

亚热带屋顶短期干旱下园林植物光合日动态及其生理响应

陈惠珊, 潘 澜*

华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年8月31日; 录用日期: 2026年9月26日; 发布日期: 2026年10月8日

摘 要

目的: 探究72 h短期干旱对华南典型屋顶绿化植物光合日动态的影响, 揭示其干旱适应机制, 为亚热带粗放式屋顶绿化节水灌溉与耐旱植物筛选提供理论依据。方法: 以华南地区常用园林植物蚌花为试验材料, 设置正常供水对照组(CK)、短期干旱处理组(D), 于8:00、11:00、14:00和17:00同步测定净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r) 4项叶片气体交换参数, 分析光合生理的日动态变化。结果: 短期干旱对 P_n 的抑制存在明显时段特异性, 正午D处理 P_n 显著低于CK, 而清晨与傍晚两组无显著差异; 各时刻 g_s 与 T_r 均无组间显著差异, 而 C_i 在午间大幅降低, 表明正午光合受抑以非气孔限制为主导; 傍晚各参数可恢复至对照水平, 未造成不可逆损伤。结论: 供试植物在短期干旱下呈现“正午受抑-傍晚恢复”的光合日动态模式, 正午受抑以非气孔限制为主导且具有可逆性。研究结果可为粗放型屋顶绿化灌溉管理及耐旱植物筛选提供参考。

关键词

屋顶绿化, 园林植物, 干旱, 光合日动态, 气孔限制, 非气孔限制

Photosynthetic Diurnal Dynamics and Physiological Responses of Landscape Plants to Short-Term Drought on Subtropical Rooftops

Huishan Chen, Lan Pan*

College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

Received: August 31, 2026; accepted: September 26, 2026; published: October 8, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈惠珊, 潘澜. 亚热带屋顶短期干旱下园林植物光合日动态及其生理响应[J]. 林业世界, 2026, 15(4): 827-835. DOI: 10.12677/wjf.2026.154096

Abstract

Objective: This study investigated the effects of 72 h short-term drought on the diurnal photosynthetic dynamics of a typical subtropical green roof plant and revealed its drought adaptation mechanisms, aiming to provide a theoretical basis for water-saving irrigation and drought-tolerant plant selection on extensive green roofs in subtropical regions. **Methods:** *Tradescantia spathacea*, a commonly used landscape plant in South China, was selected as the test material. Two water treatments were established: well-watered control (CK) and short-term drought treatment (D). Four leaf gas exchange parameters, including net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (g_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), and transpiration rate (T_r), were synchronously measured at 08:00, 11:00, 14:00 and 17:00 to analyze the diurnal dynamics of photosynthetic physiology. **Results:** The inhibition of P_n by short-term drought exhibited distinct time-specificity: P_n in the D treatment was significantly lower than that in CK only at midday, with no significant differences between the two groups in the morning and evening. Stomatal conductance and transpiration rate showed no significant differences between treatments at all measured time points, whereas C_i decreased substantially at midday, indicating that the midday photosynthetic depression was predominantly attributed to non-stomatal limitation. All photosynthetic parameters in the D treatment recovered to control levels by the evening, suggesting that no irreversible damage to photosynthetic capacity was caused. **Conclusion:** The tested landscape plants exhibited a “midday depression—evening recovery” diurnal photosynthetic response pattern under short-term drought, with the midday photosynthetic depression dominated by non-stomatal limitation and the inhibition being reversible. These findings provide a reference for irrigation management and drought-tolerant plant selection on extensive green roofs.

