

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.004

论文标题： 水分胁迫及恢复对白兰幼树叶片光合生理特性的影响

作　　者： 周 鹏，田 洋，李智琦，等

收稿日期： 2025-05-06

引文格式： 周鹏,田洋,李智琦,等.水分胁迫及恢复对白兰幼树叶片光合生理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):29-38.

ZHOU P, TIAN Y, LI Z Q, et al. Effects of water stress and recovery on the physiological and ecological characteristics of *Michelia×alba* sapling[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):29-38.

相关论文推荐

Recommended articles

水分胁迫对山乌桕幼苗生长及生理生化的影响

Effects of water stress on the growth, physiological and biochemical characteristics of *Sapium discolor* seedlings

水分胁迫对闽楠幼苗生理及光合特性的影响

Effects of water stress on the physiological and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

持续淹水胁迫对美洲黑杨幼苗生长及生理生化的影响

Effects of continuous waterlogging stress on growth, physiology and biochemistry of *Populus deltoides* seedlings

凹叶景天在水分胁迫下的生理响应研究

Physiological responses on *Sedum emarginatum* under water stress

水分胁迫对桢楠幼树光合生理特性的影响

Effects of water stress on photosynthetic physiology characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings

滇楸优良无性系对水淹胁迫的生理响应及综合评价

Physiological response and comprehensive evaluation of elite clones of *Catalpa fargesii* Bur. f. *duclouxii* under waterlogging stress

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.004
http: //qks.csuft.edu.cn

水分胁迫及恢复对白兰幼树叶片光合生理特性的影响

周　鹏[1]，田　洋[2]，李智琦[1]，齐跃强[1]

（1. 广州市林业和园林科学研究院 广东广州城市生态系统国家定位观测研究站，广东 广州 510405；
2. 广东省林业调查规划院，广东 广州 510520）

摘　要：【目的】探究水分胁迫及水分恢复对南亚热带常用园林绿化树种白兰 *Michelia×alba* 幼树叶片水势、光合和叶绿素荧光等光合生理特性的影响。【方法】采用 12 个隔离地下水的开顶箱（OTC），每个 OTC 种植 1 株白兰幼树，按照随机区组试验设计，利用树下截雨和人工浇水相结合的方式共设置 4 种水分梯度处理，分别为过量水组（OW）、对照组（CK）、中度干旱组（MD）和重度干旱组（HD），测定水分胁迫（持续 3 个月）后不同时间及水分恢复（持续 2 个月）后不同时间白兰幼树叶片水势、瞬时光合、叶绿素荧光等参数动态变化，对比分析不同处理间的差异。【结果】1）与 CK 比较，干旱胁迫（MD 和 HD）显著降低白兰幼树叶片水势指标（正午水势）、光合指标（净光合速率和气孔导度等）和叶绿素荧光指标（最大光化学效率和电子传递速率等），而过量水灌溉对白兰幼树叶片水势、光合和荧光指标均不存在显著影响。2）在经历连续大气自然降水后，干旱胁迫（MD 和 HD）下白兰幼树叶片水势、光合和叶绿素荧光指标均恢复，与 CK 不存在显著差异。3）土壤水分恢复后，各处理组间的水势、光合和荧光指标均不存在显著差异。【结论】1）干旱胁迫会显著降低白兰幼树叶片水势、光合和荧光参数，使叶片出现萎蔫现象，影响白兰幼树的正常生长，及时补水可促使白兰幼树恢复正常生长状态。具体来说，当土壤水分低于 25% 田间持水量时，及时通过人工浇水措施补充土壤水分。2）大气降水可有效缓解土壤干旱对白兰幼树叶片水势、光合和荧光的抑制，促进白兰幼树的生长恢复。在城市园林绿化植物的养护与管理过程中，当出现持续干旱时，应关注土壤水分指标，及时补水可使白兰幼树从水分胁迫中恢复，避免死亡。

关键词：白兰幼树；水分胁迫；水分恢复；光合特性；叶绿素荧光

中图分类号：S718.43　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0029-10

Effects of water stress and recovery on the physiological and ecological characteristics of *Michelia×alba* sapling

ZHOU Peng[1], TIAN Yang[2], LI Zhiqi[1], QI Yueqiang[1]

