网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.011

遮阴对蔷薇科 3 种地被植物生长的影响及耐阴性评价

王维艺,韩睿婷,张鸽香,苏同向
(南京林业大学 风景园林学院,江苏 南京 210037)

[摘 要] 【目的】研究遮阴程度对蔷薇科 3 种地被植物形态和生理特性的影响,为蔷薇科地被植物在园林中的开发应用提供理论依据。【方法】以朝天委陵菜(*Potentilla supina*)、龙芽草(*Agrimonia pilosa*)和蛇含委陵菜(*Potentilla kleiniana*)为试验材料,设置 30%(T1)、50%(T2)、70%(T3)和 90%(T4)4 个遮阴率处理,以全光照为对照(CK),测定 3 种蔷薇科植物的形态和生理指标,并通过主成分和隶属函数分析法进行耐阴性综合评价。【结果】蔷薇科 3 种地被植物的叶长、叶宽、株高、株幅和叶面积均随遮阴程度增加而呈先上升后下降的趋势,朝天委陵菜的上述指标在 T2 处理下达到最大值;龙芽草除叶宽在 T2 处理下最大外,其余指标及蛇含委陵菜各指标均在 T3 处理下最大。3 种植物的比叶重随遮阴程度增加均呈下降趋势,其中朝天委陵菜降幅最大(48.9%)。随遮阴程度增加,朝天委陵菜和蛇含委陵菜的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性均呈先降后升趋势,分别在 T2 和 T3 处理时活性最小;龙芽草的 POD 和 CAT 活性变化趋势与之类似,在 T2 处理时活性最小,SOD 活性则呈逐渐下降趋势。3 种植物的丙二醛(MDA)含量均随遮阴程度的增加呈先降后升趋势,均以 CK 处理含量最高,T2 处理含量最低。随遮阴程度加重,3 种植物的可溶性糖含量逐渐下降,可溶性蛋白含量则呈先降后升趋势。通过主成分和隶属函数分析法对 3 种植物的耐阴性进行综合评价,得出其耐阴性从强到弱依次为龙芽草、蛇含委陵菜、朝天委陵菜。【结论】龙芽草在遮阴胁迫下适应性最好,耐阴性最强,适合运用在高大乔木及高层建筑造成的荫蔽环境下。

[关键词] 蔷薇科;地被植物;生理特性;耐阴性
[中图分类号] S688.4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0105-11

Effects of shading on the growth of three groundcover species in Rosaceae and evaluation of their shade tolerance

WANG Weiyi, HAN Ruiting, ZHANG Gexiang, SU Tongxiang
(*College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aimed to investigate the effects of shading intensity on the morphological and physiological traits of three Rosaceae groundcover species, to provide a theoretical basis for their development and application in gardens. 【Method】 *Potentilla supina*, *Agrimonia pilosa* and *Potentilla kleiniana* were exposed to four shading treatments (shading rate 30%(T1), 50%(T2), 70%(T3), and 90%(T4) of full light), with a control (CK) receiving full light. Their morphological and physiological indexes were measured and principal component and membership function analysis were conducted to comprehensively evaluate their shade tolerance. 【Result】 The leaf length, leaf width, plant height, plant width and leaf area of the three Rosaceae groundcover plants exhibited initial increases followed by decreases with the increase of shading intensity. These indicators of *P. supina* reached the maximum value under T2 treatment,

[收稿日期] 2024-10-08 [修回日期] 2024-11-21
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2019YFD1100404)
[作者简介] 王维艺(1999—),女,江西宜春人,在读硕士,主要从事园林植物生理与应用研究。E-mail:15207953365@139.com
[通信作者] 张鸽香(1967—),女,江苏高邮人,副教授,硕士生导师,主要从事园林植物生理与栽培应用研究。
E-mail:nld_zhang@njfu.com.cn

the leaf width of *A. pilosa* was the largest under the T2 treatment, whereas all other indicators for *A. pilosa* and all indicators for *P. kleiniana* were the highest under the T3 treatment. The specific leaf weight of all three plant species decreased with increasing shading intensity, with *P. supina* exhibiting the largest decline (48.9%). The activities of superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD) and catalase(CAT) in *P. supina* and *P. kleiniana* decreased first and then increased with the increasing shading intensity at T2 for *P. supina* and at T3 for *P. kleiniana*, respectively. The trend for POD and CAT activities in *A. pilosa* was similar, with minimum activity at T2 treatment, and SOD activity gradually decreased. The levels of malondialdehyde (MDA) decreased first and then increased with the increasing shading intensity in all plants, with the highest levels in the CK treatment and the lowest in T2 treatment. As shading intensity increased, the soluble sugar content of the three plants exhibited a gradual decrease, while the soluble protein content followed a trend of first decreasing and then increasing. A comprehensive evaluation of the shade tolerance of the three plants, conducted by principal component and membership function analysis, resulted in the following order of shade tolerance from strong to weak: *A. pilosa*, *P. kleiniana* and *P. supina*. 【Conclusion】 *A. pilosa* demonstrates the best adaptability and shade tolerance under shading stress, making it ideal for application in shaded areas caused by tall trees and high-rise buildings.

Key words: Rosaceae; groundcover plants; physiological traits; shade tolerance

光是影响植物生长发育的主要环境因子，能直接参与植物的光合作用，提高植株的生长速度和生物量，进而影响植株内养分的分布[1]。随着城市建设的不断发展，对高大乔木及高层建筑或建筑群造成的荫蔽空间进行绿化的需求随之产生，因此研究植物的耐阴性有助于合理配置稳定、美观的栽培植物群落，美化生活环境[2]。野生地被植物具有生长茂盛、抗逆性强、养护管理粗放等特点，且有重要的生态作用和景观绿化作用，引种野生地被植物与当前生态园林建设的理念相吻合，因此在城市建设过程中具有广泛的应用前景[3]。朝天委陵菜(*Potentilla supina*)、龙芽草(*Agrimonia pilosa*)、蛇含委陵菜(*Potentilla kleiniana*)均隶属于蔷薇科(Rosaceae)春季开花的野生地被植物，叶形优美、适应性强，具有较高的观赏价值和药用价值。目前，3 种植物仍处于野生状态，未被大量开发应用，若综合开发和利用这 3 种野生地被植物，不仅有利于维持当地的生态平衡，还可以促进相关产业的发展。

植物常通过调节形态和生理特性来适应不同程度的光照环境[4]。叶片是对环境变化较敏感且变异性和可塑性较大的器官，比叶重是影响叶片光合能力的重要因素，在中、重度遮阴条件下，堇叶紫金牛(*Ardisia violacea*)通过扩大叶面积、增加生物量等来保证正常的光合作用；在全光照条件下，为了避免引起光抑制，其又会通过缩小叶面积来应对[5]。植物对遮阴环境的适应首先体现在形态上，随遮阴程度减弱，植物的株高、叶长、叶宽和冠幅均逐渐增大，过度遮阴则会抑制生长[6-7]。强光及弱光环境，会造成植物质膜受损，植物可通过调节抗氧化酶活性来清除体内活性氧自由基，或通过调节渗透调节物质含量来维持渗透压平衡，以保证植物的正常生长[8-9]。目前对朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜这 3 种植物的研究还集中在药用成分分析方面，对其在不同遮阴程度下植物形态及生理特性等变化的研究鲜少报道[10-12]。因此，本试验以蔷薇科 3 种野生地被植物为试验材料，探究不同遮阴程度下其形态及生理指标的变化，并采用主成分和隶属函数分析法进行耐阴性综合评价，以期为蔷薇科野生地被植物的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜均为当年生植物，2022 年 12 月中旬从南京紫金山挖取后，栽植于高 11.5 cm、上口径 13 cm、下口径 11.5 cm 的塑料花盆内，每盆 1 株，栽培基质为园土与营养土按体积比 2∶1 混配而成。将所有的供试材料置于南京林业大学国家园林实验教学示范中心缓苗 3 个月，缓苗期间严格控制水分和养分供给，生长期间也保持水肥一致。

