标值, 结合隶属函数计算获得 11 种植物耐荫性综合评价值 (D) 并排序。在 50% 遮光处理下, 耐荫性从高到低依次为‘胭脂红’彩叶芋、‘粉色和声’彩叶芋、‘青柠’秋海棠、‘黑天鹅’秋海棠、‘白犀牛’海芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘圣火’秋海棠、‘黑天鹅’海芋、‘红金灿’彩叶芋、‘珊瑚’秋海棠、‘冬云’秋海棠, 耐荫性前 3 位是‘胭脂红’彩叶芋、‘粉色和声’彩叶芋和‘青柠’秋海棠, 末 2 位为‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海棠。75% 遮光排序略微变化, 但‘胭脂红’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋仍居前 2 名, ‘黑天鹅’秋海棠由第 4 位提升到第 3 位, ‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海棠排在末尾。90% 遮光下,

‘胭脂红’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋仍稳居前 2 位，‘青柠’秋海棠重回到第 3 位，耐荫性最差的仍为‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海棠。

表 4 不同遮光度处理下 11 种植物耐荫性综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of shade tolerance of 11 plant species under different shading treatments						
品种	50%遮光		75%遮光		90%遮光	
	平均隶属值	综合排序	平均隶属值	综合排序	平均隶属值	综合排序
‘胭脂红’彩叶芋	0.60	1	0.68	2	0.51	2
‘黑天鹅’海芋	0.20	8	0.41	8	0.35	6
‘白犀牛’海芋	0.38	5	0.51	4	0.37	5
‘红金灿’彩叶芋	0.19	9	0.44	7	0.39	4
‘粉色和声’彩叶芋	0.54	2	0.72	1	0.79	1
‘加仑虎斑’秋海棠	0.34	6	0.48	6	0.33	8
‘青柠’秋海棠	0.52	3	0.50	5	0.42	3
‘黑天鹅’秋海棠	0.45	4	0.52	3	0.35	7
‘圣火’秋海棠	0.21	7	0.38	9	0.31	9
‘珊瑚’秋海棠	0.17	10	0.21	10	0.21	10
‘冬云’秋海棠	0.12	11	0.19	11	0.06	11

说明：50% 遮光的主成分提取数为 4，累计贡献率为 85.81%；75% 遮光的主成分提取数为 4，累计贡献率为 89.09%；90% 遮光的主成分提取数为 3，累计贡献率为 85.32%。

为了明确耐荫性与各单项指标之间的相关性，找到影响植物耐荫性的关键指标，建立可用于彩叶观叶植物耐荫性评价的数学模型。以耐荫性综合评价值 (D) 为因变量 (Y)，把株高、冠幅、叶柄长、叶柄粗、叶长、叶宽、 L^* 、 C^* 、叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和叶绿素 a/b 的耐荫系数作为自变量，利用逐步回归分析法建立最优回归方程，结果如下：

$$Y_{50} = -1.468 + 1.314 X_1 + 0.453 X_2 \quad (R^2 = 0.801, P = 0.002);$$
$$Y_{75} = -1.148 + 0.682 X_1 + 0.352 X_3 + 0.374 X_4 + 0.154 X_2 \quad (R^2 = 0.998, P = 0.000);$$
$$Y_{90} = -0.874 + 0.244 X_5 + 1.059 X_6 + 0.076 X_7 \quad (R^2 = 0.976, P = 0.000)。$$

方程式中， Y_{50} 、 Y_{75} 、 Y_{90} 分别表示 50%、75%、90% 遮光下的耐荫性综合评价值； X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 和 X_7 分别代表株高、 L^* 、总叶绿素、叶长、叶绿素 a、冠幅和叶绿素 b 各指标的耐荫系数。不同遮光度下回归方程的 R^2 均大于 0.8，说明方程式拟合程度较好。结果表明：在 50% 遮光下，株高和叶片 L^* 可作为耐荫性的评价指标；75% 遮光下，株高、总叶绿素、叶长和 L^* 对植物耐荫性的影响较大；90% 遮光下，叶绿素 a、冠幅和叶绿素 b 可以作为评价植物耐荫性的重要指标。

