

全红婷, 朱洁怡, 龙凤玲, 等. 麻楝幼苗生长和生理特性对于干旱胁迫的响应[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(4): 587-595.
QUAN Hongting, ZHU Jieyi, LONG Fengling, et al. Responses of *Chukrasia tabularis* seedling growth and physiological characteristics to drought stress[J].
Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(4): 587-595.

麻楝幼苗生长和生理特性对于干旱胁迫的响应

全红婷, 朱洁怡, 龙凤玲, 赵倩, 吴道铭, 曾曙才

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探讨干旱胁迫对麻楝 *Chukrasia tabularis* 生长及生理特性的影响, 揭示麻楝幼苗适应干旱环境的生理响应机制。【方法】以半年生麻楝幼苗为研究对象, 设置 4 个处理: 轻度干旱 (田间持水量的 65%~70%)、中度干旱 (田间持水量的 50%~55%)、重度干旱 (田间持水量的 35%~40%) 和对照 (田间持水量的 80%~85%), 测定麻楝幼苗的生长指标、光合参数、生理特性指标。【结果】中度和重度干旱显著降低麻楝幼苗的株高增长、叶宽、叶长和叶面积 ($P<0.05$); 轻度干旱促进根系生长, 根长 (1 103.24 cm) 和根体积 (2.53 cm³) 显著高于对照 ($P<0.05$)。随着胁迫程度增加, 麻楝幼苗的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率以及叶绿素含量均呈先升后降趋势, 且均在轻度干旱达到最大值。脯氨酸含量在重度干旱达到最大值, 显著高于对照 ($P<0.05$)。各干旱处理组可溶性蛋白、丙二醛 (MDA) 含量以及过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性均与对照无显著差异。【结论】65%~70% 田间持水量有利于麻楝幼苗根系生长、生物量积累和光合作用效率提升, 表明适度干旱总体上对麻楝幼苗生长有利。

关键词: 麻楝幼苗; 干旱胁迫; 生长发育; 生理特性

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)04-0587-09

Responses of *Chukrasia tabularis* seedling growth and physiological characteristics to drought stress

QUAN Hongting, ZHU Jieyi, LONG Fengling, ZHAO Qian, WU Daoming, ZENG Shucai

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of *Chukrasia tabularis*, and reveal the physiological response mechanism of *C. tabularis* seedlings to adapt to drought environments. 【Method】Taking half-year-old *C. tabularis* seedlings as the research subjects, four treatments were set up: Light drought (65%–70% of field water capacity), moderate drought (50%–55% of field water capacity), severe drought (35%–40% of field water capacity), and control (80%–85% of field water capacity). The growth indicators, photosynthetic parameters, and physiological characteristics of *C. tabularis* seedlings were measured. 【Result】Moderate and severe drought significantly reduced the plant height growth, leaf width, leaf length and leaf area of *C. tabularis* seedlings ($P<0.05$), while light drought promoted root growth. The root length (1 103.24 cm) and root volume (2.53 cm³) were significantly

收稿日期: 2024-12-05 网络首发时间: 2025-05-23 13:56:59

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20250523.1137.002>

作者简介: 全红婷, E-mail: 1627291486@qq.com; 通信作者: 曾曙才, 主要从事森林生态学研究, E-mail: sczeng@scau.edu.cn

基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2022KJCX015)

higher than those of the control ($P<0.05$). With the increase of stress intensity, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, and chlorophyll content of *C. tabularis* seedlings all showed a trend of first increasing and then decreasing, reaching the maximum values under light drought. The proline content reached the maximum value under severe drought, significantly higher than that in the control ($P<0.05$). The contents of soluble protein and malondialdehyde (MDA), as well as the activities of peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) in all drought treatment groups were not significantly different from those in the control. 【Conclusion】 A field water capacity of 65%–70% facilitates root growth, biomass accumulation, and enhances photosynthetic efficiency in *C. tabularis* seedlings, indicating that appropriate drought is generally advantageous for the growth of *C. tabularis* seedlings.

Key words: *Chukrasia tabularis* seedling; Drought stress; Growing development; Physiological property

在全球气候变暖的背景下,气温上升与降水模式变化相互作用,导致干旱事件频发且强度加剧,成为生态环境领域的关键问题^[1-2]。干旱是植物生理代谢的胁迫因素,显著影响植物的光合作用、水分吸收和传输等生命活动^[3-4]。这不仅对森林生态系统及碳循环的稳定性构成威胁,也影响全球林业的可持续发展^[5]。研究表明,植物通过调节气孔开闭和合成渗透调节物质等方式适应干旱环境,但不同树种的响应机制存在差异^[6-7]。因此,深入探究林木的抗旱响应机制,对于指导抗旱林木的培育和森林生态系统的保护具有重要意义。

麻楝 *Chukrasia tabularis*, 楝科麻楝属大乔木,以其快速生长、强适应性和多功能性在热带和亚热带地区广泛种植,还因强大的萌芽更新能力和坚实的木质成为生态恢复和木材利用的理想选择,有利于增强碳汇和助力实现碳中和目标^[8]。尽管麻楝的化学成分、繁殖技术和应用潜力已受到关注,但其抗旱性研究相对较少,进一步探索麻楝的抗旱机制对于优化树种选择和提升森林经营策略具有重要的学术和实践价值^[9-10]。

本研究选定麻楝幼苗作为研究对象,通过设置不同程度干旱的环境条件,对其生长和生理反应进行深入探究。通过对麻楝幼苗生长和生理指标的测定和分析,期望阐明其适应干旱环境的生理机制。研究成果预期为麻楝的苗期管理,尤其是在干旱条件下的水分管理策略提供科学依据,以期提高麻楝在不利环境条件下的生长质量和存活率。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自华南农业大学校内树木园,土壤类型为赤红壤,采集深度为 20~60 cm,自然风干后碾碎过 1 cm 筛网备用。土壤基本性质:pH 5.52,电

