

遮光对单叶铁线莲生长与生理特性的影响

陈子航¹, 陶丽¹, 俞天泽¹, 杨晗曦¹, 刘志高^{1,2}, 俞慧婷¹, 申亚梅^{1,2}

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省园林植物种质创新与利用重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】探讨单叶铁线莲 *Clematis henryi* 对不同光照强度的生理响应机制, 为单叶铁线莲的引种栽培和园林应用提供依据。【方法】以3年生单叶铁线莲扦插苗为研究材料, 设置遮光率为0(ck)、80%(T1)、60%(T2)、50%(T3)和40%(T4)5种光照处理, 研究不同遮光强度对单叶铁线莲植株生长和生理的影响。【结果】①遮光处理显著增加植株分蘖数量、节数和节间距 ($P < 0.05$), T1处理的分蘖数和节数增幅最大, 分别增加63.0%和24.3%, T1、T2、T3处理的节间距分别高于对照27.5%、8.4%和32.1%, T3处理的生物量最高, 高于对照36.7%; ②遮光处理极显著促进蛋白质合成, 同时减少丙二醛(MDA)的产生 ($P < 0.01$), T1处理的MDA质量摩尔浓度最低, 可溶性蛋白质量分数于30d达最大值 ($11.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$); ③叶绿素a和叶绿素b质量浓度不断增加, 60d时各处理组均高于对照, T1处理的叶绿素总量于30d时达最大值 ($2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 为对照的3.9倍; ④随遮光强度由高到低, 过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性呈升—降—升的变化趋势, 同时2种酶的活性随时间推移逐步上升, 超氧化物歧化酶(SOD)则相反。【结论】单叶铁线莲有较强耐阴性, 50%~60%的光照强度可显著促进枝和叶的生长和干物质积累, 提高观赏价值。夏季栽培单叶铁线莲应选择适宜的遮光环境, 保障植株的健康生长。图3表4参30

关键词: 单叶铁线莲; 遮光; 保护酶活性; 叶绿素; 生理指标

中图分类号: S718.43 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)00-0001-09

Effects of shading treatment on growth and physiological characteristics of *Clematis henryi*

CHEN Zihang¹, TAO Li¹, CHOU Tianze¹, YANG Hanxi¹, LIU Zhigao^{1,2}, YU Huiting¹, SHEN Yamei^{1,2}

(1. College of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization of Garden Plants, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study, with an investigation of the physiological response mechanism of *Clematis henryi* to different light intensity, is aimed to provide scientific basis for its introduction, cultivation, and landscaping applications. [Method] With three-year-old *C. henryi* cutting seedlings used as experimental materials, five light treatments were set up: full sunlight (ck), 80% (T1), 60% (T2), 50% (T3), and 40% (T4) shading before a study was conducted of the effects of different shading levels on the growth and physiology of *C. henryi* plants. [Result] (1) Shading treatment significantly increased the number of tillers, number of segments and segment spacing of plants ($P < 0.05$), with the increase in the number of tillers and segment spacing of plants under T1 treatment being the highest (63.0% and 24.3%, respectively), and the segment

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2024-01-17

基金项目: 浙江省农业新品种重大专项花卉育种专项(2021C02071-6-4); 浙江省农业(林木)新品种选育重大科技专项子课题(2016C02056-13-4); 浙江农林大学学生科研训练项目(2023KX048)

作者简介: 陈子航 (ORCID: 0009-0007-4515-8740), 从事铁线莲育种等研究。E-mail: 635939848@qq.com。通信作者: 刘志高 (ORCID: 0000-0002-2720-9619), 副教授, 博士, 从事园林植物栽培与应用研究。E-mail: vzhigao@sina.com

spacing of plants under T1, T2 and T3 treatments being higher than that of the control (27.5%, 8.4% and 32.1% respectively). (2) Shading treatment significantly promoted protein synthesis and decreased MDA production ($P < 0.01$), with the mass molar concentration of MDA in T1 treatment being the lowest, and the mass fraction of soluble protein (SP) reaching the maximum at 30 d ($11.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). (3) The mass concentration of chlorophyll a and chlorophyll b increased continuously, with each index of the shading group being higher than that of the control at 60 d, and the total mass concentration of chlorophyll reaching the maximum value ($2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) at 30 d, which was 3.9 times that of the control. (4) The activities of POD and CAT showed the trend of rise-fall-rise with the shading from high to low, while the activities of the two enzymes increased gradually over time, and the opposite was true for SOD. [Conclusion] *C. henryi* exhibited strong shade tolerance, with shading levels of 50% – 60% significantly promoting the growth and dry matter accumulation of branches and leaves, enhancing ornamental value. Therefore, suitable shading environments should be selected for summer cultivation to ensure the healthy growth of plants. [Ch, 3 fig. 4 tab. 30 ref.]