1.2 试验设计

2023 年 3 月中旬选取长势相似、生长状况良好的植株，采用人工搭棚进行遮阴处理，遮阴棚南北走向，规格为 4 m×2 m×2 m(长×宽×高)，棚间距 5 m。

根据前人方法[13]和预试验结果设置 5 个光照水平，分别为全光照(CK，光子照度 1 581 μmol/(m² · s))、遮阴率 30%(T1，光子照度 1 093 μmol/(m² · s))、遮阴率 50%(T2，光子照度 782 μmol/(m² · s))、遮阴率 70%(T3，光子照度 458 μmol/(m² · s))和遮阴率 90%(T4，光子照度 144 μmol/(m² · s))。本试验采用完全随机区组设计，每种植物每个处理设置 3 个重复，每个重复 15 盆，3 种植物共计 675 盆。

1.3　指标测定方法

1.3.1　形态指标　试验进行 50 d 时取样，每种植物每处理随机取 3 枚生长良好、完全展开的叶片，使用游标卡尺(精度 0.1 mm)测量叶长(叶片与叶柄交界处到叶尖的距离)和叶宽(垂直于叶片长度轴的叶片边缘两点的最大距离)，使用 AM-300 手持叶面积仪扫描叶面积；每种植物每处理随机取 3 盆植株，使用卷尺(精度 0.1 cm)测量株高(盆土表面到植株最高点的距离)和株幅(地上部分最大宽度)。

将叶片放入烘箱 105 ℃杀青 15 min 后，80 ℃烘至质量恒定，使用分析天平称量干质量。

比叶重(mg/cm²)＝叶片干质量/叶面积。

1.3.2　生理指标　于试验进行 50 d 的上午 08:00－09:00，从每处理选出 3 株生长状况相近的植株，在每植株中上部选取 3 片朝向部位基本一致的新鲜成熟叶片采样。采用氮蓝四唑(NBT)光还原法[14]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性，愈创木酚法[14]测定过氧化物酶(POD)活性，紫外吸光法[14]测定过氧化氢酶(CAT)活性，巴比妥酸法[14]测定丙二醛(MDA)含量，蒽酮比色法[14]测定可溶性糖含量，考马斯亮蓝 G-250 染色法[14]测定可溶性蛋白含量。

1.4　耐阴性综合评价

为保证综合评价结果的可靠性，参考刘光杨等[15]的方法将与耐阴性相关的上述 12 个指标的测量值进行无量纲化处理，按下式计算得到耐阴系数(α)：

耐阴系数(α)＝各遮阴处理下某指标的测定值/对照组中该指标的测定值。　(1)

采用主成分因子分析法对蔷薇科 3 种地被植物的 12 个形态指标和生理指标的耐阴系数进行主成分分析[16]，得出 3 个综合指标即前 3 个主成分、每个综合指标的方差贡献率及权重；运用隶属函数分析法[17]计算出综合指标值[$CI(X)$]、隶属函数值(μ_x)和综合评价值(D)，结合上述指标对 3 种地被植物的耐阴性进行综合评价。

1.5　数据处理

使用 Excel 2010 软件整理数据并绘制图表，使用 SPSS 27.0 软件进行数据分析，采用主成分分析法和隶属函数分析法对 3 种蔷薇科植物的耐阴性进行综合评价。

2　结果与分析

2.1　遮阴对 3 种地被植物形态指标的影响

2.1.1　叶面积、叶长和叶宽　遮阴对 3 种地被植物叶面积、叶长和叶宽的影响见表 1。

表 1　不同遮阴处理下蔷薇科 3 种地被植物形态指标的变化

Table 1　Changes in morphological indexes of three groundcover species in Rosaceae under different shading treatments

植物种类 Plant species	处理 Treatment	叶面积/cm² Leaf area	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	株高/cm Plant height	株幅/cm Plant width	比叶重/(mg · cm⁻²) Specific leaf weight
朝天委陵菜 *P. supina*	CK	4.35±0.65 b	2.76±0.25 d	2.11±0.18 b	30.67±1.86 b	15.62±0.84 c	3.64±0.35 a
	T1	5.10±0.38 ab	3.19±0.25 c	2.41±0.12 ab	34.75±1.48 b	18.27±0.77 b	3.45±0.36 ab
	T2	5.94±0.58 a	4.22±0.08 a	2.55±0.32 a	45.61±3.02 a	26.32±1.91 a	2.68±0.29 b
	T3	5.76±0.29 a	4.02±0.19 a	2.25±0.08 ab	43.61±4.97 a	20.44±2.19 b	2.37±0.17 c
	T4	5.36±0.35 a	3.62±0.15 b	2.16±0.16 b	30.21±2.01 b	19.14±1.77 b	1.86±0.20 c
龙芽草 *A. pilosa*	CK	29.54±1.29 c	9.08±0.46 d	2.33±0.10 c	10.01±0.37 c	24.10±0.90 d	4.50±0.59 a
	T1	37.39±1.68 b	10.45±0.28 c	2.81±0.24 b	11.44±1.00 c	26.60±1.27 c	3.85±0.16 ab
	T2	40.89±0.80 b	14.45±0.87 b	3.27±0.15 a	13.87±0.57 b	34.60±0.99 b	3.76±0.63 ab
	T3	48.67±3.64 a	16.89±0.47 a	3.15±0.18 a	19.31±0.46 a	39.19±1.14 a	3.26±0.25 b
	T4	47.63±2.96 b	15.42±0.43 b	2.97±0.15 ab	17.58±1.77 a	36.73±1.65 b	3.16±0.39 b
蛇含委陵菜 *P. kleiniana*	CK	4.59±0.09 c	2.38±0.02 b	7.86±0.33 d	13.98±0.50 c	37.86±0.69 d	4.01±0.17 a
	T1	5.77±0.19 b	2.57±0.06 ab	9.03±0.19 c	14.53±1.19 c	46.49±0.95 c	3.58±0.33 ab
	T2	6.06±0.23 ab	2.91±0.22 a	12.77±0.91 ab	16.83±0.34 b	48.33±1.46 bc	3.33±0.22 bc
	T3	6.15±0.14 a	2.96±0.32 a	13.13±0.32 a	17.73±0.32 a	55.74±1.06 a	3.28±0.41 bc
	T4	5.91±0.16 ab	2.80±0.35 ab	12.22±0.26 b	17.45±0.77 a	49.49±1.35 b	2.71±0.54 c

