



贺雪仪,欧静.遮阴与种植密度对紫萼光合生理的影响[J].江西农业大学学报,2026,48(2):432-444.

HE X Y,OU J.Effects of shading and planting density on the photosynthetic physiology of *Hosta ventricosa*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(2):432-444.

遮阴与种植密度对紫萼光合生理的影响

贺雪仪,欧 静*

(贵州大学 林学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:【目的】探讨紫萼(*Hosta ventricosa* (Salisb.) Stearn)在不同遮阴与种植密度下的光合生理响应,为紫萼林下栽培与园林应用提供理论与实践依据。【方法】设置3种遮阴处理:透光率30%~35%(L1)、45%~50%(L2)和60%~70%(L3);3种植植密度:行株距10 cm×10 cm(D1)、12 cm×12 cm(D2)和21 cm×21 cm(D3),通过测定并分析紫萼叶片的光合气体交换参数、叶绿素荧光、叶绿素含量、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性及形态指标,探讨遮阴、密度及其交互作用对紫萼生长与光合适应的影响。【结果】(1)生理适应性方面,紫萼在中等遮阴(L2,透光率45%~50%)条件下表现出最优光合性能(净光合速率达5.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),并通过提高叶绿素总量、降低叶绿素a/b比值(1.91~2.15),以及激活抗氧化酶系统(如POD活性达388.4 U/g FW)来增强弱光适应性与氧化胁迫抵御能力;(2)栽培模式方面,中等密度(D2)结合适度遮阴(L2)可显著提升水分利用效率(最高达8.73 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$),实现生物量最大化积累;(3)双因素分析表明,遮阴与密度的交互作用显著,中等遮阴与中等密度(L2+D2)组合最能促进紫萼光合生理功能的整体优化与形态建成。【结论】紫萼对遮阴与种植密度的响应具有明显的生理可塑性与资源权衡特征。结果表明,中等遮阴(L2)与中等密度(D2)组合(L2+D2)能够有效协调群体光分布、缓解光抑制、增强抗氧化防御并提高水分利用效率,是实现个体优质生长与群体高产稳产的较优栽培配置。该结果可为喀斯特地区林下经济、复层景观构建及生态修复中紫萼的科学栽培提供直接指导。

关键词:紫萼;遮阴处理;种植密度;光合特性;生理生化指标

中图分类号:S682.1;Q945 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2026)02-0432-13

CSTR:32399.14.aauj.2026036



Effects of shading and planting density on the photosynthetic physiology of *Hosta ventricosa*

HE Xueyi, OU Jing*

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the photosynthetic physiological response mechanisms of *Hosta ventricosa* (Salisb.) Stearn under different light conditions and planting densities, in order to provide

收稿日期:2025-10-30 修回日期:2026-01-17 接受日期:2026-01-22

基金项目:贵州省林业科研项目黔林科合[2023]09号和贵州省科技厅人才项目黔科合人才[CXTD(2025)053]

Project supported by Guizhou Provincial Forestry Research Project [Grant No. QLKH-2023-09] and Guizhou Provincial Science and Technology Talent Program [Grant No. CXTD-2025-053]

作者简介:贺雪仪,硕士生,orcid.org/0009-0004-3382-6527,1141706800@qq.com;*通信作者:欧静,教授,博士,主要从事园林植物与应用的研究,orcid.org/0000-0002-3924-5094,coloroj@126.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

theoretical and practical guidance for its understory cultivation and landscape application. [Method] Three shading treatments were set: 30%–35% transmittance (L1), 45%–50% (L2), and 60%–70% (L3), along with three planting densities: 10 cm×10 cm (D1), 12 cm×12 cm (D2), and 21 cm×21 cm (D3). By analyzing photosynthetic gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence, chlorophyll content, osmotic adjustment substances, antioxidant enzyme activities, and morphological indicators of *Hosta ventricosa* leaves, we investigated the effects of shading, planting density, and their interaction on the growth and photosynthetic adaptation of the plant. [Result] (1) In terms of physiological adaptability, *H. ventricosa* exhibited optimal photosynthetic performance under moderate shading (L2, 45%–50% light transmittance), with the net photosynthetic rate reaching $5.55 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. It enhanced low-light adaptation and oxidative stress resistance by increasing total chlorophyll content, reducing the chlorophyll a/b ratio (1.91–2.15), and activating the antioxidant enzyme system (e.g., POD activity reached 388.4 U/g FW). (2) In cultivation mode, moderate density (D2) combined with moderate shading (L2) significantly improved water-use efficiency (up to $8.73 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) and maximized biomass accumulation. (3) Two-factor analysis showed a significant interaction between shading and density, with the combination of moderate shading and moderate density (L2+D2) most effectively promoting the overall optimization of photosynthetic physiological function and morphological development. [Conclusion] The response of *H. ventricosa* to shading and planting density demonstrates clear physiological plasticity and resource trade-off characteristics. The results indicate that the combination of moderate shading (L2) and moderate density (D2) (L2+D2) can effectively coordinate light distribution within the population, alleviate photoinhibition, enhance antioxidant defense, and improve water-use efficiency. This represents a superior cultivation configuration for achieving both high-quality individual growth and stable population yield. The findings provide direct guidance for the scientific cultivation of *H. ventricosa* in understory economy, multi-layer landscape construction, and ecological restoration in karst regions.

Keywords: *Hosta ventricosa*; shading treatment; planting density; photosynthetic characteristics; physiological and biochemical indices

【研究意义】贵州省森林覆盖率达63%,为林下经济发展提供了得天独厚的条件。紫萼(*Hosta ventricosa* (Salisb.) Stearn)是贵州喀斯特地区特色乡土花卉,其叶形优美、花色淡雅,观赏价值高,适于园林绿化与鲜切花生产;同时药用价值突出,含黄酮类、皂苷类等活性成分,具有抗炎、抗氧化等功效^[1];此外,紫萼耐阴性强和适应性广,这些优点使其成为喀斯特地区林下种植的理想物种^[2]。贵州多地已探索紫萼产业化模式,如石龙村通过“公司+合作社+农户”的形式,开发鲜切花、盆栽及药用产品,有效促进了农民增收^[3]。【前人研究进展】前人研究^[4–5]表明,玉簪在夏季强光下会出现焦边、光合受抑甚至地上部分枯死等现象。为应对强光胁迫,玉簪叶片表皮蜡质可发挥保护作用。曲玉盈等^[6]研究发现,表皮蜡质可通过反射和散射过剩光能,降低叶片温度、减轻光抑制;平晓帆等^[7]、邵美妮等^[8]研究发现,其能维持较高的PSII最大光化学效率(F_v/F_m)及净光合速率。此外,光照强度也可调控玉簪叶片蜡质含量与组成,Xu等^[9]研究发现,*H. 'Halcyon'*可通过动态调节蜡质含量适应更宽的光照范围。在干旱与强光协同胁迫下,蜡质通过影响气孔行为及水分散失,间接调控光合格局^[10]。目前,关于种植密度对植物生长影响的研究主要聚焦于地上部与地下部:地上部涉及植株形态、光热资源利用、生物量与干物质积累等^[11–12];地下部主要包括根系生物量及形态分布等^[13]。Ma等^[14]研究发现,随着种植密度增加,冠层内部透光性会受到抑制,加剧植株间对光热资源的竞争,导致株高增加、茎粗减小,产量呈先增后减的趋势。王鸿宇等^[15]研究证实,适宜的种植密度能促进根系生长,进而提高作物产量。

