



轻木幼苗光合特性和生长对干旱胁迫的响应

冯铭, 岩应叫, 栗忠飞, 张树斌

引用本文:

冯铭, 岩应叫, 栗忠飞, 等. 轻木幼苗光合特性和生长对干旱胁迫的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(3): 309–316.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

桂西南不同种源蚬木光合和生长特征的研究

Photosynthetic and Growth Characteristics of Different Excentrodendron hsienmu Provenances from Karst District of Southwestern Guangxi, China

热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 164–170 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3799>

水氮处理对岛礁植物假茉莉生理适应性的影响

Effects of Water and Nitrogen Treatment on Physiological Adaptability of Island Reef Plant *Clerodendrum inerme*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 403–410 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4172>

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>

竹柏2种颜色叶片的光合特性研究

Photosynthetic Characteristics of Two Color Leaves of *Podocarpus nagi*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 177–184 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4134>

向下翻页，浏览PDF全文

轻木幼苗光合特性和生长对干旱胁迫的响应

冯铭^{1a,2}, 岩应叫³, 栗忠飞^{1b}, 张树斌^{2*}

(1. 西南林业大学, a. 水土保持学院; b. 生态与环境学院, 云南省高原湿地保护与恢复及生态服务重点实验室, 昆明 650224; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 勐腊 666303; 3. 普洱学院生物与化学学院, 云南 普洱 665000)

摘要: 为揭示轻木(*Ochroma lagopus*)幼苗对干旱胁迫的响应机制, 设置梯度水分胁迫处理, 通过测定净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)等关键的光合参数, 并监测株高和基径等生长指标, 以及根茎叶的干重及其占比等生物量分配特征, 系统研究干旱胁迫对轻木幼苗光合生理和生长特性的影响。结果表明, 干旱胁迫显著抑制轻木幼苗株高、基径和生物量的积累; 在轻度干旱胁迫条件下, P_n 、 g_s 和 C_i 同步下降, 表明气孔限制是导致光合抑制的主要原因; 轻-中度干旱处理下生物量的显著降低, 主要源于光合作用受限引起的碳同化物的供应不足; 同时, WUE 的提高则有助于维持干旱条件下保水与碳同化的平衡。因此, 在轻木的大田栽培过程中, 干旱通过滴管等节水灌溉技术给予适宜的水分供给, 使土壤水分维持在田间持水量的 80%~85%, 能够显著提升轻木的光合效率和生物量积累能力, 从而达到优化轻木栽培管理和提高木材蓄积量的目的。

关键词: 轻木; 净光合速率; 生长; 生物量; 水分胁迫

doi: 10.11926/jtsb.5026

CSTR:32235.14.jtsb.5026

Responses of Photosynthetic Traits and Growth of *Ochroma lagopus* Seedlings to Drought Stress

FENG Ming^{1a,2}, YAN Yingjiao³, LI Zhongfei^{1b}, ZHANG Shubin^{2*}

(1a. College of Soil and Water Conservation; 1b. Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China 3. School of Biological and Chemistry Science, Puer University, Puer 66500, Yunnan, China)

Abstract: *Ochroma lagopus*, an important fast-growing tropical timber tree species, has been successfully introduced and cultivated in the tropical regions of southwest China. However, the region's distinct tropical monsoon climate, characterized by a pronounced seasonal drought lasting half a year, poses significant challenges to growth and large-scale industrial production of *O. lagopus*. To reveal the response mechanism of *O. lagopus* seedlings to drought, gradient water stress treatments were set up. The key photosynthetic parameters, such as net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (g_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), transpiration rate (T_r), and water use efficiency (WUE) were measured. Growth indicators, such as plant height and basal diameter, as well as biomass allocation characteristics, such as dry weight and proportion of roots, stems, and leaves were monitored. The effects of drought stress on the photosynthetic physiology and growth characteristics of *O. lagopus* seedlings were systematically studied. The results showed that drought stress significantly inhibited the plant height, ground diameter and biomass accumulation of *O. lagopus* seedlings. Under mild drought stress, P_n ,

收稿日期: 2025-04-23 接受日期: 2025-06-24

基金项目: 中国科学院企业合作项目(E4HX061B01); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202405AC350012)资助

This study was supported by the Project of Chinese Academy of Sciences and Enterprise Cooperation (Grant No. E4HX061B01), and the Program for Youth Academic and Technical Leading Talent Reserve in Yunnan (Grant No. 202405AC350012).

作者简介: 冯铭(2000年生), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态学研究。E-mail: fengming@xtbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangshubin@xtbg.ac.cn

g_s and C_i decreased simultaneously, indicating that stomatal limitation was the main cause of photosynthetic inhibition. The significant reduction in biomass under mild to moderate drought was mainly due to the insufficient supply of carbon assimilates caused by restricted photosynthesis. At the same time, the increase in WUE helped maintain the balance between water conservation and carbon assimilation under drought conditions. Therefore, in the field cultivation of *O. lagopus*, providing appropriate water supply through water-saving irrigation techniques such as drip irrigation during the dry season to maintain soil moisture at 80% to 85% of field capacity can significantly improve the photosynthetic efficiency and biomass accumulation capacity of *O. lagopus*, thereby achieving the purpose of optimizing the cultivation management of *O. lagopus* and increasing wood volume.