(1. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou Urban Ecosystem National Field Station, Guangzhou 510405, Guangdong, China; 2. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of water stress and subsequent recovery on the water potential, photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Michelia×alba* sapling, a widely utilized greening tree species in the south subtropical region.【Method】Twelve open-topped chambers (OTCs) with isolated groundwater were utilized, each containing one *Michelia×alba* sapling. A randomized block design was employed to set up four water gradient treatments, incorporating both rainfall interception in the undercanopy and artificial irrigation: Over-irrigation (OW), control (CK), moderate drought (MD), and high drought (HD). The dynamic changes in instantaneous water potential, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of the *Michelia×alba* leaves were measured under different water stress treatments (3 consecutive months) and subsequent water recovery (2 consecutive months), and the differences between treatments were analyzed.【Result】Compared with CK, drought stress (MD and HD) significantly reduced the leaf water potential index (midday water potential), photosynthetic indices (net photosynthetic rate, stomatal conductance, etc.), and chlorophyll fluorescence indices (maximum photochemical efficiency, electron transport rate, etc.) of *Michelia×alba* saplings. In contrast,

收稿日期（Received）：2025-05-06　　**修订日期**（Revised）：2025-07-08

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC3802602）；广州市科学技术局农业和社会发展科技项目（202206010058）。

第一作者：周鹏（173770894@qq.com），博士。　　**通信作者：**李智琦（2278554670@qq.com），高级工程师，博士。

引文格式：周鹏 , 田洋 , 李智琦 , 等 . 水分胁迫及恢复对白兰幼树叶片光合生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):29-38.

ZHOU P, TIAN Y, LI Z Q, et al. Effects of water stress and recovery on the physiological and ecological characteristics of *Michelia×alba* sapling[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):29-38.

excessive water irrigation had no significant effect on the leaf water potential, photosynthesis, and fluorescence indices of *Michelia×alba* saplings. After continuous natural atmospheric precipitation, the leaf water potential, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence indices of *Michelia×alba* saplings under drought stress (MD and HD) recovered and showed no significant differences compared with those of the CK. After the soil moisture was restored, there were no significant differences in the water potential, photosynthesis, and fluorescence indices among different treatment groups.【Conclusion】Drought stress limits the leaf water potential, photosynthesis, and fluorescence of *Michelia×alba* sapling leaves, causing wilting and negatively affecting growth. Timely watering can restore the plants to normal conditions. Specifically, before the soil moisture falls below 25% of the field capacity, timely artificial watering should be applied to replenish the soil moisture. Atmospheric precipitation effectively mitigates the suppression of *Michelia×alba* sapling's water potential, photosynthetic fluorescence due to soil drought, promoting recovery and growth. In the maintenance and management process of urban landscaping plants like *Michelia×alba*, when continuous drought occurs, attention should be paid to the soil moisture index. Timely watering can help *Michelia×alba* recover from water stress and avoid death.

Keywords: *Michelia×alba* sapling; water stress; water recovery; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence

在全球气候变化背景下，气候变暖对大气水循环产生显著影响，使大气降水的频率和强度发生变化，导致旱涝灾害频繁发生[1]。旱涝灾害直接影响植物的光合生理特性，从而对植物生长产生影响，甚至引起植物死亡[2-3]。特别是在城市园林绿化领域，由旱涝灾害造成的植物死亡，不仅削弱了城市生态系统功能，同时也给后续的养护管理工作增加了技术难度和经济负担[4]。因此，研究水分胁迫及水分恢复对城市园林绿化植物光合生理特性的影响，对其科学养护管理具有重要实践价值。

植物光合生理特性（叶片水势、光合和荧光）对水分胁迫响应敏感[5]。叶片水势作为 SPAC 系统（土壤 - 植物 - 大气连续体）水分运输的重要指标，能反映植物体内水分供需情况[6]。光合作用是植物将光能转化为稳定化学能的关键过程，对水分变化反应敏感[7-8]。水分胁迫会对光合作用产生严重限制[9-10]。叶绿素荧光是光合作用的探针，具有对进入叶片的光能进行能量分配的能力，能够准确映射出光系统Ⅱ（PS Ⅱ）的代谢活性[11]，被广泛用于评估光系统在环境胁迫下的活性状态，以及监测植物整体健康程度[12-14]。水分胁迫与恢复过程贯穿于植物整个生命周期。在不同程度的水分胁迫和恢复过程中，植物的抗逆能力和恢复能力存在显著差异[15]。因此，理解植物叶片水势、光合和荧光等光合生理性状对水分胁迫及水分恢复的响应，将有助于评估植物对水分胁迫的适应性，为植物的水分管理提供科学依据。