注：CK. 全光照；T1. 遮阴率 30%；T2. 遮阴率 50%；T3. 遮阴率 70%；T4. 遮阴率 90%。表中数据为“平均值±标准差”。同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note：CK. Full light；T1. Shading rate 30%；T2. Shading rate 50%；T3. Shading rate 70%；T4. Shading rate 90%. Values in the table are presented as “mean±standard deviation”. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

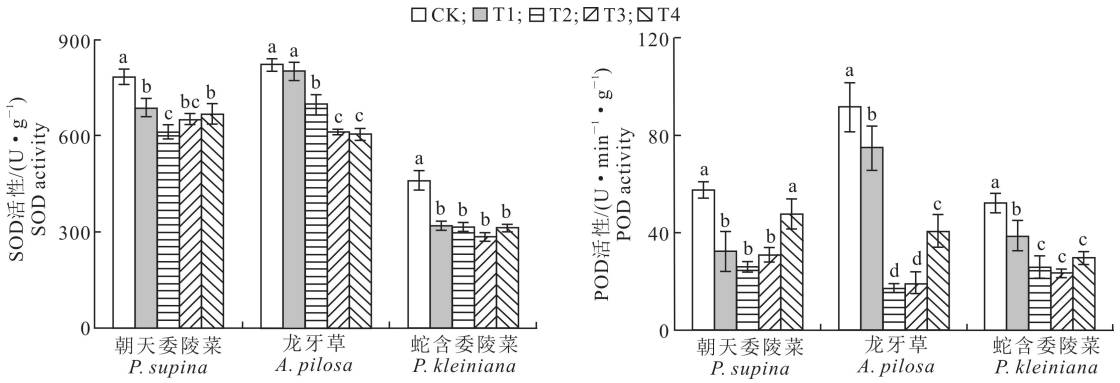
由表1可知,3种植物的叶面积、叶长和叶宽均随遮阴率的增加呈先上升后下降的趋势,其中朝天委陵菜均在T2处理下达到最大值,且显著高于CK($P<0.05$);龙芽草和蛇含委陵菜的叶面积和叶长均在T3处理下达到最大值,且显著高于CK($P<0.05$),叶宽分别在T2和T3处理下达到最大值,较CK显著上升40.34%和62.47%。

2.1.2 株高、株幅和比叶重 由表1可知,随着遮阴率的增加,3种植物的株高和株幅均呈现先上升后下降的趋势,朝天委陵菜均在T2处理下达到最大值,分别较CK显著上升48.71%和68.50%;龙芽草和蛇含委陵菜的株高和株幅均在T3处理下最大,且显著高于CK($P<0.05$)。随着遮阴率的增加,3种植物的比叶重均呈下降趋势,其中龙芽草的比叶重下降幅度最小,朝天委陵菜下降幅度最大;朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜的比叶重均在T4处理下达到最小值,分别较CK下降了48.9%,29.7%和32.42%。

2.2 遮阴对3种地被植物生理指标的影响

2.2.1 SOD活性 图1显示,朝天委陵菜和蛇含委陵菜SOD活性随遮阴率增加均呈先降后升的趋势,朝天委陵菜在T2处理时达到最小值,此时SOD活性较CK显著下降21.92%,在T3和T4处理时SOD活性虽又逐渐上升,但仍显著低于CK;蛇含委陵菜在T1~T4处理的SOD活性均与CK有显著差异,分别较CK显著降低了30.92%,31.67%,38.37%和32.47%。龙芽草SOD活性随遮阴率增加整体呈下降趋势,T1处理与CK无显著差异,但T2~T4处理的SOD活性较CK分别显著降低了14.97%,25.53%和26.47%。这表明3种植物在一定的遮阴处理下,植物体内自由基的产生与清除保持着一个平衡的过程;而全光照环境对植物的生长造成了一定程度的胁迫,刺激了SOD活性的表达。

2.2.2 POD活性 图1表明,随着遮阴率的增加,3种植物的POD活性均呈先下降后升高的趋势。朝天委陵菜和龙芽草均在T2处理时POD活性最小,分别较CK显著下降55.06%和81.33%;蛇含委陵菜的POD活性在T3处理时最小,较CK显著下降55.60%。说明3种植物能迅速适应轻度遮阴胁迫,过度遮阴则会使植株抗氧化酶系统受到影响,促使POD活性提升。



图柱上标不同小写字母表示同种植物不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同。

Different lowercase letters on the column indicate significant differences among different treatments for the same plant($P<0.05$). The same as below.

图1 不同遮阴处理下蔷薇科3种地被植物体内SOD和POD活性的变化

Fig. 1 Changes of SOD and POD activities in three ground cover plants of Rosaceae under different shading treatments

2.2.3 CAT活性 从图2可知,随着遮阴率的增加,朝天委陵菜的CAT活性呈先降后升的趋势,且在T2处理时活性最低,T1~T4处理的CAT活性较CK分别显著下降47.11%,52.97%,41.17%和24.98%;龙芽草CAT活性呈先下降后上升的趋势,T2处理时活性最低,较CK显著下降56.47%,并与T1和T4处理差异显著($P<0.05$);蛇含委陵菜CAT活性呈先下降后升高的趋势,T1~T3处理较CK显著降低,T4处理的CAT活性较T1~T3处理上升,但与CK相比仍显著降低了27.64%。说明强光照环境和极度弱光环境都会诱导植物细胞内CAT活性的提高,以增强植物对逆境的承受力。

2.2.4 MDA含量 由图2可知,朝天委陵菜、龙芽草、蛇含委陵菜的MDA含量均随遮阴率的增加呈先降后升趋势,均以CK处理含量最高,T2处理含量最低,分别较CK显著下降31.37%,45.57%和

50.29%。这表明适度遮阴改善了植物的生长环境，减少了对植物细胞膜的伤害；但过度遮阴，则会促进细胞膜脂过氧化，导致 MDA 含量上升。

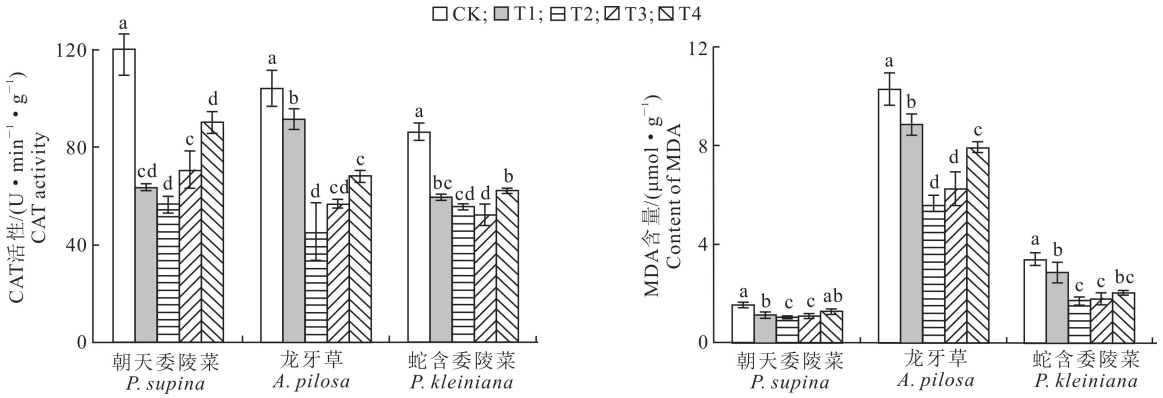


图 2　不同遮阴处理下蔷薇科 3 种地被植物体内 CAT 活性和 MDA 含量的变化

Fig. 2　Changes in CAT activity and MDA content in three groundcover species in Rosaceae under different shading treatments