Keywords

Green Roof, Landscape Plant, Drought Stress, Diurnal Photosynthetic Dynamics, Stomatal Limitation, Non-Stomatal Limitation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球变暖背景下, 极端干旱事件的频率、强度和时间长度持续攀升, 土壤水分亏缺通过调控植被光合生理过程深刻影响陆地生态系统碳汇能力[1]-[3]。干旱胁迫主要通过气孔关闭增加 CO_2 扩散阻力, 以及根系吸水受限直接抑制碳同化两类途径制约光合进程[1]。城市热岛效应进一步放大了这一过程的水分胁迫强度[4], 在城区地面绿化空间日趋紧张背景下, 屋顶绿化作为不占用地面土地的关键绿色基础设施, 成为缓解城市热环境与提升碳汇储量的重要途径[5]。然而, 屋面绿化生境存在基质层偏薄、持水保肥性能弱的天然短板, 加之夏季屋面强光辐射与基质温度骤升, 水分蒸发速率显著高于平地绿地, 植被长期处于持续性中度干旱胁迫状态, 叶片光合固碳与蒸腾降温功能受到明显抑制[6]。因此, 解析屋顶绿化植物的干旱适应机制, 亟需从叶片气体交换参数(净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率)的时序动态变化入手, 这些参数可直观表征水分亏缺对碳同化与水分损耗的协同调控规律, 并据此判别光合限制类型[7]。但现有研究多聚焦景天科品种或单一时间点的静态光合测定[8]-[10], 对华南本土园林草本植物在干旱条件下全天光合气体交换的时序变化及分时段气孔调控机制缺乏系统分析。

基于此, 本研究以华南粗放型屋顶绿化常用园林植物为试验材料, 设置正常供水对照(CK)与短期干旱处理(D)两类水分梯度, 通过监测叶片气体交换参数的日间动态变化, 分析各时段光合响应特征及其限制因子类型, 以期从时序生理角度揭示供试植物对屋顶薄层基质干旱环境的适应机制, 为粗放型屋顶绿化节水灌溉提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验地概况

试验场地设于广州市越秀区一处建筑物屋顶, 屋面开阔平整, 满足试验布设与长期连续观测要求。该区域属南亚热带季风气候, 多年平均温度约 24℃, 极端最低-0.4℃, 最高 38.4℃; 年均日照时数约 1472 h, 其中 7 月日照最长(236.3 h)。降雨集中在 4 至 9 月, 年均降水量 1633 mm。

2.2. 试验材料

试验前选取生长健壮、无病虫害、苗高和地径相近的蚌花(*Tradescantia spathacea*)幼苗作为供试材料。该植物为鸭跖草科紫露草属多年生常绿草本, 抗逆性强, 适应粗放管护, 是华南屋顶绿化中应用广泛的地被园林植物。试验于 2025 年 7 月中旬至 8 月上旬进行室外盆栽种植, 盆栽区域为全光照开放场地, 无明显遮阴。定植后各处理统一进行水分和除草管理, 不额外追肥。于 2025 年 8 月中旬和下旬进行终期采样与测定, 试验处理持续时间约 1 个月。

2.3. 研究方法

2.3.1. 试验设计

本试验于屋面同质生境条件下开展, 采用单因素完全随机试验设计, 以土壤水分为主导调控因子, 设置正常供水对照组(CK)与短期干旱处理组(D)两组水分模式, 模拟城市屋顶绿化常规管护与自然干旱胁迫的真实生境。试验选取光照、通风、温度及基底条件相对一致的屋面区域, 布设 2 个规格 2 m × 2 m 的屋面单元(见表 1), 各屋面单元统一定植 400 株蚌花。

水分处理方式参照亚热带粗放型屋顶绿化管护现状设置。CK 处理于每日 6:00 和 18:00 定时补水, 维持基质含水量在植株正常生长适宜区间。D 处理整个观测周期内停止浇灌 72 h, 依托屋顶薄层基质保水性弱与水分快速散失的特点, 构建短期基质水分亏缺条件。观测期间, CK 处理始终维持在 0.32~0.38 m³/m³ 之间, 无明显波动; D 处理基质含水量持续下降, 由起始的 0.25 m³/m³ 降至 0.13 m³/m³, 降幅达 48%; 可模拟屋顶绿化夏季短时缺水的实际生境。