Key words: *Clematis henryi*; shading treatment; protect enzyme activity; chlorophyll; physiological index

单叶铁线莲 *Clematis henryi* 为多年生常绿木质藤本，为毛茛科 Ranunculaceae 铁线莲属 *Clematis* 植物。铁线莲属植物种类丰富，全世界约 300 种，中国分布 108 种。该属植物多为藤本，兼具药用以及观赏价值，栽培品种多样，在西方园林中应用广泛，素有“藤本皇后”之美誉^[1-2]。中国拥有丰富的铁线莲属植物资源，但绝大多数仍处于野生状态^[3]。单叶铁线莲花为白色或淡黄色，聚伞花序，花量大，具芳香，花期为 12 月至翌年 2 月，有效填补了现有铁线莲品种冬季少花的空白，具有极大的开发利用潜力^[4]。

光照对植物的生长和发育具有重要的作用，除了影响光合作用之外，也影响植物体内激素的产生和形态建成、生理特征、新陈代谢和基因表达调控等^[5-6]。城市园林中的小环境光照强度变化多样，光照过强会灼伤植株叶片，破坏光系统，过低则降低植物的光合效率，影响植物生长和观赏效果^[7]。研究表明：遮光条件下植株具有形态可塑性，植物可以通过调节体内保护酶活性和次生代谢物含量适应遮光环境，夏季适度遮光能够明显提高光合作用^[8-9]。选择适宜的光照环境，对园林植物健康生长，以及生态价值、观赏价值的充分发挥起到决定性作用。现有铁线莲品种多为春秋季节开花的喜阳类型，单叶铁线莲作为冬季开花且具有良好的耐阴性的植株种类，可以满足林下栽培、室内观赏等多种景观需求，将有效扩大铁线莲品种的栽培应用范围。因单叶铁线莲药用价值高，前人对其研究多集中在药材性状、资源调查、药理作用等方面^[10]，而关于单叶铁线莲的园林应用和遮光对其生理特性影响的研究尚未见报道。本研究对不同遮光强度下单叶铁线莲幼苗的生长发育及生理特性进行研究，探讨其对不同遮光强度响应的生理机制，为单叶铁线莲在园林中的栽培应用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及研究材料

研究在浙江农林大学东湖校区铁线莲种质资源圃中 ($30^{\circ}13'19.2''\text{N}$, $119^{\circ}22'33.6''\text{E}$) 进行。该区属亚热带湿润型季风气候，雨量充足且四季分明，年平均气温为 $13.0\sim 21.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量为 $1\,427.0\text{ mm}$ ，年均日照时数为 $1\,939.0\text{ h}$ ，无霜期为 23.0 d 。2022 年 3 月 2 日选取 60 株长势良好、生长一致的 3 年生单叶铁线莲扦插植株移栽于上口口径 16.0 cm 、下口径 12.0 cm 、高 13.5 cm 的容器中，单株定植，栽培基质 [V(珍珠岩):V(泥炭土)=1:1] 一致。容器苗置于大棚内 (遮光强度为 73%)，常规栽培及管理。研究区 5、6、7 月日均最高气温分别为 26.0 、 33.0 、 $36.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；正午最高光强分别为 $1\,300$ 、 $1\,550$ 、 $1\,800\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.2 方法

2022 年 5 月 20 日，从上述移栽的植株中选取生长健康，且长势一致的 40 株用于后续研究。共设 5 个遮光处理，遮光率分别为 80% (T1)、60% (T2)、50% (T3)、40% (T4) 和 0 (ck)，每个处理 8 株，植株间距为 25 cm ，防止相互遮挡，期间常规栽培管理。15 d 后开始进行形态和光合生理指标的测定。

1.3 形态和光合生理指标测定

1.3.1 形态指标与生物量测定 2022 年 6 月 5 日开始，分别于遮光后的 15 d (6 月 5 日)、30 d (6 月 20 日) 和 60 d (7 月 20 日) 共 3 次测量并记录每组单叶铁线莲的分蘖数、节数以及节间距，并取平均值，拍照记录叶片变化。7 月 30 日，各处理分别取 3 株带回实验室，冲去根部泥土，60 °C 烘干至恒量，测定生物量。

1.3.2 可溶性蛋白、丙二醛、叶绿素测定 2022 年 6 月 5 日开始，每 15 d 测定 1 次，分别于遮光后的 15 d (6 月 5 日)、30 d (6 月 20 日)、45 d (7 月 5 日) 和 60 d (7 月 20 日) 共测定 4 次。可溶性蛋白 (SP) 采用考马斯亮蓝法测定^[11]；丙二醛 (MDA) 采用硫代巴比妥酸显色法测定^[11]；叶绿素采用乙醇浸提-分光光度法测定^[11]。

1.3.3 保护酶活性测定 采样时间同 1.3.2。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用南京建成科技有限公司的试剂盒测定，以每克组织在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为 1 个 SOD 活力单位；过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定^[11]；过氧化氢酶 (CAT) 活性采用苏州格锐思生物科技有限公司的试剂盒测定，以 25 °C 下每克组织每分钟催化分解 1 μmol 过氧化氢为 1 个酶活单位。

1.4 数据处理

所有数据均采用 Excel 2010 和 Origin 2022 软件进行整理和作图，利用 SPSS 26.0 进行方差分析和相关性分析。文中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 遮光对形态指标与生物量的影响