【本研究切入点】植物与光环境的关系一直是植物生理生态研究中的热点^[17]。在玉簪栽培选育中,光适应性直接影响植株形态与养分储备能力^[12],适宜的种植密度能够有效提高植物花叶产量。不同郁闭度与种植密度影响其光合效率、生物量及次生代谢产物积累,进而决定经济与生态效益。【拟解决的关键问题】本研究通过分析不同遮阴与种植密度条件下紫萼的光合生理响应,揭示其适应机制,为本土植物资源的高效开发提供科学依据,助力贵州林下经济可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2024年3—9月在贵州大学试验大棚(26°25′39.62″N, 106°40′5.81″E)进行。试验地区属亚热带季风气候, 年均气温14.7℃, 年均降水量1200 mm, 年均日照时数1146.9 h, 无霜期270 d, 具有终年温凉湿润的特点。试验在透光通风良好的PE塑料薄膜大棚内进行, 试验期间平均气温为28.6℃。2024年3月下旬, 选择植株生长一致、长势良好的紫萼幼苗进行定植。

1.2 试验设计

2024年5月下旬, 选用黑色遮阴网设置3个光照处理, 分别为3针遮阴网L1(遮光率30%~35%), 8针遮阴网L2(遮光率45%~50%), 14针遮阴网L3(遮光率60%~70%), 遮阴率计算公式为(1-单位面积内网眼面积)×100%^[18]。设置种植深度为15 cm, 种植密度设3个水平, 分别为行株距10 cm×10 cm(D1)、12 cm×12 cm(D2)、21 cm×21 cm(D3), 每穴分别定植1株、3株、5株。试验共设9个处理, 每个处理3次重复, 共27个小区。试验期间人工浇水和除草, 确保各小区其他栽培条件一致。遮阴处理60 d后开始各项指标测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合气体交换参数测定

于2024年9月上旬晴朗无风日的08:00—12:00, 使用Li-6800便携式光合仪(Li-cor, USA)测定紫萼向阳健壮叶片的光合气体交换参数。光强设定为600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 每处理取3片健康叶片, 测定指标包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等^[18]。

1.3.2 叶绿素荧光参数测定

于2024年9月上旬晴朗无风日的08:00—12:00, 使用Li-6800便携式光合仪(Li-cor, USA)测定叶片叶绿素荧光参数。每处理取3片健康叶片, 用锡纸包裹, 经过黑暗适应30 min后, 测定初始荧光(F_0)、PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、最大荧光(F_m)等参数^[19]。

1.3.3 生理指标测定

叶绿素含量采用二甲亚砜(DMSO)提取法测定; 可溶性糖采用蒽酮法进行测定; 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸反应法(TBA法)测定; 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定; 超氧化物酶(SOD)活性采用WST-8法测定; 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法(直接法, H_2O_2 降解速率法)测定^[20-21]。

1.3.4 形态指标测定

于2024年9月进行形态指标测定。每处理随机选取3株, 每株选择3片向阳叶片。使用米尺和透明直尺联合测量叶片的叶长、叶宽, 统计每株叶片数量。

试验结束后测量生物量, 每个处理选取3株生长良好的植株, 清洗后擦干, 将地上部与地下部分离并按照处理组标记, 装入信封后置于105℃烘箱中杀青30 min, 随后再60℃烘72 h至恒重, 待冷却后使用万分之一电子天平称量各部分干重, 即为生物量。

1.4 统计与分析

使用Excel软件进行数据处理, 运用SPSS 22.5软件进行统计分析, 运用双因素方差分析(two-way ANOVA)遮阴程度、种植密度及其交互作用对紫萼叶片光合指标及各项生理指标的影响, 运用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同遮阴程度、不同种植密度条件下紫萼叶片光合指标及各项生理指标进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$), 运用Pearson相关性分析不同遮阴程度、不同种植密度条件下紫萼叶片光合指标与各项生理指标的相关性。采用Origin 2024软件作图。

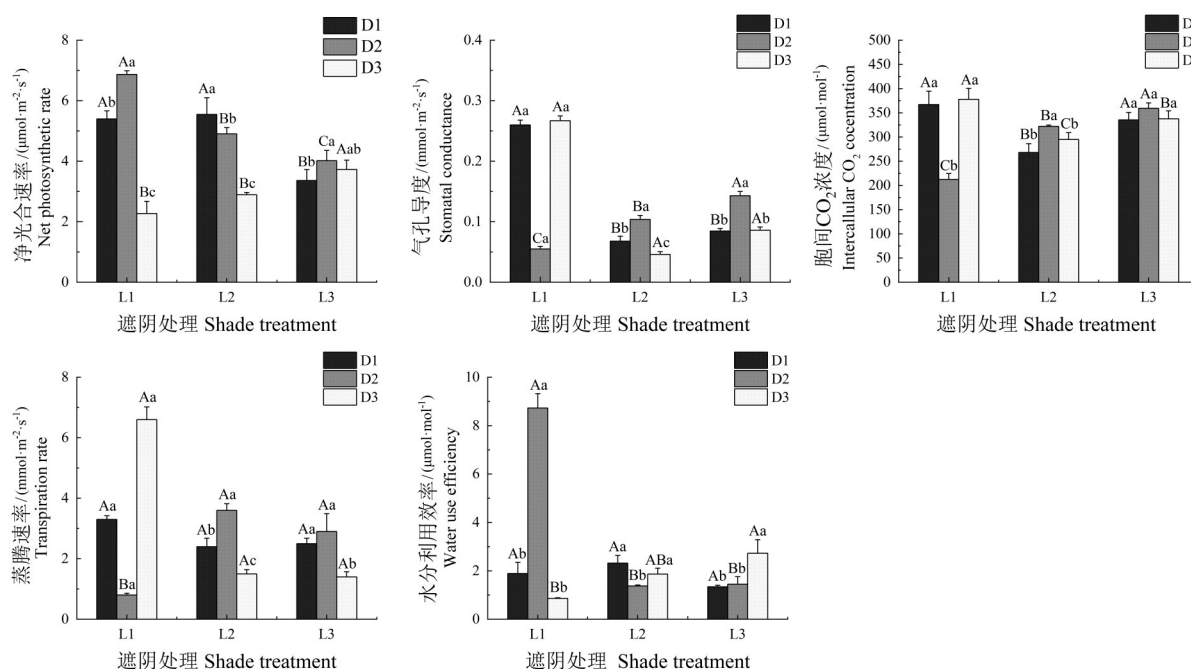
2 结果与分析

2.1 遮阴与密度对紫萼叶片光合指标的影响

2.1.1 不同遮阴程度下紫萼叶片光合气体交换参数对种植密度的响应

紫萼叶片光合指标对遮阴与种植密度处理的响应呈现显著差异, 不同指标表现多样化变化趋势, 反映植株在不同栽培环境下光合生理调控的复杂性(图1)。净光合速率(P_n)的变化显示密度依赖性。在D1条件下呈先升后降趋势, 于L2遮阴时达到峰值5.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 较L1提高12.1%, 表明适度遮阴可