Table 1. Settings of two water treatments on the rooftop
表 1. 两种屋面不同水分处理的设置情况

处理编号	水分处理	土壤含水量(m ³ /m ³)	配置植物
CK	正常供水	0.32~0.38	蚌花
D	短期干旱	0.13~0.25	蚌花

2.3.2. 光合指标测定

为探究干旱胁迫下植物光合生理的日内动态响应特征, 选取晴天分别于 8:00、11:00、14:00、17:00 四个典型时段开展测定, 涵盖清晨弱光、午间高温强光及傍晚缓光全过程, 试验利用光合仪 LI-6400 (LI-COR Inc., USA)同步测定并获取叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率四项气体交换参数, 试

验期间将仪器光合系统光量子通量密度设置为 $1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度设置为 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。测定时在各组随机选取健康功能叶单株取样测定, 先计算各重复内部样本均值, 再以三组生物学重复均值作为最终有效数据, 对比分析不同水分处理下植株光合日动态的差异, 揭示持续水分供给不足对屋面植物光合固碳与水分生理节律的调控规律。

2.4. 统计分析

本试验所有光合生理数据首先采用 Microsoft Excel 2021 软件进行整理与预处理, 通过描述统计分析甄别并剔除极端异常数值, 保障基础数据的准确性与可靠性。利用 SPSS 26.0 统计软件开展数据差异性检验与相关性分析, 以同一测定时段内正常供水组与短期干旱组的成对数据为基础进行独立样本 t 检验, $P < 0.05$ 为差异显著的判定标准, 明确不同水分处理下植物光合参数的组间差异特征, 并通过 Pearson 相关性分析揭示各生理指标间的内在关联。最终采用 Origin 2026 软件完成数据可视化处理, 绘制不同水分处理下植物各光合参数的日内动态变化折线图, 直观反映干旱胁迫对蚌花光合生理日变化节律的调控规律。

3. 结果与分析

3.1. 不同水分处理对叶片净光合速率的影响

由图 1 可知, 2 组处理蚌花净光合速率均呈单峰下降、傍晚小幅回升的日动态变化节律。分时段组间独立样本 t 检验结果表明, 两个处理在 8:00、11:00、17:00 内的净光合速率差异不显著($P > 0.05$)。14:00 高温强光时段, D 处理的净光合速率显著低于 CK 处理($P < 0.05$), 正午为短期水分供给短缺限制植株碳同化过程的关键时段。

从日内光合衰减幅度对比来看, CK 处理的正午净光合速率下降幅度平缓, 而 D 处理衰减幅度明显更大。清晨 8:00 光温条件温和, 两组净光合速率差异较小; 随日间光照与气温持续升高, 两组光合差距逐步拉大, 14:00 差异达到峰值, D 处理均值仅 $1.38 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著低于同期 CK 处理均值($2.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); 17:00 光照减弱后, D 处理净光合速率回升, 与同期 CK 无显著差异。

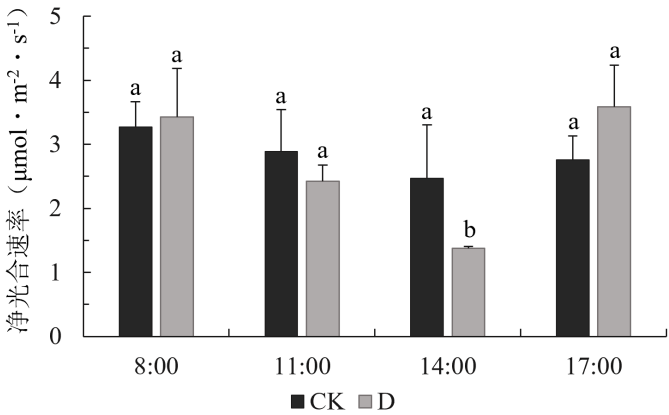


Figure 1. Diurnal dynamics of net photosynthetic rate of *Tradescantia spathacea* under control (CK) and drought (D) treatments
图 1. 对照(CK)与干旱(D)处理下蚌花净光合速率日动态变化

