

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.010

论文标题： 不同遮阴程度对树番茄幼苗生长及光合生理的影响

作　　者： 杨玖妹，郭焕仙，李兴则，等

收稿日期： 2025-08-06

引文格式： 杨玖妹,郭焕仙,李兴则,等.不同遮阴程度对树番茄幼苗生长及光合生理的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):111-119,130.

Yang J M, Guo H X, Li X Z, et al. Effects of different shading levels on the growth of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):111-119,130.

相关论文推荐

Recommended articles

叶面配比施肥对树番茄幼苗生长与养分积累的影响

Effects of foliar rationing of fertilizers on growth and nutrient accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings

土壤含水量对树番茄苗木生长及非结构性碳水化合物的影响

Effect of different soil moisture content on growth and non-structural carbohydrates of *Cypomandra betacea* seedlings

不同遮阴度对红花玉兰‘娇红1号’生长生理及花期特性的影响

Effects of different shading degrees on growth physiology and flowering characteristics of Magnolia wufengensis ‘Jiaohong 1’

遮阴对南京椴容器苗叶片性状和光合生理的影响

Effect of shading on leaf traits and photosynthetic characteristics of *Tilia miqueliana* container seedlings

金叶银杏叶表型及光合特征对遮阴的响应

Response of leaf phenotypes and photosynthetic characteristics of golden-leaf *Ginkgo biloba* to shading

遮阴对皂荚幼苗生长和生化特性的影响

Effects of shading on growth and biochemical characteristics of *Gleditsia sinensis* seedlings

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.010
http: //qks.csuft.edu.cn

不同遮阴程度对树番茄幼苗生长及光合生理的影响

杨玖妹[1, 2]，郭焕仙[1, 2]，李兴则[1, 2]，曾惠平[1, 2]，董　琼[1, 2]

（1. 西南林业大学 林学院，云南 昆明 650224；
2. 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室，云南 昆明 650224）

摘　要：【目的】探究不同遮阴程度对树番茄 *Cyphomandra betacea* 幼苗生长及光合生理的影响，确定其最适光照范围，为林下栽培和集约化育苗提供理论依据与技术支撑。【方法】以 1 年生树番茄幼苗为材料，设置 4 种遮阴梯度（CK，100% 自然光照；S_1，75% 自然光照；S_2，50% 自然光照；S_3，30% 自然光照），测定苗高、地径、单株叶面积及光合色素含量等指标，结合相关性分析和隶属函数模糊综合评价，解析其光适应机制。【结果】1）遮阴处理会显著影响幼苗生长（$P < 0.05$），S_1 处理下苗高较 CK 提升了 10.5%，叶面积扩展最佳，而 S_3 处理则抑制茎粗发育。2）光合特性显示，S_1 处理可维持较高净光合速率（7.84 μmol·m^{-2}·s^{-1}），非光学淬灭系数（11 489.98）显著高于 CK，表明适度遮阴可提高热耗散效率，有效缓解植物光抑制程度。3）相关性分析揭示，苗高与净光合速率呈极显著负相关（r=−0.587，$P < 0.01$），而气孔导度与净光合速率呈极显著正相关（r=0.731，$P < 0.01$）。4）隶属函数综合评价表明，S_1 处理为最优处理（均值为 26 116.65）。【结论】树番茄幼苗可通过形态可塑性（增高、扩叶）和光化学效率调节适应遮阴环境，75% 自然光照为其最适光照条件，适用于林下间作与遮阳网育苗栽培。

关键词：树番茄；遮阴程度；生物量；光合色素
中图分类号：S718.43；Q954　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0111-09

Effects of different shading levels on the growth of *Cyphomandra betacea* seedlings

Yang Jiumei[1,2], Guo Huanxian[1,2], Li Xingze[1,2], Zeng Huiping[1,2], Dong Qiong[1,2]

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Key Laboratory of Southwest Biodiversity Conservation, State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of varying shading intensities on the growth and photosynthetic physiological characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings, clarify the optimal light intensity range for seedling growth, and to provide theoretical references and technical guidance for understory intercropping and intensive seedling production.【Method】One-year-old *Cyphomandra betacea* seedlings were selected as experimental materials. Four shading treatments were established: full sunlight (CK, 100% natural radiation, NR), light shading (S_1, 75% NR), moderate shading (S_2, 50% NR), and severe shading (S_3, 30% NR). Growth and physiological indices including seedling height, ground diameter, single-leaf area and photosynthetic pigments content were measured. Correlation analysis and fuzzy membership function comprehensive evaluation were performed to elucidate the light adaptation mechanism of seedlings.【Result】1) Seedling growth was significantly affected by shading treatments ($P < 0.05$). In the S_1 treatment, seedling height increased by 10.5% compared with the CK group and exhibited the best leaf expansion performance, whereas the S_3 treatment significantly inhibited stem radial growth; 2) Photosynthetic measurements demonstrated that the S_1 treatment maintained a relatively high net photosynthetic rate (7.84 μmol·m^{-2}·s^{-1}), with a significantly higher non-photochemical quenching (NPQ) value (11 489.98) than the CK group. Moderate shading was proven to enhance the heat dissipation capacity and effectively alleviate leaf photoinhibition; 3) Correlation analysis showed that seedling height had an extremely significant negative correlation with net photosynthetic rate (r=−0.587, $P < 0.01$), while stomatal conductance was extremely significantly positively correlated with net

收稿日期（Received）：2025-08-06　　**修订日期**（Revised）：2025-10-24
基金项目：云南省“三区”科技人才支持计划项目（990023236）；西南林业大学基金项目（2023YY013）。
第一作者：杨玖妹（2125385337@qq.com），硕士研究生。　　**通信作者：**董琼（dqyeam@swfu.edu.cn），教授，博士。
引文格式：杨玖妹 , 郭焕仙 , 李兴则 , 等 . 不同遮阴程度对树番茄幼苗生长及光合生理的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):111-119,130.
Yang J M, Guo H X, Li X Z, et al. Effects of different shading levels on the growth of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):111-119,130.

photosynthetic rate (r=0.731, P ＜ 0.01); 4) The fuzzy membership function evaluation results verified that the S_1 treatment was the optimal growth condition, with an average comprehensive value of 26 116.65.【Conclusion】*Cyphomandra betacea* seedlings can adapt to shading stress via morphological plasticity (plant height promotion and leaf area expansion) and photochemical efficiency regulation. In summary, 75% NR is identified as the optimal light condition for seedling growth, which can be applied to understory intercropping and shading-based intensive seedling cultivation.

