

11 个睡莲品种的耐阴性综合评价

刘光杨^{1,①}, 周 炜^{1,①}, 陈 磊^{2,3}, 王 华¹, 金奇江¹, 王彦杰¹, 李 娜^{2,3}, 徐迎春^{1,②}

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095; 2. 浙江伟达园林工程有限公司, 浙江 杭州 311201;
3. 浙江省风景园林学会水生植物伟达研究所, 浙江 杭州 311256)

摘要: 对遮光率 0% (全光照, CK)、22%、58% 和 70% 条件下 11 个睡莲 (*Nymphaea tetragona* Georgi) 品种的生长和生理指标进行比较和分析, 并采用主成分分析法和隶属函数法对 11 个睡莲品种的耐阴性进行综合评价。结果表明: 总体上看, 遮光率 22%、58% 和 70% 处理组, 11 个睡莲品种的开花数、叶片数以及叶片中可溶性糖含量和叶绿素 *a/b* 值小于 CK 组, 叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量大于 CK 组。遮光率 22%、58% 和 70% 处理组, ‘黑美人’ (‘Black Beauty’)、‘约瑟芬’ (‘Josephine’)、‘保罗蓝’ (‘Paul Stetson’) 和 ‘科罗拉多’ (‘Colorado’) 的叶面积和冠幅总体上大于 CK 组; ‘克里三萨’ (‘Chrysantha’) 的叶面积显著小于 CK 组, 其他 6 个睡莲品种的叶面积与 CK 组间无显著差异; ‘玛格丽特’ (‘Margaret’) 的冠幅均显著小于 CK 组, 其他 6 个睡莲品种的冠幅总体上在遮光率 22% 和 58% 处理组大于 CK 组, 在遮光率 70% 处理组小于 CK 组。综合评价结果显示: 11 个睡莲品种的耐阴性由强到弱依次为 ‘约瑟芬’、‘黑美人’、‘保罗蓝’、‘科罗拉多’、‘玛格丽特’、‘霞妃’ (‘Sunshine Princess’)、‘流星’ (‘Meteor’)、‘教王’ (‘King of Siam’)、‘红仙子’ (‘Rose Arey’)、‘莱德格尔’ (‘Ledeger’)、‘克里三萨’, 与睡莲的生长和生理指标变化基本一致。研究结果显示: 主成分分析法和隶属函数法可用于睡莲品种的耐阴性评价。

关键词: 睡莲; 耐阴性; 生长; 生理; 综合评价

中图分类号: Q945.78; S682.32 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)01-0044-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.01.06

Comprehensive evaluation of shade tolerance of 11 *Nymphaea tetragona* cultivars LIU Guangyang^{1,①}, ZHOU Wei^{1,①}, CHEN Lei^{2,3}, WANG Hua¹, JIN Qijiang¹, WANG Yanjie¹, LI Na^{2,3}, XU Yingchun^{1,②} (1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Zhejiang Weida Landscape Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311201, China; 3. Weida Institute of Aquatic Plants, the Landscape and Garden Society of Zhejiang Province, Hangzhou 311256, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(1): 44-51

Abstract: Growth and physiological indexes of 11 *Nymphaea tetragona* Georgi cultivars under shading rate of 0% (full light, CK), 22%, 58%, and 70% were compared and analyzed, and shade tolerance of 11 *N. tetragona* cultivars were comprehensively evaluated by using principal component analysis and subordination function methods. The results show that in general, flower number, leaf number, and soluble sugar content and chlorophyll *a/b* value of leaf of 11 *N. tetragona* cultivars in treatment groups of 22%, 58%, and 70% shading rate are lower, while contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and total chlorophyll in leaf are higher than in CK group. Leaf area and crown width of ‘Black Beauty’, ‘Josephine’, ‘Paul Stetson’, and ‘Colorado’ are generally greater in treatment groups of 22%, 58%, and 70% shading rate than in CK group; leaf area of ‘Chrysantha’ is significantly lower than in CK group, while that of other six *N. tetragona* cultivars shows no significant difference with CK group; crown

收稿日期: 2019-03-04

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18_0238); 南京农业大学大学生科研训练项目(1814A09); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目: 园艺品牌专业建设(PPZY2015B156)

作者简介: 刘光杨(1997—), 男, 山东泰安人, 本科, 主要从事观赏植物栽培生理方面的研究。

周 炜(1994—), 男, 浙江德清人, 硕士研究生, 主要从事观赏植物栽培生理方面的研究。

① 共同第一作者

② 通信作者 E-mail: xyc@njau.edu.cn

width of 'Margaret' is significantly smaller than in CK group, while that of other six *N. tetragona* cultivars is generally greater in treatment groups of 22% and 58% shading rate, but smaller in treatment group of 70% shading rate than in CK group. The comprehensive evaluation result shows that shade tolerance from strong to weak of 11 *N. tetragona* cultivars is in the order of 'Josephine', 'Black Beauty', 'Paul Stetson', 'Colorado', 'Margaret', 'Sunshine Princess', 'Meteor', 'King of Siam', 'Rose Arey', 'Ledeger', 'Chrysantha', which is basically in accordance with the variations of growth and physiological indexes of *N. tetragona*. It is indicated that principal component analysis and subordination function methods can be used to evaluate shade tolerance of *N. tetragona* cultivars.