缓解潜在光抑制;但继续加重遮阴至L3则使其下降24.2%。在D2条件下, P_n 随遮阴增强持续降低,L3较L1大幅下降54.9%,反映该密度下植株耐阴性较弱。在D3条件下, P_n 随遮阴增加而上升,L3较L1提高41.7%,说明在自身遮阴严重的群体中,外部遮阴反而可能改善冠层光分布,有利于光合维持。气孔导度(G_s)与胞间 CO_2 浓度(C_i)的变化趋势相似,均反映气孔行为对光强与种植密度的响应。在D1和D3条件下,二者均呈“V”型变化,L1时最高,L3时有所恢复,暗示重度遮阴下气孔限制可能减轻。在D2密度下,两者均随遮阴增强而持续上升, G_s 和 C_i 在L3较L1分别增加40.0%和10.5%,说明在该特定组合下,气孔开度增加成为维持碳获取的主要途径。蒸腾速率(T_r)的响应因种植密度而异,在D1与D3条件下随遮阴增强而下降,L3较L1降幅约25%,与光照减弱一致;但在D2条件下呈现单峰曲线,于L2时达到最高,较L1和L3分别高出20.0%和15.4%,这与该条件下 G_s 的变化模式相符。水分利用效率(WUE)的响应最为复杂,体现出光合与蒸腾过程的协调关系。在D1条件下呈单峰型(L2时最高),D2条件下呈“U”型(L1时最高),D3下则持续上升(L3较L1提高58.1%)。D2L1组合的WUE异常高达8.73 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,表明该处理下实现了高光合与低蒸腾的高效匹配。



不同小写字母表示相同遮阴下不同种植密度紫萼叶片的差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同种植密度下不同遮阴下紫萼叶片差异显著($P<0.05$),误差线使用标准差(SD)。

Different lowercase letters indicate significant differences among planting densities under the same shading level ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among shading levels under the same planting density ($P<0.05$). Error bars represent standard deviation (SD).

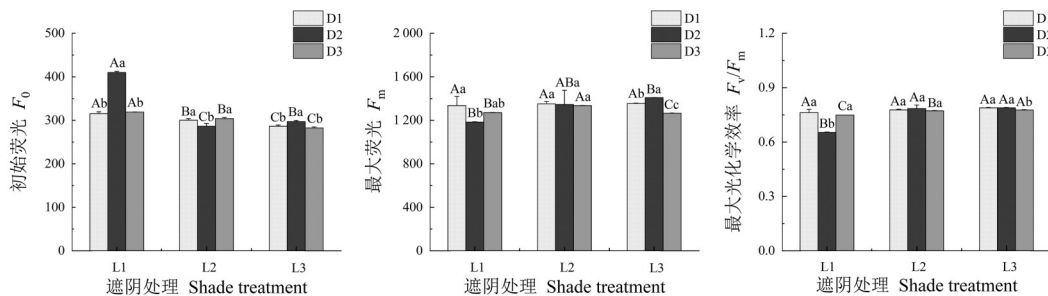
图1 不同遮阴下紫萼叶片光合气体交换参数对种植密度的响应

Fig.1 Response of photosynthetic gas exchange parameters in *Hosta ventricosa* leaves to planting density under different light intensities

2.1.2 不同遮阴程度条件下紫萼叶片荧光参数对种植密度的响应

紫萼叶片叶绿素荧光参数对遮阴与种植密度处理的响应表现出明显差异,反映光系统II(PSII)功能在不同栽培环境下的可塑性调节(图2)。初始荧光(F_0)随密度变化而变化:在D1与D3条件下, F_0 随遮阴增强持续下降(D1降幅15.2%,D3降幅10.4%),表明遮阴可能减轻PSII反应中心的光抑制或损伤。在D2条件下, F_0 呈现先降后升的趋势,L2时较L1下降14.6%,L3虽回升但仍低于L1(总降幅27.5%),提示该密度下轻度遮阴可缓解光压,但重度遮阴可能导致能量耗散增加。最大荧光(F_m)的响应因种植密度而异:在D1与D2条件下, F_m 随遮阴增强逐步上升,L3较L1分别提高11.0%与12.6%,表明遮阴可能促进PSII电子传递链还原,有利光能捕获。在D3条件下, F_m 呈单峰变化,L2时达峰值,较L1与L3分别提高7.8%与4.1%,说明在此条件下适度遮阴最利于维持PSII的功能完整性。最大光化学效率(F_v/F_m)在所有密度

下均随遮阴增强而上升,由L1的0.74~0.76提升至L3的0.78~0.79,增幅介于2.6%~5.4%,表明遮阴环境普遍降低光抑制程度,有助于PSII维持较高的光能转化效率,其中D2L3组合表现最优。从密度效应来看, F_0 在L1与L3处理下均在D2密度处达到峰值(分别为409.84与297.13),高出其他密度21.8%~37.7%,说明中等密度下植株可能面临较强的光竞争或光胁迫; F_m 和 F_v/F_m 则在D2L3组合下同时达到最高值(1408.21与0.79),体现该处理下PSII功能整体较优。



不同小写字母表示相同遮阴下不同种植密度紫萼叶片的差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示相同种植密度下不同遮阴下紫萼叶片差异显著($P < 0.05$),误差线使用标准差(SD)。

Different lowercase letters indicate significant differences among planting densities under the same shading level ($P < 0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among shading levels under the same planting density ($P < 0.05$). Error bars represent standard deviation (SD).

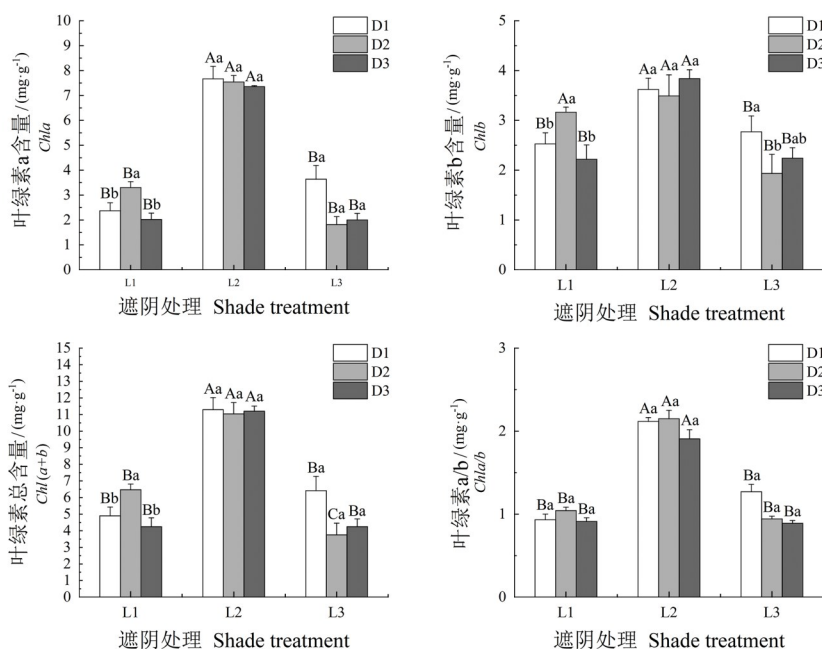
图2 不同遮阴下紫萼叶片荧光参数对种植密度的响应

Fig.2 Response of chlorophyll fluorescence parameters in *Hosta ventricosa* leaves to planting density under different light intensities

2.2 遮阴与密度对紫萼叶片生理指标的影响

2.2.1 不同遮阴下紫萼叶片叶绿素含量对种植密度的响应

叶绿素含量是植物适应和利用生境的重要标志^[20-21]。较高的叶绿素含量以及较低的叶绿素 a/b 值,有利于植物在低光度下吸收更多光来提高光合效率,因此常以叶绿素含量及叶绿素 a/b 值为指标来判定植物的耐阴性^[22]。



不同小写字母表示相同遮阴下不同种植密度紫萼叶片的差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示相同种植密度下不同遮阴下紫萼叶片差异显著($P < 0.05$),误差线使用标准差(SD)。

Different lowercase letters indicate significant differences among planting densities under the same shading level ($P < 0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among shading levels under the same planting density ($P < 0.05$). Error bars represent standard deviation (SD).