遮光处理 30 d 后单叶铁线莲叶片颜色均比对照颜色深，其中 T1 为浓绿色；处理 60 d 后，T3、T4 处理组叶片发黄，对照叶片边缘及叶尖出现明显的皱缩和焦枯现象 (图 1)。表明遮光处理有利于叶片生长，高光强叠加高温会降低叶绿素的合成甚至使叶片受到损害。



图 1 遮光对单叶铁线莲叶片形态变化的影响

Figure 1 Effect of shading on leaf morphology of *C. henryi*

方差分析 (表 1) 显示：与对照相比，T1 处理的分蘖数、节数总体平均增加了 63.0%、24.3%，60 d 时，T1、T2、T3 处理的节间距分别高于对照 29.8%、10.7%、36.6%。随着时间的延长，植株分蘖数、节数和节间距均有增长，30 d 时增幅最大，整体呈先快后慢的增长趋势。此外，不同遮光处理之间的植株生长也存在一定差异，如 60 d 时，T4 处理的分蘖数最多 (3.6 个)，T1 处理的节数最多 (13.6 个)，T3 处理的节间距最大 (17.9 cm)。可见，促进分蘖数、节数和节间距增加的最适宜光强存在差异。生物量测定结果显示：T2、T3 处理的生物量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)，分别比对照高 58.2% 和 61.7% (表 2)，表明 50%~60% 的遮光促进植株生长，高温、强光不利于植株干物质积累。

2.2 遮光对可溶性蛋白、丙二醛和叶绿素的影响

由图 2 可知：对照处理的可溶性蛋白 (SP) 最低，45 和 60 d 时，T1 处理的 MDA 质量摩尔浓度显

表1 遮光对单叶铁线莲分蘖数、节数、节间距的影响

Table 1 Effect of shading on tillers, number of nodes, and internode spacing of *C. henryi*

处理	分蘖数/个			节数/个			节间距/cm		
	15 d	30 d	60 d	15 d	30 d	60 d	15 d	30 d	60 d
T1	2.10±0.10 a	3.00±0.10 a	3.20±0.16 AB	10.20±0.10 AB	13.00±0.10 A	13.60±0.16 a	16.00±0.10 A	16.80±0.10 A	17.00±0.16 B
T2	1.75±0.04 a	2.50±0.85 ab	2.70±0.20 AB	8.20±0.04 B	10.00±0.85 B	12.10±0.20 ab	14.00±0.04 B	14.30±0.30 B	14.50±0.20 C
T3	2.00±0.13 a	3.40±0.30 a	3.50±0.20 AB	10.20±0.13 AB	12.00±0.30 AB	12.30±0.20 ab	17.00±0.13 A	17.50±0.30 A	17.90±0.20 A
T4	2.10±0.07 a	3.50±0.05 a	3.60±0.10 AB	10.30±0.07 AB	12.50±0.05 AB	13.00±0.10 a	13.00±0.07 B	14.00±0.05 BC	14.20±0.10 C
ck	1.75±0.20 a	2.00±0.15 b	2.10±0.01 B	12.50±0.20 A	13.00±0.15 AB	13.00±0.01 a	13.00±0.20 B	13.10±0.15 C	13.10±0.01 D

说明：不同大写字母表示同一时间不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$)；不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

著低于其他处理 ($P < 0.05$)，遮光处理促进蛋白质合成的同时减少 MDA 的产生。随着处理时间的延长，除对照和 T4 处理外，SP 质量分数呈升—降—升的变化趋势，对照处理的 MDA 质量摩尔浓度持续升高，60 d 时达最大值 ($56.4 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)，表明高温高光胁迫下植物对于能量的固定能力下降，引发较强细胞膜脂过氧化作用。T3 处理 60 d 时的 SP 质量分数高于 30 d，而 MDA 质量摩尔浓度却分别低于 T4、ck 处理 25.0%、26.6%，即适宜遮光度更有利于有机物积累，减少膜脂过氧化分解产物生成，膜系统更稳定。

表2 遮光对单叶铁线莲生物量的影响

Table 2 Effects of shading on biomass of *C. henryi*

处理	生物量/g
T1	35.0±3.1 b
T2	40.5±2.0 a
T3	41.4±1.7 a
T4	33.2±2.4 b
ck	25.6±1.3 c

说明：不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

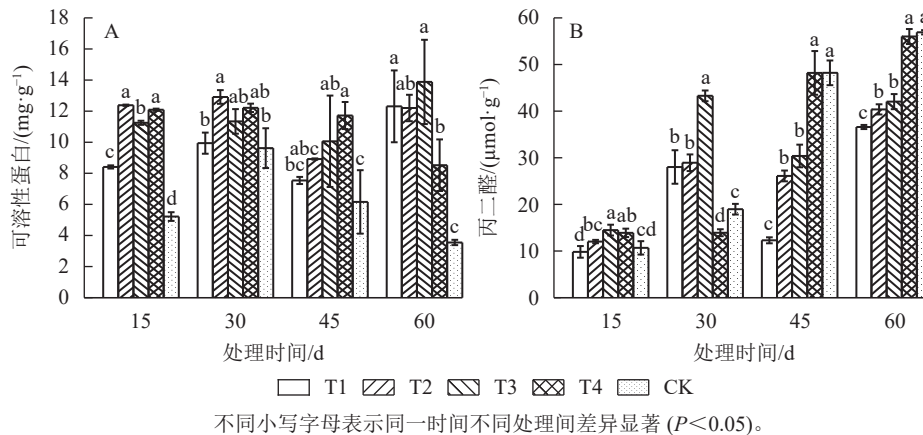


图2 遮光对单叶铁线莲可溶性蛋白(A)和丙二醛(B)的影响

Figure 2 Effect of shading on soluble protein(A) and malondialdehyde (B) contents of *C. henryi*