3 讨论

3.1 遮光条件下植物形态指标变化

弱光环境下，植株形态结构会发生相应变化以增强光捕获能力，典型响应包括茎干伸长和株高增加，以扩大受光面积，从而提升光能利用效率^[18-20]。本研究结果表明：多数供试植物的株高在遮光后均有不同程度的增加，其中‘胭脂红’彩叶芋、‘黑天鹅’海芋和‘粉色和声’彩叶芋随着遮光强度上升株高持续增长，表现出较强的耐荫性。但是，当光照强度过低导致能量供应不足时，植物株高则会受到显著抑制^[11, 20]，‘白犀牛’海芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘青柠’秋海棠和‘黑天鹅’秋海棠的株高随着遮光度增加呈先升后降的趋势，可能与高强度遮光下光合产物积累不足有关。‘圣火’‘珊瑚’和‘冬云’秋海棠在遮光后株高未增反而显著下降，说明它们的耐荫性较差，弱光环境已明显抑制其正常发育。冠幅对遮光的响应进一步印证了光强对植物生长的显著影响，观赏草丽色画眉 *Eragrostis spectabilis* 在 50% 和 75% 遮光下冠幅保持稳定，但在 90% 遮光时显著下降，此时植株已经不能正常生长和返青^[21]。本研究中，除‘粉色和声’彩叶芋和‘青柠’秋海棠外，其余 9 个供试品种在 90% 遮光下冠幅均显著下降，说明该遮光水平已超出多数供试植物的适应范围，严重抑制植物冠部扩展。

叶片是植物应对外界环境变化时可塑性极强的器官,其形态调整是适应策略的重要体现^[22]。在适当的遮光状态下,耐荫性较强的植物叶柄会随着遮光强度的增加而变长,将叶片抬升到光强较高的位置,以获取更多的光资源^[23-25]。本研究中,在50%和75%遮光下,除了‘圣火’‘珊瑚’和‘冬云’3种秋海棠外,多数供试植物的叶柄随遮光增强而显著伸长,尤其‘胭脂红’彩叶芋、‘黑天鹅’海芋和‘白犀牛’海芋的叶柄在90%高强度遮光下仍持续伸长,表明叶柄伸长能力与植物耐荫性存在相关性,是弱光条件下增强采光的一种典型形态适应。然而,弱光诱导的植株快速生长常伴随着徒长,表现为分蘖数下降、茎秆纤细等现象^[26-27]。本研究中多数植物叶柄粗度随着遮光增强而持续下降,与同化产物优先供应于纵向生长,而非结构物质积累有关。姚熠涵等^[28]和朱萱等^[11]发现遮光能增加植物的叶片长度、宽度、叶片数和叶面积,此为阴生植物的常见特征^[29]。但本研究中只有‘青柠’秋海棠的叶片长和宽在50%和75%遮光下均显著大于对照,说明适当的遮光有利于植株叶片的生长。除了‘青柠’秋海棠外,其他多数品种在50%和75%遮光下的叶长和叶宽无显著变化,说明叶长和叶宽对遮光的响应较为迟缓,可塑性低于叶柄伸长。

3.2 遮光条件下叶片叶绿素质量分数变化

叶绿素是植物光合作用的关键色素,其质量分数与植物的光能捕获效率密切相关^[30]。通常,在适度的遮光环境下,植物会通过提高叶绿素质量分数以增强对弱光的利用能力^[4,31]。本研究中,‘白犀牛’海芋、‘红金灿’彩叶芋和‘黑天鹅’秋海棠在遮光后的叶绿素总量均较对照有不同程度上升,与前人研究结论相似^[11,31-32]。与之相反,‘冬云’秋海棠随着遮光强度增加叶绿素质量分数持续下降,表明‘冬云’秋海棠是阳性植物,对弱光胁迫较为敏感。弱光条件下,低叶绿素a/b有助于提高植物对远红光的吸收利用,从而维持植物正常的生命活动^[4,18,29]。本研究中,90%高强度遮光处理下,‘胭脂红’彩叶芋、‘红金灿’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋的叶绿素a/b显著低于对照,说明三者通过增加叶绿素b质量分数以更有效地捕捉蓝紫光,维持光合系统在低光条件下的正常进行^[19,33]。