图3 不同遮阴下紫萼叶片叶绿素含量对种植密度的响应

Fig.3 Response of chlorophyll content in *Hosta ventricosa* leaves to planting density under different light intensities

遮阴是影响叶绿素积累的主导因素。叶绿素a、b及总含量均在中度遮阴(L2)下达到各密度处理的峰值(如总叶绿素:D1L2为11.29 mg/g, D2L2为11.04 mg/g, D3L2为11.20 mg/g),较L1与L3处理平均提高约15%~40%。这反映出适度遮阴显著促进了光合色素的合成,从而增强了对弱光的捕获能力,是典型的耐阴适应表现。同时,叶绿素a/b比值在L2处理下最低(D3L2为1.91),表明叶绿素b的相对增幅更大,这利于优化光系统II的捕光复合体比例,从而提高弱光下的光能利用效率。密度效应因遮阴条件而异。在L1条件下,叶绿素a、b及总含量均在D2处理中达到最高(分别为3.30、3.17与6.47 mg/g),显著高于低密度与高密度处理,这可能与群体内光分布较为均匀有关。而在遮阴条件下(L2与L3),不同密度处理间的叶绿素含量无一致变化规律,说明遮阴环境下密度对色素积累的调控较为复杂,可能受群体内光质、水分状况等多因素的交互影响(图3)。

2.2.2 不同遮阴下紫萼叶片渗透调节物质、抗氧化酶对种植密度的响应

紫萼叶片渗透调节物质与抗氧化酶对遮阴及种植密度处理的响应呈现复杂的变化模式,反映植株在光强与竞争压力下的生理调节及胁迫适应机制。

可溶性糖含量的响应因密度而异。在低、中密度(D1、D2)下呈“U”型变化,L3时显著回升(D1L3较L2增加32.6%),表明重度遮阴下植株可能通过积累可溶性糖维持渗透平衡。在D3条件下,可溶性糖随遮阴增强持续下降(L3较L1降低32.8%),反映该条件下光合产物积累受限,难以支持渗透调节需求。丙二醛(MDA)含量呈现不同的胁迫响应:在D1与D3条件下于L2遮阴时达到峰值(较L1分别上升42.3%与35.5%),说明适度遮阴可能诱导活性氧积累,加剧膜脂过氧化。在D2条件下,MDA含量先降后升,L3时达到1.00 mg/g FW,但仍低于D1L2处理,体现密度与遮阴在氧化损伤上的交互效应(图5)。

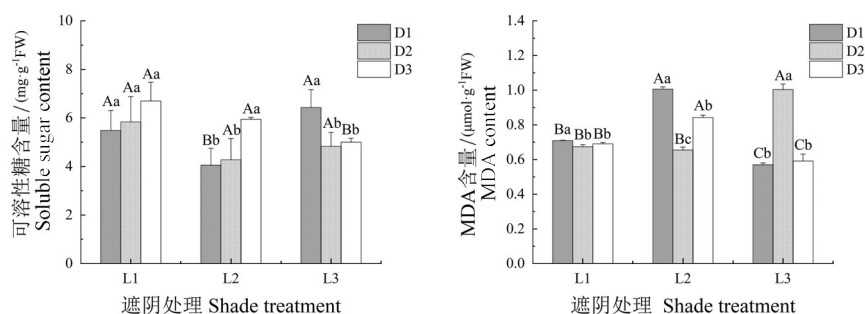
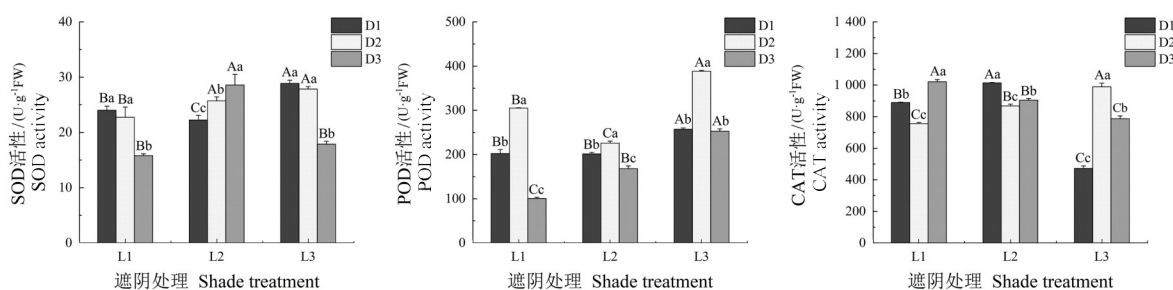


图4 不同遮阴下紫萼叶片渗透调节物质对种植密度的响应

Fig.4 Response of osmotic adjustment substances in *Hosta ventricosa* leaves to planting density under different light intensities



不同小写字母表示相同遮阴下不同种植密度紫萼叶片的差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同种植密度下不同遮阴下紫萼叶片差异显著($P<0.05$),误差线使用标准差(SD)。

Different lowercase letters indicate significant differences among planting densities under the same shading level ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among shading levels under the same planting density ($P<0.05$). Error bars represent standard deviation (SD).

图5 不同遮阴下紫萼叶片抗氧化系统对种植密度的响应

Fig.5 Response of the antioxidant system in *Hosta ventricosa* leaves to planting density under different light intensities

抗氧化酶系统响应表现出处理特异性:SOD活性在D1条件下为“V”型变化,D2条件下持续上升,D3条件下呈单峰曲线(L2时最高),反映不同群体结构下清除超氧阴离子的策略差异。POD活性在D1与

D2 条件下均呈“U”型并在 L3 时最高,其中 D2L3 较 D1L3 高出 50.9%,说明中密度加重度遮阴可强烈激活该酶促清除途径。CAT 活性变化不一,在 D1 条件下单峰型(L2 时最高),D2 条件下持续上升,D3 条件下则随遮阴增强而下降,其中 D3L1 活性最高(1 020.78 U/g FW),可能与高密度强光下 H₂O₂大量产生有关(图 5)。

2.3 不同遮阴下紫萼叶片生长指标对种植密度的响应

紫萼生长指标对遮阴和密度的响应呈现显著差异($P<0.05$)。形态指标方面,3 种密度下叶长、叶宽、叶片数和株高均随遮阴增强呈先升后降趋势,L2 处理达最大值,其中 D1 密度下差异显著,D2 和 D3 密度下差异不显著。密度效应分析显示,叶长、叶宽和株高呈单峰变化(L2 时最优),叶片数随密度持续增加(L3 时最高)(表 1)。生物量指标响应模式因密度而异:D1 密度下鲜重和干重均呈单峰曲线(L2 时最高且差异显著);D2 和 D3 密度下则持续上升,D2 密度在 L3 时达最大值(较 L1 差异显著),D3 密度下 L3 处理时,鲜重和干重地下部显著优于其他处理。密度梯度试验表明,L1 和 L3 遮阴下生物量随密度增加而上升(D3 最高),L2 遮阴下鲜重随密度降低(D1 最高),干重呈“V”型变化(D1 最高)(表 2)。结果表明,中等遮阴(L2)最有利于形态建成,而生物量积累的最适遮阴强度随密度增加而增强(低密度 L2 最优,中高密度 L3 更佳),为栽培管理中根据目标密度优化遮阴强度提供理论依据。

表 1 不同遮阴下紫萼叶片生长性状对种植密度响应

Tab.1 Response of leaf growth traits in *Hosta ventricosa* to planting density under different shading gradients