Keywords: *Cyphomandra betacea*; shading intensity; biomass; photosynthetic pigment

光照是影响植物生长的关键环境因素 [1]，其强弱直接作用于植物生长 [2-3]。光照不足会降低植物净光合速率，进而抑制植物生长 [4]。弱光环境下，植物会将更多生物量分配至叶片，以此提升光捕获效率 [5]，而强光条件下则会因光能过剩诱发光抑制与光损伤，致使植物光合速率下降 [6]。因此，调节光照至适宜范围是植物高效栽培的重要技术途径。不同植物对遮阴的适应存在差异，如矮滨菊 *Leucanthemum vulgare* 最适遮阴度为 30% ～ 50%[7]，短梗大参 *Macropanax rosthornii* 在 40% ～ 60% 遮阴条件下可显著提高表观量子效率和最大净光合速率 [8]，金莲花 *Trollius chinensis* 在 40% ～ 60% 遮阴下光合效率更高 [8]，观光木 *Michelia odora* 在 73% 透光率下生长更佳 [9]，浙江楠 *Phoebe chekiangensis* 在轻度遮阴时苗高和地径显著增加且净光合速率较高 [10]。研究植物的遮阴应对方式，对预测林下植物生长趋势和森林培育具有指导意义。

树番茄 *Cyphomandra betacea* 属茄科 Solanaceae 树番茄属 *Cyphomandra* 植物，原产南美洲，在中国西藏南部和云南均有栽培，兼具观赏价值与经济价值，为典型食药两用果蔬，可加工为多种产品 [11-14]，其含有的花青素、酚类物质等活性成分具有抗氧化 [15]、抗炎和抗肿瘤等生理活性 [16]。树番茄为喜温喜光植物，可集约化栽培，是典型的林下经济作物。树番茄幼苗叶片光饱和点偏低，强光会损伤光系统Ⅱ（PSII）反应中心 [17]。目前，关于树番茄苗高、地径、单株叶面积等生长指标适配的最优光照条件尚不明确，通过分析不同光照下各器官光合色素含量的动态变化，可了解其碳代谢生理特征，为其林下种植管理提供参考，助力林下复合经济产业提质增效 [18]。现有针对树番茄幼苗遮阴的研究多集中在叶片性状、生理参数等方面 [19-20]，且试验水分条件存在差异。树番茄作为云南特色森林食物与优质林下经济作物，对光照环境变化较为敏感，其产业化发展对丰富森林“粮库”“钱库”、推动“两山”理念落地转化和助力乡村振兴具有重要意义。因此，开展树番茄苗期遮光调控研究，对构建高原特色作物光照调控技术体系、提升幼苗抗逆能力与定植存活率、实现林下资源高效利用具有重要的实践价值。

本研究以 1 年生树番茄幼苗为试验材料，设置 4 种遮阴梯度进行盆栽试验，分别为全光照（CK：100% 自然光照）、轻度遮阴（S_1：75% 自然光照）、中度遮阴（S_2：50% 自然光照）、重度遮阴（S_3：30% 自然光照），测定不同遮阴程度下幼苗的苗高、地径、单株叶面积及光合色素含量变化，旨在阐明其光适应机制，确定最适光照阈值，为苗木规范化培育及林下栽培的光照管理提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省昆明市西南林业大学树木园（25°04′00″N、102°45′41″E），地处云贵高原中部，属于山原地貌，海拔 1 964 m。该地属于北亚热带半湿润高原山地季风性气候，气候温和，年平均温度 16.5 ℃，年平均降水量为 1 035 mm，年均相对湿度 67%。土壤为红壤，pH 值为 5.45。

1.2 试验材料

供试材料于 2021 年采自云南保山。果实采收后经晾晒干燥处理，剥离种子，采用穴盘育苗方式培育实生苗。试验于 2022 年 4 月启动，在统一环境条件下培育 5 个月，于同年 9 月筛选出 360 株长势优良、生长健壮、株型与性状均一的幼苗作为试验材料并开展盆栽控光试验。试验采用单盆单株的定植方式，塑料栽培盆规格为上口径 20 cm、盆高 18 cm，保证栽培载体规格一致。基于树番茄喜肥、忌涝的生理特性 [17-18]，本研究以红壤与腐殖土（质量比为 2∶1）为原料配制复合栽培基质，混合基质 pH 值为（5.8±0.3），有机质含量为（45.2±3.5）g/kg，可满足树番茄幼苗的生长需求。为有效消除土传病原微生物对试验的干扰，基质使用前经 120 ℃高温蒸汽灭菌 2 h。幼苗移栽完成后，统一置于大棚内进行梯度遮阴处

理。且所有遮光率参数均采用 SW6023 型手持式光照度计（广州速为）进行田间实测。

1.3　试验设计

试验采用单因素完全随机试验设计。基于李世民等 [20] 的遮阴试验研究方法，试验共设置 4 个光照梯度处理，包括全光照对照（CK：100% 自然光照）、轻度遮阴（S_1：75% 自然光照）、中度遮阴（S_2：50% 自然光照）与重度遮阴（S_3：30% 自然光照）。为系统探明树番茄幼苗对遮阴胁迫的时序响应规律，分别在遮阴处理后的 30、60、90、120 d 开展分期采样测定。各处理在每个采样时间点均选取 9 株长势一致的幼苗作为试验样本，试验设置 3 次生物学重复。为规避环境异质性对试验精度的影响，试验期间实施标准化栽培管理。同时，通过调整遮阴网层数与张紧度精准调控光照强度，保障各遮阴梯度持续稳定。

1.4　指标检测

本试验于 2023 年 5 月初开展幼苗破坏性取样，用于各项指标的测定。取样前测定幼苗苗高与地径，每个处理组选取 9 株长势一致、具有代表性的幼苗。在每株苗木中部，采集健康、无病虫害的成熟功能叶作为试验测定样本。采用 CI-203 手持式激光叶面积仪精准测量叶片长度、叶片宽度，仪器自动计算单叶面积。叶片生物量的测定：使用精度 0.1 mg 分析天平测定叶片鲜质量；样品经 105 ℃杀青 30 min 灭酶后，80 ℃烘干至恒质量，测定叶片干质量。光合色素含量采用丙酮 - 乙醇混合提取法测定，叶片荧光参数采用荧光仪测定，叶片光合参数使用 Li-6400 光合仪进行测定。

