



连香树幼苗对光照强度的响应

魏娟, 马永红, 毛平

引用本文:

魏娟, 马永红, 毛平. 连香树幼苗对光照强度的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(6): 791–799.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4923>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响

Effect of Nitrogen Forms on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Metabolism of *Clematis*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 276–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4281>

冬季南亚热带森林演替中后期优势树种幼叶光保护策略

Photoprotection Strategies in Young Leaves of Dominant Species in Mid- and Late-Successional Stages of Low Subtropical Forest in Winter

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 171–179 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4264>

不同光环境对海南龙血树幼苗表型可塑性及生存策略的影响

Effects of Light Intensity on Phenotypic Plasticity and Survival Strategy of *Dracaena cambodiana* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 150–156 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3782>

不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 31–40 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

向下翻页，浏览PDF全文

连香树幼苗对光照强度的响应

魏娟, 马永红*, 毛平

(西华师范大学, 西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 四川 南充 637000)

摘要: 为了解不同光照强度对连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)幼苗生长的影响, 分别在 10% (L₁)、25% (L₂)、100% (L₃)、110% (L₄)和 125% (L₅)自然光照强度下处理 1 a 生连香树幼苗, 对其形态和生理适应能力进行研究。结果表明, 随光照强度的增加, 株高增长量、生物量、叶长、叶宽、叶面积均呈现先升后降的趋势且都在 L₂ 达到最高值; 比叶面积、叶片含水量、根冠比持续下降, 基径增长量则持续上升。L₁ 和 L₂ 处理的过氧化物酶活性保持在较高水平且显著高于 L₄ 和 L₅ 处理, 丙二醛含量则相反; 随处理时间的增加, L₂ 处理的超氧化物歧化酶活性先升后降, L₁ 处理的持续上升且高于 L₃、L₄、L₅ 处理, 总叶绿素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量随处理时间增加而降低, 且光照越强, 含量越低。因此, 连香树幼苗在遮荫和强光环境下均能生长, 以 25% 自然光照强度更适宜。

关键词: 连香树; 幼苗; 光照强度; 形态指标; 生理指标

doi: 10.11926/jtsb.4923

CSTR:32235.14.jtsb.4923

Response to Light Intensity of *Cercidiphyllum japonicum* Seedlings

WEI Juan, MA Yonghong*, MAO Ping

(Key Laboratory of Southwest Wildlife Resources Conservation, Ministry of Education, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China)

Abstract: In order to understand the effects of light intensity on growth of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings, one-year-old seedlings were grown under 10% (L₁), 25% (L₂), 100% (L₃), 110% (L₄), and 125% (L₅) natural light intensity, and the adaptive ability in morphology and physiology of seedlings was studied. The results showed that the increase of plant height, biomass, leaf length, leaf width, and leaf area increased at first and then decreased with the increase of light intensity, and all of them reached the highest under L₂. The specific leaf area, leaf water content, and root shoot ratio continued to decrease, while the base diameter increased continuously. The peroxidase activity under L₁ and L₂ was significantly higher than that under L₄ and L₅, while the changes in malondialdehyde content was the opposite. With the increase of treatment time, the superoxide dismutase activity under L₂ increased at first and then decreased, which under L₁ continued to increase and was higher than that under L₃, L₄ and L₅. The contents of total chlorophyll, chlorophyll a and chlorophyll b decreased with the treatment time, and the stronger the light, the lower the content. Therefore, *Cercidiphyllum japonicum* seedlings could grow under both shade and strong light, and 25% natural light intensity was more suitable.

Key words: *Cercidiphyllum japonicum*; Seedlings; Light intensity; Morphological index; Biochemical index

连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)为连香树科
(Cercidiphyllaceae)连香树属高大且雌雄异株的落叶

乔木, 是第三纪孑遗植物, 现为国家二级重点保护
物种。化石记录表明, 连香树属植物在晚白垩纪就

收稿日期: 2024-03-29

接受日期: 2024-06-21

基金项目: 四川米仓山国家级自然保护区生物多样性调查与监测服务项目(KH2023-016)资助

This work was supported by the Project for Biodiversity Survey and Monitoring Service of Micangshan National Nature Reserve, Sichuan Province (Grant No. KH2023-016).

作者简介: 魏娟(1999年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物学。E-mail: 15882976979@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mayh@cwnu.edu.cn

已出现, 在古近纪已遍布北半球, 它们作为先锋树种, 在洪水冲击过的漫滩地首先生长^[1], 我国境内就有 6 个化石记录种^[2]。随着地史的变迁, 该类群不仅数量逐渐减少, 且逐步向中低纬度地区迁移而成为东亚特有类群, 目前仅 2 个相近的现代种间断分布在我国(中部和西南部)和日本^[2]。

植物幼苗作为个体发育的重要阶段, 对外界环境的变化极为敏感^[3-4], 幼苗的存活情况不仅会直接影响种群的更新, 也会间接的影响森林群落的物种组成、结构和稳定性^[5]。光照是植物幼苗进行光合作用的重要因素, 不同的光照对植物幼苗的生长发育具有不同的影响。国内外学者通过人工遮荫的方法, 对植物幼苗的生长情况、光合特性变化以及生理特性变化进行了大量的研究, 如轻度遮荫促进了莲叶桐(*Hernandia nymphifolia*)和琼岛杨(*Populus qiondaoensis*)幼苗的生物量积累^[6-7], 提高了乐昌含笑(*Michelia chapensis*)幼苗的净光合速率^[8]; 老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)幼苗在轻度遮荫环境下生理生态指标表现为促进其生长^[9], 亦有研究表明当光照强度超过一定的范围时就会对植物造成非生物胁迫和生理损害^[10]。目前对连香树的光照研究主要集中于光照对连香树幼苗光和特性、形态特征以及化学计量特征的影响^[11-14], 对生理生化特征的影响研究尚未见报道, 本研究利用人工气候室, 排除其它环境因素的干扰, 设置不同光照强度处理 1 a 生连香树幼苗, 结合形态特征和生理生化特征, 深入探讨连香树幼苗对光照强度变化的适应能力和适应策略, 期为连香树的种群复壮及濒危机制研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