导率 $134.00\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,有机质 $9.09\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.55\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $37.33\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $0.33\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $19.95\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $6.91\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $45.40\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试植物为麻楝半年生幼苗,购于广州德源林业有限公司,在德源种苗基地育苗,精心选用植株健壮、长势良好、株高地径一致的麻楝幼苗进行试验。栽培用盆为塑料花盆,顶部直径和底部直径分别为 21.5 和 16.5 cm,高 23.0 cm。

1.2 试验设计

试验场地位于华南农业大学试验大棚,属海洋性亚热带季风气候区,全年水热同期,光热条件充足,试验期间大棚平均温度在 25~28 ℃。试验分为 2 个阶段:适应性生长阶段与干旱胁迫试验阶段。在适应性生长阶段,将麻楝幼苗种植于塑料花盆中,每天均匀浇水以确保存活,持续 30 d。随后,进行充分供水,使土壤含水量达到最大田间持水量。接着,通过自然干燥和人工控制,逐步将土壤含水量调节至设定的 4 个水平:对照 (Control, CK)、轻度干旱 (Light drought, LD)、中度干旱 (Moderate drought, MD)、重度干旱 (Severe drought, SD),分别为田间持水量的 80%~85%、65%~70%、50%~55%、35%~40%。每个处理 5 次重复,每盆为 1 次重复,每盆种植 1 株,共 20 盆。当土壤自然干燥至田间持水量的 80%~85% 时,随机选取 5 盆作为对照组,其余继续干旱处理,直至最后 5 盆土壤水分降至 35%~40%,此时正式开始干旱胁迫试验。胁迫试验于 2022 年 10 月 1 日启动,持续 60 d,至 2022 年 11 月 30 日结束。为了精确控制土壤含水量,本研究采用称质量法和土壤水分测定仪相结合的方法。每盆装土 5 kg,测定装土时的土壤含水量,并据此换算出每盆干土的质量。通过计算浇水后不同处理相对应的土壤质量,并加上植株的平均质量和花盆

质量, 从而得出不同处理盆栽应维持的总质量。此外, 每个盆栽下方都放置一个托盘, 用以收集并重新利用每天浇水过程中流失的水分。

1.3 相关指标测定

1.3.1 植物生长指标 2022 年 9 月 30 日, 在干旱胁迫试验启动前, 对植物进行首次株高和地径测量; 11 月 30 日试验结束时, 进行第 2 次测量。其中株高采用直尺测量, 地径采用游标卡尺测量。叶片带回实验室后, 用叶面积测定仪扫描叶面积。植物根系用双光源扫描仪扫描后用根分析软件分析其根长、根表面积、根体积、根平均直径形态指标。

1.3.2 光合作用参数 11 月 30 日, 在天气晴朗的上午 8:00 至 12:00 期间, 利用 LI-6400 便携式光合作用测定系统 (Li-COR, USA) 测定植物光合参数。使用红蓝光光源叶室在自然条件下测定, 设置饱和光强为 $1200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 叶室温度为 $25\ ^\circ\text{C}$, CO_2 体积分数为 0.0425% 。每种植物各处理组选取叶位及长势基本一致的成熟叶片, 每处理组测 5 株, 每株测定 3 枚叶片, 每枚记录 10 个值。测定的指标包括: 净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率。

1.3.3 植物生理指标 11 月 30 日, 干旱胁迫试验结束时, 从每株试验苗随机采集 5~7 片完全伸展、没有病虫害的成熟叶片, 迅速放入冰盒带回实验室, 测定可溶性蛋白 (SP)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、丙二醛 (MDA)、可溶性糖、游离脯氨酸 (Pro) 以及叶绿素含量。SP 含量采用考马斯亮蓝染色法测定; SOD 活性采用氮蓝四唑光化还

原法测定; POD 活性测定采用愈创木酚法测定; MDA 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 显色法测定; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定; Pro 含量采用酸性茚三酮法测定; 叶绿素含量采用紫外分光光度法测定^[1]。

1.4 数据分析与处理

运用 Excel 对数据进行录入整理, 运用 SPSS19.0 软件进行数据统计分析, 并对相关数据进行方差分析、LSD 法多重比较和 Pearson 相关性分析, 运用 Origin Pro 软件进行绘图。图表中数据均为平均值±标准误差 ($n=5$)。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对麻楝幼苗生长和形态特征的影响

2.1.1 株高、地径和叶片形态 各处理麻楝幼苗生长和叶片形态如表 1 所示。与 CK 相比, LD 处理的株高增长量下降 26.1%, 但差异不显著。相比之下, MD 和 SD 处理显著抑制株高增长, 降幅分别为 53.0% 和 63.7% ($P<0.05$)。地径增长方面, LD 处理较 CK 增加 4.6%, 而 MD 和 SD 处理分别下降 17.1% 和 16.4%。LD 处理叶宽较 CK 增加 4.5%, 但 MD 和 SD 处理使叶宽分别显著下降 18.6% 和 14.5% ($P<0.05$)。叶长方面, LD 处理较 CK 下降 4.4%, MD 和 SD 处理分别显著下降 27.5% 和 28.3% ($P<0.05$)。叶面积在所有干旱处理中较 CK 均有所减少, 其中 MD 和 SD 处理的降幅显著, 分别为 43.6% 和 47.6% ($P<0.05$), 而 LD 处理降幅为 2.2%。