2.2.5　可溶性糖含量　由图 3 可知，随遮阴率增加，3 种植物的可溶性糖含量均不断下降，且各遮阴处理的可溶性糖含量均显著低于 CK，其中朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜在 T4 处理下的可溶性糖含量分别较 CK 显著下降了 41.24%，66.41%和 33.76%。这表明植物在遮阴环境下，叶片合成碳水化合物的能力下降，因此可溶性糖含量降低。

2.2.6　可溶性蛋白含量　由图 3 可知，随遮阴率增加，朝天委陵菜的可溶性蛋白含量呈先下降后上升趋势，其中 CK 处理的可溶性蛋白含量最高，T1 和 T2 处理的可溶性蛋白含量分别较 CK 显著下降 25.11%和 20.75%，T3 和 T4 处理的可溶性蛋白含量虽较 T1 和 T2 处理显著上升，但仍分别较 CK 显著下降 10.38%和 11.43%；龙芽草的可溶性蛋白含量呈先下降后上升趋势，在 T2 处理时含量最低，T3 和 T4 处理较 T2 处理略上升但不明显，T2～T4 处理分别较 CK 显著下降 18.66%，16.69%和 14.82%；蛇含委陵菜的可溶性蛋白含量也呈先下降后上升的趋势，其中 T1 和 T2 处理分别较 CK 显著降低了 22.25%和 23.61%。说明轻度遮阴处理对 3 种植物生长影响较小，而过度遮阴处理下植物通过积累可溶性蛋白来调节细胞渗透势，以抵御遮阴胁迫带来的伤害。

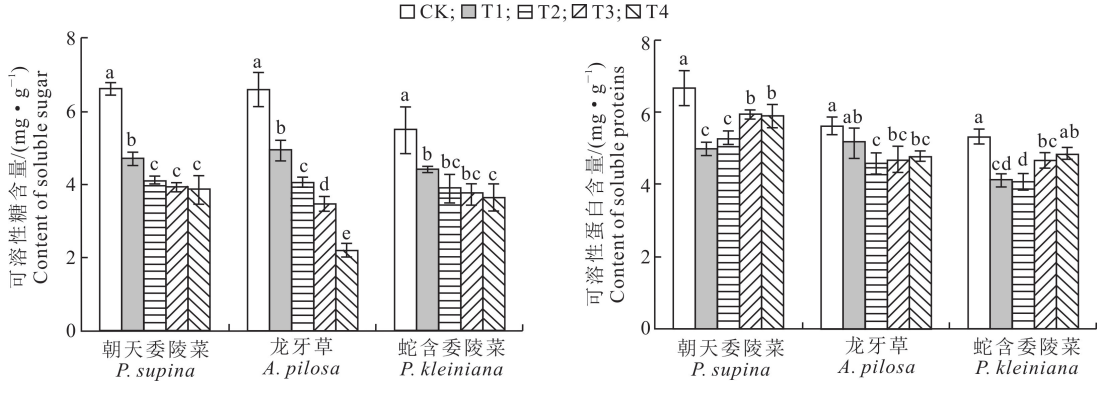


图 3　不同遮阴处理下蔷薇科 3 种地被植物体内可溶性糖和可溶性蛋白含量的变化

Fig. 3　Changes of soluble sugar and soluble protein contents in three groundcover species in Rosaceae under different shading treatments

2.3　蔷薇科 3 种地被植物耐阴性的综合评价

2.3.1　耐阴系数和主成成分分析　为评价蔷薇科 3 种地被植物的耐阴性，通过公式(1)计算得出各遮阴处理下 12 项指标的耐阴系数 α 值(表 2)，可知 3 种蔷薇科植物的叶长、叶宽、株高、株幅和叶面积 α 值除个别外均大于 1，说明遮阴环境对 3 种植物的以上指标有促进作用。

表 2 不同遮阴处理下蔷薇科 3 种地被植物各评价指标的耐阴系数(α)

Table 2 Shade tolerance coefficient (α-values)of three groundcover species in Rosaceae under different shading treatments

指标 Index	朝天委陵菜 *P. supina*				龙芽草 *A. pilosa*				蛇含委陵菜 *P. kleiniana*			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
叶长 Leaf length	1.03	1.50	1.61	1.32	1.15	1.59	1.86	1.70	1.08	1.22	1.24	1.18
叶宽 Leaf width	1.15	1.20	0.88	1.03	1.05	1.24	1.72	1.57	1.21	1.40	1.35	1.27
株高 Plant height	1.14	1.49	1.43	0.99	1.14	1.39	1.93	1.75	1.04	1.20	1.27	1.37
株幅 Plant width	1.17	1.69	1.01	1.22	1.10	1.44	1.63	1.53	1.23	1.19	1.38	1.31
叶面积 Leaf area	1.26	1.40	1.35	1.24	1.27	1.39	1.65	1.61	1.19	1.37	1.24	1.29
比叶重 Specific leaf weight	0.95	0.74	0.66	0.51	0.87	0.84	0.73	0.71	0.89	0.83	0.82	0.67
MDA 含量 Malondialdehyde content	0.72	0.77	0.80	0.83	0.87	0.55	0.61	0.77	0.84	0.50	0.53	0.61
SOD 活性 Superoxide dismutase activity	0.94	0.71	0.83	0.85	0.98	0.85	0.75	0.74	0.62	0.42	0.37	0.68
POD 活性 Peroxidase activity	0.57	0.45	0.54	0.83	0.82	0.19	0.21	0.44	0.73	0.36	0.44	0.56
CAT 活性 Catalase activity	0.53	0.47	0.59	0.76	1.29	0.64	0.81	0.66	0.69	0.64	0.68	0.72
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.71	0.81	0.77	0.59	0.75	0.62	0.53	0.34	0.81	0.72	0.69	0.67
可溶性蛋白含量 Soluble proteins content	0.79	0.94	0.95	0.89	0.82	0.92	0.78	0.85	0.69	0.89	0.88	0.91

再对 3 种植物的 12 个形态指标和生理指标进行主成分分析(表 3),以特征值和贡献率为标准来提取主成分。由表 3 可知,有 3 个主成分的特征值大于 1.000,最终提取这 3 个综合指标即前 3 个主成分,其累计方差贡献率达 76.465%,说明这 3 个主成分保留了 12 个指标的大部分信息。各指标对应的 3 个主成分的载荷值有很大差异,载荷值越大,说明该指标对主成分的贡献越大。主成分 1 中叶面积和株高的载荷值较大,因此这 2 个指标是主成分 1 的主要作用因子;主成分 2 中 MDA 含量和 SOD 活性的载荷值较大,二者为主成分 2 中的主要作用因子;主成分 3 中比叶重的载荷值最大,表明其为主成分 3 中的主要作用因子。综合 3 个主成分的信息,可将株高、叶面积、MDA 含量、SOD 活性和比叶重作为筛选蔷薇科 3 种地被植物耐阴性的重要指标。