3.2. 不同水分处理对气孔导度的影响

由图 2 可见, 两组处理的蚌花叶片气孔导度日变化趋势整体一致, 均表现为 8:00 至 11:00 持续下降, 11:00 降至全天最低值, 11:00 至 17:00 随光照减弱逐步回升。分时段独立样本 t 检验结果显示, 8:00、

11:00、14:00 和 17:00 四个观测时段内, 两组植株气孔导度组间均无显著差异($P > 0.05$)。从数值变化来看, 11:00 午间高温时段两组气孔导度差值达到全天最大, 但该数值差异未达到统计学显著水平; 14:00 至 17:00 光照逐步减弱, 两组气孔导度同步持续回升; 17:00 傍晚两组气孔导度均回升至全天较高水平, 组间差值仍稳定存在。

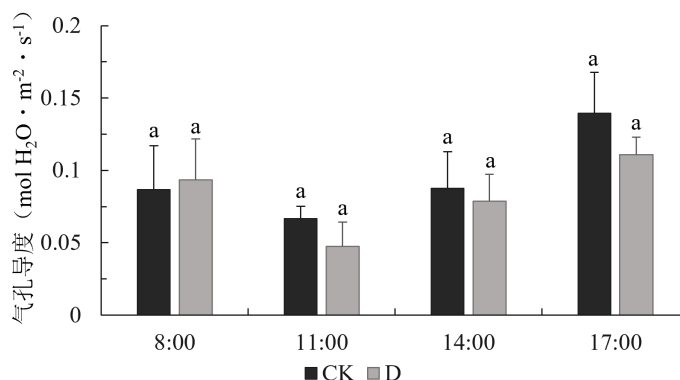


Figure 2. Diurnal dynamics of stomatal conductance of *Tradescantia spathacea* under control (CK) and drought (D) treatments

图 2. 对照(CK)与干旱(D)处理下蚌花气孔导度日动态变化

3.3. 不同水分处理对胞间 CO₂ 浓度的影响

如图 3 所示, 胞间 CO₂ 浓度的双因素方差分析表明, 处理与时间存在显著交互作用($P < 0.05$)。根据时间点开展组间多重比较, 11:00 午间高温时段, D 处理胞间 CO₂ 浓度均值为 312.20 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, CK 处理为 365.56 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, D 处理的胞间 CO₂ 浓度极显著低于 CK, 两组均值差值达 53.36 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ($P < 0.01$)。8:00、14:00 和 17:00 三个观测时刻, D 处理与 CK 处理的胞间 CO₂ 浓度均无显著组间差异($P > 0.05$)。

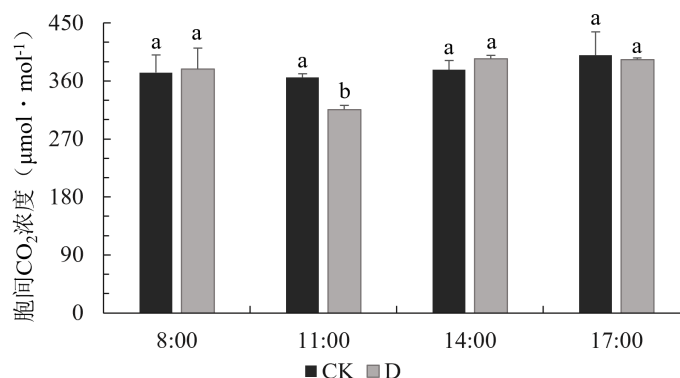


Figure 3. Diurnal dynamics of intercellular CO₂ concentration of *Tradescantia spathacea* under control (CK) and drought (D) treatments