表 1 干旱胁迫对麻楝幼苗株高、地径和叶片形态的影响¹⁾

Table 1 Effects of drought stress on plant height, ground diameter and leaf morphology of *Chukrasia tabularis* seedlings

处理 Treatment	株高增长量/cm Plant height growth	地径增长量/cm Ground diameter growth	叶宽/mm Leaf width	叶长/mm Leaf length	叶面积/mm ² Leaf area
CK	7.74±2.60a	1.52±0.64a	37.91±1.96a	42.18±4.64a	1242.61±201.69a
LD	5.74±1.34ab	1.59±0.14a	39.62±3.58a	40.30±9.90a	1214.43±406.17a
MD	3.64±0.61b	1.26±0.39a	30.63±3.63b	30.47±4.70b	696.48±197.67b
SD	2.82±2.88b	1.27±0.24a	32.42±4.55b	30.02±1.39b	652.58±86.83b

1) CK 为对照, LD 为轻度干旱胁迫, MD 为中度干旱胁迫, SD 为重度干旱胁迫; 同列数据后相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD 法)。

1) CK is control, LD is light drought stress, MD is moderate drought stress, and SD is severe drought stress. The same lowercase letters after the same column data indicate no significant difference ($P>0.05$, LSD method).

2.1.2 根系形态 各处理麻楝幼苗根系形态如表 2 所示。与 CK 相比, LD 处理根长和根体积显著增加, 增幅分别为 68.9% 和 39.0% ($P<0.05$), 根表面积增加 38.2%。MD 处理根表面积较 CK 显著增加

39.3%, 根长增加 50.1%, 根体积减少 16.5%。SD 处理根长较 CK 增加 38.4%, 根表面积增加 12.7%, 根体积增加 13.2%, 差异不显著。根平均直径在 MD 和 SD 处理中较 CK 有所减少, 降幅分别为

表 2 干旱胁迫对麻楝幼苗根系形态的影响¹⁾

Table 2 Effects of drought stress on root morphology of *Chukrasia tabularis* seedlings

处理 Treatment	根长/cm Root length	根平均直径/mm Root mean diameter	根表面积/cm ² Root surface area	根体积/cm ³ Root volume
CK	653.29±168.55b	0.60±0.07a	121.52±27.66b	1.82±0.50b
LD	1 103.24±270.62a	0.60±0.04a	167.96±34.61ab	2.53±0.71a
MD	978.67±176.57ab	0.49±0.06b	169.24±53.89a	1.53±0.12b
SD	904.40±331.78ab	0.45±0.04b	136.91±13.54ab	2.06±0.51ab

1) CK为对照,LD为轻度干旱胁迫,MD为中度干旱胁迫,SD为重度干旱胁迫;同列数据后相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD法)。

1) CK is control, LD is light drought stress, MD is moderate drought stress, and SD is severe drought stress. The same lowercase letters after the same column data indicate no significant difference ($P>0.05$, LSD method).

18.3% 和 25.0% ($P<0.05$)。

2.1.3 生物量分配 各处理麻楝幼苗生物量如表 3 所示。与 CK 相比,LD 处理麻楝幼苗地上部干质量、总生物量和根部干质量的增幅分别为 11.3%、12.3% 和 14.0%, 差异不显著。MD 处理地上部干质量和根部干质量分别较 CK 降低 36.9% 和 26.9%, 总生物量显著减少 34.3% ($P<0.05$)。SD 处理地上部

干质量和总生物量较 CK 分别减少 25.9% 和 17.2%, 但根部干质量增加 6.7%。

2.2 干旱胁迫对麻楝幼苗光合特性的影响

2.2.1 光合气体交换 各处理麻楝幼苗光合气体特征如表 4 所示。与 CK 相比,LD 处理净光合速率和气孔导度增幅为 5.9% 和 14.3%, 胞间 CO₂ 浓度增加 4.2%, 蒸腾速率增加 11.5%, 变化不显著。

表 3 干旱胁迫对麻楝幼苗生物量分配的影响¹⁾

Table 3 Effect of drought stress on biomass allocation of *Chukrasia tabularis* seedlings

处理 Treatment	地上部干质量/g Aboveground dry weight	根部干质量/g Root dry weight	总生物量/g Gross biomass
CK	5.82±1.50a	2.08±0.81ab	7.90±2.24a
LD	6.50±2.34a	2.37±0.81a	8.87±3.02a
MD	3.67±0.96a	1.52±0.16b	5.19±1.03b
SD	4.31±0.62a	2.22±0.43ab	6.54±0.95ab

1) CK为对照,LD为轻度干旱胁迫,MD为中度干旱胁迫,SD为重度干旱胁迫;同列数据后相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD法)。

1) CK is control, LD is light drought stress, MD is moderate drought stress, and SD is severe drought stress. The same lowercase letters after the same column data indicate no significant difference ($P>0.05$, LSD method).

表 4 干旱胁迫对麻楝幼苗光合气体交换的影响¹⁾

Table 4 Effect of drought stress on photosynthetic gas exchange in *Chukrasia tabularis* seedlings

处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Stomatal conductivity	胞间CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Intercellular CO ₂ concentration	蒸腾速率/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) Transpiration rate
CK	6.91±0.93a	0.07±0.02a	230.66±30.10ab	1.39±0.33a
LD	7.32±1.53a	0.08±0.02a	240.38±27.77a	1.55±0.35a
MD	7.39±0.51a	0.06±0.02a	153.13±100.08b	1.19±0.47a
SD	5.31±0.47b	0.02±0.02b	61.89±31.91b	0.38±0.32b

1) CK为对照,LD为轻度干旱胁迫,MD为中度干旱胁迫,SD为重度干旱胁迫;同列数据后相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD法)。