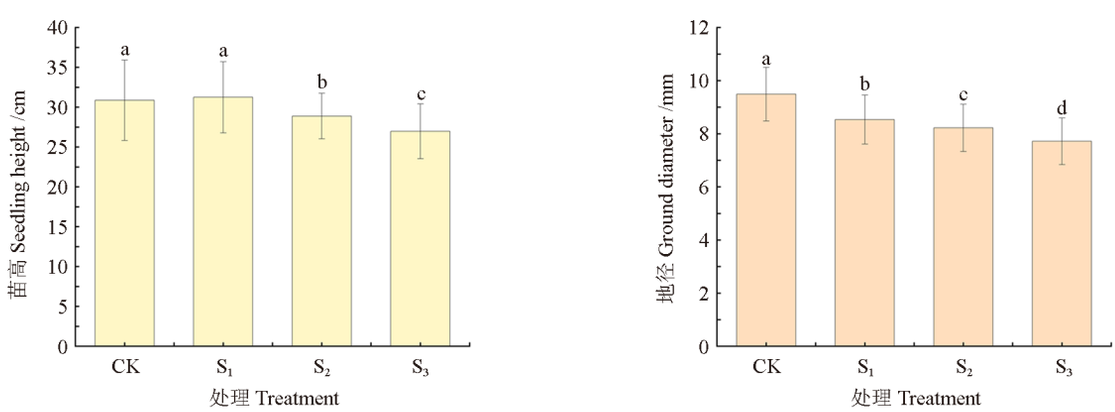
1.5　数据处理

采用 Excel 2019 软件完成数据整理，运用 SPSS 27.0 软件开展单因素方差分析、LSD 多重比较以及 Pearson 相关性分析，利用 Origin 2022 软件绘制图表。通过模糊数学隶属函数法 [21] 计算各遮阴处理下的隶属函数值，以此综合评价树番茄幼苗对光照环境的适应能力。

2　结果与分析

2.1　不同遮阴程度对树番茄幼苗苗高和地径的影响

由图 1 可知，不同遮阴梯度对树番茄幼苗生长的调控效应存在显著差异。轻度遮阴（S_1：75% 自然光照）对树番茄幼苗生长的负面影响最小，重度遮阴（S_3：30% 自然光照）的抑制效果最为显著。S_1 处理下，幼苗苗高略高于 CK，适度遮阴（光照强度降低 25%）可激发幼苗对弱光的适应性响应，进而促进幼苗生长；S_2 处理下，幼苗的苗高低于 CK 与 S_1 处理，表明遮阴的抑制效应开始显现；S_3 处理下，幼苗苗高显著低于 CK（$P < 0.05$），说明重度遮阴（光强降低至 30%）会显著抑制幼苗生长，这可能是由于光合过程受限，造成植株能量供给不足。全光照处理的幼苗地径最大，表明充足光照可促进幼苗茎干增粗，提升植株健壮程度；S_1 处理下，幼苗地径显著低于 CK（$P < 0.05$），说明轻度遮阴对茎干加粗生长无明显负面影响；S_2 处理下，幼苗地径显著低于 CK（$P < 0.05$），说明随着遮阴程度的加剧，茎干增粗过程受到明显抑制；S_3 处理下，幼苗地径最小，且显著低于 CK（$P < 0.05$），说明重度遮阴会导



不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the $P < 0.05$ level. The same below.

图 1　不同遮阴程度对树番茄幼苗苗高和地径的影响

Fig. 1 Effects of different shading treatments on height and ground diameter of *C. betacea* seedlings

致幼苗株型细弱，植株抗倒伏能力显著降低。综合结果表明，75% 自然光（遮光 25%）为树番茄幼苗最适光照条件，强光与弱光胁迫均不利于幼苗生长。

2.2 不同遮阴程度对树番茄幼苗单株叶面积的影响

由图 2 可知，相较于全光照对照组（CK：100% 自然光照），不同遮阴处理对树番茄幼苗单株叶面积的影响呈先促进后抑制的变化趋势。轻度遮阴（S_1：75% 自然光照）处理下，幼苗单株叶面积显著高于 CK、S_2 和 S_3（$P < 0.05$），说明轻度遮阴有利于树番茄幼苗叶片扩展；中度遮阴（S_2：50% 自然光照）处理下，单株叶面积略低于 CK，但仍高于重度遮阴处理组（S_3）；重度遮阴（S_3：30% 自然光照）处理下，幼苗叶面积降至各处理最低，但与 CK 组无显著差异。不同光照处理对单株叶面积的影响整体表现为 $S_1 > CK > S_2 > S_3$。综上所述，树番茄幼苗在 75% 自然光照（S_1）下叶片发育状态最优，该光照条件适用于林下间作与遮阳网育苗栽培模式；当光照强度低于 50% 自然光照（S_2、S_3）时，需对幼苗进行人工补光处理。

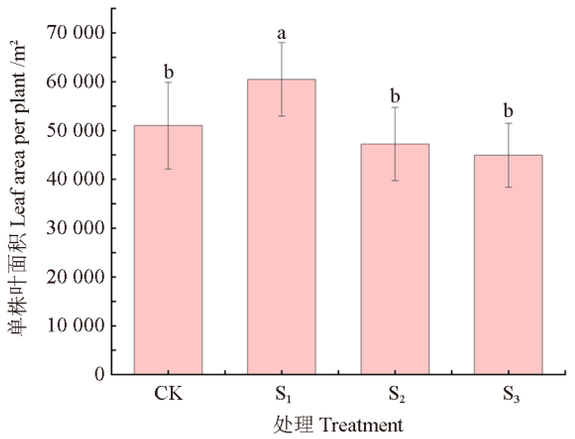


图 2 不同遮阴程度对树番茄幼苗单株叶面积的影响

Fig. 2 Effects of different shading levels on the leaf area per plant of *C. betacea* seedlings