图 3. 对照(CK)与干旱(D)处理下蚌花胞间 CO₂ 浓度日动态变化

3.4. 不同水分处理对蒸腾速率的影响

见图 4 中全天 4 个观测时刻, 同一时间内 CK 与 D 处理柱状上方均标注相同小写字母 a, 说明 72 h 短期基质水分亏缺处理与常规供水对照组的叶片蒸腾速率在各时段均无统计学显著差异($P > 0.05$)。从日内变化规律来看, 蒸腾速率整体呈现午间降低、后升高、傍晚小幅稳定的时序特征。11:00 午间高温时段

两组蒸腾速率达到全天最低值, D 处理蒸腾数值低于 CK, 但二者无显著差异; 8:00 清晨、14:00 正午与 17:00 傍晚两组蒸腾速率数值接近, 仅存在数值层面小幅波动。结合双因素方差分析结果, 水分处理与日内测定时间无显著交互作用($P > 0.05$); 水分处理主效应不显著($P > 0.05$), 仅日内时间对蒸腾速率存在显著主效应($P < 0.05$)。

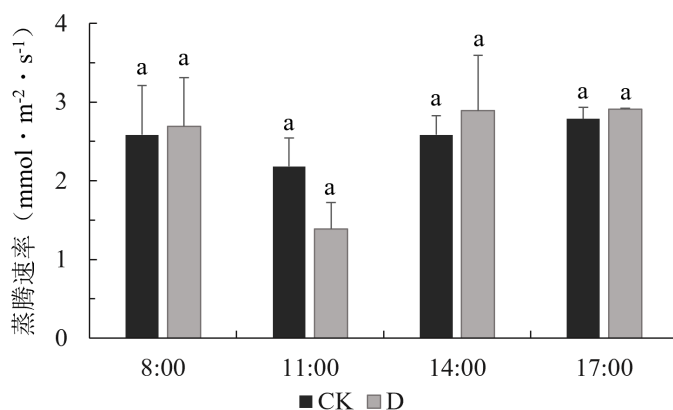


Figure 4. Diurnal dynamics of transpiration rate of *Tradescantia spathacea* under control (CK) and drought (D) treatments

图 4. 对照(CK)与干旱(D)处理下蚌花蒸腾速率日动态变化

4. 讨论

4.1. 短期干旱对光合日变化的时间特异性及其恢复特征

本研究表明, 短期干旱对净光合的抑制存在明显时段特异性, 仅 14:00 高温强光时段 D 处理净光合速率显著低于 CK 处理, 而清晨和傍晚两组差异不显著。全天各观测时刻气孔导度均无组间显著差异, 表明正午碳同化能力下降无法用气孔开闭变解释, 气孔限制并非该时段光合受抑的主导诱因, 而可能涉及叶肉细胞羧化效率降低等非气孔限制因素[11]。汤聪等[6]对广州屋顶绿化植物的抗旱研究指出, 干旱胁迫可通过土壤水分亏缺、叶片失水及细胞膜损伤多重途径抑制植株生理代谢。与之相符, 本研究 14:00 时段植株净光合的大幅降低, 正是强光高温加剧叶片蒸腾与基质水分供给不足引发碳同化过程受抑的综合体现; 而清晨和傍晚环境胁迫负荷较低, 植物可通过气孔调控维持基础光合, 甚至因干旱驯化效应而小幅提升弱光下的固碳效率。

与正午受抑相对应的是, 17:00 傍晚时段 D 处理与 CK 的所有光合指标均无显著差异, 表明 72 h 短期水分亏缺所引起的光合抑制在光温条件回落后基本解除。该恢复格局并非孤例, Venkat 和 Muncer[12]对菠菜的研究发现, 干旱胁迫下净光合速率与气孔导度的日间波动受昼夜节律调控, 傍晚胁迫处理组可恢复至对照的 80%~90%, 表明光温环境的日周期变化是驱动光合参数动态恢复的重要外部因子。