Key words: *Nymphaea tetragona* Georgi; shade tolerance; growth; physiology; comprehensive evaluation

睡莲(*Nymphaea tetragona* Georgi)隶属于睡莲科(Nymphaeaceae)睡莲属(*Nymphaea* Linn.),为多年生水生植物。全世界睡莲属植物有 50 余种,分为 5 个亚属:广温带睡莲亚属(Subg. *Castalia* Salisb)(耐寒睡莲)、广热带睡莲亚属(Subg. *Brachyceras* Casp.)、古热带睡莲亚属(Subg. *Lotos* Decandolle)、新热带睡莲亚属(Subg. *Hydrocallis* Casp.)及澳大利亚睡莲亚属(Subg. *Anecphyra* Casp.),后 4 个亚属通常被称为热带睡莲^[1]。睡莲花色艳丽,姿态优美,观赏价值较高,被誉为“花中睡美人”,是园林水景中不可或缺的素材;睡莲能吸收水中的有害物质,也是难得的水体净化材料^[2]。睡莲可作为鲜切花和工艺干花进入宾馆和家庭,经济价值较高。睡莲花还可作为药食同源食品,其鲜花既可生食,亦可泡茶和浸酒等。睡莲花含多糖和黄酮等药用成分,具有降血糖、降血脂、抗氧化、抗衰老和增强免疫力等作用^[3]。

睡莲为喜光植物,在室内种植时,由于光照较弱,常生长不良,观赏效果变差,部分品种甚至死亡,严重制约盆栽睡莲的推广,因此,睡莲种质资源的耐阴性评价亟待开展,以选育出耐阴性强的品种。

目前,通常采用单一生理或生长指标^[4]和利用统计学方法对多项指标进行综合评价^[5-6]来评价植物的耐阴性。植物的耐阴性是其在长期进化过程中获得的一项可遗传的抗性,且受到多种环境因子的影响,因此,只利用单一生理或生长指标对其耐阴性进行评价是不科学和片面的,而利用主成分分析^[7]和隶属函数法^[8]等方法对其耐阴性进行综合评价则更科学和全面。

本研究以 11 个中小型盆栽睡莲品种(包括 3 个热带睡莲品种和 8 个耐寒睡莲品种)为研究对象,通过不同程度遮光处理,观察其生长和生理反应,并运用主成分分析法和隶属函数法对其耐阴性进行综合评价,以期获得耐阴性强的睡莲品种,并为盆栽睡莲

的生产和推广奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试 11 个睡莲品种的生长发育期基本一致,包括‘黑美人’(‘Black Beauty’)、‘约瑟芬’(‘Josephine’)和‘保罗蓝’(‘Paul Stetson’)3 个热带睡莲品种以及‘科罗拉多’(‘Colorado’)、‘莱德格尔’(‘Ledeger’)、‘教王’(‘King of Siam’)、‘玛格丽特’(‘Margaret’)、‘流星’(‘Meteor’)、‘霞妃’(‘Sunshine Princess’)、‘红仙子’(‘Rose Arey’)和‘克里三萨’(‘Chrysantha’)8 个耐寒睡莲品种,所有品种均由浙江伟达园林工程有限公司提供。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验于 2018 年 4 月至 8 月在浙江省风景园林学会水生植物伟达研究所生产基地进行。于 2018 年 4 月 15 日挑选生长健壮、大小基本一致的热带睡莲胎生苗和耐寒睡莲块茎移栽入直径 38 cm、高 25 cm 的花盆中,盆土(塘泥土)装至 2/3 处,每盆种植 1 株。

于 2018 年 5 月 15 日开始遮光处理,选用不同透光率的遮阳网分别设置遮光率 0%(全光照,CK)、22%(轻度遮光)、58%(中度遮光)和 70%(重度遮光)共 4 个处理。采用完全随机区组设计,每个品种每个处理 3 盆,即为 3 次重复。实验过程中进行正常的肥水管理。

1.2.2 生长指标测量和统计 于 2018 年 7 月 2 日,由于睡莲的叶片呈近圆形,使用卷尺(精度 0.1 cm)测量每株所有叶片的直径,计算直径最大叶片的叶面积;使用卷尺测量每盆睡莲的冠幅(叶幕区的最大直径)。每个指标重复测量 3 次。统计每盆植株的叶片数和开花数(整个花期的开花数量)。

1.2.3 生理指标测定 于 2018 年 7 月 15 日分别采集各处理组叶片,每盆随机采集 3 枚叶片,采用 Lichtenthaler^[9]的方法测定叶绿素含量,并计算叶绿素 a/b 值;采用蒽酮比色法^[10]测定可溶性糖含量。每个指标重复测定 3 次。

1.3 数据处理与统计

利用 EXCEL 2013 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计以及 Duncan's 多重比较、单因素方差分析、相关性分析、主成分分析和隶属函数分析。

1.3.1 耐阴系数和主成分分析 为了保证综合评价结果的可靠性,采用耐阴系数(β)将 9 个指标的原始数据进行无量纲化处理,计算公式为 $\beta = \text{某一遮光处理下某一指标的测量值} / \text{全光照下该指标的测量值}$ 。然后进行主成分分析^[11],根据累计贡献率确定主成分个数。

1.3.2 隶属函数分析 参照赵银月等^[7]的方法计算

综合指标值(Z)、隶属函数值(μ)及其权重、综合评价值(D)。

2 结果和分析

2.1 生长和生理指标分析

不同遮光条件下 11 个睡莲品种生长和生理指标的变化分别见表 1 和表 2。

2.1.1 生长指标的变化 由表 1 可见:‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘保罗蓝’和‘科罗拉多’在 3 个遮光处理组均可开花,但开花数总体上随着遮光率的提高而减少,其中,遮光率 70%处理组这 4 个睡莲品种的开花数为 CK(遮光率 0%)组的 60.0%~71.4%;‘玛格丽特’和‘霞妃’在遮光率 22%和 58%处理组均可开花,其中,遮光率 58%处理组二者的开花数达到 CK 组的 50%及以上,而遮光率 70%处理组二者均不开花;‘莱