2.3 不同遮阴程度对树番茄幼苗光合色素的影响

由图 3 可知，不同遮阴程度对树番茄幼苗光合气体交换参数存在显著影响。净光合速率（Net photosynthetic rate，Pn）在全光照对照组（CK）

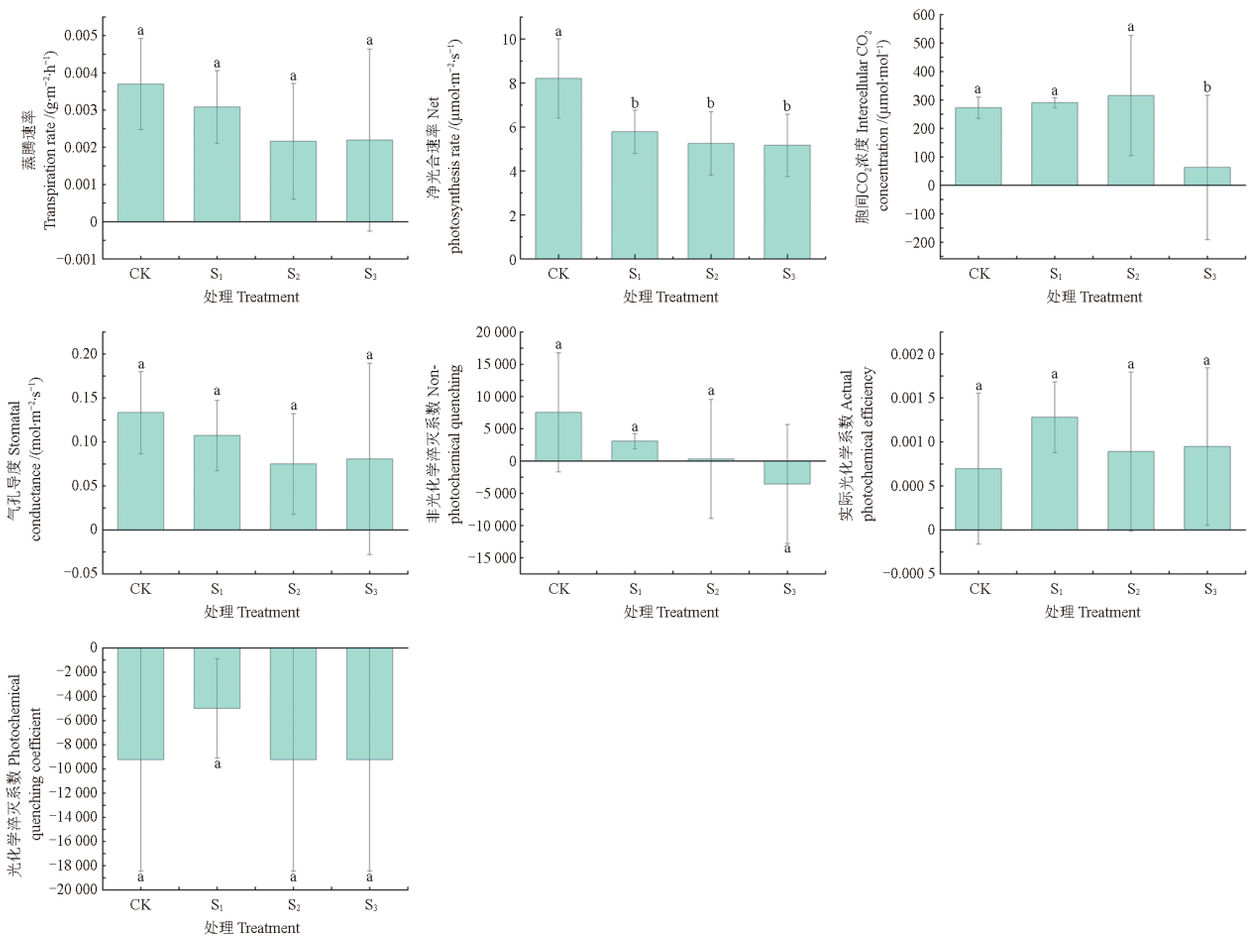


图 3 不同遮阴程度对树番茄幼苗光合色素的影响

Fig. 3 Effects of different shading levels on photosynthetic pigments of *C. betacea* seedlings

达到最大值，整体随遮阴程度加剧呈逐步降低的趋势，表现为CK＞S_1＞S_2＞S_3，说明遮阴处理显著降低树番茄幼苗净光合速率。胞间CO_2浓度（Intercellular CO_2 concentration，Ci）呈先上升后下降的变化趋势，CK、S_1、S_2处理下胞间CO_2浓度逐步升高且整体趋于稳定，S_3处理下胞间CO_2浓度快速下降，各处理整体表现为S_2＞S_1＞CK＞S_3，表明遮阴梯度变化可显著改变叶片胞间CO_2浓度水平。幼苗蒸腾速率（Transpiration rate，Tr）随遮阴程度的加剧持续降低，各处理的表现规律为CK＞S_1＞S_2=S_3，但各处理间无显著差异，间接影响植株水分代谢与光合生理进程。在不同遮阴处理下对幼苗气孔导度（Stomatal conductance，Gs）的影响表现为CK＞S_1＞S_3＞S_2，各处理间不存在统计学显著差异；遮阴生境会诱导叶片气孔导度小幅降低，叶片气孔开度呈现微弱收缩趋势，但该抑制效应未达到显著水平。

遮阴梯度处理下，树番茄幼苗非光化学淬灭系数（Non-photochemical quenching，NPQ）随遮阴程度加剧呈逐渐下降趋势，各处理影响表现为CK＞S_1＞S_2＞S_3。与对照组CK相比，S_1明显降低，S_1继续下降，S_3变为负值。在重度遮阴环境下，光化学活性受严重抑制，植株可通过调控非光化学淬灭相关代谢机制耗散体内过剩光能，进而缓解弱光胁迫对光合系统造成的损伤。遮阴处理对幼苗光化学淬灭系数（Photochemical quenching coefficient，qP）有一定的影响，但各处理间无明显统计学差异；S_1处理的qP最优，CK、S_2、S_3处理的qP均有所下降，整体表现为S_1＞CK=S_2=S_3，该结果可反映不同遮阴梯度下植株光反应系统光能分配与利用效率的动态变化规律。遮阴处理对幼苗实际光化学效率（Actual photochemical efficiency，Fv′/Fm′）影响表现为S_1＞S_3＞S_2＞CK，各处理间无统计学显著差异。这表明轻度遮阴（S_1）可优化PSII反应中心的光能转化效率，全光照环境下植株的光能利用效率反而偏低；中度、重度遮阴胁迫下ΦPSII呈小幅回落趋势，但处理间差异未达到显著水平。综上所述，适度遮阴（75%自然光照）可有效维持树番茄幼苗较高的光化学效率，而重度遮阴（30%自然光照）会显著削弱植株光合能力。