Key words: *Ochroma lagopus*; Net photosynthesis rate; Growth; Biomass; Water stress

在全球气候变暖背景下, 降水格局的变化会导致干旱事件呈现强度递增、频率攀升的全球性态势^[1]。干旱胁迫作为陆地生态系统面临的最严峻非生物胁迫因子之一, 不仅会抑制植物的生理代谢和形态建成过程, 更可能诱发大规模森林退化等生态灾难^[2]。当前研究已明确其作用机制主要涉及对植物光合器官的双重破坏与水分调控系统的多重干扰: 一方面, 植物为应对干旱胁迫而采取的降低气孔导度(g_s)的保守策略有助于维持水分平衡, 但是会导致胞间 CO_2 浓度(C_i)下降, 进而形成 CO_2 向羧化位点扩散的浓度梯度障碍, 最终使核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶的羧化效率显著降低^[3]; 另一方面, 持续干旱引发的叶绿体超微结构损伤会破坏类囊体膜系统完整性, 同时活性氧自由基(ROS)的过量积累通过抑制光系统 II (PSII)反应中心 D_1 蛋白周转速率, 阻断了光合电子传递链的正常运行, 最终导致光合效率的大幅下降^[4]。

光合作用是植物生长发育的基础, 光合作用通过碳同化与光能转化双重路径构建植物体的能量-碳骨架, 从而为植物提供能量和碳源。当光合电子传递受阻引发光能捕获效率下降时, 核酮糖-1,5-二磷酸羧化效率的衰减, 光合同化物的积累量大幅减少, 直接导致植株整体生产力降低。在碳的供应受限时, 植物会启动源库再调控机制, 优先将有限的光合同化物分配至其他器官, 如根系分生组织等关键生长部位。研究表明, 在干旱胁迫下, 叶片光合速率的降低会导致茎秆生长速率减缓约 20%~30%, 而根系发育也会受到显著抑制^[5-6]。在干旱胁迫环境下, 由于光合作用受到抑制, 植物会优先将有限的光合同化物用于维持基本代谢功能(如呼吸作用)以及防御机制(如抗氧化酶的合成), 而非投入生长相关过程^[7]。为应对干旱胁迫, 植物可能通过调整地上部分与地下部分的资源再分配进行适应性响

应: 一方面增加根系生长以获取深层土壤水分, 另一方面减少地上部分生物量的积累^[8]。因此, 光合效率下降不仅限制光合同化产物的生成量, 还通过改变植株资源分配策略, 对植物的生长速率和发育进程产生显著影响。

轻木(*Ochroma lagopus*)作为一种速生且性能优良的商品用材树种, 其木材具有密度小、强度高以及良好的隔音隔热特性, 被广泛应用于航空航天材料和大型风力发电机组叶片制造等多个领域。当前, 我国对轻木的需求主要依赖进口。随着清洁能源和高端制造业的快速发展, 推进其本土化培育与产业化开发具有重要的战略意义^[9]。轻木原产于南美洲赤道地区的无台风热带气候区, 年降水量在 2 000 mm 以上。自 20 世纪 60 年代起, 我国在云南等适生区域成功实现了轻木的引种栽培。受区域间气候差异的影响, 引种地的年降水量较原产地减少 20%以上; 加上该区域的热带季风气候导致长达半年的季节性干旱, 严重制约了轻木的生长发育及其规模化、产业化进程。目前尚缺乏关于不同水分供应条件对轻木光合特性和生长特征影响的研究工作。本研究旨在通过对轻木盆栽幼苗进行梯度控水试验, 系统研究在水分胁迫下轻木的光合响应特性、生物量分配和幼苗生长状况, 深入解析轻木对水分胁迫的生理生态响应机制, 为优化引种区的水分管理策略提供理论依据, 提高轻木的环境适应能力和生产效率, 对于促进我国轻木产业的可持续发展具有重要的实践意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究于 2024 年 8 月—12 月在云南省西双版纳傣族自治州勐腊县勐仑镇中国科学院西双版纳

热带植物园(21°55'07" N, 101°16'22" E)内进行。该园区海拔 570 m, 热带季风气候。根据云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站的气象数据, 年均气温 21.7 °C, 最冷月(12 月)平均气温 15.9 °C, 最热月(6 月)平均气温 25.7 °C; 年平均降水量 1 560 mm, 年内降水量呈现明显的季节性, 全年可分为雨季(5 月—10 月)和干季(11 月至翌年 4 月), 其中雨季降水量占全年总量的 80%以上, 季节性干旱明显。

1.2 植物材料

采用中国科学院西双版纳热带植物园培育的轻木(*Ochroma lagopus*)杂交品系的 F₁ 代实生苗为试验材料, 其母本和父本分别来自于厄瓜多尔和苏门答腊。2024 年 5 月 26 日播种, 萌发整齐, 于 5 月 29 日全部出土。在经过 55 d 的生长期后, 于 7 月 23 日进行移栽, 移栽标准为株高(20.0±1.2) cm、基径(13.0±3.0) mm 的生长健壮、形态均一的苗木。本试验采用直径和高度均为 35 cm 的塑料花盆作为栽培容器, 栽培基质由壤土与河沙按体积比 3:1 混匀配制而成, 经孔径 2 mm 的标准分级筛筛选后机械混匀, 以去除杂质, 装盆时在容器底部铺设厚度为 5 cm 的陶粒作为排水层。移栽完成后进入缓苗期, 期间保持正常水分供应, 确保苗木适应新的环境, 缓苗期为 60 d。