表 1 不同遮光条件下 11 个睡莲品种生长指标的变化($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 1 Changes in growth indexes of 11 *Nymphaea tetragona* Georgi cultivars under different shading conditions ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

品种 Cultivar	遮光率/% Shading rate	开花数 Flower number	叶面积/cm ² Leaf area	叶片数 Leaf number	冠幅/cm Crown width
黑美人 Black Beauty	0(CK)	11.0±0.6a	102.64±9.45b	34.0±2.4a	55.3±3.1b
	22	10.0±1.5a	124.56±11.74a	30.0±2.4ab	62.3±4.2ab
	58	8.0±0.6b	139.78±14.83a	28.3±3.3bc	64.6±3.1a
	70	7.0±1.0b	123.18±11.05a	25.3±1.8c	57.5±4.6ab
约瑟芬 Josephine	0(CK)	7.0±1.0a	95.57±6.35b	23.0±2.3a	36.8±2.5b
	22	7.0±0.6a	115.34±11.5ab	22.3±1.4a	44.6±3.6a
	58	6.0±1.5ab	126.23±12.93a	21.7±1.9a	51.4±3.8a
	70	5.0±0.6b	100.64±7.34b	16.7±1.8b	49.7±4.5a
保罗蓝 Paul Stetson	0(CK)	10.0±1.5a	103.46±11.57b	26.3±1.9a	44.1±3.2b
	22	8.0±0.6b	120.37±10.22ab	20.3±2.3b	53.5±3.9a
	58	8.0±0.6b	123.48±10.23a	19.0±0.9b	58.0±5.2a
	70	6.0±0.6c	101.49±10.35b	18.3±2.5b	61.9±4.6a
科罗拉多 Colorado	0(CK)	6.0±1.5a	107.45±8.34bc	45.0±4.7a	54.4±3.2ab
	22	4.0±0.6a	123.75±10.74ab	42.7±3.4ab	61.0±4.8a
	58	5.0±1.0a	132.96±12.04a	37.7±2.9b	59.3±4.2a
	70	4.0±1.0a	103.23±9.24c	38.3±1.3b	50.0±3.2b
莱德格尔 Ledeger	0(CK)	4.0±1.0a	78.43±12.53a	16.3±1.4a	49.6±2.1b
	22	2.0±0.0b	72.48±10.64a	15.3±1.3a	52.7±3.1b
	58	0.0±0.0c	73.13±13.58a	12.0±1.4b	60.7±3.6a
	70	0.0±0.0c	70.84±6.45a	13.7±1.4ab	43.1±3.9c
教王 King of Siam	0(CK)	3.0±0.6a	104.75±10.45a	20.7±1.9a	45.3±3.3b
	22	0.0±0.0b	102.96±12.74a	16.3±1.7b	49.7±3.6ab
	58	0.0±0.0b	99.35±13.04a	16.3±1.3b	52.8±2.6a
	70	0.0±0.0b	97.23±11.85a	15.0±1.3b	50.5±2.7ab
玛格丽特 Margaret	0(CK)	3.0±1.0a	74.37±5.34a	16.3±1.3a	50.8±3.0a
	22	3.0±1.5a	83.53±7.34a	13.3±1.4b	45.2±2.4b
	58	2.0±0.0a	82.85±12.30a	12.7±1.4b	46.3±2.9b
	70	0.0±0.0a	71.67±4.63a	9.7±0.8c	42.4±1.2b

续表1 Table 1 (Continued)

品种 Cultivar	遮光率/% Shading rate	开花数 Flower number	叶面积/cm ² Leaf area	叶片数 Leaf number	冠幅/cm Crown width
流星 Meteor	0(CK)	2.0±0.6a	75.64±6.59a	22.7±1.4a	35.9±2.2c
	22	0.0±0.0b	68.65±6.85a	12.7±0.5b	42.9±2.1b
	58	0.0±0.0b	66.23±8.34a	13.3±1.3b	54.4±2.5a
	70	0.0±0.0b	65.20±9.35a	11.3±1.8c	32.3±2.6d
霞妃 Sunshine Princess	0(CK)	4.0±0.6a	83.39±7.86ab	18.3±1.8a	44.8±3.8a
	22	4.0±0.6a	98.45±8.45a	13.3±1.6b	47.8±3.0a
	58	2.0±0.6b	91.88±8.34ab	12.3±0.8b	37.5±3.6b
	70	0.0±0.0c	77.24±4.64b	12.0±1.3b	32.3±1.4c
红仙子 Rose Arey	0(CK)	2.0±1.0a	89.45±12.57a	16.7±0.8a	29.4±1.8b
	22	0.0±0.0b	88.75±12.94a	13.0±2.4b	41.2±2.8a
	58	0.0±0.0b	83.35±12.05a	8.0±0.7c	42.9±2.5a
	70	0.0±0.0b	73.67±9.34a	5.7±1.4d	31.4±2.5b
克里三萨 Chrysantha	0(CK)	3.0±0.0a	69.42±3.85a	28.0±0.9a	33.0±2.5b
	22	0.0±0.0b	52.34±6.20b	17.7±1.1b	42.8±3.2a
	58	0.0±0.0b	55.74±4.69b	10.0±1.3c	36.3±2.5b
	70	0.0±0.0b	53.78±5.34b	6.3±1.4d	31.6±3.1b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different treatments of the same cultivar.