目前，关于水分胁迫与水分恢复对植物叶片水势、光合和荧光等光合生理特性影响的研究已开展较多[5]。以幼苗为研究对象的试验结果在城市园林养护管理实践中存在一定的局限性，主要表现为以下两方面：一是城市园林绿化乔木以胸径大于 5 cm 的幼树为主[16]，其对水分胁迫的响应可能与采用盆栽幼苗的试验结果存在差异；二是温室盆栽试验条件无法模拟城市园林植物的自然生长环境，难以准确揭示城市园林植物对水分胁迫的真实响应状况[17]。因此，基于近自然的控制试验，阐明城市园林树种对水分胁迫和恢复响应的研究亟需开展。白兰 *Michelia*×*alba* 是亚热带常绿乔木，凭借其阔伞形树冠和洁白芳香的花朵，具有优良的观赏价值。该树种具备环境适应性强、抗污染能力突出的良好生态适应性，加之其根系发达、对地面破坏少、维护成本低等特点，是城市园林绿化的优选树种，在华南地区应用尤为广泛。本试验以白兰为研究树种，通过实施野外水分胁迫及恢复的近自然控制试验，测定了白兰幼树的叶片水势、瞬时光合参数和叶绿素荧光参数等指标，旨在明确水分胁迫及恢复对白兰幼树光合生理特性的影响，为白兰的科学养护提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于广州市城区，属于典型的亚热带季风性海洋气候，年日照时数 1 770 ～ 1 940 h，年太阳辐射总量 4 400 ～ 5 000 MJ/m^2；全年温度较高，年平均气温为 21.5 ～ 22.2 ℃；年平均降水量为 1 689.3 ～ 1 876.5 mm，4—9 月为雨季，降水量约占全年的 80%。土壤类型为赤红壤。该城市主要园林绿化树种有白兰、樟 *Camphora officinarum*、榕树 *Ficus microcarpa*、羊蹄甲 *Bauhinia purpurea*、中国无忧花 *Saraca dives* 等。

1.2 试验材料

模拟水分胁迫试验平台位于广州市林业和园林科学研究院（113°16′48″E，23°09′26″N）内，平台海拔为 20 m，于 2020 年建成。试验平台由树下截雨系统、开顶箱（Open-top chamber，OTC）群

和土壤水分自动观测设备构成。每个 OTC 的面积为 3 m×3 m，深度为 0.8 m，每个 OTC 之间相隔 1.5 m。该 OTC 的箱体和箱底采用砖、水泥砂浆混凝土砌造，可以隔除地下水。OTC 中土壤取自就近的城市森林土壤，并按自然土层堆填。每个 OTC 内，于植株斜对角距树干 1 m 处，分别在 30 cm 土层中放置一个土壤水分传感器（TEROS 12，METER，USA），用来监测土壤体积含水量。OTC 中传感器数据每 10 min 平均 1 次，并将平均后的数据保存在数据采集器（CR-1000，Campbell Scientific，USA）中。2020 年，从南亚热带城市园林绿化主要应用树种中选取 1 年生白兰幼树栽种于 OTC 内，每个 OTC 种植 1 株，自然生长至 2023 年 6 月，白兰平均胸径达 8 cm，平均树高为 3.5 m。