3.3 遮光条件下叶片色彩的变化

不同彩叶植物对光照强度的响应存在明显差异,如红叶石楠 *Photinia × fraseri*^[34]、鸡爪槭 *Acer palmatum*^[35] 和秋海棠^[36] 等须在充足光照下才能展现最佳叶色。而彩叶凤梨 *Neoregelia*^[13]、矾根 *Heuchera micrantha*^[14] 和紫鸭跖草 *Setcreasea purpurea*^[37] 等则在适度遮光条件下表现出更鲜艳的斑叶性状,强光反而会导致色彩淡化。本研究中,各品种对遮光的叶色响应也有所不同,其中‘粉色和声’彩叶芋、‘加仑虎斑’秋海棠、‘黑天鹅’秋海棠和‘圣火’秋海棠叶色在遮光后变化不显著,叶片 L^* 和 C^* 与全光处理无差异。‘胭脂红’彩叶芋叶片在遮光后叶片 C^* 有所降低,叶色变浅,说明它适宜在充足光照下栽培以保持最佳的观赏效果。另外,适当的遮光可以提高‘青柠’秋海棠叶片彩度,可见‘青柠’秋海棠可在适当的弱光下栽培以增加叶片的观赏效果。

3.4 不同遮光度处理下植物耐荫性综合评价及耐荫性指标筛选

植物的耐荫性是一种综合表现,仅凭单一指标评判其耐荫性是不科学的。为整合多维度信息,主成分分析法结合隶属函数法等已被广泛应用于植物耐荫性的综合评估^[8-11]。本研究以多种指标的耐荫系数为基础,采用上述方法对供试的11种观叶植物的耐荫性进行综合评价。结果显示:在不同遮光条件下,‘胭脂红’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋一直稳居前2名,表明‘胭脂红’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋属于强耐荫植物,室内光线较暗的地方可选择这2种植物,但需注意‘胭脂红’彩叶芋在光线不足时叶色观赏性会有所下降。‘青柠’秋海棠、‘黑天鹅’秋海棠和‘白犀牛’海芋在50%和75%遮光下一直占据排名3~5位,说明这3个植物耐荫性属于中上等,同样适合室内养护。而‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海棠在不同遮光处理下的耐荫性综合排序均靠后,属于阳性植物,室内栽培观赏应尽量选择阳台等光线充足处。

值得注意的是,植物耐荫性受遮光环境、植物类别和品种等影响,并非所有指标均能有效反映其耐荫性强弱^[10,38-39]。本研究通过逐步回归分析,建立了不同遮光水平下测试植物耐荫性与各指标之间的数学模型,发现可用于评价耐荫性的关键指标随遮光程度变化而异。在50%遮光下,株高和叶片 L^* 可作为鉴定彩叶植物耐荫性的关键指标;75%遮光时则需要引入总叶绿素含量和叶长;而90%强遮光下,

叶绿素 a、叶绿素 b 和冠幅成为关键耐荫性鉴定指标。这一结果说明植物耐荫性评价体系需考虑环境光照强度,在实际鉴定与应用中应结合具体光环境选择相应指标。

4 结论

本研究综合评价了 11 种彩叶植物的耐荫性,结果表明:多数供试彩叶植物可通过株形和叶形调整,以及叶绿素质量分数提升来适应弱光环境,但品种间差异性显著。‘胭脂红’彩叶芋和‘粉色和声’彩叶芋耐荫性最强,两者通过显著增加株高、叶柄长和叶绿素 b 质量分数有效适应弱光环境,而‘珊瑚’秋海棠和‘冬云’秋海耐荫性最弱,遮光处理显著抑制其生长。基于主成分分析法和隶属函数法的综合评价模型能有效整合多指标信息,可鉴定彩叶植物的耐荫性强弱,排序结果与它们在不同遮光情况下的植株表型和生理指标响应变化基本一致。此外,本研究还发现耐荫性评价关键指标具有遮光度特异性,因此彩叶植物耐荫性评价中应结合具体光照条件进行。本研究不仅明确了供试彩叶植物的耐荫性等级,为室内不同光照环境的植物选择提供了直接参考,所建立的评价体系和方法还可为彩叶植物及其他观赏植物的耐荫性快速鉴定提供重要方法参考。