德格尔’仅在遮光率 22% 处理组可开花, 开花数为 CK 组的 50%, 在遮光率 58% 和 70% 处理组均不开花; ‘教王’、‘流星’、‘红仙子’和‘克里三萨’在 3 个遮光处理组均不开花。

随着遮光率的提高, ‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘保罗蓝’和‘科罗拉多’的叶面积均呈先增大后减小的趋势, 且均在遮光率 58% 处理组达到最大值, 显著高于 CK 组; ‘玛格丽特’和‘霞妃’的叶面积也呈先增大后减小的趋势, 且均在遮光率 22% 处理组达到最大值, 但与 CK 组间无显著差异; ‘莱德格尔’、‘教王’、‘流星’、‘红仙子’和‘克里三萨’的叶面积总体上呈下降趋势, 且除 3 个遮光处理组‘克里三萨’的叶面积显著小于 CK 组外, ‘莱德格尔’、‘教王’、‘流星’和‘红仙子’的叶面积在 CK 组及 3 个遮光处理组间无显著差异。遮光率 70% 处理组, ‘黑美人’的叶面积较 CK 组显著增大, 其余 10 个睡莲品种的叶面积与 CK 组无显著差异。

随着遮光率的提高, 11 个睡莲品种的叶片数总体上呈减少趋势, 且 3 个遮光处理组 11 个睡莲品种的叶片数总体上与 CK 组间存在显著差异。

随着遮光率的提高, ‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘科罗拉多’、‘莱德格尔’、‘教王’、‘流星’、‘霞妃’、‘红仙子’和‘克里三萨’的冠幅呈先增大后减小的趋势, ‘保罗蓝’的冠幅呈逐渐增大的趋势, ‘玛格丽特’的

冠幅呈减小的趋势。除‘玛格丽特’外, 遮光率 22% 和 58% 处理组其他睡莲品种的冠幅总体上大于 CK 组。

2.1.2 生理指标的变化 由表 2 可见: 随着遮光率的提高, 11 个睡莲品种叶片中可溶性糖含量基本呈逐渐降低的趋势。遮光率 22% 处理组, 仅‘黑美人’、‘保罗蓝’、‘教王’和‘霞妃’叶片中可溶性糖含量较 CK 组显著降低; 遮光率 58% 处理组, 除‘约瑟芬’和‘科罗拉多’叶片中可溶性糖含量与 CK 组间无显著差异外, 其他 9 个睡莲品种叶片中可溶性糖含量均较 CK 组显著降低; 遮光率 70% 处理组, 11 个睡莲品种叶片中可溶性糖含量均较 CK 组显著降低。

由表 2 还可见: 随着遮光率的提高, 11 个睡莲品种叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量均呈逐渐升高的趋势。总体上看, 遮光率 22% 处理组, ‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘保罗蓝’、‘科罗拉多’和‘莱德格尔’叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量较 CK 组显著升高, 其他 6 个睡莲品种这 3 个指标则与 CK 组无显著差异; 遮光率 58% 和 70% 处理组, 11 个睡莲品种叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量总体上较 CK 组显著升高。总体上看, 随着遮光率的提高, 11 个睡莲品种叶片中叶绿素 *a/b* 值呈逐渐降低的趋势, 但同一品种叶片中叶绿素 *a/b* 值在 CK 组及 3 个遮光处理组间无显著差异。

表 2 不同遮光条件下 11 个睡莲品种叶片中生理指标的变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
 Table 2 Changes in physiological indexes of leaves of 11 *Nymphaea tetragona* Georgi cultivars under different shading conditions ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