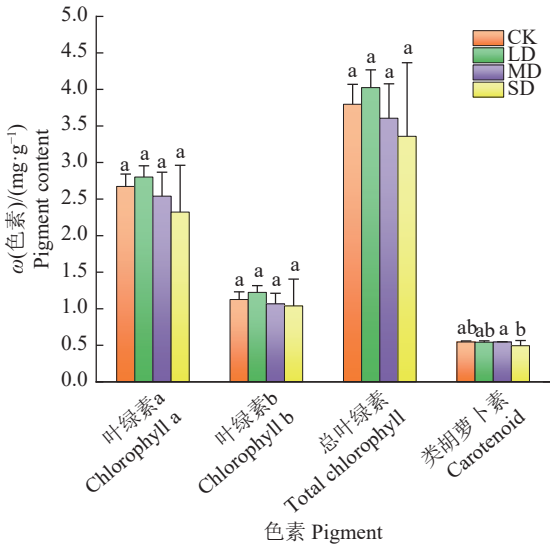
1) CK is control, LD is light drought stress, MD is moderate drought stress, and SD is severe drought stress. The same lowercase letters after the same column data indicate no significant difference ($P>0.05$, LSD method).

MD 处理净光合速率较 CK 提升 7.0%, 气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率分别下降 14.3%、33.6% 和 14.4%。SD 处理胞间 CO₂ 浓度较 CK 减少 73.3%, 但差异不显著, 而净光合速率、气孔导度和蒸腾速率较 CK 分别显著下降 23.2%, 71.4% 和 72.7% ($P<0.05$)。

2.2.2 叶绿素含量 各处理麻楝幼苗叶绿素含量如图 1 所示。与 CK 相比, LD 处理叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均有增加, 增幅分别为 4.8%、8.8% 和 5.7%, 而类胡萝卜素含量有所下降, 降幅为 0.4%。MD 处理叶绿素 a、总叶绿素和叶绿素 b 的含量较 CK 均有所下降, 降幅分别为 4.9%、5.0% 和 5.3%, 而类胡萝卜素含量基本与 CK 持平, 增幅为 0.2%。SD 处理叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素含量与 CK 相比有所下降, 降幅分别为 13.1%、7.7%、11.3% 和 9.2%, 差异均不显著。

2.3 干旱胁迫对麻楝幼苗生理特性的影响

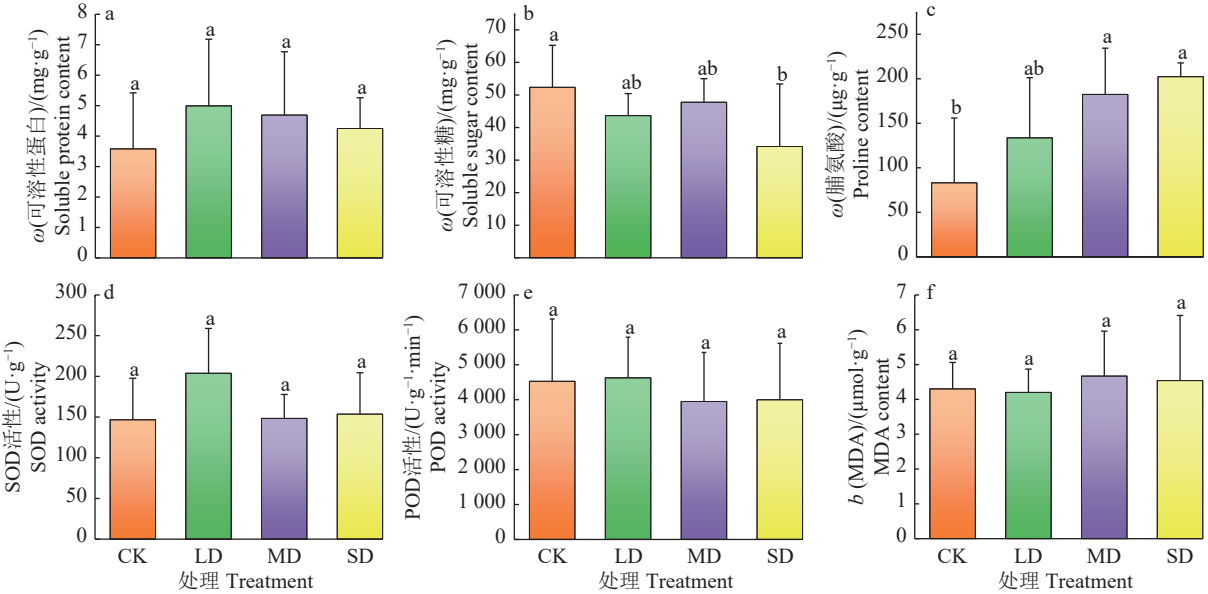
各处理麻楝幼苗生理特性如图 2 所示。与 CK 相比, LD、MD 和 SD 处理可溶性蛋白含量相较于 CK 分别增加 39.3%、31.2% 和 18.9%, 但差异不显著。SD 处理可溶性糖含量较 CK 显著下降 34.8% ($P<0.05$)。脯氨酸含量在各干旱处理中呈上升趋势, 与 CK 相比, MD 和 SD 处理分别显著增加 118.3% 和 143.0% ($P<0.05$)。LD 处理 SOD 活性较 CK 增加 38.9%, 在 MD 和 SD 处理下分别增加



CK 为对照, LD 为轻度干旱胁迫, MD 为中度干旱胁迫, SD 为重度干旱胁迫; 相同指标柱子上方相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD 法)。
CK is control, LD is light drought stress, MD is moderate drought stress, and SD is severe drought stress. The same lowercase letters above the column of the same index indicate no significant difference ($P>0.05$, LSD method).