5 参考文献

- [1] 赵莹. 叶形与叶色在园林景观设计中的应用[J]. 分子植物育种, 2025, 23(2): 622–627.
ZHAO Ying. Application of leaf shape and leaf color in landscape design [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2025, 23(2): 622–627.
- [2] 张磊, 曹德美, 胡建军. 植物叶色形成调控机制研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(2): 293–303.
ZHANG Lei, CAO Demei, HU Jianjun. Advance of the regulation mechanism of leaf color formation in plants [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(2): 293–303.
- [3] MA Yanyun, MA Xu, GAO Xiang, *et al.* Light induced regulation pathway of anthocyanin biosynthesis in plants[J/OL]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(20): 11116[2025-07-26]. DOI: [10.3390/ijms222011116](https://doi.org/10.3390/ijms222011116).
- [4] MARTINEZ-GARCIA J F, RODRIGUEZ-CONCEPCION M. Molecular mechanisms of shade tolerance in plants [J]. *New Phytologist*, 2023, 239(4): 1190–1202.
- [5] HUBER M, NIEUWENDIJK N M, PANTAZOPOULOU C K, *et al.* Light signalling shapes plant-plant interactions in dense canopies [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(4): 1014–1029.
- [6] WAN Yingling, ZHANG Yixuan, ZHANG Min, *et al.* Shade effects on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of three *Paeonia* species[J/OL]. *PeerJ*, 2020, 8: e9316[2025-07-26]. DOI: [10.7717/peerj.9316](https://doi.org/10.7717/peerj.9316).
- [7] 潘远智, 江明艳. 遮荫对盆栽一品红光合特性及生长的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 95–100.
PAN Yuanzhi, JIANG Mingyan. Effects of shade on the photosynthetic characteristics and growth of *Poinsettia* [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(1): 95–100.
- [8] 胡肖肖, 段玉侠, 金荷仙, 等. 4 个杜鹃花品种的耐荫性[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 88–95.
HU Xiaoxiao, DUAN Yuxia, JIN Hexian, *et al.* Shade tolerance of four *Rhododendron* cultivars [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(1): 88–95.
- [9] 刘光杨, 周炜, 陈磊, 等. 11 个睡莲品种的耐荫性综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(1): 44–51.
LIU Guangyang, ZHOU Wei, CHEN Lei, *et al.* Comprehensive evaluation of shade tolerance of 11 *Nymphaea tetragona* cultivars [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(1): 44–51.
- [10] 丁爱萍, 王瑞, 张卓文. 12 种园林植物耐荫性鉴定指标的筛选[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(1): 55–59.
DING Aiping, WANG Rui, ZHANG Zhuowen. Selection of shade-tolerance identification indices for 12 garden plant species [J]. *Plant Physiology Communications*, 2009, 45(1): 55–59.
- [11] 朱萱, 高康, 滕文军, 等. 遮荫对 5 种观赏草表型的影响及耐荫性评价[J]. 草地学报, 2023, 31(7): 2096–2106.
ZHU Xuan, GAO Kang, TENG Wenjun, *et al.* Effects of shade on phenotypes and shade tolerance evaluation of five ornamental grasses [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2096–2106.
- [12] BRAND M H. Shade influences plant growth, leaf color, and chlorophyll content of *Kalmia latifolia* L. cultivars [J]. *HortScience*, 1997, 32(2): 206–208.