种植密度 Planting density	遮阴处理 Shade treatment	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	叶片数/片 Leaf number	株高/cm Height
D1	L1	8.91±2.08 ^{Ba}	3.78±0.57 ^{Bb}	8.33±1.52 ^{Bc}	4.13±1.62 ^{Cb}
	L2	12.59±0.87 ^{Aa}	6.87±1.96 ^{Aa}	23.33±4.16 ^{Ab}	19.73±1.05 ^{Aa}
	L3	7.31±1.31 ^{Bb}	3.24±0.45 ^{Bb}	7.33±1.15 ^{Bc}	8.37±2.95 ^{Bb}
D2	L1	10.76±0.80 ^{Aa}	4.94±0.24 ^{Aa}	25.33±2.30 ^{ABb}	21.00±1.41 ^{Aa}
	L2	14.08±0.76 ^{Aa}	8.13±1.10 ^{Aa}	26.67±1.52 ^{Ab}	22.83±6.89 ^{Aab}
	L3	11.84±2.51 ^{Aa}	6.76±0.22 ^{Aa}	20.33±4.50 ^{Bb}	21.47±2.66 ^{Aa}
D3	L1	10.69±1.21 ^{Aa}	4.81±0.19 ^{Aa}	34.67±4.72 ^{Aa}	20.70±3.01 ^{Aa}
	L2	10.99±0.53 ^{Aa}	6.44±1.82 ^{Aa}	43.33±6.11 ^{Aa}	21.97±1.42 ^{Ab}
	L3	10.60±0.78 ^{Aa}	6.34±0.34 ^{Aa}	42.00±5.00 ^{Aa}	21.03±1.96 ^{Aa}

不同小写字母表示相同遮阴下不同种植密度紫萼叶片的差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同种植密度下不同遮阴下紫萼叶片差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among planting densities under the same shading level ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among shading levels under the same planting density ($P<0.05$).

2.4 不同遮阴下紫萼叶片光合指标以及各项生理指标对种植密度响应情况的相关性分析

紫萼生理与形态指标间的相关性分析揭示了其在遮阴与密度处理下的资源分配策略与多性状协同适应。各指标间呈现复杂的相关性,反映了光合性能、抗氧化防御、渗透调节及形态建成之间的内在联系与生理权衡。

可溶性糖含量与水分利用效率(WUE)呈极显著正相关($P<0.01$)(图 6),说明可溶性糖的积累不仅作为渗透调节物质维持细胞水分平衡,还能通过改善水分利用效率增强植株在多变光强与竞争环境下的抗旱适应性。可溶性糖与叶片数呈显著负相关($P<0.05$),暗示植株在遮阴或高密度胁迫下可能将有限光合产物优先分配给渗透保护而非新叶生长,体现典型的“生长-防御”权衡策略^[23]。WUE 与叶绿素总量呈极显著负相关($P<0.01$),表明较高水分利用效率伴随较低的叶绿素含量,可能是因为在水分受限或光强较高条件下,植株通过减少捕光色素以降低光吸收与蒸腾耗水,从而优化水分经济性。WUE 与 SOD、POD 活性均呈显著负相关($P<0.05$),说明在水分利用效率较高的处理中,抗氧化酶系统的活化程度相对较低,暗示水分高效利用与活性氧清除之间存在资源竞争或调控分离。叶绿素含量与形态指标表现出明显的负向关联:叶绿素总量与株高、叶宽均呈极显著负相关($P<0.01$),说明在遮阴或高密度环境下,紫

表 2 不同遮阴下紫萼叶片生物量对种植密度响应

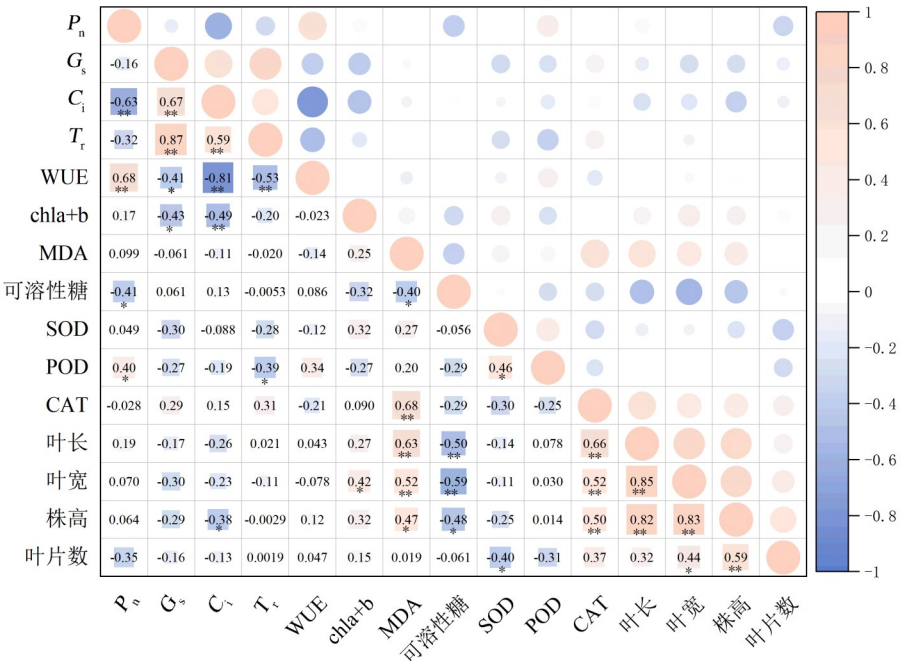
Tab.2 Response of *Hosta ventricosa* leaf biomass to planting density under different shading conditions

种植密度 Planting density	遮阴程度 Shade treatment	鲜重/g Fresh weight		干重/g Dry weight	
		地上部	地下部	地上部	地下部
D1	L1	4.61±1.60 ^{Bb}	5.21±1.31 ^{Bb}	0.74±0.25 ^{Bc}	1.46±0.39 ^{Bc}
	L2	40.04±6.77 ^{Aa}	52.42±6.51 ^{Aa}	12.61±0.85 ^{Aa}	24.81±1.37 ^{Aa}
	L3	2.72±0.58 ^{Bc}	2.03±0.77 ^{Bc}	0.46±0.28 ^{Bb}	0.25±0.06 ^{Bc}
D2	L1	25.99±4.85 ^{Ba}	20.70±3.91 ^{Ba}	5.81±0.46 ^{Bb}	6.92±0.81 ^{Bb}
	L2	33.51±5.60 ^{ABa}	38.98±3.43 ^{Ab}	7.98±1.78 ^{ABb}	18.03±2.14 ^{Aa}
	L3	37.78±3.15 ^{Ab}	43.28±2.28 ^{Ab}	9.71±1.13 ^{Aa}	19.00±3.75 ^{Ab}
D3	L1	32.25±4.97 ^{Ba}	22.67±3.18 ^{Ca}	7.12±1.41 ^{Aa}	13.87±3.35 ^{Ba}
	L2	32.34±6.57 ^{Ba}	37.90±6.83 ^{Bb}	8.04±1.78 ^{Ab}	20.56±2.53 ^{Ba}
	L3	49.31±9.06 ^{Aa}	93.80±4.62 ^{Aa}	9.95±0.55 ^{Aa}	60.11±4.35 ^{Aa}

不同小写字母表示相同遮阴下不同种植密度紫萼叶片的差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同种植密度下不同遮阴下紫萼叶片差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among planting densities under the same shading level ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences among shading levels under the same planting density ($P<0.05$).