1.3　试验方法

1.3.1　试验设计

本研究试验处理分为水分胁迫处理和水分恢复处理，其中水分胁迫处理时间为 2023 年 6 月 20 日—9 月 21 日，持续时间约 3 个月，将 6 月 20 日—7 月 20 日定义为水分胁迫早期，7 月 21 日—8 月 20 日定义为水分胁迫中期，8 月 21 日—9 月 21 日定义为水分胁迫后期；于 9 月 22 日开始进行水分恢复处理，设定水分恢复持续时间约 2 个月（9 月 22 日—11 月 16 日）。本试验时间节点的设计主要参考了大型树池相关研究的试验方法，这些试验的水分胁迫处理时间一般为 2 ～ 4 个月，水分恢复处理时间一般为 1 个月以上 [5,9,18]。水分胁迫试验开始前，测量 OTC 中土壤田间持水量，将其转换成土壤水分传感器测定的土壤体积含水量（VWC），为 0.34，并对所有 OTC 浇水至土壤田间持水量。水分胁迫试验共设置 4 个处理组，分别为：1）过量灌溉组（OW，轻度水淹），土壤含水量等于田间持水量的（125±5）%，对应的 VWC 为 0.41 ～ 0.44；2）对照组（CK），土壤含水量等于田间持水量的（75±5）%，对应的 VWC 为 0.24 ～ 27.00；3）中度干旱组（MD），土壤含水量等于田间持水量的（50±5）%，对应的 VWC 为 0.15 ～ 0.19；4）重度干旱组（HD），土壤含水量等于田间持水量的（25±5）%，对应的 VWC 为 0.07 ～ 0.10。在每天的 18:00 左右，根据 OTC 中土壤水分传感器数据进行补水，实施干旱胁迫处理，使各水分胁迫处理组分别保持对应的土壤含水量。水分恢复处理阶段，3 个水分胁迫组土壤含水量均恢复至 CK 水平，其中 HD 处理补水至 CK 水平的日期为 10 月 18 日（26 d），OW 处理自然干旱至 CK 水平的日期为 10 月 25 日（约 33 d）。试验采用随机区组设计，每组处理设置 3 个重复，共使用 12 个 OTC。OTC 处理分布和截雨设施如图 1 所示。

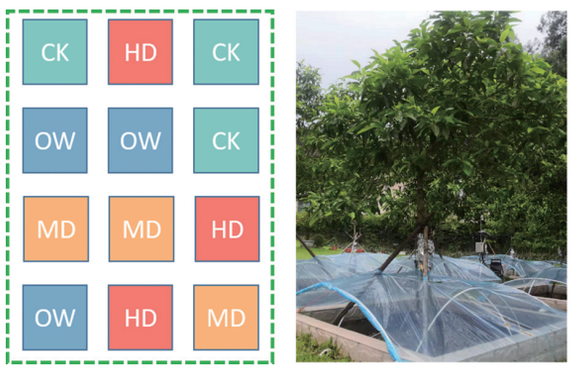


图 1　OTC 处理分布和截雨设施

Fig. 1　OTC treatment distribution map and rainfall interception facilities

1.3.2　指标测定

2023 年 6—11 月，依据天气情况，选择 7 d 及以上间隔的晴天对白兰叶片进行光合、荧光、水势同步测定，由于荧光叶室和水势仪为新购仪器，于 8 月 23 日到货之后开始进行水势和荧光测定（因天气原因，10 月 12 日未测水势和荧光）。使用便携式植物水势压力室（PMS-1505D，PMS instruments，USA）测定每棵植株中部 3 片成熟叶片的叶片水势，于黎明前 5:00—6:00 采集叶片，测定黎明前水势（Ψ_{pd}，MPa）；于正午 13:00—14:00 采集叶片，测定正午水势（Ψ_{md}，MPa）。在 9:00—11:30 时段，对每棵植株中部向阳的 3 片叶片，采用便携式光合仪（Li-6800，LI-COR，USA）测定瞬时气体交换参数，包括净光合速率（P_n）、胞间 CO_2 浓度（C_i）、气孔导度（G_s）和蒸腾速率（T_r），测定 3 次稳定值并取平均值。在测定时，叶室光强和温度均设置为测试时段下的平均值，相对湿度为 60%，大气 CO_2 浓度（C_a）为 400 μmol·mol^{-1}，空气流速为 500 μmol·s^{-1}。凌晨（5:00—6:00）采用 LI-COR 6800 光合仪荧光叶室测定叶绿素荧光，分别测定最小初始荧光（F_o）、最大荧光（F_m）、PS Ⅱ最大光化学效率（F_v/F_m）；白天开展光合参数测定时，同步测定 PS Ⅱ实际光化学效率（ΦPS Ⅱ）、电子传递速率（ETR）、光化学淬灭系数（q_p）等参数。

1.4　数据统计与分析

叶片瞬时水分利用效率（WUE，E_{WU}）和气孔限制值（L_s）分别采用公式 $E_{WU}=P_n/T_r$ 和

L_s=(C_a−C_i)/C_a×100% 计算。运用单因素方差分析确定水分胁迫处理对白兰叶片的 Ψ_{pd}、Ψ_{md}、叶片水势差（$\Delta\Psi$，Ψ_{pd}−Ψ_{md}）、G_s、T_r、P_n、WUE、L_s、F_o、F_m、F_v/F_m、ΦPS Ⅱ、ETR、q_p 等指标的影响是否显著，再采用 Tukey 验测法进行多重比较分析，比较白兰水势、光合和荧光指标在不同水分胁迫处理间的差异，显著性判断标准为 P < 0.05。所有统计分析和绘图均用 R 语言进行，数据采用平均值 ± 标准误表示。