图 1 干旱胁迫对麻楝幼苗叶绿素含量的影响
Fig. 1 Effect of drought stress on chlorophyll content in *Chukrasia tabularis* seedlings

1.1% 和 4.8%; MD 和 SD 处理的 POD 活性较 CK 分别降低 13.2% 和 11.7%; MD 和 SD 处理的 MDA 含量较 CK 分别增加 8.6% 和 5.7%, LD 处理增加 2.5%; 差异均不显著。



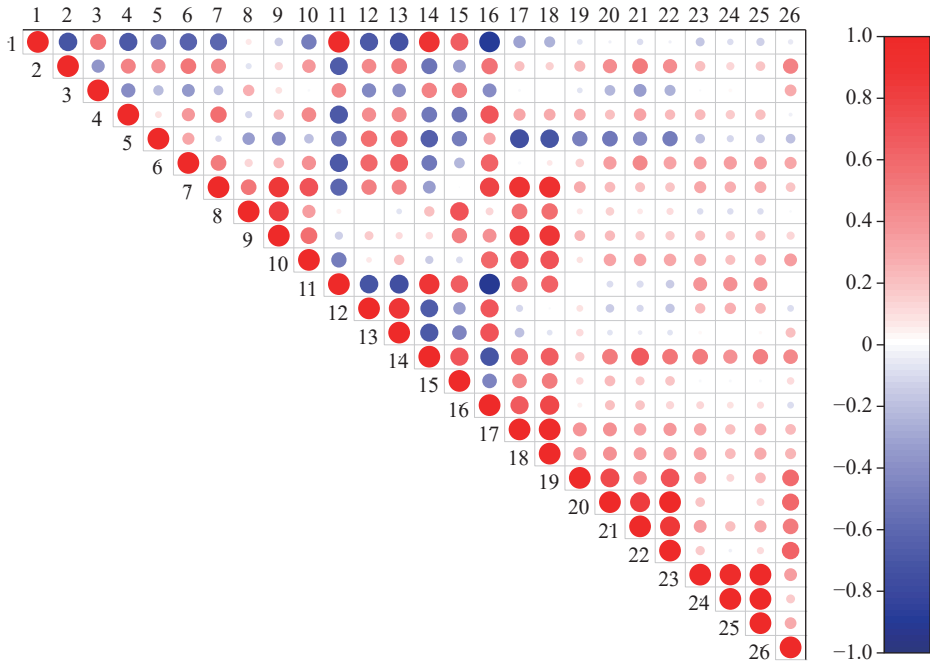
CK 为对照, LD 为轻度干旱胁迫, MD 为中度干旱胁迫, SD 为重度干旱胁迫; 各图中, 柱子上方相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD 法); 脯氨酸含量、MDA 含量及 SOD 活性以鲜质量为基准进行测定。
CK is control, LD is light drought stress, MD is moderate drought stress, and SD is severe drought stress. In each figure, the same lowercase letters above the columns indicate no significant difference ($P>0.05$, LSD method). The proline content, MDA content and SOD activity are determined based on fresh weight.

图 2 干旱胁迫对麻楝幼苗生理特性的影响
Fig. 2 Effect of drought stress on the physiological characteristics of *Chukrasia tabularis* seedlings

2.4 麻楝幼苗各项生理生化指标相关性分析

麻楝幼苗各项生理生化指标的 Pearson 相关性分析结果如图 3 所示。株高增长量和叶长、叶面积呈显著正相关,而地径增长量和根长、根表面积、叶宽呈显著负相关 ($P<0.05$)。根部干质量和总生物量、根体积呈显著正相关 ($P<0.05$)。可溶性蛋白含

量与 POD 活性、可溶性糖含量、根长、根表面积、叶宽呈显著负相关,而可溶性糖含量与叶宽呈显著正相关 ($P<0.05$)。脯氨酸含量与叶长、叶面积呈显著负相关,而 SOD 活性与根表面积呈显著正相关 ($P<0.05$)。



颜色越深表示显著性越强,蓝色表示负相关,红色表示正相关 (Pearson 法); 1: 可溶性蛋白含量, 2: POD 活性, 3: MDA 含量, 4: 可溶性糖含量, 5: 脯氨酸含量, 6: SOD 活性, 7: 地上部干质量, 8: 根部干质量, 9: 总生物量, 10: 株高增长量, 11: 地径增长量, 12: 根长, 13: 根表面积, 14: 根平均直径, 15: 根体积, 16: 叶宽, 17: 叶长, 18: 叶面积, 19: 净光合速率, 20: 气孔导度, 21: 胞间 CO₂ 浓度, 22: 蒸腾速率, 23: 叶绿素 a 含量, 24: 叶绿素 b 含量, 25: 总叶绿素含量, 26: 类胡萝卜素含量。

Deeper color indicates greater significance, blue color indicates negative correlation, red color indicates positive correlation (Pearson method). 1: Soluble protein content, 2: POD activity, 3: MDA content, 4: Soluble sugar content, 5: Proline content, 6: SOD activity, 7: Aboveground dry weight, 8: Root dry weight, 9: Gross biomass, 10: Plant height growth, 11: Ground diameter growth, 12: Root length, 13: Root surface area, 14: Root mean diameter, 15: Root volume, 16: Leaf width, 17: Leaf length, 18: Leaf area, 19: Net photosynthetic rate, 20: Stomatal conductivity, 21: Intercellular CO₂ concentration, 22: Transpiration rate, 23: Chlorophyll a content, 24: Chlorophyll b content, 25: Total chlorophyll content, 26: Carotenoid content.