萼可能通过抑制纵向生长与叶片扩展,同时增加叶绿素积累以提升弱光捕获能力,实现光资源在形态与生理之间的再分配。在抗氧化酶系统中,SOD和POD活性与叶宽呈显著正相关($P<0.05$),表明叶片扩展较大的植株可能面临更高的氧化压力,从而激活酶促防御系统以维持氧化还原稳态。CAT与MDA含量呈负相关,说明过氧化氢酶在减轻膜脂过氧化、保护膜结构完整性方面具有重要作用,其活性升高有助于降低膜脂损伤程度。形态指标之间表现较高协同性,如叶长与叶宽极显著正相关,反映叶片形态建成的整体协调;然而叶片数与其他形态指标及多数生理参数相关性较弱,说明叶片数目可能受独立于当前生理状态的发育程序调控。



**表示相关性极显著, $P<0.01$; *表示相关性显著, $P<0.05$ 。

** indicates that the correlation is extremely significant when $P<0.01$; * indicates that the correlation is significant when $P<0.05$.

图 6 不同遮阴下紫萼叶片光合指标以及各项生理指标对种植密度响应情况之间相关性的分析结果

Fig.6 Correlation analysis between photosynthetic parameters and physiological indicators in *Hosta ventricosa* leaves under different light intensities and planting densities

3 讨论与结论

3.1 讨论

紫萼作为喀斯特地区具有应用潜力的观赏植物,其光合生理、形态建成及抗逆性对遮阴与种植密度交互作用的响应机制,是科学栽培与生态利用的重要依据。本研究基于不同处理下的数据分析,对其适应性机制与优化栽培模式进行讨论。

3.1.1 光合适应性

光合参数是揭示植物生理代谢能力及对环境因子响应的关键指标^[24]。本研究显示,紫萼的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)等气体交换参数在中度遮阴(L2)下普遍较优,说明其光合碳同化在适度光照环境下达到最佳,与胡英杰等^[25]研究结果类似,合理冠层结构能显著改善透光性,增强冠层内部光合有效辐射,从而提高光能利用效率;过度遮阴(L3)则因光能供应不足显著抑制光合效率^[26]。种植密度通过改变群体内部光照分布与竞争强度,进一步调控光合表现,在中等密度(D2)下,适度遮阴(L2)协调群体受光与个体空间,使光合性能最优;而高密度(D3)下即使适度遮阴也难以完全缓解由光竞争所导致的光合下降。紫萼在L2处理下的光合响应模式,与典型阳生植物(如月季 *Rosa chinensis*)和耐阴植物(如酢浆草 *Oxalis corniculata*、喜荫花 *Episcia cupreata* 等)形成对比^[27]。紫萼属于中间型光合特性,适合应用于贵州喀斯特地区常见的“乔木-灌木-草本”多层林分结构。

3.1.2 生理适应性

光照为植物提供光化学反应所需能量,遮阴条件下光强降低会驱动植物光合特性与保护系统的调整^[28]。本研究中,紫萼叶片叶绿素a、b及总量在L2处理下显著升高,叶绿素a/b比值相应下降,与耿晓东等^[29]研究趋势一致,显示其通过增强捕光能力适应弱光。荧光参数表明,紫萼的最大光化学效率(F_v/F_m)在遮阴下保持较高水平且降幅较小,相较于同为百合科的北黄花菜(*Heimerocallis lilio-asphodelus*)在重度遮阴下 F_v/F_m 出现较大降幅^[30],说明紫萼可能具备更完善的光保护机制,能通过调节非光化学淬灭(NPQ)等途径有效避免光损伤。植物遭遇高温、低温、干旱、强光或弱光等非生物胁迫时,其细胞内活性氧代谢平衡会被打破,导致自由基过量积累;这些过量活性氧会引发膜脂过氧化反应,破坏细胞膜完整性,促使有害过氧化物积累,造成细胞膜系统的严重损伤^[31]。紫萼通过激活抗氧化酶系统(POD活性达388.4 U/g FW)来应对环境胁迫,显示出较强的抗氧化防御能力。然而,其防御策略并非单一被动。研究发现2种体现其灵活适应性的典型策略:第一,在适度遮阴与低密度条件(D1L2)下,紫萼呈现高生长量、高MDA与低抗氧化酶活性的组合,符合“生长-防御权衡”理论,即在胁迫较弱时主动降低防御投入以最大化生长收益;第二,在低遮阴与适中密度条件(D2L1)下,观测到了较高水分利用效率(WUE),很可能是因为充足光照保障了光合作用,适度的群体结构产生了利于保水的微环境,从而显著降低蒸腾耗水。因此,紫萼对喀斯特异质性生境的成功适应,不仅体现在强胁迫下强大的抗氧化能力,更关键在于能根据光照和竞争压力的具体组合,动态调整资源在生长、防御及水分利用效率等不同生命活动之间的优先分配,这种高度可塑性是其关键的生态优势。

3.1.3 遮阴与密度的耦合效应

种植密度是调控群体结构、影响光能与资源利用效率的关键栽培因子。本研究显示,叶长、叶宽、株高及生物量均在中等遮阴(L2)条件下达到最优值,表明适度遮阴有利于紫萼形态扩展和物质积累^[32]。大量田间试验数据表明,种植密度作为关键栽培因子,对植物生产有决定性影响。通过优化种植密度,能构建理想植物群体结构,从而提高对土壤养分、光照资源和环境热量的利用效率^[33]。密度效应则进一步调制了这一响应,高密度(D3)种植加剧植株间对光、水分和养分的竞争,导致单株受光不足、净光合速率降低,水分利用效率下降,与百合科大同黄花(*Heimerocallis citrina* Baroni)研究^[34]结果类似。因此,科学合理的种植密度是实现植物高产优质栽培的必要前提和关键保障^[35-36]。本研究证实,中等密度(D2)结合适度遮阴(L2)是最佳栽培组合。该配置既能通过合理群体结构减轻个体间竞争,又能利用适度遮阴改善光质、减少光抑制,从而在群体产量(鲜重增加30%以上)和单株质量间取得平衡。在喀斯特地区,建

议发展复合种植系统(如“柿树-樱花-紫萼”垂直配置),不仅能优化光能空间利用,还能形成特色景观,其花期(6—8月)与贵州旅游旺季契合,兼具生态与景观价值。

3.1.4 产业发展潜力与多元开发

紫萼除观赏价值外,还具有药用成分和作为切花的特性(瓶插寿命12~15 d),为产业链延伸提供了可能^[37]。基于其生理适应性与栽培优化研究,建议发展“种植-加工-旅游”三产融合模式,通过开发紫萼茶、药用提取物和营造特色花海等项目,提升综合经济效益。这种多元化开发符合乡村振兴战略,也能促进喀斯特地区生态与经济的协同发展。

3.2 结论

本研究阐明了紫萼对遮阴与种植密度交互作用的生理适应机制。结果表明,紫萼具有典型中间型光合特性,其光合性能、光保护能力及形态建成在中度遮阴(L2)条件下表现最优。种植密度通过调控群体光竞争强度,显著调制了遮阴效应,二者存在显著耦合关系。

综合生理响应与栽培效益,中等种植密度(D2)结合中度遮阴(L2)为最优栽培配置。该组合有效协调群体光分布,缓解光抑制,增强抗氧化防御能力,实现光合生产与水分利用的高效平衡,从而在群体产量与单株质量间达到最佳权衡。

紫萼所展现的基于光环境与竞争压力动态调整资源分配的高度可塑性,是其成功适应喀斯特异质生境的关键。研究结果为该物种在喀斯特地区林下经济、复层景观构建及生态修复中的科学栽培提供直接理论依据与实践指导,为其全产业链开发奠定科学基础。

参考文献 References:

- [1] 何军伟,杨丽,钟国跃.民族药玉簪的化学成分、药理活性、临床应用及质量控制研究进展[J].中草药,2016,47(23):4295-4300.
HE J W, YANG L, ZHONG G Y. Research Progress in chemical constituents, pharmacological activities, clinical practices and quality control of folk medicine *Hosta plantaginea* [J]. Chinese traditional and herbal drugs, 2016, 47(23): 4295-4300.
- [2] 罗婷.贵阳市林下耐阴花卉筛选及林花模式配置研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
LUO T. Screening of shade-tolerant flowers under forests and configuration of forest-flower patterns in Guiyang city [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [3] 吴采丽,吴传娟,金忠秀.花木助脱贫 乡村走新路:贵州花卉产业开启“美丽经济”新路径[J].当代贵州,2020(32):54-55.
WU C L, WU C J, JIN Z X. Flowers and trees assist in poverty alleviation, villages forge a new path: Guizhou flower industry opens a new route of “beautiful economy” [J]. Guizhou today, 2020(32): 54-55.
- [4] 庄倩倩,陈少鹏,刘洪章.低温胁迫对紫萼玉簪根系3种生理指标的影响[J].东北林业大学学报,2018,46(3):33-36.
ZHUANG Q Q, CHEN S P, LIU H Z. Effects of low temperature stress on three physiological indexes of root system from *Hosta ventricosa* [J]. Journal of northeast forestry university, 2018, 46(3): 33-36.
- [5] 朱纯瑶,栾立宏,殷佳慧,等.碱胁迫对4个品种玉簪生长及光合特性的影响[J].东北林业大学学报,2025,53(8):40-50.
ZHU C Y, LUAN L H, YIN J H, et al. Effects of alkaline stress on growth and photosynthetic characteristics of four *Hosta plantaginea* varieties [J]. Journal of northeast forestry university, 2025, 53(8): 40-50.
- [6] 曲玉莹,曲波,崔娜,等.水分胁迫对‘翠鸟’玉簪叶片表皮蜡质及生理特性的影响[J].园艺学报,2019,46(7):1344-1350.
QU Y Y, QU B, CUI N, et al. Effects of water stress on the epicuticular wax and physiological characteristics of *Hosta* ‘Halcyon’ leaves [J]. Acta horticulturae Sinica, 2019, 46(7): 1344-1350.
- [7] 平晓帆,遇文婧,宋小双.遮荫对引种玉簪生长及光合特性的影响[J].森林工程,2018,34(5):20-26.
PING X F, YU W J, SONG X S. Effects of shading on the growth and leaf photosynthetic characteristics of introduced *Hosta* [J]. Forest engineering, 2018, 34(5): 20-26.

- [8] 邵美妮,郝鑫,崔娜,等.蓝叶类型玉簪叶片表皮蜡质对光合生理的影响[J].园艺学报,2020,47(7):1401-1411.
SHAOM N,HAO X,CUI N,et al.Effects of epicuticular waxes on the physiological characteristics of blue-leaf *Hosta*[J].Acta horticulturae Sinica,2020,47(7):1401-1411.
- [9] XU Y F,CHEN S Y,ZHAO S Y,et al.Effects of light intensity on the photosynthetic characteristics of *Hosta* genotypes differing in the glaucousness of leaf surface[J].Scientia horticulturae,2024,327,112834.
- [10] ISLAM M A,DU H,NING J,et al.Characterization of *Glossy1*-homologous genes in rice involved in leaf wax accumulation and drought resistance[J].Plant molecular biology,2009,70(4):443-456.
- [11] CAO Y J,WANG L C,GU W R,et al.Increasing photosynthetic performance and post-silking N uptake by moderate decreasing leaf source of maize under high planting density[J].Journal of integrative agriculture,2021,20(2):494-510.
- [12] 吴希,王家瑞,郝森艺,等.种植密度对不同生育期玉米品种光温资源利用率和产量的影响[J].作物学报,2023,49(4):1065-1078.
WU X,WANG J R,HAO M Y,et al.Effects of planting density on solar and heat resource utilization and yield of maize varieties at different growth stages[J].Acta agronomica Sinica,2023,49(4):1065-1078.
- [13] 吴斌,任伟,班祥奔,等.不同耐密性玉米品种地上部与根系性状的协同效应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(1):57-67.
WU B,REN W,BAN X B,et al.Coordination of shoot and root traits of maize cultivar types with different density tolerance[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2023,29(1):57-67.
- [14] MA D L,XIE R Z,LIU X,et al.Lodging-related stalk characteristics of maize varieties in China since the 1950s[J].Crop science,2014,54(6):2805-2814.
- [15] 王鸿宇,张英俊,姜兴芳,等.株行距配置对玉米密植群体根系及养分吸收的影响[J].玉米科学,2024,32(3):74-80.
WANG H Y,ZHANG Y J,JIANG X F,et al.Effects of plant and row spacing on the root system and nutrient absorption of dense corn planting population[J].Journal of maize sciences,2024,32(3):74-80.
- [16] 冯玉龙,曹坤芳,冯志立,等.四种热带雨林树种幼苗比叶重,光合特性和暗呼吸对生长光环境的适应[J].生态学报,2002,22(6):901-910.
FENG Y L,CAO K F,FENG Z L,et al.Acclimation of lamina mass per unit area, photosynthetic characteristics and dark respiration to growth light regimes in four tropical rainforest species[J].Acta ecologica Sinica,2002,22(6):901-910.
- [17] 李田,孙景宽,刘京涛,等.贝壳沙埋深度对杠柳幼苗生长及光合特性的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(2):338-348.
LI T,SUN J K,LIU J T,et al.Effects of shell sand burial on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Periploca sepium* Bunge[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2020,42(2):338-348.
- [18] 刘翠菊,郭霄,王奎玲,等.耐冬山茶对不同光照和水分生理生态响应[J].应用生态学报,2018,29(4):1125-1132.
LIU C J,GUO X,WANG K L,et al.Ecophysiological responses of *Camellia japonica* (Naidong) to different light and water conditions[J].Chinese journal of applied ecology,2018,29(4):1125-1132.
- [19] ZHOU J,WANG J Z,HANG T,et al.Photosynthetic characteristics and growth performance of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under different light/dark cycles in mini plant factories[J].Photosynthetica,2020,58(3):740-747.
- [20] MEDEIROS C D,FALÇAO H M,ALMEIDA-CORTEZ J,et al.Leaf epicuticular wax content changes under different rainfall regimes, and its removal affects the leaf chlorophyll content and gas exchanges of *Aspidosperma pyrifolium* in a seasonally dry tropical forest[J].South African journal of botany,2017,111:267-274.
- [21] AWACHARE C M,KURIAN R M,UPRETI K K,et al.Morpho-physiological diversity in *Annona* species[J].Scientia horticulturae,2018,234,58-62.
- [22] 谷晓博,李援农,杜娅丹,等.不同施氮水平对返青期水分胁迫下冬油菜补偿效应的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(5):572-581.
GU X B,LI Y N,DU Y D,et al.Compensative impact of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) affected by water stress at re-greening stage under different nitrogen rates[J].Chinese journal of eco-agriculture,2016,24(5):572-581.
- [23] 刘宝臣,唐伟斌.遮荫对麦冬和玉簪叶面积及叶绿素含量的影响[J].北方园艺,2012(14):77-79.