1.3 干旱处理

2024 年 10 月 18 日, 将轻木幼苗移至防雨大棚中进行后续的干旱处理。该大棚采用透明塑料薄膜设计, 透光率为 90%, 为幼苗生长提供了适宜的光照条件。随后于 2024 年 10 月 21 日开始实施水分胁迫处理: 对照组(CK, 最大田间持水量的 80%~85%)、轻度干旱处理组(QD, 最大田间持水量的 50%~55%)和中度干旱处理组(ZD, 最大田间持水量的 20%~25%), 分别对应西双版纳地区雨季中期(7 月—8 月), 干季初期(11 月—12 月)和干季末期(3 月—4 月)的土壤含水量。试验设计包括 3 个处理组, 每个处理 8 盆幼苗, 每 2 d 监测 1 次土壤湿度传感器数据, 计算需补水量后沿盆壁缓慢加水(避免扰动根系); 补水后 2 h 复测含水量, 确保达到设定的含水量范围。在干旱处理过程中, 每 2 周施用 1 次复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 14:16:15), 结合浇水同步进行。每次施肥量按每盆 20 g 肥料兑水 100 mL 的比例施用, 随后依据干旱处理的目标持水量上限进行浇水; 同时, 期间进行病虫害防治, 以确保苗木的生

长健康和养分需求得到满足。经过 55 d 的持续干旱处理后, 对各组进行光合参数的测定, 同时, 每周进行 1 次水势测定。每个处理组随机选取 5 株幼苗的叶片, 于凌晨(06:00—07:00)采集叶片, 装入含湿棉球的自封袋中, 并立即带回实验室测定凌晨水势。对照组的凌晨水势为(-0.20±0.04) MPa, 轻度干旱组凌晨水势下降到(-0.51±0.09) MPa, 中度干旱组水势显著下降到(-1.32±0.07) MPa, 各处理组间表现出明显的干旱处理梯度。光合参数测定结束后, 对植株进行生物量的收获。

1.4 光合性状测定

光合参数的测量在晴天的早上 9:00 到 11:00 间进行。使用光合作用测定系统(LI-6400XT, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)测量叶片的气体交换。试验所需光源由光合作用测定系统的红蓝叶室(Li-Cor 6400-02)提供的红光(90%)和蓝光(10%)的混合光源。CO₂ 浓度由光合仪自带的 CO₂ 注入系统(6400-01)提供。每个试验组选取 6 株, 每株选取 3 片完全展开的成熟叶片进行光合参数的测定。在光强 1 500 μmol/(m²·s), CO₂ 浓度为 400 μmol/mol, 温度为 28 °C~30 °C 测定净光合速率(P_n), 气孔导度(g_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r), 并计算瞬时水分利用效率(WUE)=P_n/g_s。

1.5 生长监测

采用定期监测方法, 每周测定 1 次苗木生长指标, 包括株高(使用卷尺测量, 0.1 cm)和基径(采用游标卡尺测定, 0.01 mm), 并计算株高和基径的生长速率(GR), 以每周的生长速率平均值用于评估基径生长速率(GRD)和高度生长速率(GRH)。

1.6 生物量及其分配

在试验处理结束后, 每个处理选 5 盆对植株进行收获。将植株分为根、茎、叶 3 部分, 并用流动的自来水将根系仔细冲洗干净。将各部分放入 70 °C 下烘干至少 72 h 后称重, 根据各部分生物量计算总生物量和生物量分配。总生物量(TB)=根生物量+茎生物量+叶生物量; 根生物量比(RBR)=根生物量/总生物量; 茎生物量比(SBR)=茎生物量/总生物量; 叶生物量比(LBR)=叶生物量/总生物量。

1.7 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 进行数据整理, 数据以平均值±标准误差表示。利用 SPSS 22.0 软件(SPSS, Chicago, IL, USA)进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 比较不同水分处理的光合参数、生长速

率和生物量分配的差异显著性, 并采用 Tukey HSD 方法进行多重比较分析, 差异显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。同时, 用 Pearson 相关检测植株的净光合速率与生物量的关系, 并使用 Sigma Plot 12.0 (Systat Software Inc., Richmond, CA) 进行绘图。

2 结果和分析

2.1 光合特性对不同水分供应的响应

由图 1 可见, CK 的 P_n 为 $(24.50 \pm 0.29) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 轻、中度胁迫分别下降 35.2% 和 75.4%, 各处理间

差异显著 ($P < 0.05$)。 g_s 表现出相似的趋势, CK 为 $(0.55 \pm 0.03) \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 轻、中度胁迫分别下降 58.2% 和 91.0%, 各处理间差异显著。 C_i 亦随干旱程度的增加显著下降, CK 为 $(298.5 \pm 5.2) \mu\text{mol}/\text{mol}$, 轻、中度胁迫下分别降低 19.9% 和 28.9%, CK 与 ZD 间差异显著。 WUE 则呈现相反的趋势, 随干旱胁迫增强而显著升高。 CK 的 WUE 为 $(45.4 \pm 2.9) \mu\text{mol}/\text{mol}$, 轻、中度胁迫下分别增至 (85.2 ± 20.0) 和 $(106.9 \pm 13.5) \mu\text{mol}/\text{mol}$, CK 和 ZD 间差异显著。 T_r 随干旱梯度下降, CK 为 $(7.49 \pm 0.03) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 轻、中度干旱胁迫下分别下降 38.2% 和 80.5%, CK 与 ZD 间差异显著。