2022 年 10 月采集四川省绵阳市雪宝顶自然保护区连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)成年健壮母树, 于 2023 年 1 月中旬进行种子萌发。

1.2 实验设计

于 2023 年 3 月初将萌发的幼苗移栽至高 15 cm、口径 18 cm 的塑料盆中, 缓苗生长 3 个月。6 月初选取高度接近, 生长健壮的幼苗放置在人工气候室中进行光照处理, 采用 LED 灯控制光照强度; 根据野外实测连香树生长期四川省绵阳市雪宝顶自然保护区的自然光照强度, 设置了 5 个光照处理, 每个光照处理放置 25 株幼苗, 通过数字光照度计

(TES-1335)测定光照强度: 以 100%自然光照强度为对照(L₃); 低光(L₁)、中低光(L₂)分别是 10%、25%自然光照强度的, 作为弱光组, 以模拟野外林下、林窗的光照条件^[15-16]; 中高光(L₄)、高光(L₅)分别是 110%、125%自然光照强度的, 为强光组, 模拟高光胁迫处理。光照时间为 12 h/d, 湿度为 65%, 温度为 20 °C, 光照处理时间为 6 月—9 月, 期间进行统一的水肥管理。

1.3 方法

形态指标 每组随机选取 5 株幼苗于实验开始前和实验结束后用直尺和游标卡尺分别测量株高、基径。实验结束后, 每组另外随机选取 5 株幼苗, 采集其成熟健康的功能叶片(从上往下数第 3~5 片叶子)进行编号和称重, 并利用叶片扫描测定仪测定叶长、叶宽、叶面积, 最后将这 5 株幼苗整株收获, 用自来水冲净根部所带土壤, 剪下根、茎和叶并分别装入茶叶袋中, 置于 55 °C 烘箱中, 烘至恒重, 用电子天平称重。计算叶片含水量、比叶面积、生物量和根冠比。比叶面积为叶面积与叶片干重之比, 根冠比为茎叶生物量与根生物量之比。

生理指标 于实验处理的第 30、60、90 天分别在不同光照强度处理下随机选取 5 株无病虫害、长势均匀的个体, 取成熟的功能叶片(从上往下数第 3~5 片叶子), 用锡箔纸包裹放进自封袋进行编号后放置冰桶中迅速带回实验室-80 °C 保存, 委托苏州锐思生物科技有限公司测定相关指标, 每个指标重复测定 3 次。过氧化物酶(POD)活性[$\Delta OD_{470}/(\text{min} \cdot \text{g})$]采用愈创木酚法测定^[17]; 超氧化物歧化酶(SOD)活性(U/g)采用黄嘌呤氧化酶法测定^[17]; 丙二醛(MDA)含量(nmol/g)采用硫代巴比妥酸法测定^[18]; 叶绿素(Chl)含量(mg/g)采用乙醇法测定^[18]。

1.4 数据的统计分析

利用 Excel 2019 对原始数据进行整理, 利用 SPSS Statistics 27.0 对数据进行分析, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异性检验(LSD)法比较各指标在不同光照处理下的差异显著性; 利用双因素方差分析法(Two-Way ANOVA)分析光照强度和处理时间及其交互作用对生理指标的显著影响; 相关性分析方法对不同光照强度下幼苗形态指标、生理指标做相关性分析; 因子分析方法对不同光照强度下幼苗形态指标、生理指标做主成分分析; 利用 Origin 2022 软件进行作图。文中数据结果均为平均值 \pm 标准误。

2 结果和分析

2.1 光照强度对幼苗形态特征的影响

不同光照强度对幼苗的形态有显著影响(图 1)。随着光照强度的增强,株高增长量、总生物量、地上部分生物量和地下部分生物量均呈现先升后降的趋势,以 L₂ 处理的最高且显著高于 L₁ 和强光处理, L₅ 处理的最低; 茎径增长量随着光照强度增强

而增加,除 L₃ 和 L₄ 处理间,其余处理间均差异显著; 根冠比随光照增强而降低,但差异并不显著。

单因素方差分析结果表明光照强度对幼苗叶宽、叶长、叶面积、比叶面积、含水量均有显著影响(图 2)。弱光处理的幼苗叶长、叶宽、叶片长宽比随光照强度增强而增加,强光处理组则随光强增大而减小,其中 L₂ 处理叶长、叶宽显著高于对照和强光处理, L₅ 处理的叶片长宽比显著高于其他处理。