气孔导度、光化学淬灭系数等部分生理指标出现负值，该现象主要由测定过程中的系统误差或操作偏差导致，并非植株真实的生物学响应结果。具体误差来源主要分为三方面：1）仪器校准与操作误差：利用叶绿素荧光仪测定光化学淬灭系数时，若叶片暗适应处理不充分或饱和脉冲强度设置不足，会造成光适应下最大荧光（Maximum fluorescence，Fm′）数值低于稳态荧光（Steady-state fluorescence，Fa），最终使得qP计算结果为负值；2）环境波动干扰：测定期间温度、空气湿度、CO_2浓度等环境因子的剧烈波动，会扰乱叶片正常生理状态，引发蒸腾速率、胞间CO_2浓度等指标基线漂移；3）样本处理差异：叶片取样部位、生理状态及暗适应时长的不一致，会引入组内试验变异，进一步放大测量误差。综上，指标负值的核心诱因是叶片暗适应不充分或饱和脉冲强度参数设置不当，造成暗适应下最大荧光产量（Maximum fluorescence，Fm）、光适应下最大荧光、PSⅡ最大光化学量子产量（Optimal/maximal photochemical efficiency of PSⅡ in the dark，Fv/Fm）、PSⅡ有效光化学量子产量（Photochemical efficiency of PSⅡ in the light，Fv′/Fm′）等基础荧光参数基准测量值失真。为验证误差来源，本研究对初始荧光（Origin fluorescence，Fo）、暗适应下最大荧光产量、稳态荧光、可变荧光（Variable fluorescence，Fv）、光适应下最大荧光（Maximum fluorescence，Fm′）、非光学淬灭系数等基础荧光原始参数开展方差齐性检验，结果（表1）显示，出现指标负值的特定处理组与样本，其基础参数方差与其他组别存在显著差异。由此可判定，该误差属于测定批次光强设置失误引发的系统性测量误差，而非试验随机误差。

2.4 不同遮阴程度及时长下树番茄幼苗生长的相关性分析

相关性分析结果（表2）表明，树番茄幼苗的苗高与地径呈极显著正相关（r=0.505，P＜0.01），说明幼苗纵向生长与径向生长具有协同性；苗高与净光合速率呈极显著负相关（r=−0.587，P＜0.01），表明遮阴环境下幼苗纵向生长过程会降低植株光合效率。在光合参数相关性分析中，净光合速率与气孔导度呈极显著正相关（r=0.731，P＜0.01），气孔导度与胞间CO_2浓度呈显著正相关（r=0.376，P＜0.05），证实叶片气孔开闭状态对胞间CO_2的供给水平具有显著调控作用。从叶绿素荧光参数来看，非光化学淬灭系数与蒸腾速率呈极显著负相关（r=−0.800，P＜0.01），光化学淬灭系数与蒸腾速率呈极显著正相关（r=0.970，P＜0.01），反映出叶片热耗散过程、光化学反应

与蒸腾生理过程存在紧密协同关联。本研究中初始荧光、最大荧光与最大光化学效率存在异常数据，未纳入相关性分析。综合可知，树番茄幼苗可通过协调苗高与地径的生长节律适配遮阴环境，但幼苗纵向生长的提升会伴随光合效率的下降，气孔导度是调控植株净光合速率与胞间 CO_2 浓度的关键因子。

表 1 遮阴处理对树番茄幼苗光合特性的方差齐性检验 †

Table 1 Homogeneity of variance test for the effects of shading treatments on the photosynthetic characteristics of *C. betacea* seedlings

处理 Treatment	Tr	Pn	Ci	Gs	Fo	Fm	Fv/Fm	NPQ	Fv′/Fm′	qP
CK	0.113^{ns}	0.729^{ns}	0.001**	0.001**	.c	.c	.c	0.094*	0.126^{ns}	0.016*
S_1	0.467^{ns}	0.794^{ns}	0.002**	0.002**	.c	.c	.c	0.413^{ns}	0.278^{ns}	0.439^{ns}
S_2	0.480^{ns}	0.794^{ns}	0.007**	0.007**	.c	.c	.c	0.431^{ns}	0.284^{ns}	0.467^{ns}
S_3	0.134^{ns}	0.738^{ns}	0.002**	0.002**	.c	.c	.c	0.170^{ns}	0.128^{ns}	0.087^{ns}

† ns，$P > 0.05$；**，$P < 0.01$；*，$P < 0.05$；.c，数据缺失或无效。下同。
ns, $P > 0.05$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$; .c indicates missing or invalid data. The same below.

表 2 不同遮阴程度对树番茄幼苗生长及光合生理的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of different shading degrees on the growth and photosynthetic physiology of *C. betacea* seedlings

指标 Indices	苗高 Seedling height	地径 Ground diameter	Tr	Pn	Ci	Gs	Fo	Fm	Fv/Fm	NPQ	Fv′/Fm′	qP
苗高 Seedling height	1											
地径 Ground diameter	0.505**	1										
Tr	0.227	−0.223	1									
Pn	−0.587**	0.048	0.069	1								
Ci	−0.363*	0.131	0.030	0.272	1							
Gs	−0.309	0.051	−0.005	0.731**	0.376*	1						
Fo	.c	.c	.c	.c	.c	.c	.c					
Fm	.c	.c	.c	.c	.c	.c	.c	.c				
Fv/Fm	.c	.c	.c	.c	.c	.c	.c	.c	.c			
NPQ	−0.302	0.182	−0.800**	−0.086	−0.142	−0.021	.c	.c	.c	1		
Fv′/Fm′	0.053	0.155	−0.220	−0.219	0.153	−0.050	.c	.c	.c	0.171	1	
qP	−0.192	0.099	0.970**	−0.063	0.014	0.024	.c	.c	.c	0.712**	0.340*	1

2.5 不同遮阴程度及时长下树番茄幼苗生长的主成分分析

由表 3 可知，第 1 主成分中苗高与地径得分系数最高，数值均为 0.576，是影响第 1 主成分的核心指标；第 2 主成分中非光化学淬灭系数得分系数最高（0.550），光化学淬灭系数（0.478）次之，二者为第 2 主成分的主要影响指标；第 3 主成分中实际光化学效率得分系数最高（0.579），胞间 CO_2 浓度（0.533）次之，为驱动第 3 主成分变异的主要指标。试验结果表明，各生理与生长指标在 3 个主成分中的得分系数存在显著差异，说明不同指标对各主成分的贡献度存在明显差异。

2.6 不同遮阴程度及时长下树番茄幼苗生长的隶属函数模糊综合评价

本研究基于树番茄幼苗各项生长与光合生理指标测定数据，采用模糊隶属函数法开展综合评价分析，结果（表 4）表明，不同遮阴处理下幼苗平均隶属函数值为 8 273.12 ～ 26 116.65，其中 S_1 处理组综合评价最优，说明轻度遮阴（75% 自然光照）最适宜树番茄幼苗生长；而重度遮阴（30%