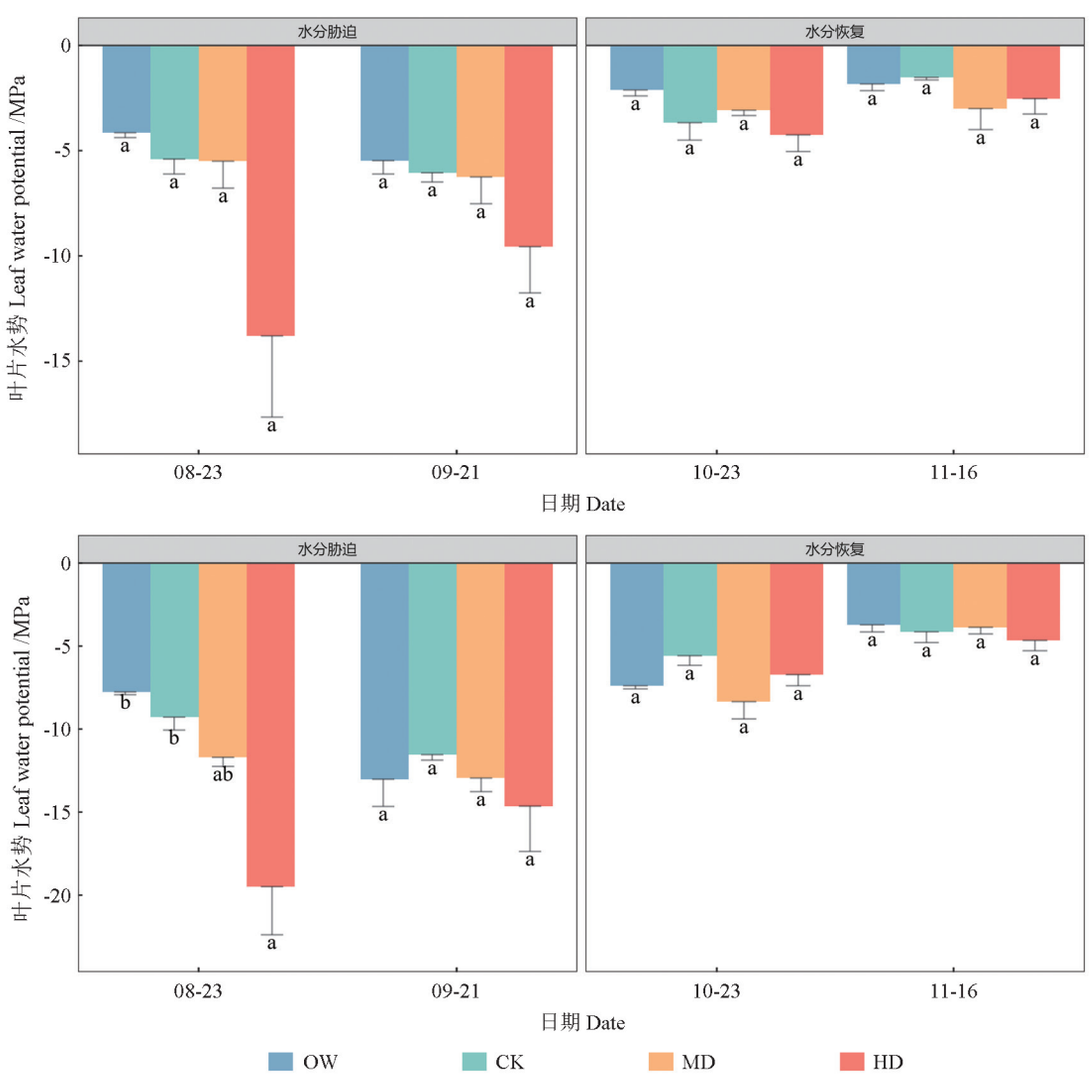
2　结果与分析

2.1　水分胁迫及水分恢复下叶片水势

白兰叶片水势对水分胁迫处理响应敏感（图 2）。在水分胁迫后期（8 月 23 日），不同处理的平均 Ψ_{md} 分别为 −9.28 MPa（CK）、−7.76 MPa（OW）、−11.70 MPa（MD）、−19.49 MPa（HD），HD 的 Ψ_{md} 显著低于 CK 和 OW（P < 0.05）。在水分胁迫后期（9 月 21 日），HD 的 Ψ_{md} 恢复至 CK 水平，不同水分处理间均没有显著差异（P > 0.05）。在整个水分胁迫处理阶段，不同处理的 Ψ_{pd} 与 $\Delta\Psi$ 均没有显著差异（图 2、图 3，P > 0.05），8 月 23 日和 9 月 21 日的 Ψ_{pd} 分别为 −13.8 ～ −4.15 MPa 和 −5.47 ～ 9.56 MPa，8 月 23 日和 9 月 21 日的 $\Delta\Psi$ 分别为 3.61 ～ 6.20 MPa 和 5.07 ～ 7.55 MPa。在水分恢复期，Ψ_{pd}、Ψ_{md} 和 $\Delta\Psi$ 在不同处理间均不存在显著差异（P > 0.05）。

2.2　水分胁迫及恢复下叶片气体交换参数

水分胁迫处理对白兰 G_s、T_r 和 P_n 的影响随处理时间而发生变化。在水分胁迫中期和后期（8 月 10 日—8 月 23 日），与 CK 比较，MD 和 HD 均



不同小写字母表示处理间差异显著（P < 0.05）；误差棒为标准误；下同。