- [13] 俞信英, 俞少华, 詹书侠, 等. 不同遮阳处理对彩叶凤梨观赏性的影响[J]. 分子植物育种, 2018, **16**(22): 7564–7568.
YU Xinying, YU Shaohua, ZHAN Shuxia, *et al.* Effects of different shading treatments on ornamental characteristics of *Neoregelia* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, **16**(22): 7564–7568.
- [14] 周佳, 宋丽莉. 遮荫对彩叶植物矾根夏季适应性表型的影响[J]. 亚热带植物科学, 2021, **50**(2): 118–124.
ZHOU Jia, SONG Lili. Effect of shading on adaptive phenotype of color-leafed *Heuchera micrantha* in summer [J]. *Subtropical Plant Science*, 2021, **50**(2): 118–124.
- [15] 徐桂红, 杨蕾蕾, 李凌飞. 60种秋海棠属植物在深圳地区园林应用能力的综合评价[J]. 广东农业科学, 2023, **50**(7): 127–136.
XU Guihong, YANG Leilei, LI Lingfei. Comprehensive evaluation on the landscape application ability of 60 *Begonia* species/cultivars in Shenzhen [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, **50**(7): 127–136.
- [16] 刘金梅, 廖飞雄, 于波, 等. 彩叶芋新品与观赏应用[J]. 中国花卉园艺, 2012(14): 26–28.
LIU Jinmei, LIAO Feixiong, YU Bo, *et al.* New products of colorful taro and its ornamental application [J]. *China Flowers & Horticulture*, 2012(14): 26–28.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134–137.
LI Hesheng. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134–137.
- [18] 刘佩, 邬玉芬, 王肖峰, 等. 荫蔽环境下植物生理形态及光响应机制研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(6): 1313–1322.
LIU Pei, WU Yufen, WANG Xiaofeng, *et al.* Research progress on plant physiological morphology and light response mechanism in shaded environments [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(6): 1313–1322.
- [19] 韩霜, 陈发棣. 植物对弱光的响应研究进展[J]. 植物生理学报, 2013, **49**(4): 309–316.
HAN Shuang, CHEN Fadi. Research progress in plant response to weak light [J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, **49**(4): 309–316.
- [20] RUBERTI I, SESSA G, CIOLFI A, *et al.* Plant adaptation to dynamically changing environment: the shade avoidance response [J]. *Biotechnology Advances*, 2012, **30**(5): 1047–1058.
- [21] 秦衍雷, 武菊英, 徐迎春, 等. 遮荫对观赏草丽色画眉生长、光合以及生物量的影响[J]. 草地学报, 2013, **21**(5): 921–927.
QIN Yanlei, WU Juying, XU Yingchun, *et al.* Effects of shading on the growth, photosynthetic characteristics and biomass of ornamental grass *Eragrostis spectabilis* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, **21**(5): 921–927.
- [22] NIINEMETS Ü. Leaf trait plasticity and evolution in different plant functional types[J]. *Annual Plant Reviews Online*, 2020: 473–522.
- [23] NIINEMETS Ü. A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance [J]. *Ecological Research*, 2010, **25**(4): 693–714.
- [24] 谢雨霏, 曾维英, 雷怡, 等. 荫蔽对大豆叶片角度及光合特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2024, **42**(4): 744–751.
XIE Yufei, ZENG Weiyang, LEI Yi, *et al.* Effect of shading on soybean leaf angle and photosynthetic characteristics [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, **42**(4): 744–751.
- [25] 钟梦江, 代绿叶, 韩莹琰. 弱光对不同品种紫叶生菜品质和抗氧化性的影响[J]. 北京农学院学报, 2023, **38**(4): 45–50.
ZHONG Mengjiang, DAI Lüye, HAN Yingyan. Effects of weak light on nutritional quality and antioxidant enzyme activity of different varieties of purple leaf lettuce [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2023, **38**(4): 45–50.
- [26] PIERIK R, de WIT M. Shade avoidance: phytochrome signalling and other aboveground neighbour detection cues [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, **65**(11): 2815–2824.
- [27] GOMMERS C M M, VISSER E J W, ST ONGE K R, *et al.* Shade tolerance: when growing tall is not an option [J]. *Trends in Plant Science*, 2013, **18**(2): 65–71.
- [28] 姚熠涵, 厉亮, 俞遴, 等. 遮荫对玉兰叶石楠幼苗生长及生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2025, **53**(4): 67–78.
YAO Yihan, LI Liang, YU Lin, *et al.* The effect of shading on the growth and physiological characteristics of *Photinia magnoliifolia* seedlings [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, **53**(4): 67–78.
- [29] BOARDMAN N K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1977, **28**:

355–377.