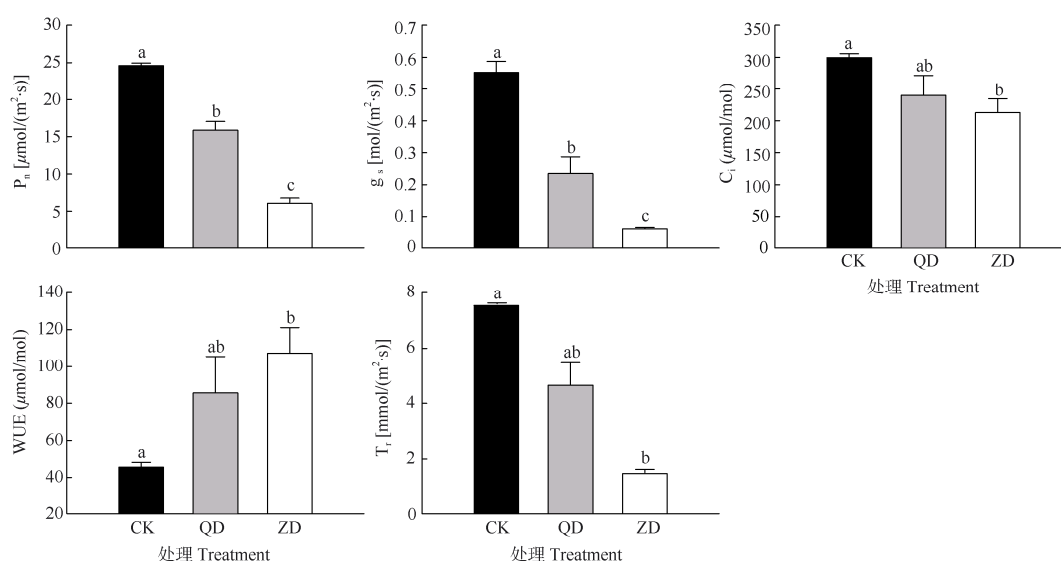


图 1 轻木幼苗光合参数对不同水分胁迫的响应。CK: 对照; QD: 轻度干旱; ZD: 中度干旱; P_n : 净光合速率; g_s : 气孔导度; C_i : 胞间 CO_2 浓度; T_r : 蒸腾速率; WUE: 水分利用效率; 柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Fig. 1 Responses of photosynthetic parameters of *Ochroma lagopus* seedlings to different water stress. CK: Control; QD: Mild drought; ZD: Moderate drought; P_n : Photosynthetic rate; g_s : Stomatal conductance; C_i : Intercellular CO_2 concentration; T_r : Transpiration rate; WUE: Water use efficiency. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

2.2 不同水分供应对轻木生长的影响

经 55 d 干旱处理后, 幼苗基径与株高均呈现梯度生长差异。CK、QD 和 ZD 处理的基径增量分别为 (13.84 ± 0.50) 、 (9.67 ± 0.78) 和 $(6.91 \pm 0.53) \text{mm}$, QD 和 ZD 较 CK 分别下降了 30.1% 和 50.1%; CK、QD、ZD 的株高增长量分别为 (63.38 ± 3.70) 、 (38.88 ± 3.87) 和 $(28.25 \pm 0.77) \text{cm}$, QD 和 ZD 分别下降了 38.7% 和 55.4% (图 2)。CK 基径的生长速率为 $(0.25 \pm 0.01) \text{mm}/\text{d}$, 轻、中度胁迫下分别下降 30.0% 和 48.0%, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。CK 株高的生长速率为 $(1.15 \pm 0.07) \text{cm}/\text{d}$, 轻、中度胁迫下分别下降 38.3% 和 55.7%,

轻、中度干旱处理后幼苗植株高度的生长速率与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 生物量及其分配对不同水分供应的响应

随干旱胁迫加剧, 轻木幼苗总生物量显著降低, 且生物量分配模式发生适应性调整 (图 3)。总生物量在正常供水条件下为 $(293.91 \pm 10.42) \text{g}$, 轻、中度干旱下分别下降 46.0% 和 68.4%。根生物量的分配比例从 CK 的 $(9.9 \pm 0.4)\%$ 增至 QD 的 $(14.15 \pm 0.72)\%$, 中度干旱下虽略低于轻度处理, 但仍显著高于 CK。茎生物量占比持续上升, CK 为 $(24.32 \pm 1.92)\%$, 轻、中度干旱下分别增加至 $(29.68 \pm 1.03)\%$ 和 $(34.76 \pm 2.81)\%$ 。叶生物