上述时段性响应特征揭示, 土壤水分含量是调控亚热带屋顶蚌花日间光合潜力的核心限制因子, 正午高温强光与基质缺水构成光合功能显著衰减的关键窗口期, 而傍晚光温胁迫负荷的回落则为光合参数的快速恢复提供了外部条件。这种正午受抑而傍晚恢复的日变化格局, 其背后的生理驱动机制, 尤其是正午时段光合受抑的主导限制因子, 尚需进一步甄别。

4.2. 正午光合受抑的限制因子辨析

本研究结果显示, 与 CK 相比, D 处理组的净光合速率显著下降, 气孔导度未发生显著变化($P > 0.05$), 而胞间 CO_2 浓度却极显著降低($P < 0.01$)。在经典的气孔限制分析框架下, 轻度干旱下净光合速率的下降

通常伴随气孔导度与胞间 CO_2 浓度的同步下降[13][14]。然而, 本研究中气孔导度未显著变化, 直接排除了气孔关闭作为主导限制因子的可能性, 表明非气孔限制是造成正午光合受抑的主要途径。

值得关注的是, 本研究中“气孔导度未变而胞间 CO_2 浓度极显著降低”的矛盾格局表明, CO_2 经由气孔进入叶片的扩散通道并未受阻, 但胞间 CO_2 浓度却大幅下降, 胞间 CO_2 的异常快速消耗可能是导致这一现象的直接原因。其生理机制可能涉及叶肉细胞羧化效率的短期上调、 CO_2 由气孔下腔向叶绿体羧化位点液相传输阻力的改变, 或光呼吸速率的激发[15]。由于本研究未直接测定叶肉导度与 Rubisco 活性等关键生理参数, 上述推测有待进一步实验验证。

前人研究为上述推测提供了间接佐证。张成军等[16]在干旱胁迫下小麦旗叶的研究中发现, 叶肉导度对净光合速率的限制效应早于并大于气孔导度; Yang 等[15]进一步从叶片解剖结构角度证实, 干旱可通过改变细胞壁厚度、叶绿体分布密度等形态特征降低叶肉导度, 从而抑制 CO_2 由气孔下腔向羧化位点的传输效率。上述文献规律与本试验观测到的“非气孔限制优先”特征一致, 提示在浅基质屋顶绿化植物的短期干旱响应中, 叶肉水平的 CO_2 传输效率变化可能是限制光合速率的重要环节之一, 但其具体贡献程度尚需结合叶肉导度与生化限制的直接测定加以明确区分。

4.3. 光合限制因子的时间动态及其生态适应意义

综合上述两节的分析, 短期干旱下屋顶蚌花光合响应呈现出“正午受抑-傍晚恢复”的格局。正午时段, CO_2 经由气孔进入叶片的扩散通道并未受阻, 但胞间 CO_2 浓度却大幅下降, 表明植物在水分亏缺与高蒸腾需求的双重压力下, 在叶肉层面表现为胞间 CO_2 的快速消耗与碳同化效率的短期下调[17], 而非等待气孔缓慢响应。从节水策略看, 叶肉限制的优先激活比气孔关闭更为高效[18], 气孔关闭需改变叶片整体水分状况才能触发, 而叶肉水平的调控可在水分胁迫初期迅速介入, 将有限的基质水分优先用于维持植株水分安全。这一推论与全天气孔导度始终维持对照水平的实验结果吻合, 表明正午碳同化的显著受抑并非由气孔关闭所致。

傍晚光温条件回落后, 光合参数快速恢复至对照水平。该恢复现象从另一侧面验证了正午光合受抑的暂态性质, 即胁迫高峰期发生的碳同化速率下调并非光合机构遭受不可逆损伤的结果, 而是植物采取的一种可逆性生理调节。杨泽粟等[19]对半干旱区春小麦的研究指出, 光合速率在日变化不同时段受不同限制因子主导, 午间以气孔限制为主, 下午尤其傍晚以非气孔限制为主, CO_2 扩散限制的主导因子会随时间在气孔导度与叶肉导度之间发生转移。该发现与本试验傍晚光合恢复所隐含的非气孔限制解除趋势一致。此外, 曾小平等[20]对屋顶绿化植物佛甲草的研究发现, 不同生长期佛甲草的 CO_2 同化速率、气孔导度和蒸腾速率均呈现相似的日变化格局, 三者呈显著正相关, 表明屋顶绿化植物的气体交换参数对环境因子的日周期变化具有高度协同响应特征, 这为本试验观测到的光合参数日动态提供了同类研究佐证。