表 3 不同遮阴处理下蔷薇科 3 种地被植物形态指标和生理指标的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of morphological and physiological indexes of three groundcover species in Rosaceae under different shading treatments

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
叶长 Leaf length	0.361	0.278	−0.128
叶宽 Leaf width	0.355	−0.160	0.343
株高 Plant height	0.398	0.150	0.050
株幅 Plant width	0.344	−0.026	0.057
叶面积 Leaf area	0.399	0.195	0.109
比叶重 Specific leaf weight	−0.088	−0.376	0.441
MDA 含量 Malondialdehyde content	−0.218	0.485	0.367
SOD 活性 Superoxide dismutase activity	−0.098	0.508	0.088
POD 活性 Peroxidase activity activity	−0.367	0.256	0.073
CAT 活性 Catalase activity activity	−0.126	0.264	0.383
可溶性糖含量 Soluble sugar content	−0.292	−0.254	−0.143
可溶性蛋白含量 Soluble proteins content	0.079	0.038	−0.678
特征值 Eigen value	5.235	2.200	1.740
权重 Weight	0.436	0.183	0.145
方差贡献率/% Variance contribution rate	43.628	18.335	14.502
累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate	43.628	61.963	76.465

2.3.2 隶属函数分析 根据主成分分析结果再进行隶属函数分析,计算出 3 种地被植物各处理的综合指标值[$CI(X)$]、隶属函数值(μ_x)、权重以及综合评价值(D),并基于 D 值对 3 种植物的耐阴性进行排序,D 值越大表示该植物在该遮阴率下适应性越好,结果见表 4。由表 4 可知,朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜分别在 50%,70%和 90%遮阴率下 D 值最高,表明蔷薇科 3 种地被植物均有良好的耐

阴性，龙芽草和蛇含委陵菜耐阴性更强。

表 4　蔷薇科 3 种地被植物耐阴性的隶属函数分析

Table 4　Membership function analysis of shade tolerance of three groundcover species in Rosaceae

植物种类 Plant species	遮阴率/% Shading rate	综合指标值 Comprehensive index value			隶属函数值 Subordinate function value			综合评价值(D) Comprehensive evaluation value	排序 Ranking
		$CI(1)$	$CI(2)$	$CI(3)$	μ_1	μ_2	μ_3		
朝天委陵菜 *P. supina*	30	−1.859	−0.686	0.889	0.010	0.000	1.000	0.150	4
	50	0.946	−0.051	−1.364	1.000	0.237	0.251	0.516	1
	70	−0.908	1.291	−2.119	0.346	0.738	0.000	0.286	2
	90	−1.889	1.991	−1.234	0.000	1.000	0.294	0.226	3
龙芽草 *A. pilosa*	30	−3.105	1.652	1.723	0.000	1.000	1.000	0.328	3
	50	1.516	−0.507	−0.596	0.620	0.000	0.000	0.270	4
	70	4.348	0.689	1.592	1.000	0.554	0.944	0.675	1
	90	3.308	1.594	0.800	0.860	0.973	0.602	0.641	2
蛇含委陵菜 *P. kleiniana*	30	−2.624	−0.912	1.766	0.000	0.725	1.000	0.278	4
	50	0.301	−2.411	−0.363	1.000	0.000	0.171	0.461	2
	70	0.174	−2.310	−0.292	0.957	0.049	0.198	0.455	3
	90	−0.208	−0.342	−0.802	0.826	1.000	0.000	0.544	1

3　讨论与结论

3.1　不同遮阴处理对植物形态指标的影响

植物在低光照条件下能够成活和生存的能力通常被称为耐阴[18]。在一定的遮阴条件下，植物通常会通过加大与光的接触面积，如通过改变株高、冠幅、叶长和叶面积等形态指标来增加对光的吸收量，进而适应弱光环境。叶片是植物进行光合作用的关键部位，对光照的变化十分敏感，当光照条件改变时，叶片的形态和结构也会相应调整以适应其环境的变化[7]。本研究中蔷薇科 3 种地被植物的叶长、叶宽和叶面积均随着遮阴程度的增大呈现先上升后下降的趋势，这说明过强的光照抑制了植物叶片的生长，也可能是植物在全光照下主动减缓了叶片的生长速度；之后，随着遮阴程度的增加，在一定范围内，植物为了增强对光能的捕捉而逐渐增大叶面积；但当遮阴程度超出植株耐受范围后，植株捕获的光能不足以维持自身生长，叶面积随之下降[19-20]。同样，随着遮阴程度的增加，蔷薇科 3 种地被植物的株高和株幅也呈现先上升后下降的趋势，蛇含委陵菜和龙芽草的株高在 70%遮阴率下最高，这与矮滨菊（*Leucanthemum vulgare* 'Short'）[21]在不同光照强度处理下的植物形态变化相似，表明适度遮阴能促进植物快速向上生长，从而得到充足的光能，这是植物对荫蔽环境的适应策略，同时植物为了获得更多的光照，将吸收的碳源更多地用于垂直生长而不是向下辐射；而当遮阴程度超过植株的耐受范围后，株高和株幅便逐渐下降[22]。

蔷薇科 3 种地被植物的比叶重随着光照减弱呈现下降趋势，说明遮阴条件下，叶片内的营养积累减少、叶片变薄，植株通过增大叶面积来提高对光的捕捉能力，增强光合作用，以便获得更多的光能来维持自身生长，这与前人对马铃薯（*Solanum tuberosum*）[23]和白三叶（*Trifolium repens*）[24]的研究结果一致。

3.2　不同遮阴处理对植物抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）和过氧化物酶（POD）等共同构成了植物体内的保护性酶系统，维持着细胞内活性氧产生及清除过程的动态平衡，保护植物细胞免受损伤[25]。SOD 是植物细胞体内清除活性氧的第一道防线，SOD 能将 O_2^- 转化为 H_2O_2 和 O_2，随后产生的 H_2O_2 可以刺激 POD 和 CAT 活性增强，三者协同作用可以清除植物体内过多的活性氧[26-27]。研究抗氧化酶活性及丙二醛（MDA）含量，可以评估植株受到活性氧伤害和细胞膜脂质遭受伤害的程度，如短期的弱光胁迫会导致紫心甘薯叶片的 SOD 和 CAT 活性下降，MDA 积累量上升，这对叶片的生理机能造成了一定的毒害作用[28]。当植物激活自身的抗氧化防御机制时，通常会伴随膜脂质过氧化反应的发生，而 MDA 作为这一反应的最终产物，其含量的高低往往反映了细胞膜脂质过氧化的程度以及植物在逆境胁迫下受损的情况。这表明 MDA 含量可以作为衡量植物细胞膜受损程度及其在逆境条件下受伤害情况的一个重要指标[29-30]。本试验中，全光照条件下 3 种地被植物的 MDA 含量最高，说明尽管有热耗散和活性氧清除酶系统等光保护机制的存在，但在光照较强时，仍能引起植物细胞较严重的膜脂质过氧化[31]。而随着遮阴程度的增加，3 种地被植物的 MDA 含

量先降后升,且在 50%遮阴率处理下最低,说明此时植物细胞膜脂质过氧化程度较小,适度遮阴有利于植物的生长,这与前人对皂荚幼苗(*Gleditsia sinensis*)的研究结果[1]相同。