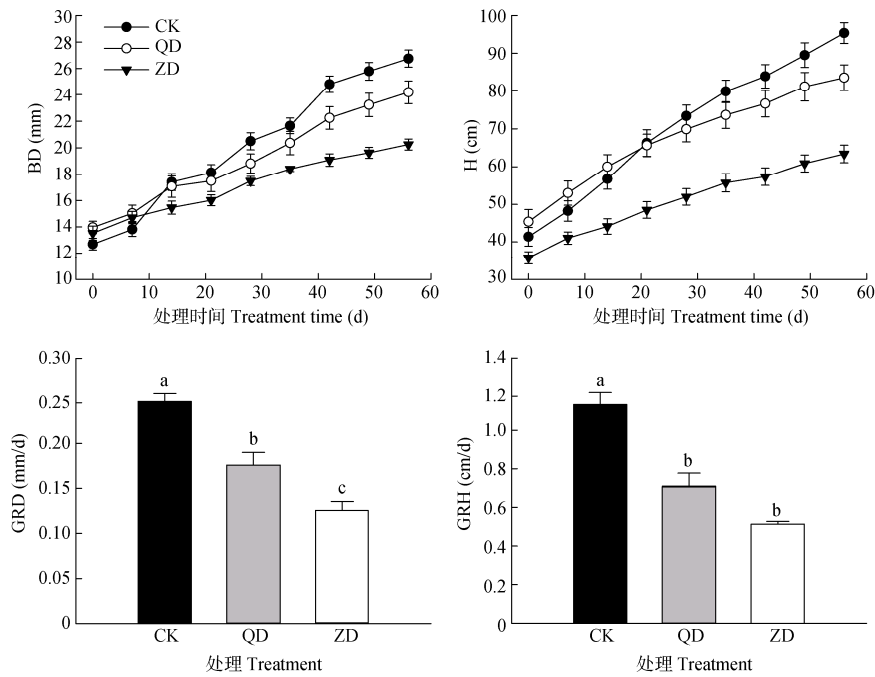


图 2 轻木幼苗生长对水分供应的响应。BD: 基径; H: 株高; GRD: 基径生长速率; GRH: 高度生长速率。
Fig. 2 Responses of *Ochroma lagopus* seedling growth to water stress. BD: Base diameter; H: Height; GRD: Growth rate of diameter; GRH: Growth rate of height.

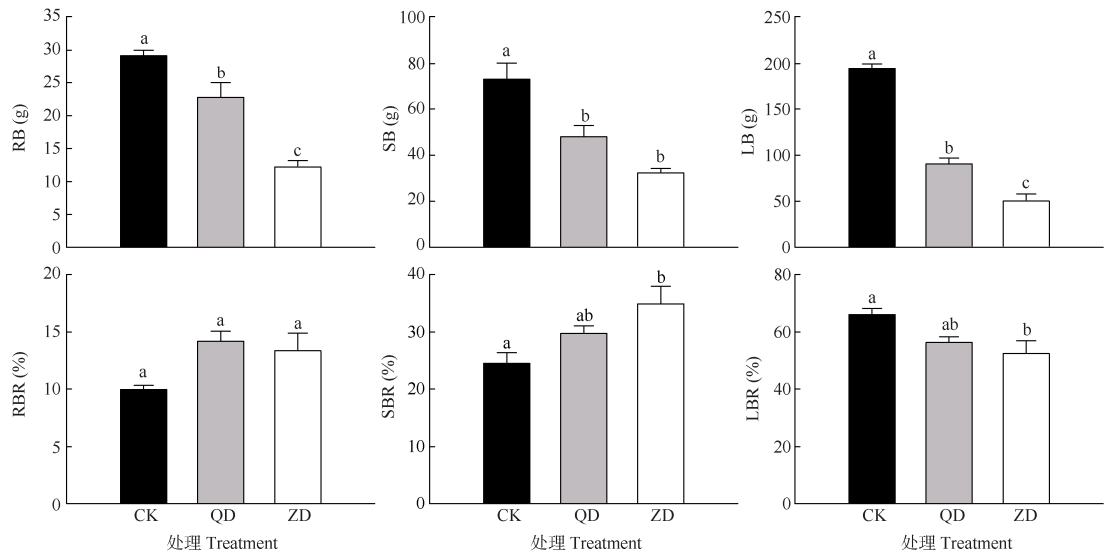


图 3 轻木幼苗生物量及其分配对水分处理的响应。RB: 根生物量; SB: 茎生物量; LB: 叶生物量; RBR: 根生物量比; SBR: 茎生物量比; LBR: 叶生物量比。
Fig. 3 Response of biomass and its allocation of *Ochroma lagopus* seedlings to different water stress. RB: Root biomass; SB: Stem biomass; LB: Leaf biomass; RBR: Root biomass ratio; SBR: Stem biomass ratio; LBR: Leaf biomass ratio.

量占比则显著下降, 从 CK 的(65.78±1.68)%逐步减少至 QD 的(56.17±1.47)%和 ZD 的(52.01±4.21)%。

2.4 光合速率和生物量的关系

相关分析表明轻木幼苗的净光合速率与根、茎、叶的生物量均呈显著正相关关系($P<0.05$, 图 4); 植株整株的生物量与净光合速率也呈显著的正相关关系。结果表明随着干旱程度的加剧, 植株各器官