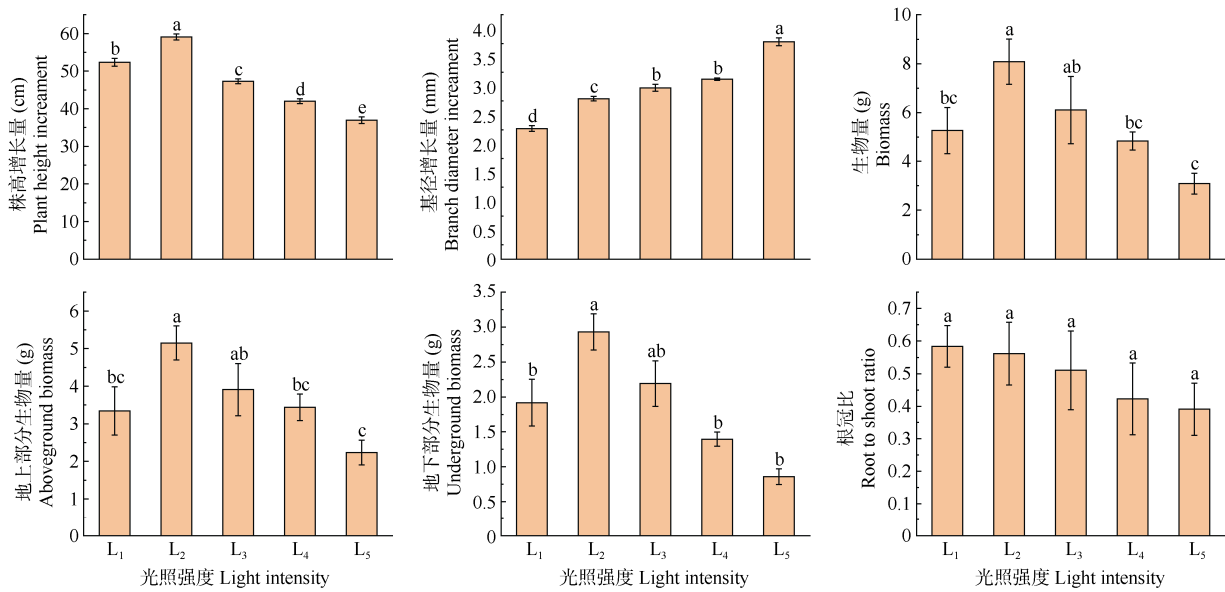


图 1 光照强度对连香树幼苗生长的影响。L₁、L₂、L₃、L₄、L₅ 分别为低光、中低光、对照、中高光、高光; 柱上不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同
Fig. 1 Effect of light intensity on growth of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings. L₁, L₂, L₃, L₄, L₅ represent light intensity at low, medium low, control, medium high, and high levels, respectively. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

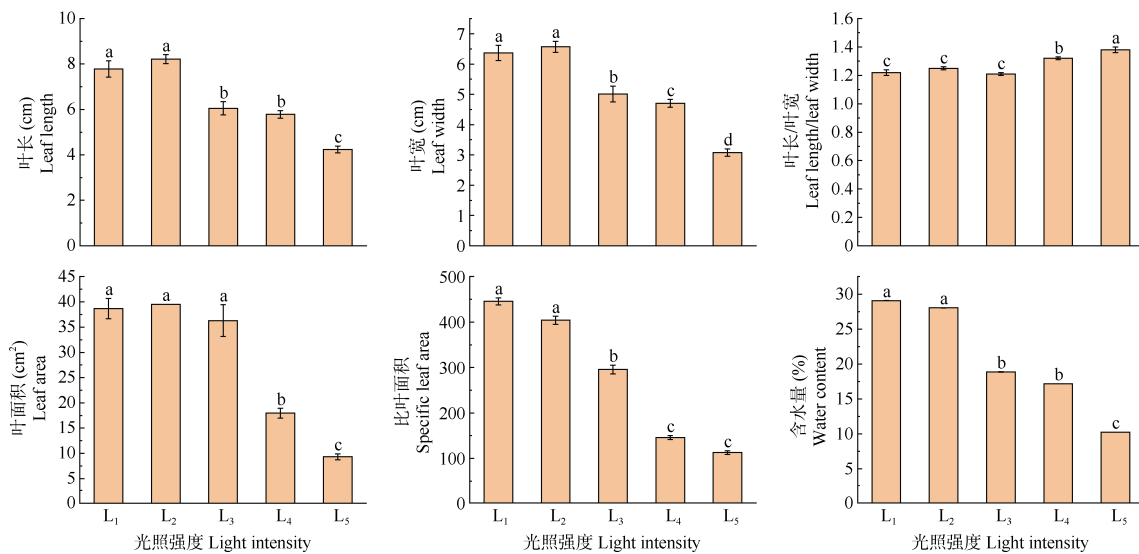


图 2 光照强度对连香树幼苗叶片形态和含水量的影响
Fig. 2 Effect of light intensity on morphology and water content in leaves of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

与对照相比,强光处理的叶面积、比叶面积随光照强度增强而显著降低,弱光处理的叶面积无显著差异,但比叶面积显著低于对照。随着光照强度的增强,叶片含水量呈现降低趋势,其中 L₅ 处理显著低于其他处理组。

2.2 光照强度对幼苗生理特征的影响

连香树幼苗的生理指标受光照、处理时间以及光照和处理时间交互作用的影响极显著(表 1)。不同光照强度下幼苗叶片的 SOD、POD 活性和 MDA、Chl 含量随处理时间的增加呈现出不同的变化趋势(图 3)。相同处理时间下,弱光的 SOD 活性高于强