从表3可见：遮光处理 15 d 时，T1 处理的叶绿素 a/b 最高 (4.37)。60 d 时遮光组的各指标均高于对照，高温、强光胁迫降低了单叶铁线莲合成叶绿素的能力。除 15 d 以外，T1 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 均最高，并显著高于对照 ($P < 0.05$)。说明单叶铁线莲可以通过提高叶绿素质量浓度适应遮光环境，更最大限度地捕捉光能。

2.3 遮光对保护酶活性的影响

图3显示：遮光时间对 POD、CAT 和 SOD 活性均有影响，其中 POD 和 CAT 活性随时间推移整体上升，SOD 则不断下降，表明 7 月高温和强光胁迫叠加下，氧离子和氢氧根离子的积累超出了 SOD 的清除能力，POD 和 CAT 被不断激活，成为保护细胞活力的主要力量，并起主要作用来抵抗植物体内的氧化物。除 15 d 之外，POD 和 CAT 活性随着遮光强度由强到弱，均呈升—降—升的变化趋势，表明不同遮光环境下 2 种酶协同发挥作用，共同维持细胞膜稳定。45 d 时 T1 处理的 POD 活性较低，T4 处理的 CAT 活性分别显著高于 T1、T2 处理 ($P < 0.05$)，说明短期高温高光强胁迫下，遮光强度较高时 POD 保持较低活性，即可抵御逆境带来的损害，遮光强度较低时 CAT 活性升高以维持细胞内部稳定。

表 3 不同遮光处理下叶片叶绿素质量浓度的比较

Table 3 Comparison of different shading treatments on leaf chlorophyll content

处理 时间/d	叶绿素a(mg·L ⁻¹)					叶绿素b(mg·L ⁻¹)				
	T1	T2	T3	T4	ck	T1	T2	T3	T4	ck
15	0.44±0.06 B	0.79±0.29 A	0.43±0.13 B	0.73±0.14 AB	0.67±0.06 AB	0.11±0.05 a	0.26±0.16 a	0.11±0.04 a	0.18±0.05 a	0.15±0.03 a
30	0.60±0.12 A	0.42±0.13 AB	0.62±0.00 A	0.34±0.11 B	0.29±0.09 B	0.23±0.03 A	0.13±0.06 BC	0.20±0.01 AB	0.07±0.06 C	0.07±0.05 C
45	1.54±0.16 A	0.66±0.09 B	0.29±0.04 D	0.48±0.06 C	0.24±0.02 C	0.73±0.08 A	0.38±0.04 B	0.24±0.02 CD	0.30±0.02 BC	0.22±0.01 D
60	0.62±0.10 A	0.42±0.05 B	0.28±0.01 C	0.42±0.03 B	0.15±0.03 D	0.23±0.03 A	0.13±0.02 B	0.14±0.08 AB	0.14±0.02 AB	0.13±0.02 B

处理 时间/d	叶绿素a+b(mg·L ⁻¹)					叶绿素a/b				
	T1	T2	T3	T4	ck	T1	T2	T3	T4	ck
15	0.55±0.10 B	1.05±0.35 A	0.54±0.16 B	0.91±0.17 AB	0.82±0.03 AB	4.37±1.30 a	3.82±1.93 a	3.98±0.87 a	4.17±1.08 a	4.68±1.15 a
30	0.83±0.15 A	0.56±0.18 AB	0.81±0.01 A	0.42±0.16 B	0.36±0.14 B	2.64±0.28 a	3.35±0.80 a	3.11±0.09 a	6.95±4.51 a	5.93±3.95 a
45	2.28±0.25 A	1.03±0.12 B	0.53±0.05 CD	0.78±0.07 BC	0.47±0.03 D	2.10±0.02 A	1.74±0.08 B	1.24±0.07 D	1.55±0.11 C	1.11±0.05 D
60	0.85±0.13 A	0.55±0.06 B	0.42±0.07 BC	0.56±0.03 B	0.28±0.06 C	2.74±0.06 A	3.73±0.25 A	4.24±2.46 A	3.05±0.36 A	1.24±0.17 B

说明：不同大写字母表示同一时间不同处理间差异极显著($P<0.01$)；不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著($P<0.05$)。