上述文献规律与本试验观测到的“气孔导度未变而碳同化已在正午受抑”现象可形成互补, 即本试验中叶肉水平的限制因子在正午即已介入, 其响应时序可能早于气孔调控。上述“正午受抑、傍晚恢复”的时间格局及其背后气孔未关闭而碳同化已受抑的因子辨析, 共同指向了浅基质屋顶绿化植物的一种特殊响应策略, 即在光温胁迫高峰期, 植物通过叶肉水平碳同化效率的动态调节, 在维持气孔开放所允许的 CO_2 进入潜力的同时, 优先控制水分消耗; 待胁迫窗口关闭后, 光合系统迅速恢复以利用早晚适宜窗口期进行碳固定。这一策略使植物在水分保持与碳固定之间实现了动态权衡, 反映了其对屋顶浅基质生境的一种节水适应。该推论尚需结合植物水势、叶片相对含水量及 ABA 信号等生理指标加以验证。

4.4. 研究启示与局限性

本研究揭示了短期干旱下蚌花正午光合受抑、傍晚恢复的光合日动态格局, 并辨析了正午光合受抑

以非气孔限制为主导, 为理解该物种在浅基质屋顶生境下碳水平衡的维持机制提供了生理学依据。上述发现对屋顶绿化养护管理具有一定参考价值, 即午间高温时段对基质水分的及时补给可能是保障植物光合功能持续稳定发挥的关键窗口。需要注意的是, 本研究仅基于蚌花单一物种的屋顶室外短期盆栽试验, 结论不宜外推至其他屋顶绿化植物; 且干旱胁迫周期较短, 无法反映长期干旱的植株响应。受试验条件限制, 本研究未测定叶水势、叶肉导度、叶绿素荧光等参数, 缺乏直接证据解析非气孔限制内在机制, 一定程度上限制了机理解析深度与结论拓展广度。未来可同步测定叶肉导度、Rubisco 活性及叶绿素荧光参数, 量化各限制因子贡献, 结合多物种与野外原位试验, 进一步验证叶肉水平碳同化效率动态调节的推论。

5. 结论

本研究表明, 短期干旱对供试蚌花净光合速率的抑制呈现明显时段特异性。净光合速率仅在午间高温强光时段明显降低, 清晨与傍晚与对照无差异。午间光合受抑主要归因于非气孔限制导致的碳同化受抑, 而非气孔关闭造成的 CO₂ 供应不足; 傍晚光温条件回落后, 受抑的光合速率可恢复至对照水平。蚌花通过午间下调碳同化效率以减少碳同化消耗、傍晚恢复碳同化, 表现出对屋顶薄层基质水分快速变化生境的节水适应策略。因此, 针对蚌花而言, 正午高温时段保障基质水分供给, 是维持浅基质屋顶绿化植物光合功能稳定的关键养护措施。