的生物量和整株生物量的积累随净光合速率的下降而显著下降。

3 讨论和结论

3.1 轻木光合特性对干旱胁迫的响应

本研究结果表明, 与对照相比, 轻、中度干旱处

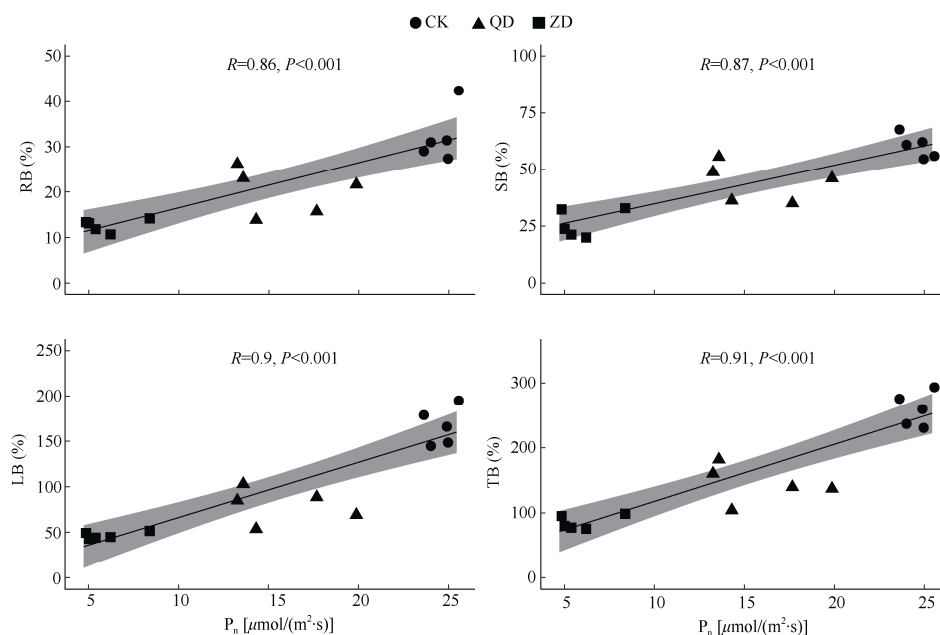


图 4 轻木幼苗净光合速率和生物量的相关性。RB: 根生物量; SB: 茎生物量; LB: 叶生物量; TB: 总生物量; P_n : 净光合速率。

Fig. 4 Correlation between photosynthetic rate and biomass of *Ochroma lagopus* seedlings. RB: Root biomass; SB: Stem biomass; LB: Leaf biomass; TB: Total biomass; P_n : Photosynthetic rate.

理后轻木的净光合速率分别下降了 35.2% 和 75.4%。这与人^[10-11]对其他植物的研究结果一致, 进一步证实干旱胁迫会严重抑制植物光合能力。以前的研究表明干旱胁迫对光合能力的限制包括光反应和暗反应两个方面^[12-13]。干旱胁迫会引发植物细胞稳态被破坏, 抑制捕光色素复合体对光的吸收, 光合传递链中电子传递速率下降^[12]。干旱也会触发 O_2 单电子还原生成活性氧自由基(ROS), ROS 累积会导致 PSII 中光抑制淬灭, 从而限制了最大光化学效率^[13]。另外, 干旱条件下植物通过主动的气孔关闭减少蒸腾失水, 维持体内水分平衡。然而, 气孔关闭使 C_i 的下降和叶绿体羧化位点胞内 CO_2 供应不足, 从而导致 Rubisco 的羧化效率下降^[3]。本研究结果表明, 在轻度干旱胁迫下, 轻木幼苗的 P_n 、 g_s 、 C_i 出现一定程度的降低, 这与张金凤等^[14]对马尾松 (*Pinus massoniana*) 幼苗的研究结果一致。 C_i 的下降, 可能是由于植物为了减少蒸腾耗水而进行的气孔开度减小甚至关闭, 气孔限制是引起净光合速率下降的主导因素。轻木幼苗遭遇干旱胁迫时, 通过主动调节气孔开闭启动自我保护机制。随着干旱胁迫程度加剧, 叶片气孔导度呈进一步下降, 这一气孔调控机制直接影响了植物的气体交换过程, 从而限制了植株的光合效率。

在土壤水分充足条件下, 轻木幼苗展现出较强

的光合能力; 而遭遇干旱胁迫时, 通过主动调节气孔开闭启动自我保护机制。本研究结果表明, 干旱胁迫下轻木幼苗的净光合速率和蒸腾速率均下降; 然而, 由于蒸腾速率的下降幅度大于光合速率, WUE 显著提高。这与已有研究提出的干旱胁迫条件下植物通过提升 WUE 来维持光合系统的完整性的适应机制相吻合^[15]。同时, 本研究结果表明轻木幼苗主要通过气孔调节进行水分平衡, 在中度干旱强度下能实现保水与碳同化的最优平衡, 该调控策略避免了过度蒸腾造成的水分流失, 也体现了轻木作为热带速生树种对干旱的生态适应性策略。

3.2 轻木幼苗生物量及其分配对干旱胁迫的响应

本研究结果表明, 干旱胁迫抑制了轻木幼苗高度和基径的生长以及整株生物量积累, 反映了轻木幼苗在干旱胁迫下的适应性调节机制及其内在生理生态权衡。这一响应模式与罗甸小米核桃 (*Juglans regia*) 通过生长停滞抵御干旱的策略具有相似性^[16]。同时, 本研究结果进一步表明, 轻木各器官的生物量积累与净光合速率呈现显著正相关关系。根据 Mauney 等^[17]的研究, 幼苗阶段生长速率与光合速率呈显著正相关, 进一步验证了光合作用在调控植物碳同化和生物量积累中的关键作用。有机物的合成主要由光合作用驱动, 干旱条件下水分供应不足会诱发幼苗气孔关闭, 从而导致生长速率和生物量积

累的降低。在干旱胁迫下, 轻木各器官生物量及个体的总生物量均显著下降。叶生物量展示了植物对光合作用的投资^[18-19], 其占比下降是为了减少遭遇干旱时叶片衰老掉落产生的植物体能量损失^[20]。植株将资源优先分配到生长受限的部位, 以帮助该部位获得更多的资源, 缓解水分限制, 维持正常生长发育, 因而根茎生物量分配比例增加^[21]。因此, 轻度干旱处理下生物量有一定程度降低, 中度处理下生物量降低更多, 可归因于光合能力受限导致的碳同化物的供应不足。