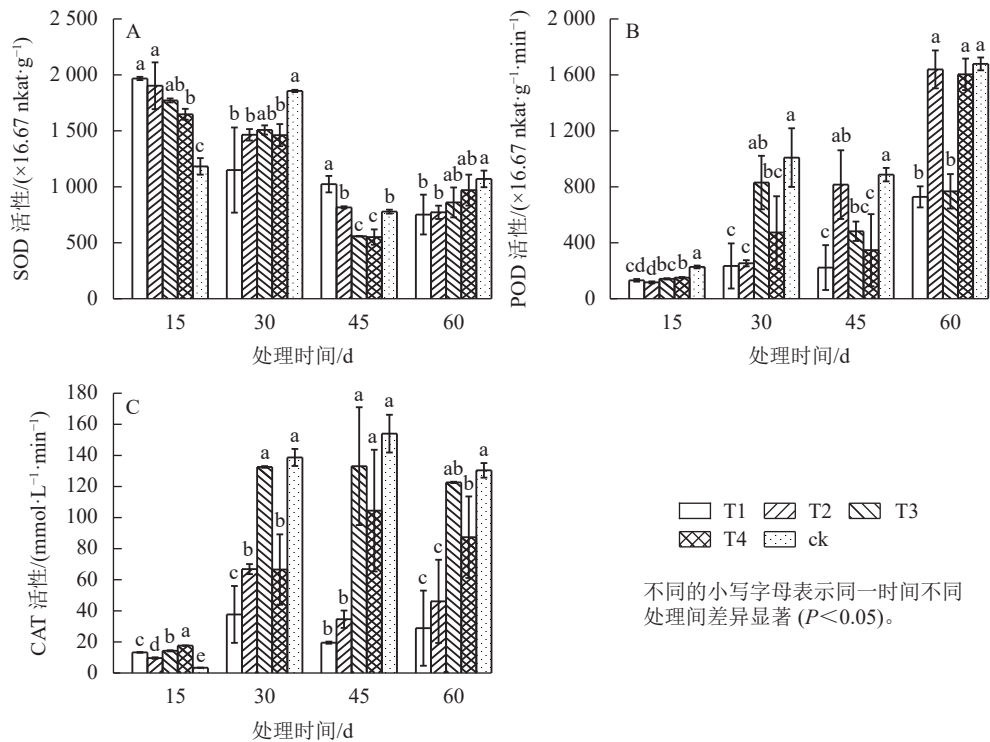


图 3 遮光对单叶铁线莲 SOD(A)、POD(B)、CAT(C) 活性的影响

Figure 3 Effect of shading on SOD (A)、POD (B)、CAT (C) activity of *C. henryi*

2.4 遮光条件下植株形态和生理指标间的相关性分析

相关性分析(表 4)表明：CAT、SOD 和 POD 活性均与 MDA 呈显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 正相关，说明弱光或高温高光强环境使植物体内积累过量 MDA，此时植株通过提高抗氧化酶活性来清除逆境下产生的有害物质。MDA 与节间距、生物量均呈极显著负相关 ($P<0.01$)，而可溶性蛋白与节间距、生物量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，膜脂过氧化产物对植物造成损伤，不利于植物形态发育以及干物质的积累。

3 讨论

3.1 植株形态指标对遮光处理的响应

单叶铁线莲的分蘖数、节数和节间距分别于不同遮光强度下达到最高值，但与金线莲 *Anoectochilus*

表4 不同遮光处理下植株形态和生理指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of morphological and physiological indexes under different shading treatments

指标	生物量	分蘖数	节数	节间距	叶绿素总量	可溶性蛋白	MDA	CAT	POD	SOD
生物量	1									
分蘖数	0.152	1								
节数	-0.142	0.542*	1							
节间距	0.585*	0.421	0.300	1						
叶绿素总量	0.303	0.733**	0.579*	0.420	1					
可溶性蛋白	0.854**	0.423	0.102	0.718**	0.531*	1				
MDA	-0.684**	-0.302	-0.234	-0.707**	-0.623*	-0.789**	1			
CAT	-0.325	-0.594*	-0.375	-0.143	-0.794**	-0.468	0.604*	1		
POD	-0.403	-0.461	-0.453	-0.952**	-0.454	-0.613*	0.689**	0.203	1	
SOD	-0.631*	-0.442	-0.012	-0.444	-0.535*	-0.744**	0.684**	0.692**	0.425	1