参考文献

- [1] Liu, J., Wang, Q., Zhan, W., Lian, X. and Gentine, P. (2025) When and Where Soil Dryness Matters to Ecosystem Photosynthesis. *Nature Plants*, **11**, 1390-1400. <https://doi.org/10.1038/s41477-025-02024-7>
- [2] Lesk, C., Anderson, W., Rigden, A., Coast, O., Jägermeyr, J., McDermid, S., *et al.* (2022) Compound Heat and Moisture Extreme Impacts on Global Crop Yields under Climate Change. *Nature Reviews Earth & Environment*, **3**, 872-889. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8>
- [3] Liu, X., Hu, Z., Wang, M., Hou, W. and Hu, T. (2026) Multidimensional Aspects of Drought Event Evolution Drive the Spatiotemporal Heterogeneity of Vegetation Photosynthetic Responses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **149**, Article ID: 105253. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2026.105253>
- [4] Huang, S., Gan, Y., Wang, C., Wang, S., Chen, J., Zhang, X., *et al.* (2026) Urbanization-Induced Compression Effect Accelerates and Amplifies Dry-Wet Abrupt Alternations in Chinese Cities. *Science Bulletin*, **71**, 1461-1473. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2026.01.078>
- [5] Zheng, X., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Yang, S., Liu, H., *et al.* (2023) Green Roof Cooling and Carbon Mitigation Benefits in a Subtropical City. *Urban Forestry & Urban Greening*, **86**, Article ID: 128018. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128018>
- [6] 汤聪, 刘念, 郭微, 等. 广州地区 8 种草坪式屋顶绿化植物的抗旱性[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1867-1876.
- [7] 徐志鹏. 寒温带兴安落叶松林蒸散过程对环境变化的响应机制及模型模拟[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- [8] 程建峰, 陈根云, 沈允钢. 植物叶片特征与光合性能的关系[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 466-473.
- [9] 陈艺荃, 罗远华, 吴建设, 等. 景天科多肉植物品种资源评价体系构建及应用[J]. 福建农业学报, 2024, 39(3): 320-329.
- [10] 刘紫娟, 袁蕊, 王娜, 等. 干旱胁迫对八宝景天叶片生理的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(4): 548-553.
- [11] Flexas, J., Bota, J., Galmés, J., Medrano, H. and Ribas-Carbó, M. (2006) Keeping a Positive Carbon Balance under Adverse Conditions: Responses of Photosynthesis and Respiration to Water Stress. *Physiologia Plantarum*, **127**, 343-352. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00621.x>
- [12] Venkat, A. and Muneer, S. (2025) Circadian-Mediated Regulation of Growth, Chloroplast Proteome, Targeted Metabolomics and Gene Regulatory Network in Spinacia Oleracea under Drought Stress. *Agriculture*, **15**, Article 522. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050522>
- [13] 陈卫元, 曹晶, 姜卫兵. 干旱胁迫对红叶石楠叶片光合生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 217-220.

-
- [14] 汪本福, 黄金鹏, 杨晓龙, 等. 干旱胁迫抑制作物光合作用机理研究进展[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(23): 5628-5632.
- [15] Yang, Y., Li, Y., Ma, X., Teng, Z., Yan, L., Chang, S., *et al.* (2026) Leaf Morpho-Anatomical Traits Regulate the Differential Responses of Stomatal and Mesophyll Conductance to Drought in Rice and Wheat. *The Plant Journal*, **125**, e70673. <https://doi.org/10.1111/tpj.70673>
- [16] 张成军, 陈国祥, 施大伟, 等. 灌浆对小麦旗叶光合功能的影响[J]. 河南农业科学, 2005, 34(2): 18-21.
- [17] Flexas, J., Ribas-Carbó, M., Diaz-Espejo, A., Galmés, J. and Medrano, H. (2007) Mesophyll Conductance to CO₂: Current Knowledge and Future Prospects. *Plant, Cell & Environment*, **31**, 602-621. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01757.x>
- [18] Grassi, G. and Magnani, F. (2005) Stomatal, Mesophyll Conductance and Biochemical Limitations to Photosynthesis as Affected by Drought and Leaf Ontogeny in Ash and Oak Trees. *Plant, Cell & Environment*, **28**, 834-849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01333.x>
- [19] 杨泽粟, 张强, 郝小翠. 自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 174-182.
- [20] 曾小平, 赵平, 蔡锡安, 等. 佛甲草(*Sedum lineare*)在干旱条件下的气体交换[J]. 生态科学, 2011, 30(2): 156-161.