光,随着处理时间的增加,L₁ 处理的幼苗叶片 SOD 活性逐渐升高,L₄ 显著降低,L₂ 和 L₅ 呈先升后降的趋势,L₃ 则先降后升且差异显著。

相同处理时间下,弱光、对照的 POD 活性始终显著高于强光,MDA 含量则相反;相同光照下,弱光的 POD 活性随处理时间增加呈下降趋势但不显著,L₃ 和 L₄ 先升后降且差异显著,L₅ 显著上升;强光的 MDA 含量随处理时间增加而显著增加,L₁、L₃ 先降后升,L₂ 则相反且差异显著。

相同光照下,对照和强光的 Chl、Chl a、Chl b 含量均随处理时间的增加而显著下降,弱光则呈先

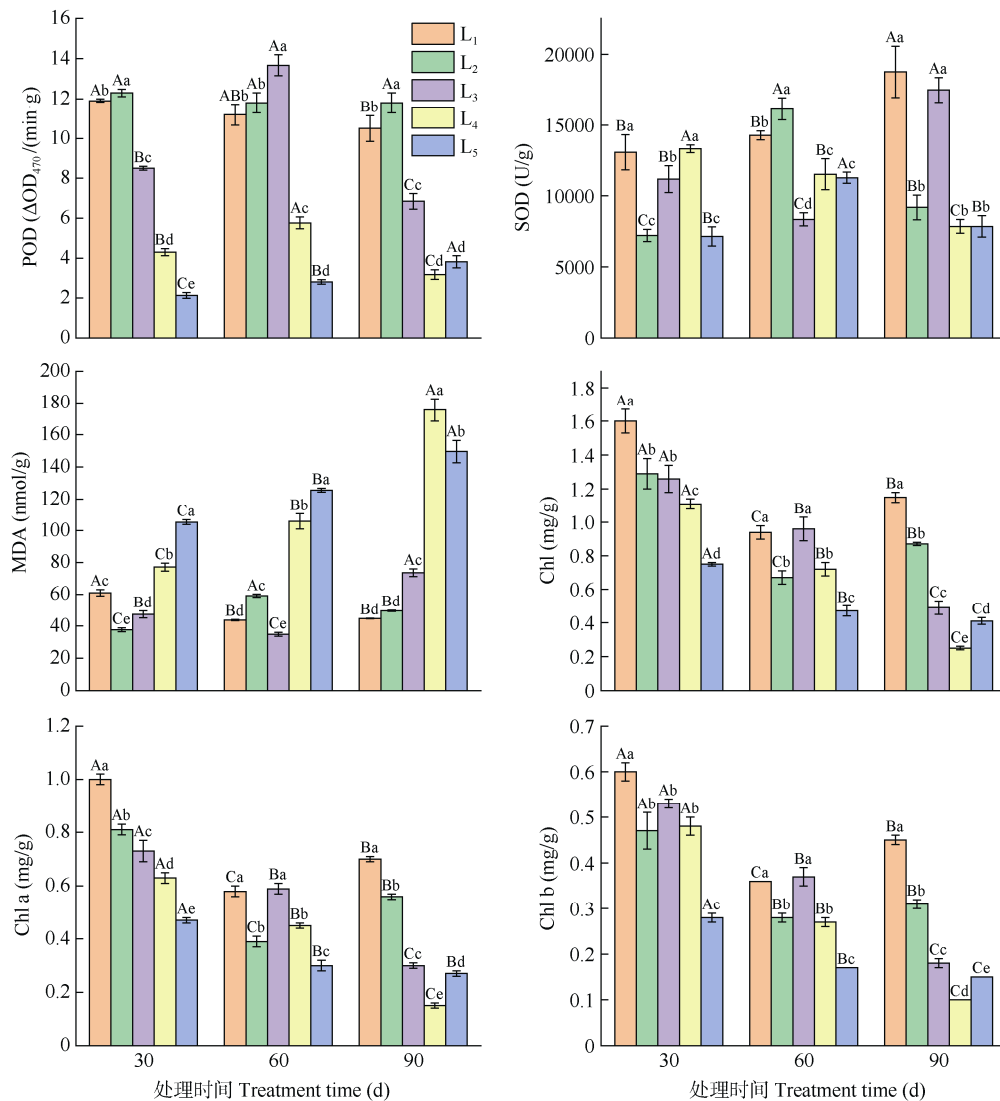


图 3 光照强度和对处理时间对连香树幼苗生理特征的影响。柱上不同小写和大写字母分别表示相同处理时间不同光照强度和相同光照强度不同处理时间下差异显著($P < 0.05$); POD: 过氧化物酶; SOD: 超氧化物歧化酶; MDA: 丙二醛; Chl: 叶绿素。下同

Fig. 3 Effects of light intensity and time on physiological characteristics of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings. Different small and capital letters indicate significant differences at 0.05 level under different light intensities at the same time and the same light intensity treated different time, respectively.

POD: Peroxidase; SOD: Superoxide dismutase; MDA: Malondialdehyde; Chl: Chlorophyl. The same below

表 1 光照和时间对连香树幼苗生理指标的影响(F 值)

Table 1 Effects of light and time on physiological indexes of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings (F value)

指标 Index	光照 Light	时间 Time	光照×时间 Light×time
过氧化物酶 Peroxidase (POD)	1144.29**	96.93**	64.41**
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (SOD)	73.60**	24.37**	61.21**
丙二醛 Malondialdehyde (MDA)	1443.38**	439.23**	163.55**
叶绿素 Chlorophyll (Chl)	268.22**	581.06**	43.50**
叶绿素 a Chlorophyll a (Chl a)	216.64**	426.78**	36.60**
叶绿素 b Chlorophyll b (Chl b)	139.64**	341.25**	24.39**