说明：*表示显著相关($P < 0.05$)；**表示极显著相关($P < 0.01$)。

roxburghii^[12] 和绢毛匍匐委陵菜 *Potentilla reptans*^[8] 生长过程中不同器官生长发育适宜的光照强度并不一致。表明光因子对植株可塑性具有一定的影响，弱光刺激植株株节的纵向生长，以获得更多的光能^[13]，适度遮光有效保持叶色浓绿，强光胁迫使叶片发黄、皱缩。研究表明：遮光下杪椴 *Alsophila spinulosa* 幼苗叶绿素显著增加，全光照下出现日灼现象^[14]。本研究中单叶铁线莲在 50%~60% 的遮光下生物量最高，这与香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 在不同遮光水平下的研究结果一致^[15]，表明中度遮光有利于耐阴植物的生物量积累，保持较好的生命活力。耐阴种类齿叶铁线莲 *C. serratifolia* 和褐毛铁线莲 *C. fusca*^[16] 的光补偿点为 $8\sim 24 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，自然分布环境多在落叶和常绿阔叶混交林下，这与单叶铁线莲生境相似。邵伟丽等^[4] 研究发现：单叶铁线莲比毛叶铁线莲 *C. lanuginosa*、毛萼铁线莲 *C. hancockiana* 等 6 个野生种耐阴性更强，建议在选择遮光的小环境中栽培，本研究也得到类似结果。此外，单叶铁线莲园林应用过程中应保持适度遮光，促进分蘖数、节数、节间距的增加和叶绿素的形成和积累，使叶色浓绿，提升垂直绿化景观效果，遮光强度设置还要综合考虑光照强度对其不同器官生长发育的影响，保障观赏效果。

3.2 可溶性蛋白、丙二醛和叶绿素对遮光处理的响应

MDA 作为膜脂过氧化产物，反映膜脂过氧化及膜受伤害的程度，可溶性蛋白含有多种参与植物体内代谢的酶类，是维持正常渗透势的重要渗透调节物质。本研究中短期 (30 d) 轻度遮光 (T4) 和不遮光 (ck) 处理植株的 MDA 质量摩尔浓度均显著低于其他处理，可能是短期弱光胁迫导致植株体内膜脂过氧化产物积累，低光强下紫心甘薯 *Ipomoea batatas*^[17] 也得到类似结果。遮光组可溶性蛋白质量分数均显著高于对照，表明低光强有利于单叶铁线莲积累光合产物，这与金莲花 *Trollius chinensis*^[18] 和地黄 *Rehmannia glutinosa*^[19] 的研究结果相似。7 月强光高温胁迫叠加，各处理组 MDA 质量摩尔浓度升高，可溶性蛋白质量分数降低，活性氧产生速度超过抗氧化物清除能力，细胞质膜通透性变大，细胞质外渗，导致植物生理代谢紊乱，植物体通过消耗可溶性蛋白来维持细胞膨压和降低渗透势，降低损害^[20]。同时，遮光条件下植株 MDA 质量摩尔浓度减少，这与北江堇花 *Wikstroemia monnula*^[21] 在遮光条件下的研究结果一致，表明遮光处理有效减缓了植株受到的伤害。

叶绿素直接影响叶肉细胞光合作用的强弱，是植物适应和利用环境因子的重要指标^[22]。处理 30 d 时，遮光组叶绿素总量均高于对照，单叶铁线莲通过增加叶绿素质量浓度来提高光合效率，这与香果树 *Emmenopterys henryi*^[23] 在遮光处理下叶绿素质量浓度的变化一致。T1、T2 和 T3 处理在 6 月的叶绿素 a/b 低于对照，且随着时间的推移逐渐降低，说明其通过增加叶绿素 b 或者降低叶绿素 a，提高了叶片对短波蓝紫光的吸收，又有利于维持光系统 I (PS I) 与光系统 II (PS II) 之间的能量平衡，从而提高自身对遮光环境的适应性^[24]，这与黄波罗 *Phellodendron amurense*^[25] 在遮光下叶片叶绿素质量浓度变化的研究结论相似。叶绿素 a+b 的增加以及叶绿素 a/b 的降低均是植物对弱光环境适应以及耐阴性强的表

现^[26]。单叶铁线莲耐阴性较强，适度遮光可以促进叶绿素积累，使叶色保持浓绿，同时可以缓解夏季外界强光造成的损害。

3.3 保护酶活性对遮光处理的响应

逆境条件下植物体内产生大量自由基会危害植物细胞膜系统，严重时会导致细胞死亡^[9]。与此对应，植物细胞会构建一套保护酶系统，减少活性氧和自由基对细胞的损害。研究初期，遮光组的 SOD 和 POD 活性显著高于对照，说明在较低光强下单叶铁线莲通过维持这 2 种酶的较高活性来清除活性氧，这与遮光处理下赤皮青冈 *Quercus gilva* 的酶活性变化相同^[9]。伴随 7 月高温的出现，轻度遮光 (T3、T4) 和对照植株的 SOD 活性增长显著，这与铁线莲品种^[27] 面对高温胁迫时 SOD 活性变化规律一致；同时重度遮光 (T1、T2) 处理的 SOD 活性降幅较小，表明遮光度增加对植株起到了有效保护作用。植物体清除胁迫过程中细胞内产生的 H₂O₂ 需依赖 CAT 和 POD 的共同作用^[28]，单叶铁线莲 POD 和 CAT 活性在 7 月持续增长，表明其通过协同机制来消除过剩光能带来的危害，这与铁线莲品种应对热胁迫的生理机制类似^[29]。此外，POD 活性增幅高于 CAT 也表明前者在协同作用中占主导地位，这与四季桂 *Osmanthus fragrans* ‘Semperflorens’^[30] 叶片酶活性对光照的响应相似。