Different lowercase letters indicated significant differences between treatments(P < 0.05), the error bars represent standard error, the same below.

图 2　水分胁迫和恢复对叶片水势的影响
Fig. 2　The effects of water stress and recovery on water potential in leaves

显著降低了白兰叶片的 G_s 和 T_r（图 4，$P < 0.05$）。在整个水分胁迫处理阶段，OW 的白兰叶片 G_s 和 T_r 均与 CK 没有显著差异（$P > 0.05$），但在水分胁迫处理中期和后期（8 月 10 日—9 月 21 日）均显著高于 HD（$P < 0.05$）。在水分胁迫处理中期和后期（8 月 10 日—8 月 23 日），HD 的白兰叶片 P_n 均显著低于 CK 和 OW（$P < 0.05$）。在水分恢复 21 d 后（10 月 12 日），经水分胁迫处理（OW、MD 和 HD）的白兰叶片 G_s、T_r 和 P_n 均已恢复，与 CK 不存在显著差异（$P > 0.05$）。在整个水分胁迫和恢复阶段，各处理间的 WUE 和 L_s 均没有显著差异（图 5，$P > 0.05$）。

2.3　水分胁迫及恢复下叶片叶绿素荧光参数

在水分胁迫阶段，白兰的叶绿素荧光参数产生比较明显的变化（图 6）。在水分胁迫后期（8 月 23 日），随着土壤水分的减少，F_v/F_m、ETR、ΦPS Ⅱ和 q_p 等荧光参数均呈下降趋势，HD 处理