图 3 干旱胁迫下麻楝幼苗各项指标的相关性热图

Fig. 3 Heat map of correlations between different indicators of *Chukrasia tabularis* seedlings under drought stress

3 讨论与结论

3.1 不同干旱处理对麻楝幼苗生长发育的影响

植物种子萌发到成熟的各阶段均受水分的影响,水分直接参与植物细胞的分裂、延伸和分化过程^[12]。Wu 等^[13]研究发现植物对水分胁迫的反应主要体现在叶和根上,而叶子是植物长期适应环境变化最大的器官,在干旱胁迫下会表现出黄化、萎缩、卷曲、衰老甚至脱落的迹象,同时叶片生长发育迟缓,叶片数量和面积减少。在本试验中,LD 处理地径增长量和叶宽较 CK 增加,株高增长量下降,但是变化不显著。随着干旱程度的加剧,从 MD 到 SD 处理,麻楝幼苗的株高增长量、叶长、叶宽和叶面积较 CK 都显著降低。这些结果表明,对照组所设定的水分条件对于麻楝幼苗的个体生长较为有利,轻

度干旱对幼苗个体生长影响较小,而中度和重度干旱则显著抑制麻楝幼苗的个体生长。

干旱胁迫不仅会引起植物个体大小的变化,还会引起植物生物量分配的改变^[14]。在干旱条件下,植物会调整其能量和资源的分配策略,优先保障关键生长部位^[15]。植物会根据环境的干旱情况进行适应性调整,如调整主根和侧根的数量与长度、根毛的密度和长度等,从而提高在土壤中探寻水分的能力^[16-17]。但也有研究表明,干旱环境下,木本植物的根系生长减缓甚至停滞,以降低水分需求并减轻蒸腾压力,从而维持根系与可用水分的平衡,如松树在干旱胁迫下,根系生长减缓,生长速率下降^[18]。在本试验中,LD 处理麻楝幼苗的根长、根体积和根部干质量为所有处理中最高,表明麻楝幼苗在这一条

件下通过调整根系形态优化水分吸收效率, 从而维持生长。在苗圃管理方面, 可以借鉴本研究中麻楝幼苗对轻度干旱的响应机制, 适度控制灌溉量以模拟轻度干旱环境, 以此刺激幼苗根系生长, 从而培育出根系更发达、抗旱性更强的麻楝幼苗, 为后续造林提供优质种苗。

3.2 不同干旱处理对麻楝幼苗生理特性的影响

植物光合速率的影响因素主要有气孔限制和非气孔限制, 前者多为可逆修复, 后者一般为不可逆损伤^[19]。根据气孔限制学说可知, 导致净光合速率下降的主要原因是气孔关闭, 叶片的气孔导度减小, 引起胞间 CO₂ 浓度下降, 最终导致净光合速率下降^[20]。本试验中, LD 处理下麻楝幼苗的气孔导度和蒸腾速率较 CK 有所增加, 表明麻楝幼苗在轻度干旱胁迫下通过调整气孔行为保持光合作用和水分利用效率; 从 MD 处理到 SD 处理, 气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率较 CK 都明显下降, 这表明麻楝幼苗可能通过闭合气孔以减少水分损失, 从而适应严重缺水环境, 但这同时会限制 CO₂ 的获取, 从而抑制光合作用。

在不同程度的干旱胁迫下, 植物叶绿素和类胡萝卜素含量的变化可以反映植物对干旱环境的生理适应^[21-22]。在干旱等不利条件下, 植物叶片若能保持叶绿素含量的稳定或有所增加, 表明其具有适应环境变化的巨大潜力, 并有助于提高植物在逆境中生存能力^[23]。王丽华等^[24]研究发现, 3 个主栽油橄榄品种的叶片叶绿素含量均呈下降趋势, 且下降幅度逐渐增加。而冯潇等^[25]研究发现, 在土壤含水量为 60%~70% 时, 红花玉兰 ‘娇红 2 号’ 的叶绿素含量为所有处理组中最高, 说明在轻度缺水条件下, 植物会主动进行适应性调整从而增强光合作用。本试验中, LD 处理麻楝幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量为所有处理组中最高, 这可能是麻楝幼苗在这一条件下的生理适应, 通过增加叶绿素含量优化光能捕获, 从而在水分受限的条件下保持或增强光合作用效率^[26]; 从 MD 到 SD 处理, 叶绿素和类胡萝卜素含量较 CK 都明显下降, 表明麻楝幼苗在极端干旱条件的光合作用受到严重影响, 这种下降可能是由于麻楝幼苗在严重水分亏缺下采取的保护性响应, 以减少光合作用过程中的水分损失。

在干旱胁迫下, 植物会通过一系列生理变化增强其适应性^[27]。比如在面临干旱胁迫时产生大量的渗透调节物质, 包括可溶性蛋白和可溶性糖。这些物质有助于维持植物细胞内外的渗透平衡, 保证细胞的保水能力, 从而增强植物的抗旱性^[28]。王硕等^[29]