干旱胁迫除了限制轻木幼苗植株生物量的积累, 还会触发其生物量再分配策略。本研究中根系生物量占比显著提升, 而叶生物量比下降, 根冠比增大。有研究表明干旱胁迫会使植物将光合产物优先分配给根系^[22]。这种“地下优先”的资源分配模式与植物干旱逆境存活理论高度契合, 通过增强水分吸收能力以缓解干旱胁迫^[23]。然而, 不同强度的干旱胁迫下的植物可能存在生物量分配的策略转换。本研究结果表明, 中度干旱与轻度干旱处理相比, 根的生物量比例略微下降。植物不同器官的干旱耐受存在脆弱性分割, 即末端器官(叶片和细根)的干旱耐受能力显著低于茎干和主根, 在干旱程度加剧时, 植物优先牺牲这些构建成本比较低的末端器官, 以保全构建成本比较高的茎干和主根, 维持植株的水力安全^[24]。随着干旱胁迫加剧, 轻木可能通过减少叶片和细根生物量保存茎干和主根。此外, 随着干旱程度的增加, 茎干的生物量比例显著提高, 这表明茎干通过优先分配资源来维持其结构完整性和水分运输能力, 从而应对干旱胁迫。由此可见, 不同器官生物量分配的调整, 既维持了光合器官(叶)的基本功能, 又通过根系强化和茎干耗水控制实现水分利用优化, 彰显了轻木在干旱适应中的生态策略。例如, 增加茎生物量比例提高水分运输效率, 而根系生物量比例的提升则通过改变根的构型增加土壤水分的吸收^[25-26]。然而, 这种适应性调节存在明显的局限性: 尽管轻木幼苗通过提升WUE可在短期内缓解水分供应压力, 但光合速率的持续下降导致碳“源”供应不足, 迫使植物进入“碳饥饿”状态, 最终通过降低生物量实现生存防御。这种策略虽能提高短期存活率, 但可能限制其长期恢复能力。

本研究通过设置对照、轻度干旱及中度干旱梯度水分处理, 系统分析了轻木幼苗生长、生物量分

配及光合生理的响应机制。研究结果表明, 维持土壤含水量在80%~85%田间持水量时, 幼苗基径、株高、净光合速率和总生物量积累均显著优于干旱处理; 而轻度干旱时光合速率与气孔导度同步降低, 证实气孔限制是光合抑制的主因; 中度干旱加剧碳同化不足, 导致生物量锐减。基于水分利用效率的平衡调控, 提出轻木栽培中应通过滴灌等技术将土壤含水量维持在80%~85%田间持水量, 以优化光合产能与生物量积累。研究结果为轻木苗木的精准水肥管理、抗旱品种选育及热带速生树种应对季节性干旱提供了关键理论支撑, 对提升人工林产量及区域生态恢复具有实践意义。

致谢 云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站为本研究提供气象监测数据, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] PETROVA I Y, MIRALLES D G, BRIENT F, et al. Observation-constrained projections reveal longer-than-expected dry spells [J]. *Nature*, 2024, 633(8030): 594-600. doi: 10.1038/s41586-024-07887-y.
- [2] HAMMOND W M, WILLIAMS A P, ABATZOGLOU J T, et al. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for earth's forests [J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 1761. doi: 10.1038/s41467-022-29289-2.
- [3] GOLDING A J, JOHNSON G N. Down-regulation of linear and activation of cyclic electron transport during drought [J]. *Planta*, 2003, 218(1): 107-114. doi: 10.1007/s00425-003-1077-5.
- [4] NISHIYAMA Y, ALLAKHVERDIEV S I, MURATA N. Protein synthesis is the primary target of reactive oxygen species in the photo-inhibition of photosystem II [J]. *Physiol Plant*, 2011, 142(1): 35-46. doi: 10.1111/j.1399-3054.2011.01457.x.
- [5] PAN S M, LIU F, LI W B, et al. Effects of drought stress on growths and root architectures of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* seedlings [J]. *Guangxi For Sci*, 2024, 53(6): 738-745. [潘淑民, 刘菲, 李伟彬, 等. 干旱胁迫对江南油杉幼苗生长和根系构型的影响 [J]. *广西林业科学*, 2024, 53(6): 738-745. doi: 10.19692/j.issn.1006-1126.20240607.]
- [6] ZHANG W H, HE S, ZHONG Z B. Effects of water deficit and salt stress on growth and photosynthetic characteristics of cotton seedlings [J]. *Agric Eng*, 2024, 14(12): 115-120. [张万恒, 何帅, 忠智博. 水分亏缺和盐胁迫对棉苗生长及光合特性的影响 [J]. *农业工程*, 2024, 14(12): 115-120. doi: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202412320.]
- [7] MARKESTEIJN L, POORTER L. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought-