表 3 主成分的成分得分系数矩阵

Table 3 Score coefficient matrix of principal components

指标 Indice	成分得分系数 Component score coefficient		
	第 1 成分 Principal component 1	第 2 成分 Principal component 2	第 3 成分 Principal component 3
蒸腾速率 Tr	0.345	0.035	−0.013
净光合速率 Pn	0.321	0.038	−0.128
胞间 CO_2 浓度 Ci	0.088	−0.251	0.533
气孔导度 Gs	0.336	0.047	0.005
非光化学淬灭系数 NPQ	0.037	0.550	−0.123
实际光化学效率 Fv′/Fm′	−0.119	−0.018	0.579
光化学淬灭系数 qP	0.028	0.478	0.075
单株叶面积 S_L	−0.004	0.048	0.370
苗高 Seedling height	0.576	0.053	0.014
地径 Ground diameter	0.576	0.048	0.035

表 4　不同遮阴程度对树番茄幼苗生长及光合生理的隶属函数模糊综合评价

Table 4　Membership function-based fuzzy comprehensive evaluation for the effects of different shading degrees on the growth and photosynthetic physiology of *C. betacea* seedlings

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value								均值 Mean value	权重 Weight	排序 Sort
	Tr	Pn	Ci	Gs	NPQ	Fv′/Fm′	qP	S_L			
CK	0.03	7.84	272.65	0.16	8 898.90	0.12	79 515.39	50 980.69	17 159.24	0.265 1	2
S_1	0.00	4.89	216.97	0.39	11 489.98	0.11	265 567.32	44 919.64	26 116.65	0.403 4	1
S_2	0.55	4.91	315.49	0.06	7 328.62	0	50 601.71	47 232.48	13 185.47	0.203 7	3
S_3	0.01	5.45	290.37	0.13	3 075.71	0	4 993.65	60 472.38	8 273.12	0.127 8	4

自然光照）处理综合表现最差，最不利于树番茄幼苗的生长发育。在所有测定指标中，实际光化学效率、净光合速率、非光化学淬灭系数及光化学淬灭系数可作为表征树番茄幼苗光照适应性强弱的核心评价指标。

3　讨　论

植物可通过形态结构与生理特征的可塑性变化来适应异质光环境 [22]。本研究通过设置多梯度遮阴处理，证实树番茄幼苗可协同调控形态建成与光合生理过程，具备显著光照可塑性，能有效优化光能捕获与利用效率，且在遮阴环境下呈现典型弱光适应策略，植株形态特征随之发生明显可塑性变化。相较于对照组，幼苗苗高显著提升 10.5%（$P < 0.05$），单株叶面积显著增大 18.5%（$P < 0.01$），叶片厚度显著降低（$P < 0.05$）。该变化模式是植物在弱光环境下典型的资源优化配置策略，植株通过茎秆伸长、光合叶面积扩张提升光能捕获能力，与已有研究结论一致 [23-27]。弱光条件下树番茄幼苗优先将生物量分配至垂直生长，该生长分配模式契合植物避阴综合征的光照竞争策略 [5]。但本研究发现，树番茄幼苗在伸长生长的同时伴随地径减小、茎干细弱的现象，导致植株抗倒伏能力有所下降。该形态响应规律与浙江楠 *Phoebe chekiangensis*[10]、金莲花 *Trollius chinensis*[8] 的研究结果相近，却与矮滨菊 *Leucanthemum vulgare* 存在明显物种特异性差异，矮滨菊在 30% ～ 50% 遮阴条件下生长状态最优，且未产生显著的抗逆性损耗 [7]。这种物种特异性响应特征，凸显了树番茄幼苗光适应过程中的权衡关系，即在形态可塑性增效与生长稳定性损耗之间存在动态平衡。

大量研究证实，遮阴环境可显著调控植物叶片光合生理指标。遮阴环境会导致叶片净光合速率、气孔导度及蒸腾速率降低，胞间 CO_2 浓度升高 [28-29]，且该负面效应随遮阴程度的加剧而显著增强 [30]。凌惠锋等 [31] 针对木荷幼苗开展遮阴试验，发现 75% 遮阴条件下苗木冠根比、单株生物量及苗木质量指数均达到最大值，其高径比与全光照处理无显著差异，高于低强度遮阴处理，低于高强度遮阴处理。本研究结果表明，树番茄幼苗可通过降低 PS Ⅱ系统的光能热耗散水平、提升植株光能转化效率的正向光合调控策略，有效补偿形态可塑性调整带来的碳同化不足。但过度遮阴环境仍会显著抑制幼苗生物量积累 [32]，证明树番茄幼苗的光合生理代偿机制存在调控上限。当光照强度低于 50% 自然光照时，光能转化效率的提升效应无法弥补光照能量供给的持续匮乏，最终造成幼苗生长受限。该研究结论与赵洋等 [33]、张勇等 [34] 的研究结果一致，明确了树番茄幼苗光合生理对遮阴环境的耐受阈值，为苗木培育过程中人工补光的精准介入提供理论依据。叶片是植物感知、响应环境胁迫的核心功能器官 [35-36]，弱光条件下植株通常通过增大叶面积来捕获更多光能，以此适应低光环境 [37]。本研究中，不同遮阴梯度对树番茄幼苗单株叶面积的影响呈先促进后抑制的变化规律，轻度遮阴（75% 自然光照）处理下幼苗叶面积显著高于全光照（$P < 0.05$），为最优生长光照条件；当光照强度低于 50% 自然光照时，需通过人工补光改善幼苗光照环境。该响应规律与王虹妍等 [38] 对米奴塔睡莲 *Nymphaea minuta* 的研究结论一致，体现了植物在弱光环境下通过调节碳同化速率适配光能供给水平的通用生理策略。本研究结果可为树番茄林下间作、遮阳网育苗的光照管控提供科学参考。

4　结　论

本研究通过分析全光照（100% 自然光照）、轻度遮阴（75% 自然光照）、中度遮阴（50% 自然光照）、重度遮阴（30% 自然光照）4 种光照条件对树番茄幼苗生长及光合生理的影响，阐明了幼苗的光适应机制，确定了最优生长光照条件。轻度遮阴（75% 自然光照）环境最适宜树番茄幼苗生长，该条件下幼苗可通过形态可塑性调整（苗

高增幅 10.5%，叶面积扩展最优）和光合生理调控（净光合速率稳定在 7.84 μmol·m^{-2}·s^{-1}，NPQ 值达 11 489.98），协同优化光能利用水平。气孔导度是调控幼苗光合速率的关键因子（r=0.731），隶属函数综合评价（均值 26 116.65）进一步验证了轻度遮阴（75% 自然光照）处理的生长优势。本研究结果明确了树番茄林下栽培的精准光照管理阈值（75% 自然光照），对高原特色经济作物树番茄的高效培育与规范化种植具有重要实践意义。

参考文献：

[1] Katahata S I, Naramoto M, Kakubari Y, et al. Photosynthetic capacity and nitrogen partitioning in foliage of the evergreen shrub *Daphniphyllum humile* along a natural light gradient[J]. Tree Physiology,2007,27:199-208.