品种 Cultivar	遮光率/% Shading rate	含量/(mg · g ⁻¹) Content			叶绿素 a/b 值 Chlorophyll a/b value	
		可溶性糖 Soluble sugar	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b		总叶绿素 Total chlorophyll
黑美人 Black Beauty	0(CK)	22.91±1.30a	1.07±0.13c	0.42±0.07c	1.49±0.32c	2.53±0.21a
	22	21.32±1.04b	1.84±0.23b	0.78±0.14b	2.62±0.11b	2.32±0.31a
	58	20.24±1.33b	1.99±0.27ab	0.95±0.09a	2.94±0.21ab	2.17±0.14a
	70	16.14±1.28c	2.21±0.18a	1.04±0.14a	3.25±0.14a	2.11±0.29a
约瑟芬 Josephine	0(CK)	18.23±1.04a	1.27±0.13c	0.57±0.07c	1.84±0.29b	2.22±0.16a
	22	17.63±1.37a	1.72±0.15b	0.84±0.13b	2.56±0.23b	2.05±0.31a
	58	16.11±1.03a	2.02±0.26ab	0.92±0.12b	2.94±0.11ab	2.09±0.27a
	70	13.20±0.82b	2.31±0.31a	1.24±0.09a	3.55±0.29a	1.86±0.37a
保罗蓝 Paul Stetson	0(CK)	20.14±0.57a	1.14±0.19c	0.47±0.06c	1.61±0.18c	2.41±0.16a
	22	17.92±0.95b	1.66±0.13b	0.75±0.09b	2.41±0.24b	2.27±0.37a
	58	17.15±1.31b	1.97±0.14a	0.92±0.13ab	2.89±0.12a	2.13±0.21a
	70	14.34±1.36c	2.08±0.25a	1.04±0.17a	3.22±0.25a	2.06±0.28a
科罗拉多 Colorado	0(CK)	18.29±1.03a	1.46±0.17c	0.49±0.12c	1.95±0.23c	2.94±0.31a
	22	16.15±0.73a	1.94±0.11b	0.68±0.15b	2.62±0.19b	2.85±0.28a
	58	15.56±1.42a	2.18±0.25b	0.76±0.09b	2.94±0.28b	2.88±0.26a
	70	12.03±1.83b	2.47±0.20a	1.07±0.14a	3.54±0.28a	2.32±0.20b
莱德格尔 Ledeger	0(CK)	15.24±1.34a	1.78±0.19b	0.75±0.06c	2.53±0.13c	2.33±0.14a
	22	13.53±1.24a	1.87±0.16ab	0.91±0.14b	2.78±0.12b	2.16±0.19a
	58	11.03±1.23b	2.03±0.22ab	0.98±0.09b	3.01±0.31b	2.07±0.36a
	70	10.30±1.24b	2.16±0.18a	1.17±0.13a	3.33±0.23a	1.81±0.26a
教王 King of Siam	0(CK)	16.64±1.19a	1.65±0.19b	0.68±0.08c	2.33±0.33c	2.47±0.19a
	22	14.53±1.35b	1.73±0.13b	0.80±0.12bc	2.53±0.23bc	2.22±0.25a
	58	14.05±0.88b	1.86±0.24ab	0.91±0.09ab	2.77±0.23ab	2.14±0.14a
	70	11.34±0.85c	2.19±0.28a	1.06±0.14a	3.25±0.21a	2.08±0.34a
玛格丽特 Margaret	0(CK)	17.01±1.34a	1.74±0.15c	0.61±0.07c	2.35±0.18c	2.86±0.22a
	22	15.53±1.03ab	1.90±0.21bc	0.68±0.05bc	2.58±0.29bc	2.77±0.17a
	58	14.69±0.74b	2.11±0.23ab	0.78±0.09ab	2.89±0.39ab	2.72±0.35a
	70	12.03±1.21c	2.34±0.10a	0.87±0.05a	3.21±0.27a	2.61±0.21a
流星 Meteor	0(CK)	14.03±1.53a	1.73±0.15b	0.69±0.07a	2.42±0.37b	2.52±0.27a
	22	14.24±0.35a	1.80±0.22b	0.73±0.04a	2.53±0.26b	2.43±0.12a
	58	11.05±0.93b	2.13±0.19a	0.88±0.06a	3.01±0.20a	2.41±0.35a
	70	9.35±0.57b	2.20±0.13a	0.93±0.14a	3.24±0.26a	2.35±0.26a
霞妃 Sunshine Princess	0(CK)	19.24±1.34a	1.45±0.18b	0.59±0.03b	2.04±0.12d	2.46±0.21a
	22	17.05±1.04b	1.65±0.14b	0.71±0.09b	2.36±0.33c	2.38±0.13a
	58	17.24±0.74b	1.99±0.21a	0.86±0.12a	2.85±0.20b	2.31±0.27a
	70	15.64±1.35b	2.11±0.16a	1.05±0.10a	3.16±0.24a	2.12±0.14a
红仙子 Rose Arey	0(CK)	13.24±0.94a	1.68±0.18b	0.68±0.07c	2.36±0.21c	2.45±0.29a
	22	11.42±1.35ab	1.93±0.24b	0.81±0.05bc	2.74±0.13bc	2.40±0.24a
	58	11.05±0.35b	2.07±0.32b	0.86±0.07ab	2.93±0.20b	2.42±0.25a
	70	10.78±0.28b	2.45±0.19a	1.05±0.12a	3.50±0.31a	2.34±0.21a
克里三萨 Chrysantha	0(CK)	15.14±1.35a	1.82±0.16b	0.72±0.04c	2.54±0.36b	2.56±0.18a
	22	14.24±1.44a	1.97±0.13ab	0.81±0.03bc	2.78±0.21ab	2.47±0.16a
	58	11.05±0.96b	2.13±0.24ab	0.88±0.11ab	3.01±0.38ab	2.41±0.21a
	70	9.79±0.73b	2.31±0.28a	0.97±0.05a	3.28±0.21a	2.32±0.24a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different treatments of the same cultivar.

2.2 生长和生理指标的耐阴系数 (β) 分析

由于遮光率 22% 处理组 11 个睡莲品种的生长和

生理指标与 CK (遮光率 0%) 组间的差异较小, 遮光率 70% 处理组大部分睡莲品种不能正常生长和开

花, 研究意义不大, 而遮光率 58% 处理组 11 个睡莲品种各指标与 CK 组间的差异较明显, 故选用遮光率 58% 处理组 11 个睡莲品种各指标的测定值计算 β 值。结果(表 3)显示: 11 个睡莲品种开花数的 β 值均小于 1.000, 其中, ‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘保罗蓝’和‘科罗拉多’开花数的 β 值较高, 为 0.727~0.857, ‘玛格丽特’和‘霞妃’开花数的 β 值较低, 分别为 0.667 和 0.500。‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘保罗蓝’、‘科罗拉多’、‘玛格丽特’和‘霞妃’叶面积的 β 值均大于 1.000, 其中, ‘黑美人’叶面积的 β 值最大, 为 1.362; 其余 5 个睡莲品种叶面积的 β 值均小于 1.000, 其中, ‘克里三萨’叶面积的 β 值最小, 为 0.803。11 个睡莲品种叶片数的 β 值均小于 1.000, 其中, ‘约瑟芬’叶片数的 β 值最大, 为 0.942, ‘克里三萨’叶片数的 β 值最小, 为 0.357。除‘玛格丽特’和‘霞妃’外, 其余