- and shade-tolerance [J]. *J Ecol*, 2009, 97(2): 311–325. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01466.x.
- [8] YANG Q H, ZHENG B Y, LI L L, et al. Effect of exogenous nitric oxide donor on carbon assimilation and antioxidant system in leaves of maize seedlings under PEG-induced water deficit stress [J]. *Acta Agron Sin*, 2018, 44(9): 1393–1399. [杨青华, 郑博元, 李蕾蕾, 等. 外源 NO 供体对水分亏缺下玉米叶片碳同化关键酶及抗氧化系统的影响 [J]. *作物学报*, 2018, 44(9): 1393–1399. doi: 10.3724/SPJ.1006.2018.01393.]
- [9] ZOU S Q, HUA S, DUAN Z B, et al. Cultivation technology of *Ochroma lagopus* in low altitude area of Xishuangbanna [J]. *For Invent Plann*, 2019, 44(5): 112–116. [邹寿青, 华帅, 段柱标, 等. 轻木在西双版纳低海拔地区栽培实用技术 [J]. *林业调查规划*, 2019, 44(5): 112–116. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2019.05.022.]
- [10] CHAVES M M, FLEXAS J, PINHEIRO C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. *Ann Bot*, 2009, 103(4): 551–560. doi: 10.1093/aob/mcn125.
- [11] ZHANG S B, ZHANG J L, CAO K F. Effects of seasonal drought on water status, leaf spectral traits and fluorescence parameters in *Tarenna depauperata* Hutchins, a Chinese savanna evergreen species [J]. *Plant Sci J*, 2016, 34(1): 117–126. [张树斌, 张教林, 曹坤芳. 季节性干旱对白皮乌口树(*Tarenna depauperata* Hutchins)水分状况、叶片光谱特征和荧光参数的影响 [J]. *植物科学学报*, 2016, 34(1): 117–126. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2016.10117.]
- [12] ZHANG Y J, XIE Z K, WANG Y J, et al. Effect of water stress on leaf photosynthesis, chlorophyll content, and growth of oriental lily [J]. *Russ J Plant Physiol*, 2011, 58(5): 844–850. doi: 10.1134/S1021443711050268.
- [13] MOUSTAKAS M, SPERDOULI I, KOUNA T, et al. Exogenous proline induces soluble sugar accumulation and alleviates drought stress effects on photosystem II functioning of *Arabidopsis thaliana* leaves [J]. *Plant Growth Regul*, 2011, 65(2): 315–325. doi: 10.1007/s10725-011-9604-z.
- [14] ZHANG J F, CHEN P Z, SUN X B, et al. Effects on photosynthetic and resistant physiological characteristics of *Pinus massoniana* seedlings under drought stress [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2021, 37(1): 32–38. [张金凤, 陈佩珍, 孙晓波, 等. 干旱对马尾松幼苗光合作用及相关生理的影响 [J]. *中国农学通报*, 2021, 37(1): 32–38.]
- [15] RIPLEY B, FROLE K, GILBERT M. Differences in drought sensitivities and photosynthetic limitations between co-occurring C₃ and C₄ (NADP-ME) Panicoid grasses [J]. *Ann Bot*, 2010, 105(3): 493–503. doi: 10.1093/aob/mcp307.
- [16] CHENG J, LIU J M, WANG S, et al. Plasticity of a karst endemic plant *Juglans regia* L. f. *luodianense* Liu et Xu in response to soil moisture [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2021, 33(2): 259–269. [程晶, 刘济明, 王姝, 等. 喀斯特特有植物罗甸小米核桃响应土壤水分的表型可塑性 [J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(2): 259–269. doi: 10.3969/j.issn.1004-1524.2021.02.09.]
- [17] MAUNEY J R, FRY K E, GUINN G. Relationship of photosynthetic rate to growth and fruiting of cotton, soybean, sorghum, and sunflower [J]. *Crop Sci*, 1978, 18(2): 259–263. doi: 10.2135/cropsci1978.0011183X001800020016x.
- [18] REICH P B, ELLSWORTH D S, WALTERS M B. Leaf structure (specific leaf area) modulates photosynthesis–nitrogen relations: Evidence from within and across species and functional groups [J]. *Funct Ecol*, 1998, 12(6): 948–958. doi: 10.1046/j.1365-2435.1998.00274.x.
- [19] WESTOBY M, WARTON D, REICH P B. The time value of leaf area [J]. *Am Nat*, 2000, 155(5): 649–656. doi: 10.1086/303346.
- [20] MUNNÉ-BOSCH S, ALEGRE L. Die and let live: Leaf senescence contributes to plant survival under drought stress [J]. *Funct Plant Biol*, 2004, 31(3): 203–216. doi: 10.1071/FP03236.
- [21] ZHU Y H, WEINER J, JIN Y, et al. Biomass allocation responses to root interactions in wheat cultivars support predictions of crop evolutionary ecology theory [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 858636. doi: 10.3389/fpls.2022.858636.
- [22] XING J, FAN W Q, WANG J N, et al. Rhizosphere bacterial diversity and the effects of soil sterilization on the growth of two varieties of *Medicago ruthenica* under drought stress [J]. *Acta Pratac Sin*, 2024, 33(12): 147–159. [邢静, 范文强, 王佳妮, 等. 干旱胁迫下 2 个扁蓿豆品种根际细菌多样性及土壤灭菌对其生长的影响 [J]. *草业学报*, 2024, 33(12): 147–159. doi: 10.11686/cyxb2024029.]
- [23] ZENG F J, SONG C, GUO H F, et al. Responses of root growth of *Alhagi sparsifolia* Shap. (Fabaceae) to different simulated groundwater depths in the southern fringe of the Taklimakan Desert, China [J]. *J Arid Land*, 2013, 5(2): 220–232. doi: 10.1007/s40333-013-0154-2.
- [24] TYREE M T, COCHARD H, CRUIZIAT P, et al. Drought-induced leaf shedding in walnut: Evidence for vulnerability segmentation [J]. *Plant Cell Environ*, 1993, 16(7): 879–882. doi: 10.1111/j.1365-3040.1993.tb00511.x.
- [25] POORTER H, NIKLAS K J, REICH P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. *New Phytol*, 2012, 193(1): 30–50. doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x.
- [26] RANJAN A, SINHA R, SINGLA-PAREEK S L, et al. Shaping the root system architecture in plants for adaptation to drought stress [J]. *Physiol Plant*, 2022, 174(2): e13651. doi: 10.1111/ppl.13651.