4 结论

单叶铁线莲耐阴性好，40%~50% 的遮光度可显著促进新枝和新叶的生长，园林应用中可在林下、建筑物北侧及室内窗台区域栽培，单叶铁线莲的开发利用将有效扩展观赏铁线莲的应用场景。夏季高温和强光叠加对单叶铁线莲植株生长的胁迫加剧，植物体通过 POD 和 CAT 等保护酶的协同作用缓解过剩光能对细胞的伤害。栽培过程中应选择不低于 60% 的遮光环境，保障植株的健康生长。

5 参考文献

- [1] 邵伟丽, 廖娣华, 刘志高, 等. 铁线莲栽培品种观赏性综合评价体系的建立与应用[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(6): 1229 – 1237.
SHAO Weili, LIAO Dihua, LIU Zhigao, *et al.* Establishment and application of comprehensive evaluation system for ornamental quality of *Clematis* cultivars [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(6): 1229 – 1237.
- [2] 陈晓蕾, 邵伟丽, 厉思源, 等. 6 个铁线莲品种杂交 F1 代表型性状遗传分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(1): 72 – 80.
CHEN Xiaolei, SHAO Weili, LI Siyuan, *et al.* Genetic analysis of phenotypic traits in F1 hybrids of 6 *Clematis* cultivars [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(1): 72 – 80.
- [3] 张君芳, 王艳莉, 李子珍, 等. 甘肃省野生铁线莲属植物分布特征及观赏性评价[J]. 中国野生植物资源, 2022, **41**(4): 71 – 79.
ZHANG Junfang, WANG Yanli, LI Zizhen, *et al.* Distribution characteristics and ornamental evaluation of wild *Clematis* in Gansu Province [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2022, **41**(4): 71 – 79.
- [4] 邵伟丽, 刘志高, 申亚梅, 等. 13 种浙江省野生铁线莲引种驯化与观赏性评价[J]. 中国园林, 2012, **38**(11): 116 – 121.
SHAO Weili, LIU Zhigao, SHEN Yamei, *et al.* Introduction, domestication and ornamental evaluation of 13 wild *Clematis* species from Zhejiang Province [J]. *Chinese Garden*, 2012, **38**(11): 116 – 121.
- [5] 金梦娇, 刘博, 王抗抗, 等. 薇甘菊光能利用及叶绿素合成在不同光照强度下的响应[J]. 中国农业科学, 2022, **55**(12): 2347 – 2359.
JIN Mengjiao, LIU Bo, WANG Kangkang, *et al.* Light energy utilization and response of chlorophyll synthesis under different light intensities in *Mikania micrantha* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, **55**(12): 2347 – 2359.
- [6] 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.
LIU Cong, TIAN Tian, LI Shan, *et al.* Growth response of Chinese woody plant seedlings to different light intensities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 518 – 527.
- [7] 梁康, 张廷忠, 陈菊艳, 等. 不同光照强度对华西花楸幼苗生长和光合日变化的影响[J]. 贵州林业科技, 2022, **50**(3): 23 – 27.
LIANG Kang, ZHANG Tingzhong, CHEN Juyan, *et al.* Effects of different light intensities on growth and diurnal variation of photosynthesis of *Sorbus wilsoniana* seedlings [J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2022, **50**(3): 23 – 27.

- [8] 张艳. 7种委陵菜属植物光适应性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
ZHANG Yan. *Research on the Light Adaptability of Seven Potentilla Species* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [9] 夏婵, 李何, 王佩兰, 等. 不同光照强度对赤皮青冈幼苗光合特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(7): 72 – 79.
XIA Chan, LI He, WANG Peilan, *et al.* Effects of shading on the photosynthetic characteristics of *Cyclobalanopsis gilva* seedlings [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2021, 41(7): 72 – 79.
- [10] 陈文允, 普春霞. 云南省铁线莲属药用资源调查[J]. 云南中医学院学报, 2006, 29(1): 31 – 33.
CHEN Wenyun, PU Chunxia. Resource investigation of medicinal species of *Clematis* in Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan College of Traditional Chinese Medicine*, 2006, 29(1): 31 – 33.
- [11] 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 Hesheng. *Experimental Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [12] 牛欢, 韦坤华, 徐倩, 等. 不同光照度对金线莲生长、生理特性和药用成分的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 29(1): 26 – 36,43.
NIU Huan, WEI Kunhua, XU Qian, *et al.* Effects of different illuminances on growth, physiological characteristics, and medicinal components of *Anoectochilus roxburghii* [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2019, 29(1): 26 – 36,43.
- [13] 吴芳兰. 红蓝光质下香梓楠苗木生长生理及代谢产物的响应[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
WU Fanglan. *The Responses of Growth and Physiological and Metabolites of Michelia hedyosperma Seedlings under Red and Blue Light* [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [14] 刘雯雯, 饶丹丹, 吴二焕, 等. 遮阴对桫欏幼苗的叶片性状及光合特性的影响[J/OL]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023-12-29 [2024-01-17]. <https://doi.org/10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202311002>.
LIU Wenwen, RAO Dandan, WU Erhuan, *et al.* Effects of shading on leaf traits and photosynthetic characteristics of *Alsophila spinulosa* seedlings [J/OL]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2023-12-29 [2024-01-17]. <https://doi.org/10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202311002>.
- [15] 郑亚辉. 遮阴对香榧幼苗生理特性的影响[J]. 安徽林业科技, 2019, 47(1): 20 – 22.
ZHENG Yahui. Effects of shading on the physiological characters of *Chinese torreyia* seedlings [J]. *Anhui Forestry Science and Technology*, 2019, 47(1): 20 – 22.
- [16] 王凯. 弱光和盐碱逆境对两种铁线莲生理特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
WANG Kai. *Effect of Weak Light and Salinity Stress on Physiological Characteristics of Two Species of Clematis* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [17] 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 Fuyun, DONG Shunxu, ZHANG Haiyan, *et al.* Research on antioxidant defense system of purple sweet potato under shading conditions [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(6): 48 – 50.
- [18] 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 Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, *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.
- [19] 刘春琰, 黄勇, 郭猛, 等. 遮阴对地黄生长及生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 51(4): 59 – 67.
LIU Chunyan, HUANG Yong, GUO Meng, *et al.* Effects of shading on growth and physiological characteristics of *Rehmannia glutinosa* [J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2019, 51(4): 59 – 67.
- [20] 熊仕发, 吴立文, 陈益存, 等. 不同种源白栎幼苗叶片对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 生态学杂志, 2019, 39(12): 3924 – 3933.
XIONG Shifa, WU Liwen, CHEN Yicun, *et al.* Response of leaf of *Quercus fabri* seedlings from different provenances to drought stress and drought resistance evaluation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 39(12): 3924 – 3933.
- [21] 彭思娴, 孙家怡, 栾牧, 等. 北江莞花光合荧光及抗氧化酶活性对不同光照强度的响应[J/OL]. 分子植物育种, 2023-12-19 [2024-01-17]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231219.1359.031>.