9 个睡莲品种冠幅的 β 值均大于 1.000, 其中, ‘流星’冠幅的 β 值最大, 为 1.515。11 个睡莲品种叶片中可溶性糖含量的 β 值均小于 1.000, 其中, ‘莱德格尔’、‘流星’和‘克里三萨’该指标的 β 值较小, 其余 8 个睡莲品种该指标的 β 值较大, 均大于 0.800。11 个睡莲品种叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量的 β 值均大于 1.000, 其中, ‘黑美人’这 3 个指标的 β 值均最大, 分别为 1.860、2.262 和 1.973, ‘约瑟芬’、‘保罗蓝’和‘科罗拉多’这 3 个指标的 β 值较大, 均大于 1.490, ‘霞妃’这 3 个指标的 β 值居中, 其他 6 个睡莲品种这 3 个指标的 β 值较小。11 个睡莲品种叶片中叶绿素 *a/b* 值的 β 值均小于 1.000, 其中, ‘黑美人’、‘保罗蓝’、‘莱德格尔’和‘教王’叶片中叶绿素 *a/b* 值的 β 值较小, 其余 7 个睡莲品种该指标的 β 值较大, 均大于 0.900。

表 3 遮光条件下 11 个睡莲品种生长和生理指标的耐阴系数

Table 3 Shade tolerance coefficient of growth and physiological indexes of 11 *Nymphaea tetragona* Georgi cultivars under shading condition

品种 Cultivar	各指标的耐阴系数 Shade tolerance coefficient of each index								
	开花数 Flower number	叶面积 Leaf area	叶片数 Leaf number	冠幅 Crown width	可溶性糖含量 Soluble sugar content	叶绿素 <i>a</i> 含量 Chlorophyll <i>a</i> content	叶绿素 <i>b</i> 含量 Chlorophyll <i>b</i> content	总叶绿素含量 Total chlorophyll content	叶绿素 <i>a/b</i> 值 Chlorophyll <i>a/b</i> value
黑美人 Black Beauty	0.727	1.362	0.833	1.168	0.883	1.860	2.262	1.973	0.858
约瑟芬 Josephine	0.857	1.321	0.942	1.397	0.884	1.591	1.614	1.598	0.941
保罗蓝 Paul Stetson	0.800	1.194	0.722	1.315	0.852	1.728	1.957	1.795	0.884
科罗拉多 Colorado	0.833	1.237	0.837	1.090	0.851	1.493	1.551	1.508	0.979
莱德格尔 Ledeger	0.000	0.932	0.735	1.231	0.724	1.140	1.306	1.189	0.888
教王 King of Siam	0.000	0.948	0.790	1.166	0.844	1.127	1.338	1.188	0.866
玛格丽特 Margaret	0.667	1.114	0.776	0.911	0.864	1.213	1.279	1.472	0.951
流星 Meteor	0.000	0.876	0.588	1.515	0.788	1.231	1.275	1.235	0.956
霞妃 Sunshine Princess	0.500	1.102	0.673	0.837	0.896	1.372	1.458	1.549	0.939
红仙子 Rose Arey	0.000	0.932	0.480	1.459	0.835	1.232	1.265	1.154	0.988
克里三萨 Chrysantha	0.000	0.803	0.357	1.101	0.729	1.170	1.347	1.223	0.941

2.3 生长和生理指标耐阴系数的主成分分析

遮光条件下睡莲生长和生理指标耐阴系数的主成分分析结果见表 4。由表 4 可见: 前 3 个主成分的贡献率依次为 54.327%、17.217% 和 11.776%, 累计贡献率达 83.310%。第 1 主成分中, 开花数、叶面积和叶片数以及叶片中可溶性糖、叶绿素 *a* 和总叶绿素含量的特征向量较大; 第 2 主成分中, 叶片中叶绿素 *b* 含量的特征向量较大; 第 3 主成分中, 冠幅的特征向量较大。

2.4 耐阴性评价

基于主成分分析结果, 采用隶属函数法对遮光条件下 11 个睡莲品种的综合指标值 [$Z(x)$]、隶属函数

值 [$\mu(x)$] 及其权重以及综合评价值 (D) 进行计算, 并基于 D 值对 11 个睡莲品种的耐阴性进行排序, 结果见表 5。 D 值越大, 植物的耐阴性越强^[12]。由表 5 可见: 根据 D 值, 11 个睡莲品种的耐阴性由强到弱依次为‘约瑟芬’、‘黑美人’、‘保罗蓝’、‘科罗拉多’、‘玛格丽特’、‘霞妃’、‘流星’、‘教王’、‘红仙子’、‘莱德格尔’、‘克里三萨’, 其中, ‘约瑟芬’、‘黑美人’和‘保罗蓝’的 D 值大于 0.700, 耐阴性较强; ‘科罗拉多’、‘玛格丽特’和‘霞妃’的 D 值为 0.490~0.658, 耐阴性居中; ‘流星’、‘教王’、‘红仙子’、‘莱德格尔’和‘克里三萨’的 D 值小于 0.400, 耐阴性较弱。

表 4 遮光条件下睡莲生长和生理指标耐阴系数的主成分分析结果¹⁾Table 4 Result of principal component analysis on shade tolerance coefficient of growth and physiological indexes of *Nymphaea tetragona* Georgi under shading condition¹⁾

主成分 Principal component	各指标耐阴系数的特征向量 Eigenvector of shade tolerance coefficient of each index									E	CR/%	CCR/%
	FN	LA	LN	CW	SS	Chla	Chlb	Chl	Chla/b			
1	0.930	0.978	0.748	-0.214	0.777	0.900	0.239	0.948	-0.307	4.889	54.327	54.327
2	0.128	0.114	0.388	-0.033	0.412	-0.275	-0.900	-0.244	0.503	1.549	17.217	71.544
3	-0.108	0.066	-0.033	0.953	-0.099	0.240	-0.163	-0.016	-0.132	1.059	11.766	83.310

¹⁾ FN: 开花数 Flower number; LA: 叶面积 Leaf area; LN: 叶片数 Leaf number; CW: 冠幅 Crown width; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; Chla: 叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content; Chlb: 叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content; Chl: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Chla/b: 叶绿素 a/b 值 Chlchlorophyll a/b value; E: 特征值 Eigenvalue; CR: 贡献率 Contribution rate; CCR: 累计贡献率 Cumulative contribution rate.