[2] Wei J S, von Arx G, Fan Z X, et al. Drought alters aboveground biomass production efficiency: insights from two European beech forests[J]. Science of the Total Environment,2024,919:170726.

[3] Brown C E, Mickelbart M V, Jacobs D F. Leaf physiology and biomass allocation of backcross hybrid American chestnut (*Castanea dentata*) seedlings in response to light and water availability[J]. Tree Physiology,2014,34:1362-1375.

[4] 张培 , 庞圣江 , 刘士玲 , 等 . 遮荫对江南油杉幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 西北植物学报 ,2023,43(10):1716-1722.
Zhang P, Pang S J, Liu S L, et al. Effects of shading on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2023,43(10):1716-1722.

[5] 陈乾 , 黄霞 , 江登辉 , 等 . 遮荫对福建柏苗期生长及生物量的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版),2020,49(6):796-802.
Chen Q, Huang X, Jiang D H, et al. Effect of shading on growth and biomass of *Fokienia hodginsii* seedlings[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020,49(6):796-802.

[6] 代大川 , 胡红玲 , 陈洪 , 等 . 遮阴对楨楠幼苗生长和光合生理特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2020,48(4):56-64,74.
Dai D C, Hu H L, Chen H, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020,48(4):56-64,74.

[7] 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.

[8] 吕晋慧 , 王玄 , 冯雁梦 , 等 . 遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响 [J]. 生态学报 ,2012,32(19):6033-6043.
Lü J H, Wang X, Feng Y M, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(19):6033-6043.

[9] 陈凯 , 杨梅 , 刘世男 . 不同光照对观光木幼苗生长及光合生理特性的影响 [J]. 北华大学学报 (自然科学版),2019,20(4):536-541.
Chen K, Yang M, Liu S N. Effects of different lights on growth and photosynthetic physiological characteristics of *T. odorum* seedlings[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2019,20(4):536-541.

[10] 李冬林 , 向其柏 . 光照条件对浙江楠幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2004,28(5):27-31.
Li D L, Xiang Q B. Effects of light condition on the growth and photosynthetic characters of *Phoebe chekiangensis* seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2004,28(5):27-31.

[11] Gautam A K, Singh P K, Aravind M. Defensive role of plant phenolics against pathogenic microbes for sustainable agriculture[M]//Plant phenolics in sustainable agriculture: volume 1. Singapore: Springer Singapore,2020:579-594.

[12] 董琼 , 李世民 , 高尚杰 , 等 . 不同种源树番茄果实品质比较及综合分析 [J]. 食品与发酵工业 ,2022,48(4):266-273.
Dong Q, Li S M, Gao S J, et al. Comparison and comprehensive analysis the quality of *Cyphomandra betacea* from different provenance[J]. Food and Fermentation Industries,2022,48(4):266-273.

[13] 曾惠平 , 韦兴兰 , 李兴则 , 等 . 叶面配比施肥对树番茄幼苗生长与养分积累的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(7):32-45.
Zeng H P, Wei X L, Li X Z, et al. Effects of foliar rationing of fertilizers on growth and nutrient accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(7):32-45.

[14] 李荣和 , 于景华 . 林下经济作物种植新模式 [M]. 北京 : 科学技术文献出版社 ,2010:13-50.
Li R H, Yu J H. New planting mode of cash crops under forest[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House,2010:13-50.

[15] Kou M C, Yen J H, Hong J T, et al. *Cyphomandra betacea* Sendt. phenolics protect LDL from oxidation and PC12 cells from oxidative stress[J]. LWT - Food Science and Technology,2009,42:

458-463.

[16] Mutalib M A, Rahmat A, Ali F, et al. Nutritional compositions and antiproliferative activities of different solvent fractions from ethanol extract of *Cyphomandra betacea* (Tamarillo) fruit[J]. The Malaysian Journal of Medical Sciences,2017,24(5):19-32.

[17] 郭碧瑜 , 周伟华 , 叶青莲 , 等 . 树番茄的生物学特性及栽培技术 [J]. 广东农业科学 ,2007(12):102-103.
Guo B Y, Zhou W H, Ye Q L, et al. Biological characteristics and cultivation techniques of *Cyphomandra betacea*[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2007(12):102-103.

[18] 王琳 , 郭焕仙 , 董琼 , 等 . 遮荫处理对树番茄幼苗生物量和非结构性碳水化合物的影响 [J]. 植物科学学报 ,2025,43(3):371-381.
Wang L, Guo H X, Dong Q, et al. Effects of shade treatments on biomass and non-structural carbohydrates in *Cyphomandra betacea* Sendt. seedlings[J]. Plant Science Journal,2025,43(3):371-381.

[19] 李树萍 , 董琼 , 李世民 , 等 . 遮阳对树番茄幼苗叶片性状及化学计量特征的影响 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版),2023,49(2):183-189.
Li S P, Dong Q, Li S M, et al. Effects of shading on leaf traits and stoichiometric characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2023,49(2):183-189.

[20] 李世民 , 董琼 , 金友帆 , 等 . 树番茄幼苗叶片性状和生理参数对遮阴的响应及评价 [J]. 中国农业科技导报 ,2023,25(1):72-82.
Li S M, Dong Q, Jin Y F, et al. Response and evaluation of leaf traits and physiological parameters of *Cyphoma betacea* seedlings under shading environment[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023,25(1):72-82.

[21] 黄溦溦 , 张念念 , 胡庭兴 , 等 . 高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响 [J]. 生态学报 ,2011,31(23):7047-7055.
Huang W W, Zhang N N, Hu T X, et al. Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of *Simmondsia chinensis* seedlings from different provenances[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(23):7047-7055.

[22] 李金平 , 任瑞芬 , 尹大芳 , 等 . 不同光环境下金边百里香的形态和生理可塑性 [J]. 草业科学 ,2017,34(10):2130-2140.
Li J P, Ren R F, Yin D F, et al. Morphological and physiological plasticity of *Thymus mongolicus* under different light conditions[J]. Pratacultural Science,2017,34(10):2130-2140.