- PENG Sixian, SUN Jiayi, LUAN Mu, *et al.* Response of photosynthetic fluorescence and antioxidant enzyme activity to different light intensities in *Wikstroemia monnula* [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023-12-19[2024-01-17]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231219.1359.031>.
- [22] 冯灿灿. 遮阴对木芙蓉生长及开花品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
FENG Cancan. *Effects of Shading Treatment on Growth and Flowering Quality of Hibiscus mutabilis* L. [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [23] 李冬林, 金雅琴, 崔梦凡, 等. 遮荫对香果树叶片生理特性及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 植物研究, 2020, 40(1): 29 – 40.
LI Donglin, JIN Yaqin, CUI Mengfan, *et al.* Effects of shading on physiological characteristics and ultrastructure of mesophyll cell of *Emmenopterys henryi* leaves [J]. *Plant Research*, 2020, 40(1): 29 – 40.
- [24] 孙小玲, 许岳飞, 马鲁沂, 等. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 989 – 999.
SUN Xiaoling, XU Yuefei, MA Luyi, *et al.* A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 989 – 999.
- [25] 王凯, 朱教君, 于立忠, 等. 遮阴对黄波罗幼苗的光合特性及光能利用效率的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(5): 1003 – 1012.
WANG Kai, ZHU Jiaojun, YU Lizhong, *et al.* Effects of shading on photosynthetic characteristics and light use efficiency of *Phellodendron amurense* seedlings [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(5): 1003 – 1012.
- [26] 石凯, 李泽, 张伟建, 等. 不同光照对油桐幼苗生长、光合日变化及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(8): 35 – 42, 50.
SHI Kai, LI Ze, ZHANG Weijian, *et al.* Influence of different light intensity on the growth, diurnal change of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of tung tree seedling [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2018, 38(8): 35 – 42, 50.
- [27] 朱玉雪, 张敏涛, 刘莹, 等. 4种早花大花组铁线莲的耐热性综合评价[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2017, 35(1): 58 – 65, 71.
ZHU Yuxue, ZHANG Mintao, LIU Ying, *et al.* Comprehensive evaluation of heat-tolerance of 4 cultivars of early large-flowered group *Clematis* [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science Edition)*, 2017, 35(1): 58 – 65, 71.
- [28] 范宣. 遮阴对川西柳叶菜生长发育与生理生化的影响[D]. 南充: 西华师范大学, 2017.
FAN Xuan. *The Effects of Shading on the Growth, Physiological and Biochemical Traits of Epilobium fangii* [D]. Nanchong: China West Normal University, 2017.
- [29] 刘志高, 邵伟丽, 申亚梅, 等. 铁线莲品种耐热性分析及评价指标筛选[J]. 核农学报, 2019, 34(1): 203 – 213.
LIU Zhigao, SHAO Weili, SHEN Yamei, *et al.* Evaluation of heat tolerance and screening the index for the assessment of heat tolerance in cultivars of *Clematis* [J]. *Chinese Journal of Nuclear Agriculture*, 2019, 34(1): 203 – 213.
- [30] 杨亚男. 遮荫对四季桂光合生理及开花特性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
YANG Ya'nan. *Effects of Shading on Photosynthetic Physiology and Flowering Characteristics of Osmanthus fragrans* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016.