全光照下蔷薇科 3 种地被植物的抗氧化酶活性均最高,这表明较强光照下,植株主动提高抗氧化酶活性,消除超氧阴离子自由基和 MDA 等有害物质,抑制膜脂过氧化,缓解氧化对细胞膜系统产生的伤害[32]。随着遮阴程度增大,朝天委陵菜的 SOD、POD 和 CAT 活性均先降后升,且在 50%遮阴率处理下活性最低,表明适度遮阴对植物细胞膜系统伤害较小,植物体内的抗氧化酶活性维持在较低的水平,而过强和过弱的光照均对朝天委陵菜的细胞膜系统带来负面影响,这与前人对花叶玉簪(*Hosta* × *hybrida* 'So Sweet')的研究结果[33]一致。随遮阴程度增加,龙芽草的 POD 和 CAT 活性呈先下降后上升的趋势,均在 50%遮阴率下活性最低,SOD 活性则随遮阴程度加重而不断下降,这同样表明适度遮阴有利于缓解光照对植株的伤害,而在受到的遮阴胁迫较重时,龙芽草植物细胞内过氧化物含量增加,此时植株主要由 POD 和 CAT 发挥清除作用。蛇含委陵菜的 SOD、POD 和 CAT 活性变化趋势与朝天委陵菜一致,且在 70%遮阴率下活性最低,表明这 3 种抗氧化酶在蛇含委陵菜细胞内有着明显的协同作用,这与陈斌等[34]对 4 种鸭跖草科(Commelinaceae)植物的研究结论一致。

3.3 不同遮阴处理对植物渗透调节物质的影响

在逆境条件下,良好的渗透调节能力是植物具备较强抗逆性的重要特征之一。可溶性糖和可溶性蛋白作为植物体内重要的渗透调节物质,在逆境胁迫下大量积累,有助于维持细胞的水分含量、代谢平衡和保持细胞内的渗透压,并提升代谢所需酶的活性,从而帮助植物更好地适应不利环境[35]。可溶性糖是光合作用的直接产物,是参与糖代谢的主要形式,可满足植物生命活动需要,并起到调节渗透压的作用。前人研究发现,遮阴条件下蝴蝶兰(*Phalaenopsis aphrodite*)[36]和三角梅(*Bougainvillea spectabilis*)[37]的可溶性糖含量呈下降趋势,是因为遮阴处理后植株光合效率降低而呼吸作用增强,导致光合产物减少。本研究中,随遮阴程度增加,蔷薇科 3 种地被植物可溶性糖含量呈下降趋势,全光照下的可溶性糖含量显著高于遮阴处理,说明光照强度对糖的累积有显著作用,且光合有效辐射强度越大,糖分累积越多。

可溶性蛋白作为关键的渗透调控物质,其在植物体内的积累可以增强细胞的防水性,并可维持生物膜的稳定性。它还能反映叶片氮的代谢程度及其活力的强弱,是植物光合作用的主要产物[38]。黄永韬等[39]研究发现,遮阴处理下 2 个主要因素导致了可溶性蛋白含量的降低:首先,光量子的减少导致植物叶片无法接收到充足的阳光,进而影响光合作用,使得光合产物无法积聚;其次,由于呼吸功能的增强,部分可溶性蛋白被消耗,导致其积累减少。此外,有研究发现,在逆境中,植物体内的蛋白质生成受到阻碍,降解速度加快,致使游离氨基酸含量上升,进而导致可溶性蛋白含量增加[40]。本研究中,随着遮阴程度的增加,蔷薇科 3 种地被植物的可溶性蛋白含量呈现先降后升趋势,其中下降可能是由于光合作用减弱或呼吸作用加强导致可溶性蛋白积累量减少且消耗量上升;而可溶性蛋白含量上升,则可能是由于逆境下蛋白质的合成遭到抑制而使得游离脯氨酸含量上升,这与前人对双色木番茄(*Solanum wrightii*)的研究结果[41]一致。

3.4 蔷薇科植物的耐阴性综合评价

利用主成分分析法及隶属函数分析法能客观地综合分析植物的抗逆性,2 种方法能够削弱不同评价指标间潜在的相互影响,弥补单一指标评价的片面性。本研究对蔷薇科 3 种地被植物的形态和生理共 12 个指标进行主成分分析,并结合隶属函数分析法对 3 种植物的耐阴性进行了综合评价,精确计算出 3 种植物的耐阴性度量值,发现朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜分别在 50%,70%和 90%的遮阴率下总体生长情况最好。

综上所述,朝天委陵菜、龙芽草和蛇含委陵菜均具有一定的耐阴性,且适度遮阴有利于其生长。随着遮阴程度增大,3 种植物均通过形态和生理指标的变化来适应光照强度的变化,但不同植物对遮阴环境的响应不尽相同。对 3 种植物的耐阴性进行综合评价,寻找最适宜各自生长的遮阴率,有利于其今后在不同程度遮阴环境下更好地应用。此外,为保证结果的准确性,今后还可通过测定光合指标和叶片结构等全面评估植物的耐阴性。

[参考文献]

[1] 肖美,吕元亚,秦川,等.遮阴对皂荚幼苗生长和生化特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2024,44(8):73-83.
XIAO M,LÜ Y Y,QIN C,et al. Effects of shading on growth and biochemical characteristics of *Gleditsia sinensis* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Tech-

nology，2024，44(8)：73-83.

[2] 苏雪痕. 园林植物耐阴性及其配置[J]. 北京林学院学报，1981，3(2)：63-70.
SU X H. Shade tolerance of garden plants and its configuration [J]. Journal of Beijing Forestry University，1981，3(2)：63-70.

[3] 刘永金，叶自慧，李许文，等. 深圳市野生观赏地被植物资源调查与评价[J]. 中国园林，2013，29(11)：115-119.
LIU Y J，YE Z H，LI X W，et al. Investigation and evaluation of wild ornamental groundcover plant resources in Shenzhen[J]. Chinese Landscape Architecture，2013，29(11)：115-119.

[4] CHAI S F，TANG J M，MALLIK A，et al. Eco-physiological basis of shade adaptation of *Camellia nitidissima*，a rare and endangered forest understory plant of Southeast Asia[J]. BMC Ecology，2018，18(1)：5.

[5] 张云，夏国华，马凯，等. 遮阴对堇叶紫金牛光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报，2014，25(7)：1940-1948.
ZHANG Y，XIA G H，MA K，et al. Effects of shade on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Ardisia violacea*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2014，25(7)：1940-1948.

[6] 钱滓仙，李学孚，吴月燕，等. 遮阴对樟叶槭容器苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业学报，2015，31(3)：667-672.
QIAN P X，LI X F，WU Y Y，et al. Influence of shading on growth and physiological characteristics of container seedlings of *Acer cinnamomifolium*[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences，2015，31(3)：667-672.

[7] 张朝铖，蒋倩，吴志，等. 4 种观赏草的耐阴特性研究及评价[J]. 草业学报，2019，28(7)：60-72.
ZHANG C C，JIANG Q，WU Z，et al. Studies of the shade-tolerance of four ornamental grass and sedge cultivars[J]. Acta Prataculturae Sinica，2019，28(7)：60-72.