**：P<0.01

降后升的趋势且差异显著。相同处理时间下，强光的 Chl、Chl a、Chl b 含量均显著低于对照，弱光则随着光照的增强而显著降低。

2.3 相关性分析

连香树幼苗形态和生理指标间存在相关性(表 2)。其中，叶绿素含量与生物量、根冠比呈显著负相关，与 POD 活性呈显著正相关；MDA 含量与叶面积、比叶面积、POD 活性呈显著负相关，与根冠比呈显著正相关；POD 活性与根冠比呈显著负相关、与株高增长量呈显著正相关性；比叶面积与叶面积和 SOD 活性之间呈显著正相关；株高增长量与基径增长量之间呈显著正相关，与根冠比之间呈显著负相关。

2.4 综合评价

对不同光照强度下连香树幼苗的 10 个生长和生理指标进行主成分分析，结果表明前 2 个主成分累积贡献率高达 90.87% (表 3)，能综合幼苗生长的大部分信息，因此要将这 10 个指标转化成 2 个新的综合指标。对于第 1 主成分(表 4)，除了生物量、

根冠比和 MDA 含量具有较高的负载荷外，其他生长指标均有较高的正载荷。以主成分 1 和主成分 2 对应的方差贡献率作为权重建立综合评价模型，其表达式为 $Y=0.7841Y_1+12.46\%Y_2$ 。不同光照强度下幼苗生长的综合评价值(表 5)。综合评价值为 $L_2>L_1>L_3>L_4>L_5$ ，这表明中低光照下的幼苗有最佳的生长状态，强光下幼苗生长受到抑制且光照越强抑制作用越明显。

3 讨论和结论

3.1 连香树幼苗形态特征对光照强度的响应

光照在植物的生存生长方面发挥了重要作用^[19]。随着光照强度发生变化，植物会通过增加或者减少垂直生长和基径生长的同化碳从而调节幼苗株高增长量和基径增长量来适应光环境的变化^[5,20]。另外生物积累量也会出现差异^[6]，有研究表明当光照减弱时，地上部分生物量会有所增加从而获得更多光能，而光照增强时，地下部分生物量会增加，

表 2 相关性分析

Table 2 Correlation analysis

指标 Index	生物量 Biomass	根冠比 Root to shoot ratio	株高增长量 Plant height increment	基径增长量 Base diameter increment	叶面积 Leaf area	比叶面积 Specific leaf area	SOD	POD	MDA	Chl
生物量 Biomass	1									
根冠比 Root-shoot ratio	0.748	1								
株高增长量 Plant height increment	-0.495	-0.906*	1							
基径增长量 Base diameter increment	-0.191	-0.707	0.937*	1						
叶面积 Leaf area	-0.412	-0.803	0.865	0.839	1					
比叶面积 Specific leaf area	-0.588	-0.790	0.672	0.537	0.902*	1				
SOD	-0.524	-0.567	0.350	0.193	0.693	0.927*	1			
POD	-0.737	-0.958*	0.951*	0.801	0.823	0.728	0.454	1		
MDA	0.761	0.905*	-0.859	-0.702	-0.898*	-0.882*	-0.685	-0.943*	1	
Chl	-0.905*	-0.954*	0.764	0.492	0.643	0.726	0.567	0.903*	-0.865	1

*: P<0.05

表 3 光照对连香树幼苗生长影响主成分分析方差解释

Table 3 Principal component variance explanations of effect of light on the growth of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract the sum of squares to load		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
1	9.410	78.41	78.41	9.410	78.41	78.41
2	1.496	12.46	90.87	1.496	12.46	90.87
3	0.961	8.00	98.87			
4	0.134	1.11	100.00			

表 4 光照对连香树幼苗生长影响主成分矩阵

Table 4 Principal component matrix of effect of light on growth of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

指标 Index	第 1 主成分 1st principal component		第 2 主成分 2nd principal component	
	载荷 Load	标准化变量系数 Standardized variable coefficient	载荷 Load	标准化变量系数 Standardized variable coefficient
生物量 Biomass	-0.696	-0.227	0.499	0.408
根冠比 Root/top	-0.967	-0.315	0.046	0.038
株高增长量 Plant height increment	0.939	0.306	0.339	0.277
基径增长量 Branch diameter increment	0.797	0.260	0.577	0.472
叶面积 Leaf area	0.913	0.298	0.070	0.057
比叶面积 Specific leaf area	0.856	0.279	-0.359	-0.294
SOD	0.619	0.202	-0.646	-0.528
POD	0.975	-0.318	0.093	0.076
MDA	-0.971	-0.316	0.133	0.109
Chl	0.889	0.290	-0.260	-0.213

表 5 光照对连香树幼苗生长影响得分

Table 5 Effect score of light on seedling growth of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

光照梯度 Light gradient	第 1 主成分得分 (Y ₁) 1st principal component score	第 2 主成分得分 (Y ₂) 2nd principal component score	综合得分 (Y) Aggregate score
L ₁	2.4577	-1.4049	1.7521
L ₂	2.1521	1.6221	1.8896
L ₃	0.6043	-0.4161	0.4220
L ₄	-2.4009	0.8717	-1.7739
L ₅	-2.8133	-2.2897	-2.2897