研究发现作物在干旱胁迫下会通过积累渗透调节物质如可溶性糖、可溶性蛋白等维持细胞膨压, 从而保护细胞结构。本试验中, 各干旱处理组可溶性蛋白含量较 CK 均有所增加, 这可能是麻楝幼苗应对干旱环境的策略之一。通过增加可溶性蛋白含量提高细胞的渗透调节能力, 帮助细胞保持水分, 减少水分的损失。SD 处理可溶性糖含量较 CK 显著下降, 这可能是麻楝幼苗为了减少水分蒸腾而做出的适应性调整。通过降低叶片中的可溶性糖含量降低蒸腾作用, 减少水分的蒸发, 从而提高抗旱能力^[30]。脯氨酸作为一种关键的渗透调节物质, 在维持细胞内外渗透压平衡中发挥着至关重要的作用, 可以保护细胞结构免受干旱引起的损伤^[31]。本试验中脯氨酸含量在各干旱处理中呈上升趋势, 其中 MD 和 SD 处理较 CK 显著增加, 表明麻楝幼苗在干旱条件下会积累脯氨酸以增加细胞内的溶质浓度, 从而吸引水分进入细胞, 维持细胞的膨胀和结构完整性^[32-33]。这一结果与秦岭等^[34]对谷子品种 ‘济谷 16’ 的研究结果相似, 他们发现在干旱和复水条件下, 脯氨酸含量会随着干旱胁迫程度的增强而增加。SOD 活性作为植物抗氧化系统的一个重要组成部分, 其活性的变化可以反映植物对干旱胁迫的抗氧化响应^[35]。在本试验中, LD 处理 SOD 活性为所有处理组中最高, 表明麻楝幼苗在这一条件下增强了抗氧化能力; MD 和 SD 处理的 SOD 活性较 CK 变化不明显, 可能是麻楝幼苗的抗氧化系统调节已达到极限。POD 作为植物体内重要的抗氧化酶之一, 其活性的降低会导致植物清除活性氧的能力下降, 从而影响植物对干旱胁迫的适应性^[36-37]。本试验中, LD 处理 POD 活性较 CK 有所增加, 而 MD 和 SD 处理的 POD 活性下降, 这一现象可能反映了麻楝幼苗在中度和重度干旱胁迫下抗氧化系统的抑制或损伤。MDA 是细胞膜脂质过氧化的主要降解产物, 其含量的增加通常表明细胞膜脂质过氧化程度的增加^[31]。本试验中, 各干旱处理组的 MDA 含量与 CK 相比变化不大, 表明麻楝幼苗可能主要通过增强抗氧化酶活性, 如 SOD 和 POD, 清除活性氧, 从而保护细胞膜免受氧化损伤^[38]。在抗旱选育方面, 可以将麻楝幼苗在干旱胁迫下表现出的生理指标变化作为选育指标, 如 SOD 和 POD 指标, 筛选出在干旱条件下仍能保持良好生长状态和较强抗氧化能力的优良个体或家系, 进行定向培育, 为干旱地区的造林绿化提供优良种质资源。

3.3 各指标相关性分析

麻楝幼苗在干旱胁迫下通过调节生长、生理和

抗氧化指标适应水分短缺, 这些复杂的相关性模式揭示了麻楝幼苗在干旱条件下的生存策略。株高增长量与叶长、叶面积呈显著正相关, 表明麻楝幼苗的生长在形态上表现出协调性, 即植株整体的生长速率与其叶片的发育程度密切相关。可溶性糖含量与根长、根表面积的关系可能较为复杂。一方面, 可溶性糖的积累可以为根系的生长提供能量和碳源; 另一方面, 过高的可溶性糖含量可能会影响根系的渗透平衡, 从而抑制麻楝幼苗根系的生长^[39]。可溶性蛋白含量与 POD 活性、可溶性糖含量呈显著负相关, 这可能表明在干旱条件下, 麻楝幼苗通过增加可溶性蛋白和减少可溶性糖含量、降低 POD 活性调节渗透压和保护细胞结构。SOD 活性与根表面积之间的显著正相关关系, 表明麻楝幼苗通过提高抗氧化酶活性减少氧化胁迫, 同时增加根表面积以提高水分和养分的吸收效率, 从而增强其对干旱环境的适应能力。脯氨酸含量与叶长、叶面积呈显著负相关, 可能表明麻楝幼苗受到逆境胁迫时增加脯氨酸的合成以维持细胞内的渗透平衡和抗氧化防御^[32], 然而这种逆境胁迫可能会影响麻楝幼苗的正常生长, 导致叶长和叶面积减少。

本研究揭示了麻楝幼苗在短期干旱条件下的响应机制, 但试验周期较短, 未能全面反映长期干旱对其生长发育、生理过程及生态适应性的影响。未来研究可延长观测周期, 完善试验设计, 以获取更全面和准确的数据。

3.4 结论

在轻度干旱条件下, 麻楝幼苗通过促进根系发展、调节气孔运动、提高叶绿素含量以及增强抗氧化酶活性适应环境变化, 从而维持生理平衡。这些策略的协同效应是麻楝幼苗适应干旱的关键, 对于热带和亚热带地区森林的恢复与经营具有重要的参考价值。然而, 当干旱程度加剧至中度和重度时, 这些适应性反应受到限制, 表明麻楝幼苗对干旱的适应能力存在一定限度。

参考文献:

[1] VAN VLIET M T H, JONES E R, FLÖRKE M, et al. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 024020.

[2] HAO Y, YUAN X, ZHANG M. Enhanced relationship between seasonal soil moisture droughts and vegetation under climate change over China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 358: 110258.

[3] FAROOQ M, WAHID A, ZAHRA N, et al. Recent advances in plant drought tolerance[J]. *Journal of Plant*

Growth Regulation, 2024, 43(10): 3337-3369.

[4] BASSIOUNI M, MANZONI S, VICO G. Optimal plant water use strategies explain soil moisture variability[J]. *Advances in Water Resources*, 2023, 173: 104405.

[5] WOLF S, PAUL-LIMOGE E. Drought and heat reduce forest carbon uptake[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6217.

[6] 王彬, 陈敏氢, 林亮, 等. 植物干旱胁迫的信号通路及相关转录因子研究进展[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(10): 1792-1806.

[7] SELEIMAN M F, AL-SUHAIBANI N, ALI N, et al. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects[J]. *Plants*, 2021, 10(2): 259.