- LIU B C, TANG W B. Effects of shading on leaf area and chlorophyll contents of *Ophiopogon japonicus* and *Hosta plantaginea* [J]. Northern horticulture, 2012(14): 77-79.
- [24] MEERAN K, INGRISCH J, REINTHALER D, et al. Warming and elevated CO₂ intensify drought and recovery responses of grassland carbon allocation to soil respiration [J]. Global change biology, 2021, 27(14): 3230-3243.
- [25] 胡英杰, 范晓明, 刘兴慧, 等. 油茶不同树体结构对光的响应及主要经济性状的差异分析 [J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(6): 1522-1532.
- HU Y J, FAN X M, LIU X H, et al. Analysis of different tree structures for light response and the difference of main economic traits in *Camellia oleifera* [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(6): 1522-1532.
- [26] 陈超, 金则新, 袁梦, 等. 不同光照强度下濒危植物景宁木兰幼苗光合特性的季节变化 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(5): 950-959.
- CHEN C, JIN Z X, YUAN M, et al. Seasonal changes of photosynthetic characteristics of seedlings of *Magnolia sinostellata* under different light intensities [J]. Journal of Zhejiang A&F university, 2022, 39(5): 950-959.
- [27] 刘翠菊, 郭霄, 刘青, 等. 不同玉簪品种的光合特性比较研究 [C/OL]//中国观赏园艺研究进展 2017, 2017: 387-391. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jpN_MAf5WI4ISr4jhuonYeOt8YJ25bED7HNeISLVst5E-RjRHh1z5600ZgPMla2jVXB5ObjCO37246hVH9mlwFJJVNuLpsm3OLaLX88vL_9jL5-txaNJZWYkv4yojIP-H5FS_3CX6fnhl_hTCvYGbpxXdo0ffUJ2DWJ7hA3o7eHnI7RAgyi1Bnh9oEjDHkO3&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- LIU C J, GUO X, LIU Q, et al. Comparative study on photosynthetic characteristics of several cultivars of *Hosta* [C/OL]//Advances in ornamental horticulture of China. 2017, 2017: 387-391. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jpN_MAf5WI4ISr4jhuonYeOt8YJ25bED7HNeISLVst5E-RjRHh1z5600ZgPMla2jVXB5ObjCO37246hVH9mlwFJJVNuLpsm3OLaLX88vL_9jL5-txaNJZWYkv4yojIP-H5FS_3CX6fnhl_hTCvYGbpxXdo0ffUJ2DWJ7hA3o7eHnI7RAgyi1Bnh9oEjDHkO3&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [28] HALLIK L, NIINEMETSÜ, KULL O. Photosynthetic acclimation to light in woody and herbaceous species: a comparison of leaf structure, pigment content and chlorophyll fluorescence characteristics measured in the field [J]. Plant biology, 2012, 14(1): 88-99.
- [29] 耿晓东, 王菊秋, 周英, 等. 不同光照强度下3种萱草属植物的光合特性与叶绿素荧光特性 [J]. 分子植物育种, 2023, 21(4): 1322-1329.
- GENG X D, WANG J Q, ZHOU Y, et al. Characteristics of photosynthetic and chlorophyll fluorescence of three *Hemerocallis* species under different light intensities [J]. Molecular plant breeding, 2023, 21(4): 1322-1329.
- [30] 董然, 李金鹏, 金雪花, 等. 遮阴对金头饰玉簪光合特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 251-253.
- DONG R, LI J P, JIN X H, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics of *Hosta* 'golden tiara' [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2011, 39(5): 251-253.
- [31] 刘东焕, 赵世伟, 郭翎. 不同遮荫水平对玉簪光合特性和生长状况的影响 [C/OL]//庆祝中国园艺学会创建80周年暨第11次全国会员代表大会, 2009: 193. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jpN_MAf5WI5kaOjUBZ-JiXqEWIcfFSIXwqV1C7RKp8uUSUyx5WMz3gIvuzctlnH1lJ4Ms16YFXnuuimH9DDuWan2rdnVmd9ikYOUg2lSmlajET7v1Byp3_S-YCAQvj4EX-MnKDvv-ao4GIFrHzQf4cXQ4OXt19WYfDRWfNx-4uWtGLDpfxmldA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- LIU D H, ZHAO S W, GUO L. Effects of different shading levels on photosynthetic characteristics and growth status of *Hosta* [C/OL]//80th anniversary celebration of the Chinese society for horticultural science and the 11th national congress of members, 2009: 193. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jpN_MAf5WI5kaOjUBZ-JiXqEWIcfFSIXwqV1C7RKp8uUSUyx5WMz3gIvuzctlnH1lJ4Ms16YFXnuuimH9DDuWan2rdnVmd9ikYOUg2lSmlajET7v1Byp3_S-YCAQvj4EX-MnKDvv-ao4GIFrHzQf4cXQ4OXt19WYfDRWfNx-4uWtGLDpfxmldA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [32] 徐召丹, 林夏珍, 蒋挺. 遮光对3种地被植物生长和生理生化的影响 [J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(1): 69-75.
- XU Z D, LIN X Z, JIANG T. Shading with growth, physiological indexes, biochemical indexes of three ground-cover plants [J]. Journal of Zhejiang forestry college, 2010, 27(1): 69-75.
- [33] 卢潇. 马铃薯株型性状特征及与种植密度关系的分析 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- LU X. Analysis on the relationship between plant type characters and planting density [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.

- [34] 李名莉,刘玉兰,阚以琴,等.不同种植密度对‘大同黄花’品质与产量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(1):85-92.
- LI M L, LIU Y L, KAN Y Q, et al. The effects of different planting densities on the quality and yield of ‘Datong Huanghua’ [J]. Journal of Shanxi agricultural university (natural science edition), 2025, 45(1): 85-92.
- [35] 赵轩微,赵雅杰,田振东,等.向日葵干物质转运及产量对播种期和栽培密度的响应[J].作物杂志,2021(3):185-189.
- ZHAO X W, ZHAO Y J, TIAN Z D, et al. Response of dry matter translocation and yield to sowing date and planting density on sunflower[J]. Crops, 2021(3): 185-189.
- [36] SANDHU R, IRMAK S. Effects of subsurface drip-irrigated soybean seeding rates on grain yield, evapotranspiration and water productivity under limited and full irrigation and rainfed conditions [J]. Agricultural water management, 2022, 267: 107614.
- [37] 何军伟,杨丽,钟国跃.药食两用植物紫萼的化学成分、药理活性及应用研究进展[J].江西中医药,2019,50(1):71-72.
- HE J W, YANG L, ZHONG G Y. Research progress on chemical constituents, pharmacological activities and applications of the medicinal and edible plant *Hosta ventricosa* [J]. Jiangxi journal of traditional Chinese medicine, 2019, 50(1): 71-72.

(责任编辑:熊淑琪)



第一作者简介:贺雪仪,风景园林硕士生,研究方向为园林植物与应用。研究生期间学业优异,积极参与各类学术与设计活动,曾获中国植物学会首届青苗论坛二等奖、第四届“山地园林杯”贵州省高校风景园林设计大赛研究生组三等奖。本科期间表现突出,荣获国家奖学金、国家励志奖学金及“光华”奖学金。具备扎实的专业基础与跨学科实践能力,注重将理论研究与设计应用相结合。



通信作者简介:欧静,教授,博士,博士和硕士生导师。贵州大学林学院风景园林专业硕士点负责人。主要从事园林植物生理生态学、园林植物资源与应用、野生珍稀植物保护与利用、园林植物景观规划设计等方面的教学与研究工作。获贵州省科技进步奖一等奖1项,贵州省科技进步三等奖2项。主持和作为主要参加人完成和在研国家自然科学基金等国家级及省级项目50余项。独著或以第一作者(通信作者)发表文章百余篇。