表 5 遮光条件下 11 个睡莲品种综合指标值 [Z(x)]、隶属函数值 [μ(x)] 及其权重、综合评价值 (D) 及耐阴性排序

Table 5 Comprehensive index value [Z(x)], subordinate function value [μ(x)] and its weight, comprehensive evaluation value (D), and order of shade tolerance of 11 *Nymphaea tetragona* Georgi cultivars under shading condition

品种 Cultivar	综合指标值 Comprehensive index value			隶属函数值 Subordinate function value			D	排序 Order
	Z(1)	Z(2)	Z(3)	μ(1)	μ(2)	μ(3)		
黑美人 Black Beauty	6.889	-1.700	1.098	1.000	0.205	0.475	0.761	2
约瑟芬 Josephine	6.225	-0.863	1.353	0.784	0.772	0.849	0.791	1
保罗蓝 Paul Stetson	6.286	-1.404	1.223	0.804	0.405	0.658	0.701	3
科罗拉多 Colorado	5.872	-0.795	1.027	0.670	0.818	0.371	0.658	4
莱德格尔 Ledeger	3.953	-0.683	1.201	0.047	0.894	0.626	0.304	10
教王 King of Siam	4.052	-0.645	1.131	0.079	0.919	0.523	0.315	8
玛格丽特 Margaret	5.268	-0.526	0.837	0.474	1.000	0.092	0.529	5
流星 Meteor	3.875	-0.704	1.456	0.021	0.879	1.000	0.337	7
霞妃 Sunshine Princess	5.327	-0.803	0.774	0.493	0.812	0.000	0.490	6
红仙子 Rose Arey	3.809	-0.674	1.384	0.000	0.900	0.894	0.312	9
克里三萨 Chrysantha	3.930	-2.002	0.797	0.039	0.000	0.034	0.030	11
权重 Weight				0.652	0.207	0.141		

3 讨论和结论

遮光条件下, 11 个睡莲品种的开花数均呈下降趋势, ‘教王’、‘流星’、‘红仙子’和‘克里三萨’在遮光率 22% (轻度遮光) 处理组已经不能开花, 失去观赏价值, 说明植株的营养情况变差, 生殖生长受到抑制, 甚至不能生长, 但‘黑美人’、‘约瑟芬’、‘保罗蓝’和‘科罗拉多’在遮光率 70% (重度遮光) 处理组依然可以保持较多的开花数, 观赏价值较高。

荫蔽环境下, 植物会通过增大叶面积和冠幅、提高叶绿素含量以及降低叶绿素 a/b 值等方法适应弱光环境^[13-14]。总体上看, 遮光条件下耐阴性较强的‘黑美人’、‘约瑟芬’和‘保罗蓝’的叶面积和冠幅在遮光率 22% 和 58% (中度遮光) 处理组增大, 但随着遮光率继续提高, 在遮光率 70% 处理组叶面积和冠幅减小, 这与朱玉菲等^[15] 对大叶铁线莲 (*Clematis heracleifolia* DC.) 以及温韦华等^[16] 对绣线菊 (*Spiraea salicifolia* Linn.) 等植物的研究结果一致, 推测这 3 个

睡莲品种的叶面积和冠幅在遮光率 22% 和 58% 处理组增加是由于植物通过扩大植株与光的有效接触面积来增加对光的吸收量, 从而适应弱光环境^[17], 但这 3 个睡莲品种的叶面积和冠幅在遮光率 70% 处理组均较最高值降低, 推测其主动适应反应已达到极限。

本研究中, 11 个睡莲品种的叶片数总体上随着遮光率的提高而减少, 推测可能由于遮光条件下植物存活策略倾向于将能量更多用于增大同化面积, 减少同化器官, 叶面积通常随光照强度减弱而增加, 且与不耐阴植物相比, 耐阴植物叶面积的增幅较大^[18]。

叶绿素含量的高低一定程度上反映了植物光合作用的强弱, 从而反映植物的生长发育状况^[19]。叶绿素含量和叶绿素 a/b 值为植物耐阴性评价的重要指标^[20]。韩忠明等^[21] 对东北铁线莲 [*Clematis terniflora* var. *mandshurica* (Rupr.) Ohwi] 和石进朝^[22] 对涝峪薹草 (*Carex giraldiana* Kükenth.) 的研究结果均表明: 随着光照强度的减弱, 叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量升高, 叶绿素 a/b 值下降, 本研究结果与其一致, 推测原因为叶绿素 b 对蓝紫光的吸收

能力更强,在弱光条件下,植物冠层下部的红光比例较低,叶绿素 *b* 可以使植物捕获更多的光能,维持光合系统正常运行^[23];且叶绿素 *a/b* 值下降有利于叶片吸收远红光^[24],提高光合作用效率。本研究中,遮光条件下,耐阴性较强的‘黑美人’、‘约瑟芬’和‘保罗蓝’叶片中叶绿素相关指标的变幅较大,说明睡莲可以通过提高叶绿素含量来提高耐阴性。