以吸收更多的养分和水^[9]。本研究中,株高增长量在中低光处理下达到最高值,显著高于其余各组,而基径增长量随着光照强度增强而增加,这表明光照强度的增强并不利于连香树幼苗顶端分生组织的分裂,反而对幼苗的次生长相对友好。这说明连香树幼苗在适度遮荫(即野外林窗环境)时,会将同化碳更多的用于垂直生长,这可能是为了最大程度的获得光照,体现了连香树幼苗对光环境改变的形态适应策略;总生物量、地上部分生物量和地下部分生物量均在中低光处理下达到最大值,强光处理下达到最小值,这表明林窗环境下连香树幼苗不仅会增加地上部分以获取更多光资源,还会增加地下与土壤的接触面积来汲取更多养料和水分,这是

连香树幼苗在林窗环境下生长的双重优势,这与程勇^[11]、Masako 等^[20]的研究结果相似。连香树幼苗根冠比虽然随光强增加而减少但差异并不显著,这可能是试验处理时间较短的缘故。

叶片是植物感知外界环境变化最敏感的部位,叶片性状与物种的生长、存活和光照需求密切相关^[21]。当光照强度增加时,植物可以通过增加叶片厚度、减小叶长、叶宽、比叶面积等来抵御强光带来的伤害,而低光条件下,植物的叶子薄而大,从而增加光照接触面积,提高光能利用率^[22-23]。本研究结果表明,与对照组相比,强光组幼苗叶长、叶宽、叶面积、比叶面积都逐渐下降;弱光组叶长、叶宽、比叶面积显著高于对照组,其中中低光组叶长、叶

宽、叶面积达到最高值, 低光组比叶面积达到最高值。这表明在强光环境下, 连香树幼苗为抵御强光环境带来的伤害, 会形成小而厚的叶片, 但这并不利于幼苗通过光合作用积累有机物, 与之相反中低光(即野外林窗环境)下幼苗会通过扩大光合作用面积来制造更多的有机物以供自身生长发育所需, 这与生物量指标分析部分相呼应; 而低光处理下(即野外林下环境), 连香树幼苗会通过减少叶片生物量, 增大比叶面积来提高对光能的捕获能力以补偿光照强度不足造成的光合速率下降, 即使比叶面积达到最高, 但叶长、叶宽、叶面积均低于中低光处理组, 由此可见, 中低光照(即野外林窗环境)更有利于连香树积累有机物从而满足生长发育的需要。另外, 叶片的含水量随光照强度增加而减少, 这可能是因为连香树幼苗为了适应强光环境, 通过增加蒸腾作用加速水分蒸发使叶片变得皱缩, 从而减少叶片与光照的接触面积, 避免强光环境带来的伤害。

3.2 连香树幼苗生理指标对光照强度的响应特征

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物, 它会破坏植物细胞膜系统的稳定性, 因此 MDA 的含量可以反映膜脂过氧化和植物膜系统受害的程度^[24-25]。本研究中 L₄、L₅ 处理组 MDA 含量显著高于其余各组且随着处理时间增加持续上升, L₁、L₂、L₃ 处理组 MDA 含量始终保持在较低水平, 到处理结束时, 对照组 MDA 含量显著高于弱光组, 但显著低于高光组, 这表明强光胁迫会大幅增加幼苗质膜氧化程度, 连香树幼苗无法很好的适应, 而遮荫有利于保护幼苗细胞膜系统且连香树幼苗适应状态良好, 这与杨虎彪等^[26]对吊罗山藁草(*Carex diaoluoshanica*)的研究结果接近。

多项研究表明, 当植物处于逆境时, 体内的活性氧会大幅增加, 而植物防御系统所产生的 SOD 和 POD 是植物体内清除自由基和过氧化物的主要抗氧化酶, 可以减轻细胞损伤^[27-28]。处理 30 d 后, L₁、L₄ 处理组 SOD 活性显著高于对照组, L₂、L₅ 显著低于对照组; 处理 60 d 后, 对照组 SOD 活性最低, 弱光组显著高于强光组且 L₂ 活性最高; 处理 90 d 后, 弱光组 SOD 活性依旧显著高于强光组, 但 L₁ 活性最高, 这表明随着处理时间的增加, 强光胁迫会抑制 SOD 的作用, 而低光可能也会对幼苗产生胁迫, 但却刺激幼苗产生更多的 SOD, 从而使幼苗受到保护, 这与朱伟平等^[29]对坡柳(*Dodonaea viscosa*)的研究结果不一致, 可能是因为 SOD 活性的变化不仅与

光照强度、水分条件有关, 还与植物物种有关。在整个试验过程中, 高光组 POD 活性始终显著低于其余各组, 结合 MDA 含量变化, 这可能是在强光胁迫下幼苗膜脂过氧化加剧, 间接影响到合成 POD 所需蛋白质的合成。弱光组 POD 活性较高且变化趋势较稳定, 在试验处理结束后, 与对照组相比活性变化为 L₂>L₁>L₃ 且有显著差异, 这说明在中低光处理下, 幼苗体内产生的过氧化氢能够得到及时的清理, 从而有效保护幼苗生长。

光合作用是植物重要的生理过程, 为了适应弱光环境, 植物通常会增加叶绿素含量, 降低叶绿素 a/b 值来捕获更多的光能^[30-31]。本研究中, 与对照相比, 强光下幼苗叶片 Chl、Chl a 和 Chl b 含量都显著降低, 且随着处理时间的增加而显著降低, 结合 MDA 的变化来看, 可能是因为持续在强光环境下, 连香树幼苗无法很好的适应, 幼苗膜系统受伤程度增大, 导致叶绿素大量溶解; 而弱光处理下, 幼苗叶片 Chl、Chl a 和 Chl b 含量显著增加, 且随着处理时间的增加呈现先降后升的趋势, 这表明强光环境不利于连香树幼苗捕获光能, 光合作用能力降低从而导致生物量积累降低, 而连香树幼苗对遮荫环境适应渐佳, 从而产生更多的光和色素来增强光合作用能力, 增加有机物的产生, 这与秦舒浩等^[32]对西葫芦(*Cucurbit pepo*)的研究结果类似。