[8] SHEN J, ZHANG Y, ZHANG L, et al. Bioactivity-guided isolation of anti-inflammatory limonins from *Chukrasia tabularis*[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(12): 4216-4225.

[9] 张捷, 王青, 仲崇禄, 等. 生长基质和激素对麻楝嫩枝扦插生根的影响[J]. *植物研究*, 2019, 39(3): 380-386.

[10] ANDRADE C, FERRERES F, GOMES N G M, et al. Valorisation of the industrial waste of *Chukrasia tabularis* A. Juss: Characterization of the leaves phenolic constituents and antidiabetic-like effects[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 185: 115100.

[11] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015: 64-72.

[12] SUN Y, WANG C, CHEN H Y H, et al. Response of plants to water stress: A meta-analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 978.

[13] WU J, WANG J, HUI W, et al. Physiology of plant responses to water stress and related genes: A review[J]. *Forests*, 2022, 13(2): 324.

[14] MUNDIM F M, PRINGLE E G. Whole-plant metabolic allocation under water stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 852.

[15] CAO Y, YANG W, MA J, et al. An integrated framework for drought stress in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(17): 9347.

[16] GAO J, ZHAO J, SHI P. Multiple response mechanisms of plants to drought stress[J]. *Plants*, 2024, 13(20): 2918.

[17] KOU X, HAN W, KANG J. Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1085409.

[18] TYAGI V, SINGH S P, SINGH R D, et al. Chir pine and banj oak responses to pre-monsoon drought across slope aspects and positions in Central Himalaya[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(2): 258.

[19] 高冠龙, 冯起, 张小由, 等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 929-937.

[20] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought[J]. *Science*,

2020, 368(6488): 266-269.

[21] 王方琳, 柴成武, 赵鹏, 等. 3 种荒漠植物光合及叶绿素荧光对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. [西北植物学报](#), 2021, 41(10): 1755-1765.

[22] HAGHPANAH M, HASHEMIPETROUDI S, ARZANI A, et al. Drought tolerance in plants: Physiological and molecular responses[J]. [Plants](#), 2024, 13(21): 2962.

[23] ZAIT Y, SHEMER O E, COCHAVI A. Dynamic responses of chlorophyll fluorescence parameters to drought across diverse plant families[J]. [Physiologia Plantarum](#), 2024, 176(5): e14527.

[24] 王丽华, 余凌帆, 李欣欣, 等. 水分胁迫对 3 个品种油橄榄幼苗生理指标的影响[J]. [经济林研究](#), 2023, 41(3): 296-302.

[25] 冯潇, 田玲, 尹群, 等. 3 种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应[J]. [北京林业大学学报](#), 2024, 46(9): 57-67.

[26] 姜鹏, 秦美欧, 蔡福, 等. 干旱-复水联动对东北春玉米光合生理与产量的影响[J]. [干旱气象](#), 2023, 41(2): 207-214.

[27] OZTURK M, TURKYILMAZ UNAL B, GARCIA-CAPARROS P, et al. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants[J]. [Physiologia Plantarum](#), 2021, 172(2): 1321-1335.

[28] 席璐璐, 缙倩倩, 王国华, 等. 荒漠绿洲过渡带一年生草本植物对干旱胁迫的响应[J]. [生态学报](#), 2021, 41(13): 5425-5434.

[29] 王硕, 贾潇倩, 何璐, 等. 作物对干旱胁迫的响应机制及提高作物抗旱能力的调控措施研究进展[J]. [中国农学通报](#), 2022, 38(29): 31-44.

[30] DU Y, ZHAO Q, CHEN L, et al. Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings[J]. [Plant Physiology and Biochemistry](#), 2020, 146: 1-12.

[31] 王凯悦, 陈芳泉, 黄五星. 植物干旱胁迫响应机制研究进展[J]. [中国农业科技导报](#), 2019, 21(2): 19-25.

[32] BANDURSKA H, NIEDZIELA J, PIETROWSKA-BOREK M, et al. Regulation of proline biosynthesis and resistance to drought stress in two barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes of different origin[J]. [Plant Physiology and Biochemistry](#), 2017, 118: 427-437.

[33] DE FREITAS P A, DE SOUZA MIRANDA R, MARQUES E C, et al. Salt tolerance induced by exogenous proline in maize is related to low oxidative damage and favorable ionic homeostasis[J]. [Journal of Plant Growth Regulation](#), 2018, 37(3): 911-924.

[34] 秦岭, 陈二影, 张艳亭, 等. 干旱及复水对谷子脯氨酸积累和 SiP5CR 基因表达的影响[J]. [分子植物育种](#), 2018, 16(22): 7460-7465.

[35] 郭迦南, 赵倚澎, 杨元植, 等. 超氧化物歧化酶在植物响应干旱、盐碱和冷害中的作用[J]. [植物研究](#), 2024, 44(4): 481-490.

[36] BATOOL T, ALI S, SELEIMAN M F, et al. Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities[J]. [Scientific Reports](#), 2020, 10(1): 16975.

[37] ZHANG A, LIU M, GU W, et al. Effect of drought on photosynthesis, total antioxidant capacity, bioactive component accumulation, and the transcriptome of *Atractylodes lancea*[J]. [BMC Plant Biology](#), 2021, 21(1): 293.

[38] 李安, 舒健虹, 刘晓霞, 等. 干旱胁迫下枯草芽孢杆菌对玉米种子抗旱性及生理指标的影响[J]. [作物杂志](#), 2021(6): 217-223.

[39] HASHIMOTO Y, MAKITA N, DANNOURA M, et al. The composition of non-structural carbohydrates affects the respiration and morphology of tree fine roots in Japan Alps[J]. [Rhizosphere](#), 2023, 26: 100705.

【责任编辑 庄 延】