弱光条件下,植物光合效率降低,叶片合成碳水化合物化合物的能力下降,可溶性糖含量可以反映植物在低光照下的适应能力^[25]。本研究中,11个睡莲品种叶片中可溶性糖含量总体上随遮光率的提高而降低,这与潘远智等^[25]对一品红(*Euphorbia pulcherrima* Willd. et Klotzsch)和王京伟等^[26]对泽兰(*Aconitum gymnantrum* Maxim.)的研究结果一致。本研究结果还显示:遮光率58%处理组耐阴性较强的‘黑美人’、‘约瑟芬’和‘保罗蓝’叶片中可溶性糖含量的下降幅度明显小于耐阴性差的‘克里三萨’,说明其光合能力受到弱光环境的影响相对较小。

综合评价结果显示:11个睡莲品种耐阴性的排序与其生长和开花情况基本一致,说明主成分分析法和隶属函数法可用于睡莲的耐阴性评价。从耐阴性较强的‘约瑟芬’、‘黑美人’和‘保罗蓝’看,睡莲可通过增大叶面积和冠幅、减少叶片数、增加叶绿素含量以及降低叶绿素 *a/b* 值等方法来提高其对弱光的适应能力,以保证开花所需的光合产物。11个睡莲品种中,3个热带睡莲品种‘约瑟芬’、‘黑美人’和‘保罗蓝’的耐阴性较强,排在前3位,但热带睡莲的耐阴性是否普遍较强还需要进行后续研究;耐寒睡莲中,‘科罗拉多’的耐阴性最强,排在第4位,‘玛格丽特’和‘霞妃’分别排在第5和第6位;‘克里三萨’的耐阴性最差。耐阴性较强的‘黑美人’、‘约瑟芬’和‘保罗蓝’可作为育种材料培育耐阴性更好的品种,或者直接作为耐阴品种进行盆栽睡莲生产。

参考文献:

[1] 杨亚涵,苏群,田敏,等. 桂南地区芳香型睡莲切花优良品种筛选[J]. 热带农业科学, 2019, 39(6): 24-31.
 [2] 李淑娟,尉倩,陈尘,等. 中国睡莲属植物育种研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(4): 829-835.
 [3] 廖卫伟,杨志娟,朱天龙,等. 睡莲的植物学性状及其分类[J]. 现代农业科技, 2016(24): 148, 154.
 [4] 江君,李欣,朱建华,等. 5个碗莲品种耐阴性比较[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 118-120.

[5] 孙艳,高海顺,管志勇,等. 菊花近缘种属植物幼苗耐阴性特性分析及其评价指标的确定[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1908-1916.
 [6] 郝丽红,宋焕芝,于晓南. 6个芍药品种的光合生理特性及耐阴性分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 31-35.
 [7] 赵银月,詹和明,代希茜,等. 云南间作大豆耐阴性综合评价及鉴定指标筛选[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 81-91.
 [8] 刘万兴,潘晓东,苏永涛,等. 5种观赏灌木的耐阴性研究[J]. 农业科技通讯, 2017(12): 145-148.
 [9] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes[J]. Methods in Enzymology, 1987, 148(1): 350-382.
 [10] 高俊山,蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2018: 132-133.
 [11] 李靖华,郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究——主成分评价[J]. 管理工程学报, 2002, 16(1): 39-43.
 [12] 杨有芹,李登飞,王力,等. 红雉凤仙花形态与光合特性对光强的响应及其耐阴性评价[J]. 四川林业科技, 2019, 40(1): 5-14.
 [13] 陆鑫眉,林金水,陈金河. 7种观叶小盆栽植物的光合特性与耐阴性研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(4): 732-737.
 [14] 张朝铖,蒋倩,吴志,等. 4种观赏草的耐阴性研究及评价[J]. 草业学报, 2019, 28(7): 60-72.
 [15] 朱玉菲,刘冬云,郭思佳. 两种野生地被植物耐阴性研究[J]. 西部林业科学, 2017, 46(2): 133-138.
 [16] 温韦华,陈燕,刘东焕,等. 10种园林植物的耐阴性比较研究[J]. 中国园林, 2018, 34(9): 104-108.
 [17] 胡肖肖,段玉侠,金荷仙,等. 4个杜鹃花品种的耐阴性[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 88-95.
 [18] 覃凤飞,沈益新,周建国,等. 遮荫条件下9个紫花苜蓿品种苗期形态及生长响应[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 204-211.
 [19] 许红娟,陈之林,罗孝明,等. 彩叶矾根幼苗形态生理特性变化及耐阴性综合评价[J]. 北方园艺, 2017(15): 89-97.
 [20] 高娟,王志红,卫永太. 晋中市引种5种园林地被植物的耐阴性研究[J]. 山西林业科技, 2018, 47(2): 34-37.
 [21] 韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等. 遮荫对3年生东北铁线莲生长特性及品质的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6005-6012.
 [22] 石进朝. 涝峪苔草叶绿素含量与耐阴性研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 240-243.
 [23] 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.
 [24] 林树燕,张庆峰,陈其旭. 10种园林植物的耐阴性[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(7): 32-34.
 [25] 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.
 [26] 王京伟,张张飞,崇晓泽,等. 泽兰的耐阴性研究[J]. 西部林业科学, 2018, 47(3): 107-112.

(责任编辑: 张明霞)