综上, 光照对连香树幼苗生长和生理生化特性的影响显著, 连香树幼苗在不同遮荫程度以及强光环境下均能生长, 但是过强的光照环境会对植物的抗氧化系统以及细胞膜系统造成损伤, 而过弱的光照强度不利于植株的生长。在野外林窗环境下, 连香树幼苗体内抗氧化酶调节能力较好, 生长状态良好, 因此得出野外的林窗环境更适合连香树幼苗生长, 这可以为连香树幼苗野外培育工作以及种群的建立提供参考。

参考文献

- [1] ZHOU Z K, MOMOHARA A. Fossil history of some endemic seed plants of East Asia and its phytogeographical significance [J]. Acta Bot Yunnan, 2005, 27(5): 449-470. [周浙昆, MOMOHARA A. 一些东亚特有种子植物的化石历史及其植物地理学意义 [J]. 云南植物研究, 2005, 27(5): 449-470. doi: 10.3969/j.issn.2095-0845.2005.05.001.]
- [2] CUI J Z, SUN K Q, WANG S J, et al. Fossil Angiosperms in China, Vol. 4 [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019: 49-52. [崔金钟, 孙克勤, 王士俊, 等. 中国化石植物志, 第 4 卷 [M]. 北京: 高等教育出版社,

- 2019: 49–52.]
- [3] HAN Y Z, WANG Z Q. Spatial heterogeneity and forest regeneration [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(5): 615–619. [韩有志, 王政权. 森林更新与空间异质性 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 615–619.]
- [4] LI J Q, ZANG R G, JANG Y X. Review on studies of architecture and morphological diversity for *Fagus sylvatica* L. [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, 21(1): 151–155. [李俊清, 臧润国, 蒋有绪. 欧洲水青冈(*Fagus sylvatica* L.) 构型与形态多样性研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 151–155. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2001.01.024.]
- [5] LIU C, TIAN T, LI S, et al. Growth response of Chinese woody plant seedlings to different light intensities [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(2): 518–527. [刘从, 田甜, 李珊, 等. 中国木本植物幼苗生长对光照强度的响应 [J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 518–527. doi: 10.5846/stxb.201611012221.]
- [6] FANG Z S, ZHONG C R, CHENG C, et al. Effect of shading on growth and biomass allocation of *Hernandia nymphaeifolia* seedlings [J/OL]. *Mol Plant Breed*, [2023-06-12]. [方赞山, 钟才荣, 程成, 等. 遮荫对莲叶桐幼苗生长及生物量分配的影响 [J/OL]. *分子植物育种*, [2023-06-12]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230612.1151.004.html>]
- [7] RAO D D, HAN Y, WU E H, et al. Growth and photosynthetic characteristics of *Populus qionghaensis* seedlings under different light intensities [J]. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci)*, 2024, 44(1): 61–69. [饶丹丹, 韩豫, 吴二焕, 等. 不同光强下琼岛杨幼苗生长和光合特性 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(1): 61–69. doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202309021.]
- [8] ZHOU H, WEI R P, LI J Y, et al. Effects of light intensity on growth and photosynthetic characteristics of *Michelia chapensis* seedlings [J]. *Chin J Ecol*, 2024, 43(3): 709–715. [周欢, 韦如萍, 李吉跃, 等. 光照强度对乐昌含笑幼苗生长及光合特性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2024, 43(3): 709–715. doi: 10.13292/j.1000-4890.202403.041.]
- [9] LIU B E, LIAO B W. The physio-ecological response of *Acanthus ilicifolius* seedlings to different degrees of light intensity in tide environment [J]. *For Res*, 2013, 26(2): 192–199. [刘滨尔, 廖宝文. 老鼠簕幼苗在潮汐环境下对不同光强的生理生态响应 [J]. *林业科学研究*, 2013, 26(2): 192–199. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2013.02.010.]
- [10] SHI Y F, KE X S, YANG X X, et al. Plants response to light stress [J]. *J Genet Genom*, 2022, 49(8): 735–747. doi: 10.1016/j.jgg.2022.04.017.
- [11] CHENG Y, ZHANG M, CHEN M G, et al. Effects of forest gap area on growth and biomass allocation of *Cercidiphyllum japonicum* seedling [J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2022, 9(1): 44–49. [程勇, 张珉, 陈明皋, 等. 林窗面积对连香树幼苗生长及生物量分配的影响 [J]. *湖南生态科学学报*, 2022, 9(1): 44–49. doi: 10.3969/j.issn.2095-7300.2022.01.006.]
- [12] LI D L, JIN Y Q, CUI M F, et al. Growth, photosynthesis and ultra-structure of mesophyll cells for *Cercidiphyllum japonicum* seedlings with shading in summer [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, 37(3): 496–505. [李冬林, 金雅琴, 崔梦凡, 等. 夏季遮光对连香树幼苗形态、光合作用及叶肉细胞超微结构的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(3): 496–505. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20190370.]
- [13] LI D L, JIN Y Q, CUI M F, et al. Photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings under shading condition [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2019, 39(6): 1053–1063. [李冬林, 金雅琴, 崔梦凡, 等. 遮光对连香树幼苗光合特性及其叶片解剖结构的影响 [J]. *西北植物学报*, 2019, 39(6): 1053–1063. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2019.06.1053.]
- [14] HAN Y H, ZHAO Q L, ZHANG J, et al. Effects of shading on seedling growth and C, N, P stoichiometry characteristics of *Cercidiphyllum japonicum* [J]. *For Eng*, 2024, 40(2): 36–46. [韩云花, 赵秋玲, 张晶, 等. 遮荫对连香树幼苗生长和碳氮磷化学计量特征的影响 [J]. *森林工程*, 2024, 40(2): 36–46. doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.005.]
- [15] LIANG X D, YE W H. Advances in study on forest gaps [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2001, 9(4): 355–364. [梁晓东, 叶万辉. 林窗研究进展 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2001, 9(4): 355–364. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2001.04.015.]
- [16] WEN H. The characteristics of seed germination and the effect of light on seedlings growth of *Tetracentron sinense* Oliv. [D]. Yunnan: Yunnan University, 2010. [文晖. 水青树种子萌发特性及幼苗对光环境的适应 [D]. 云南: 云南大学, 2010.]
- [17] ZHANG A Q, LIU M X, GU W, et al. Effect of drought on photosynthesis, total antioxidant capacity, bioactive component accumulation, and the transcriptome of *Atractylodes lancea* [J]. *BMC Plant Biol*, 2021, 21(1): 293. doi: 10.1186/s12870-021-03048-9.
- [18] ZHU H F, LI X F, ZHAI W, et al. Effects of low light on photosynthetic properties, antioxidant enzyme activity, and anthocyanin accumulation in purple pak-choi (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* Makino) [J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0179305. doi: 10.1371/journal.pone.0179305.
- [19] MICHAEL F, THOMPSON K. The ecology of seeds [J]. *Seed Sci Res*, 2005, 15(4): 365–366. doi: 10.1079/SSR2005226.
- [20] KUBO M, SHIMANO K, SAKIO H, et al. Difference between sprouting traits of *Cercidiphyllum japonicum* and *C. magnificum* [J]. *J For Res*, 2010, 15(5): 337–340. doi: 10.1007/s10310-010-0188-7.
- [21] POORTER L, BONGERS F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species [J]. *Ecology*, 2006, 87(7): 1733–1743. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[1733:LTAGPO]2.0.CO;2.
- [22] CHEN C, LUO G Y, JIN Z X, et al. Effects of light intensities on leaf