- [30] PORCAR-CASTELL A, TYYSTJÄRVI E, ATHERTON J, *et al.* Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, **65**(15): 4065–4095.
- [31] 康红梅, 宋卓琴, 曹冬梅, 等. 遮荫对两种灌木光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 北方园艺, 2021(6): 59–65.
KANG Hongmei, SONG Zhuoqin, CAO Dongmei, *et al.* Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of two shrubs [J]. *Northern Horticulture*, 2021(6): 59–65.
- [32] 唐世梅, 蔡文淇, 张大毛, 等. 光照强度对三个虎耳草观赏品种的形态及生理指标的影响[J]. 广西植物, 2023, **43**(4): 699–711.
TANG Shimei, CAI Wenqi, ZHANG Damao, *et al.* Effects of light intensities on morphological and physiological indexes of three ornamental cultivars of *Saxifraga stolonifera* [J]. *Guihaia*, 2023, **43**(4): 699–711.
- [33] 温冰消, 刘卫国, 杨文钰. 植物面对荫蔽的两种策略: 避荫与耐荫反应机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, **17**(3): 1028–1033.
WEN Bingxiao, LIU Weiguo, YANG Wenyu. Two strategies for plants to face shading: advances in the mechanism of shade avoidance and shade tolerance response [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, **17**(3): 1028–1033.
- [34] DENG Chuang, LIU Xiang, LIAO Fuchang, *et al.* Light intensity plays the key role in the regulation of leaf color, anthocyanin and polyphenol profiles, as well as antioxidant activity of *Photinia × fraseri* leaves[J/OL]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2024, **17**(12): 106046[2025-07-26]. DOI: [10.1016/j.arabjc.2024.106046](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.106046).
- [35] 梁俊林, 张晓蓉, 唐实玉, 等. 光照强度对鸡爪槭叶色变化生理的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26**(3): 597–602.
LIANG Junlin, ZHANG Xiaorong, TANG Shiyu, *et al.* Physiological effects of light intensity on leaf color change of *Acer palmatum* Thunb. [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, **26**(3): 597–602.
- [36] 周媛, 葛亚英. 光强对秋海棠‘冬云’叶片生长和光合特性的影响[J]. 分子植物育种, 2023, **21**(23): 7860–7866.
ZHOU Yuan, GE Yaying. Effects of different light intensities on the leaf growth and photosynthetic characteristics of *Begonia* ‘Dongyun’ [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, **21**(23): 7860–7866.
- [37] 钟娟, 余玮, 吴仕兰. 不同光照处理对紫鸭跖草生长特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(9): 144–146.
ZHONG Juan, YU Wei, WU Shilan. Effects of different light treatments on the growth characteristics of *Setcreasea purpurea* Boon. [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(9): 144–146.
- [38] 彭惠, 王岚, 徐芬, 等. 基于主成分分析的园林植物耐荫性指标研究[J]. 草原与草坪, 2016, **36**(3): 90–96.
PENG Hui, WANG Lan, XU Fen, *et al.* Study on shade-tolerance index of garden plants based on principal component analysis [J]. *Grassland and Turf*, 2016, **36**(3): 90–96.
- [39] 胡廷会, 成良强, 王军, 等. 不同基因型花生耐荫性评价及其鉴定指标的筛选[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(6): 1140–1153.
HU Tinghui, CHENG Liangqiang, WANG Jun, *et al.* Evaluation of shade tolerance of peanut with different genotypes and screening of identification indexes [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(6): 1140–1153.