[23] 傅国林 , 李婷婷 , 方庆 , 等 . 遮荫对极小种群植物浙江安息香幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2025,33(4):381-389.
Fu G L, Li T T, Fang Q, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of extremely small populations *Styrax zhejiangensis* seedlings[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2025,33(4):381-389.

[24] 秦舒浩 , 李玲玲 . 遮光处理对西葫芦幼苗形态特征及光合生理特性的影响 [J]. 应用生态学报 ,2006,17(4):653-656.
Qin S H, Li L L. Effects of shading on squash seedlings' morphological and photosynthetic physiological characteristics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(4):653-656.

[25] 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.

[26] 李鸿雁 , 李大红 , 王彦玲 , 等 . 不同光照条件对黄花美冠兰生长特性的影响 [J]. 江苏农业科学 ,2013,41(7):170-172.
Li H Y, Li D H, Wang Y L, et al. Effects of different light conditions on growth characteristics of *Eulophia flava*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2013,41(7):170-172.

[27] Shafiq I, Hussain S, Raza M A, et al. Crop photosynthetic response to light quality and light intensity[J]. Journal of Integrative Agriculture,2021,20(1):4-23.

[28] 刘悦秋 , 孙向阳 , 王勇 , 等 . 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响 [J]. 生态学报 ,2007,27(8):3457-3464.
Liu Y Q, Sun X Y, Wang Y, et al. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Urtica dioica*[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(8):3457-3464.

[29] 苏本营 , 宋艳霞 , 陈圣宾 , 等 . 大豆幼苗对套作玉米遮荫环境的光合生理生态响应 [J]. 生态学报 ,2015,35(10):3298-3308.
Su B Y, Song Y X, Chen S B, et al. Photosynthetic responses of soybean (*Glycine max*) seedlings to shading caused by maize in an intercropping system[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(10):3298-3308.

[30] 王竹 , 杨文钰 , 伍晓燕 , 等 . 玉米株型和幅宽对套作大豆初花期形态建成及产量的影响 [J]. 应用生态学报 ,2008,19(2):323-329.
Wang Z, Yang W Y, Wu X Y, et al. Effects of maize plant type and planting width on the early morphological characters and yield of relay-planted soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(2):323-329.

[31] 凌惠锋 , 赖略 . 遮荫对木荷幼苗生长性状及光合特性的影响 [J]. 绿色科技 ,2022,24(19):80-83.
Ling H F, Lai L. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Schima superba* seedlings[J]. Journal of Green Science and Technology,2022,24(19):80-83.

（下转第 130 页）

226-236.

[34] Zhou C Z, Zhu C, Fu H F, et al. Genome-wide investigation of superoxide dismutase (SOD) gene family and their regulatory miRNAs reveal the involvement in abiotic stress and hormone response in tea plant (*Camellia sinensis*)[J]. PLoS One,2019, 14(10):e0223609.

[35] Liu W G, Tang X, Ma R, et al. The StUBC18-StPUB40 pair negatively regulates drought stress tolerance and influences tuber yield in potato[J]. Horticulture Research,2025,12:uhaf145.

[36] Refli, Muljopawiro S, Dewi K, et al. Expression analysis of antioxidant genes in response to drought stress in the flag leaf of two Indonesian rice cultivars[J]. Indonesian Journal of Biotechnology,2014,19(1):43-55.

[37] 侯丽霞 , 高超 , 车永梅 , 等 . 葡萄病程相关蛋白 1 基因的克隆和表达分析 [J]. 植物生理学报 ,2012,48(1):57-62.
Hou L X, Gao C, Che Y M, et al. Gene cloning and expression analysis of pathogenesis-related protein 1 in *Vitis vinifera* L.[J]. Plant Physiology Journal,2012,48(1):57-62.

[38] Akbudak M A, Yildiz S, Filiz E. Pathogenesis related protein-1 (PR-1) genes in tomato (*Solanum lycopersicum* L.): bioinformatics analyses and expression profiles in response to drought stress[J]. Genomics,2020,112:4089-4099.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 119 页）

[32] 王学文 , 王玉珏 , 付秋实 , 等 . 弱光逆境对番茄幼苗形态、生理特征及叶片超微结构的影响 [J]. 华北农学报 ,2009,24(5): 144-149.
Wang X W, Wang Y J, Fu Q S, et al. Effects of low light stress on morphological trait, physiological characters and leaf ultrastructure of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2009,24(5):144-149.

[33] 赵洋 , 陈云 , 张晓晨 , 等 . 遮阴对少叶花楸幼苗光合和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 东北林业大学学报 ,2019,47(1):30-34.
Zhao Y, Chen Y, Zhang X C, et al. Effects of shading on photosynthetic and chlorophyll fluorescence response of *Sorbus hupehensis* var. *paucijuga*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2019,47(1):30-34.

[34] 张勇 , 程怡 , 王清明 , 等 . 遮荫对月季光合特性及生长发育的影响 [J]. 西北植物学报 ,2014,34(1):162-168.
Zhang Y, Cheng Y, Wang Q M, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Rosa hybrida*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2014,34(1):162-168.

[35] 邢鸿林 , 刘天义 , 扎史都吉 , 等 . 光照与氮添加对红皮云杉幼树生长与叶形态功能的影响 [J]. 森林工程 ,2022,38(4):1-9.
Xing H L, Liu T Y, Zhashiduji, et al. Effects of light and nitrogen addition on the tree growth, needle morphological and functions of *Picea koraiensis* saplings[J]. Forest Engineering,2022,38(4): 1-9.

[36] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature,2004,428:821-827.

[37] 杨霖 , 黄郑雯 , 毛开泽 , 等 . 望天树幼苗光合特性与功能性状对光照和施肥的响应 [J]. 西部林业科学 ,2021,50(6):46-52.
Yang L, Huang Z W, Mao K Z, et al. Response of photosynthetic characteristics and functional traits of '*Parashorea chinensis*' seedlings to light and fertilization[J]. Journal of West China Forestry Science,2021,50(6):46-52.

[38] 王虹妍 , 卜朝阳 , 李先民 , 等 . 不同光照条件下米奴塔睡莲生长特性及抗氧化生理响应 [J]. 热带作物学报 ,2022,43(4): 798-806.
Wang H Y, Bu Z Y, Li X M, et al. Growth and antioxidant physiology effects of *Nymphaea minuta* under different light conditions[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2022,43(4): 798-806.

[本文编校：谢荣秀]