- morphological structure, stoichiometry and non-structural carbohydrates of *Magnolia sinostellata* seedlings [J]. *Chin J Ecol*, 2023, 42(6): 1307–1315. [陈超, 罗光宇, 金则新, 等. 光照强度对景宁木兰幼苗叶片形态结构、化学计量特征和非结构性碳水化合物化合物的影响 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(6): 1307–1315. doi: 10.13292/j.1000-4890.202306.009.]
- [23] ALERIC K M, KIRKMAN L. Growth and photosynthetic responses of the federally endangered shrub, *Lindera melissifolia* (Lauraceae), to varied light environments [J]. *Am J Bot*, 2005, 92(4): 682–689. doi: 10.3732/ajb.92.4.682.
- [24] BECANA M, DALTON D A, MORAN J F, et al. Reactive oxygen species and antioxidants in legume nodules [J]. *Physiol Plant*, 2000, 109(4): 372–381. doi: 10.1034/j.1399-3054.2000.100402.x.
- [25] DEL RIO D, STEWART A J, PELLEGRINI N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress [J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2005, 15(4): 316–328. doi: 10.1016/j.numecd.2005.05.003.
- [26] YANG H B, LIN P, LIU G D. Effect of light intensity and water content on the seedling growth and physiological characteristics of *Carex diaoluoshanica* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2021, 42(9): 2623–2630. [杨虎彪, 林鹏, 刘国道. 不同光照和水分对吊罗山藁草生长的影响 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42(9): 2623–2630. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.09.025.]
- [27] LI W. Study on acclimation of seedling and sapling foliage of Japanese yew (*Taxus cuspidata*) to different light intensity [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2012. [李威. 东北红豆杉幼树和幼苗光合生理适应性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.]
- [28] JI Y Y, GU W, QIU R L, et al. Effects of light intensity on growth and physio-biochemical characteristics of *Alisma orientale* (Sam.) Juzep [J/OL]. *Mol Plant Breed*, [2023-11-01]. [季媛媛, 谷巍, 邱蓉丽, 等. 不同光照强度对东方泽泻生长和生理生化指标的影响 [J/OL]. *分子植物育种*, [2023-11-01]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231101.1534.004>]
- [29] ZHU W P, GAO Y B, HAO G C, et al. Physiological response of *Dodonaea viscosa* seedlings treated with light and water [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 32(4): 483–488. [朱伟平, 高永斌, 郝琰村, 等. 光照和水分处理下坡柳幼苗的生理响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 32(4): 483–488. doi: 10.11926/jtsb.4776.]
- [30] WANG J H, REN S F, SHI B S, et al. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Forsythia suspensa* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(7): 1811–1817. [王建华, 任士福, 史宝胜, 等. 遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1811–1817.]
- [31] YAMAZAKI J, SHINOMIYA Y. Effect of partial shading on the photosynthetic apparatus and photosystem stoichiometry in sunflower leaves [J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(1): 3–12. doi: 10.1007/s11099-012-0073-z.
- [32] QIN S H, LI L L. Effects of shading on squash seedlings' morphological and photosynthetic physiological characteristics [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(4): 653–656. [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.]