[8] 尚三娟，王义婧，王楠，等. 光照强度对紫斑牡丹生理及生长特性的影响[J]. 生态学杂志，2020，39(9)：2963-2973.
SHANG S J，WANG Y J，WANG N，et al. Effects of light intensity on physiological and growth characteristics of *Paeonia suffruticosa* var. *papaveracea*[J]. Chinese Journal of Ecology，2020，39(9)：2963-2973.

[9] 黄河腾，黄剑坚，陈杰，等. 不同遮阴环境下木奶果幼苗生长与生理生化的响应[J]. 生态学杂志，2020，39(5)：1538-1547.
HUANG H T，HUANG J J，CHEN J，et al. Growth，physiological and biochemical response of *Baccaurea ramiflora* Lour. seedlings to different shading environments[J]. Chinese Journal of Ecology，2020，39(5)：1538-1547.

[10] 赵珊，孙绪，刘佳，等. 蛇含委陵菜抗炎活性部位的筛选及化学成分研究[J]. 西北药学杂志，2024，39(3)：10-15.
ZHAO S，SUN X，LIU J，et al. Screening of anti-inflammatory fractions and chemical constituents from *Potentilla kleiniana* Wight. et Arn[J]. Northwest Pharmaceutical Journal，2024，39(3)：10-15.

[11] 吴嘉，张在其，余黄合，等. 委陵菜属植物的化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志，2022，47(6)：1509-1538.
WU J，ZHANG Z Q，YU H H，et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Potentilla*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica，2022，47(6)：1509-1538.

[12] 周杰，方英玉，尹秀梅，等. 龙牙草石油醚提取物中的挥发成分研究[J]. 延边大学学报(自然科学版)，2022，48(4)：354-357.
ZHOU J，FANG Y Y，YIN X M，et al. The investigation on volatile components analysis of *Agrimonia pilosa* Ledeb petroleum ether extract[J]. Journal of Yanbian University(Natural Science Edition)，2022，48(4)：354-357.

[13] 王亚楠，董丽娜，丁彦芬，等. 遮阴对 4 种紫堇属植物光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报，2020，31(3)：769-777.
WANG Y N，DONG L N，DING Y F，et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of four *Corydalis* species[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2020，31(3)：769-777.

[14] 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.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing：Higher Education Press，2000.

[15] 刘光杨，周炜，陈磊，等. 11 个睡莲品种的耐阴性综合评价[J]. 植物资源与环境学报，2020，29(1)：44-51.
LIU G Y，ZHOU W，CHEN L，et al. Comprehensive evaluation of shade tolerance of 11 *Nymphaea tetragona* cultivars [J]. Journal of Plant Resources and Environment，2020，29(1)：44-51.

[16] 雷燕. 地被菊耐荫性研究 [D]. 北京：北京林业大学，2015.
LEI Y. Study on shade tolerance of ground-cover chrysanthemum[D]. Beijing：Beijing Forestry University，2015.

[17] 赵昕玥，王晓敏，赵云雅，等. 不同地区小茴香苗期耐盐性综合评价及耐盐指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2024，52(7)：125-135.
ZHAO X Y，WANG X M，ZHAO Y Y，et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of fennel at seedling stage in different regions and screening of salt-tolerant indexes[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)，2024，52(7)：125-135.

[18] 赵康宁，刘丹丹. 植物的耐阴性评价[J]. 南华大学学报(自然科学版)，2020，34(3)：51-59.
ZHAO K N，LIU D D. Assessment of plant shade tolerance [J]. Journal of University of South China(Science and Technology)，2020，34(3)：51-59.

[19] 刘雯雯，饶丹丹，吴二焕，等. 遮阴对栾椤幼苗的叶片性状及光合特性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，2024，44(2)：52-62.
LIU W W，RAO D D，WU E H，et al. Effects of shading on leaf traits and photosynthetic characteristics of *Alsophila spinulosa* seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Nat Sci Ed)，2024，44(2)：52-62.

[20] 郭玉洁，董彦娜，王琦，等. 藿香耐荫性研究[J]. 河北农业大学学报，2018，41(2)：62-66，115.

GUO Y J, DONG Y N, WANG Q, et al. Study on the shade tolerance of *Agastache rugosa*[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2018, 41(2): 62-66, 115.

[21] 姜珊,崇晓泽,徐拾佳,等.遮阴对矮滨菊形态特征和生理特性的影响[J].林业与生态科学,2018,33(2):208-212.
JIANG S, CHONG X Z, XU S J, et al. Effect of shading on morphological and physiological characteristics of *Leucanthemum vulgare* 'Short'[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2018, 33(2): 208-212.

[22] 蔡锡安,饶兴权,刘占锋,等.遮荫处理对梅叶冬青叶片形态、光合特性和生长的影响[J].热带亚热带植物学报,2020,28(1):25-34.
CAI X A, RAO X Q, LIU Z F, et al. Effects of shading on leaf morphology, photosynthetic characteristics, and growth of *Ilex asprella*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2020, 28(1): 25-34.

[23] VOS J, VAN DER PUTTEN P E L. Effects of partial shading of the potato plant on photosynthesis of treated leaves, leaf area expansion and allocation of nitrogen and dry matter in component plant parts[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 14(3): 209-220.

[24] 尹慧,安莹,陈雅君,等.不同遮阴强度下白三叶形态特征和生长动态[J].中国草地学报,2015,37(5):86-91.
YIN H, AN Y, CHEN Y J, et al. Effect of light intensity on morphological characteristic and growth index of *Trifolium repens* l. cv. 'Longping No. 1'[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(5): 86-91.

[25] 徐晶,谢彦兵.植物体内保护酶系统的研究[J].海峡药学,2016,28(9):40-42.
XU J, XIE Y B. Study on protective enzyme system in plants[J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2016, 28(9): 40-42.

[26] 杨野,郭再华,耿明建,等.铝胁迫下不同耐铝小麦品种活性氧代谢差异及与小麦耐铝性的关系[J].生态环境学报,2010,19(1):177-182.
YANG Y, GUO Z H, GENG M J, et al. Active oxygen metabolism differences and Al tolerance of different Al-tolerant wheat under aluminum stress[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(1): 177-182.

[27] 陈雪梅,林玮,涂智金,等.遮阴对南山茶与红皮糙果茶幼苗生长及生理特性的影响[J].亚热带植物科学,2023,52(2):101-107.
CHEN X M, LIN W, TU Z J, et al. Effects on growth and physiological characteristics of *Camellia semiserrata* and *C. crapnelliana* seedlings under different shadings[J]. Subtropical Plant Science, 2023, 52(2): 101-107.

[28] 侯夫云,董顺旭,张海燕,等.遮荫条件下紫心甘薯的抗氧化防御系统研究[J].山东农业科学,2013,45(6):48-50.
HOU F Y, DONG S X, ZHANG H Y, et al. Research on antioxidant defense system of purple sweet potato under shading conditions[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(6): 48-50.

[29] 曹艳平,朱立新,贾克功.叶水势、丙二醛含量及保护酶活性与桃砧木抗旱性的关系[J].北京农学院学报,2007,22(3):7-11.
CAO Y P, ZHU L X, JIA K G. Relations among water potential, MDA, protective enzymes activities and drought-resistance of peach rootstocks[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2007, 22(3): 7-11.

[30] 肖博文,于成,茹柯耶姆·阿布杜吉力力,等.断根及复水后骆驼刺的生理生长响应特征[J].草业科学,2025,42(1):77-89.
XIAO B W, YU C, RUKEYEMU A, et al. The growth and physiological responses of *Alhagi sparsifolia* to root cutting and subsequent rewatering[J]. Pratacultural Science, 2025, 42(1): 77-89.

[31] 孟祥海,张跃进,皮莉,等.遮荫对半夏叶片光合色素与保护酶活性的影响[J].西北植物学报,2007,27(6):1167-1171.
MENG X H, ZHANG Y J, PI L, et al. Effect of shading on the photosynthetic pigment and protective enzyme activities in *Pinellia ternata* leaves[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(6): 1167-1171.

[32] 吕晋慧,李艳锋,王玄,等.遮阴处理对金莲花生长发育和生理响应的影响[J].中国农业科学,2013,46(9):1772-1780.
LÜ J H, LI Y F, WANG X, et al. Impact of shading on growth, development and physiological characteristics of *Trollius chinensis* Bunge[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(9): 1772-1780.

[33] 陈叶.玉簪属植物耐阴性研究概况及展望[J].江苏农业科学,2021,49(15):47-52.
CHEN Y. Research overview and outlook of shade tolerance of *Hosta* species[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(15): 47-52.

[34] 陈斌,薛晴,李子葳,等.光强对4种鸭跖草科植物叶片生理特性和超微结构的影响[J].草地学报,2021,29(2):281-292.
CHEN B, XUE Q, LI Z W, et al. Effects of light intensities on physiological characteristics and ultrastructure of four Commelinaceae plants[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 281-292.

[35] 李立婷,刘文静,张鸽香.不同种源流苏树对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价[J].中国野生植物资源,2022,41(10):19-24,29.
LI L T, LIU W J, ZHANG G X. Physiological response and tolerance evaluation of *Chionanthus retusus* from different provenances under waterlogging stress[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(10): 19-24, 29.

[36] 董效文.遮阴对蝴蝶兰生理效应的影响[J].山西农业科学,2016,44(2):182-183,198.
DONG X W. Effect of overshadow on physiological effect of butterfly orchid[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 182-183, 198.

[37] 胡龙胜,汪沁林,熊雪芬,等.遮阴对云南紫三角梅生长生理特性的影响[J].北方园艺,2022(14):66-75.
HU L S, WANG Q L, XIONG X F, et al. Effects of shading on the growth and physiological characteristics of Yunnan purple *Bougainvillea spectabilis*[J]. Northern Horticulture, 2022(14): 66-75.

[38] 刘波，张庆费，夏檑. 11 种城市木本植物叶片生理物质对遮荫的响应 [J]. 浙江林业科技，2007，27(6)：15-18.
LIU B，ZHANG Q F，XIA L. Effects of shading on physiological materials of 11 urban ligneous plant leaf[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology，2007，27(6)：15-18.

[39] 黄永韬，杨好珍，黄永芳，等. 不同遮阴处理对 3 种茶花生理特性的影响[J]. 广东林业科技，2012，28(5)：16-21.
HUANG Y T，YANG H Z，HUANG Y F，et al. Effects of the physiological indices in three varieties of *Camellia* by different shade treatments[J]. Guangdong Forestry Science and Technology，2012，28(5)：16-21.

[40] 潘月，张宪权，叶康，等. 不同八仙花品种对遮阴和强光处理的生理响应与评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2021，50(1)：36-48.
PAN Y，ZHANG X Q，YE K，et al. Physiological responses of ten *Hydrangea macrophylla* cultivars to shading and evaluation of strong light tolerance[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Nat Sci Ed)，2021，50(1)：36-48.

[41] 郭品湘，尹婷，粟春青，等. 遮阴对双色木番茄幼苗生理特性的影响[J]. 森林与环境学报，2020，40(1)：76-82.
GUO P X，YIN T，SU C Q，et al. Effects of shade on the physiological characteristics of *Solanum wrightii* seedlings [J]. Journal of Forest and Environment，2020，40(1)：76-82.

(责任编辑：窦春蕊)

(上接第 104 页)

[22] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2006.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing：Higher Education Press，2006.

[23] 刘启军. 四川红杉径向生长对气候变化的响应研究[J]. 绿色科技，2023，25(15)：136-139.
LIU Q J. Response of radial growth of *Larix mastersiana* to climate change[J]. Journal of Green Science and Technology，2023，25(15)：136-139.

[24] 章进峰. 不同林龄杉木檫树混交林内檫树的生长规律[J]. 亚热带农业研究，2023，19(2)：114-119.
ZHANG J F. Growth rhythm of *Sassafras tzumu* in *Cunninghamia lanceolata* and *S. tzumu* mixed forest at different ages[J]. Subtropical Agriculture Research，2023，19(2)：114-119.

[25] 石建周，刘贤德，田青，等. 祁连山中部青海云杉年内径向生长季节变化及其对环境因子的响应[J]. 水土保持学报，2022，36(2)：261-267.
SHI J Z，LIU X D，TIAN Q，et al. Seasonal variation of annual radial growth of *Picea crassifolia* and its response to environmental factors in the central Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2022，36(2)：261-267.

[26] MARTÍNEZ-VILALTA J，SALA A N，ASENSIO D，et al. Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants：a global synthesis[J]. Ecological Monographs，2016，86(4)：495-516.

[27] 王晨，李耀翔，王子纯，等. 小兴安岭针阔混交天然次生林主要树种 NSC 变异来源分析[J]. 森林工程，2021，37(3)：36-43.
WANG C，LI Y X，WANG Z C，et al. Analysis of NSC variation sources of main tree species in Xiaoxing'an Mountains conifer and broadleaf mixed natural secondary forest[J]. Forest Engineering，2021，37(3)：36-43.

[28] 王凯，雷虹，夏扬，等. 杨树幼苗非结构性碳水化合物对增加降水和氮添加的响应[J]. 应用生态学报，2017，28(2)：399-407.
WANG K，LEI H，XIA Y，et al. Responses of non-structural carbohydrates of poplar seedlings to increased precipitation and nitrogen addition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2017，28(2)：399-407.

[29] 王逸然，郑成洋，曾发旭. 内蒙古白音敖包沙地云杉生长季非结构性碳水化合物含量动态[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2016，52(5)：967-976.
WANG Y R，ZHENG C Y，ZENG F X. Seasonal dynamic changes of non-structural carbohydrate in tissues of *Picea mongolica* in Baiyinaobao[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2016，52(5)：967-976.

[30] 王文娜，李俊楠，王会仁，等. 不同树种叶片非结构性碳水化合物季节动态比较[J]. 东北林业大学学报，2014，42(4)：46-49，108.
WANG W N，LI J N，WANG H R，et al. Seasonal dynamics of leaf nonstructural carbohydrate content in four temperate tree species[J]. Journal of Northeast Forestry University，2014，42(4)：46-49，108.

[31] 王凯，宋琪，张日升，等. 科尔沁沙地防护林主要树种的非结构性碳水化合物分布特征[J]. 林业科学，2020，56(12)：39-48.
WANG K，SONG Q，ZHANG R S，et al. Distribution characteristics of non-structural carbohydrate in main tree species of shelterbelt forests in Horqin sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae，2020，56(12)：39-48.

(责任编辑：窦春蕊)