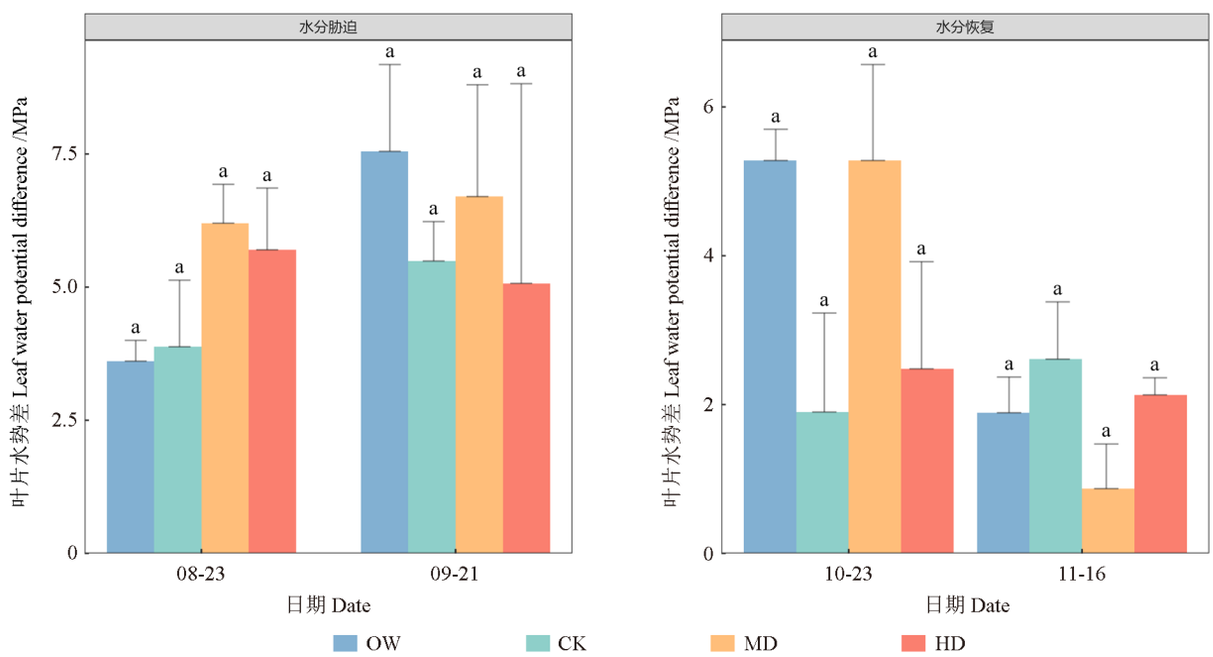


图 3　水分胁迫和恢复对叶片水势差（$\Delta\Psi$, $\Psi_{pd}-\Psi_{md}$）的影响

Fig. 3　The effects of water stress and recovery on water potential difference ($\Delta\Psi$, $\Psi_{pd}-\Psi_{md}$) in leaves

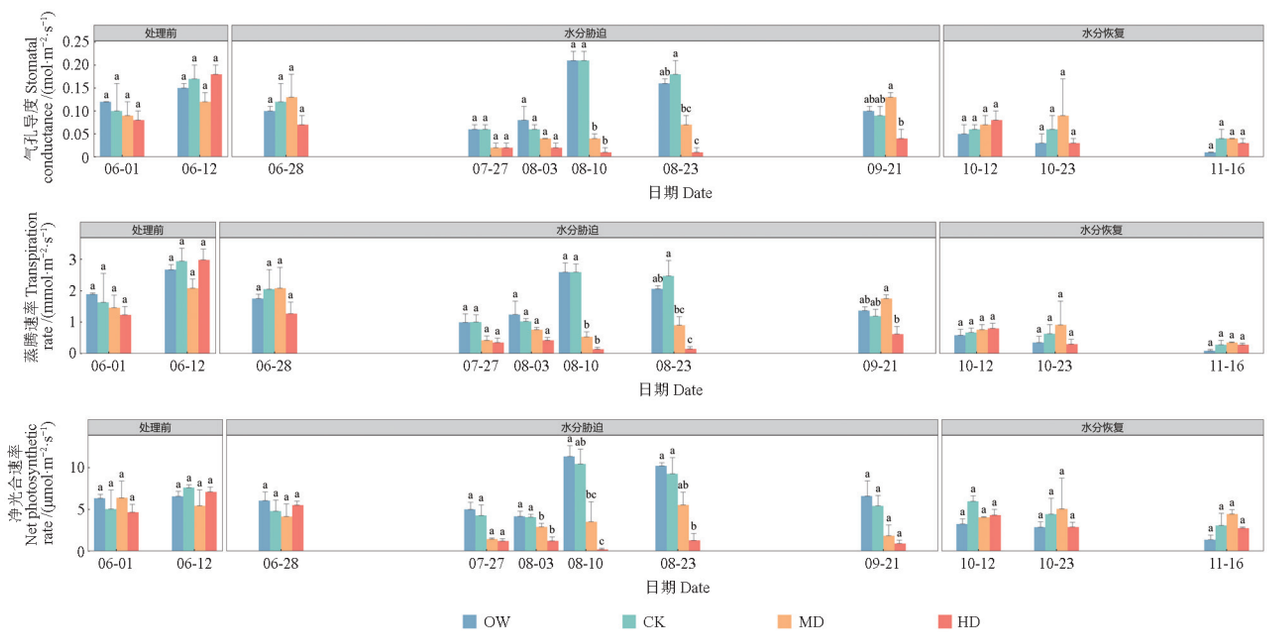


图 4　水分胁迫和恢复对叶片光合参数的影响

Fig. 4　The effects of water stress and recovery on photosynthetic parameters in leaves

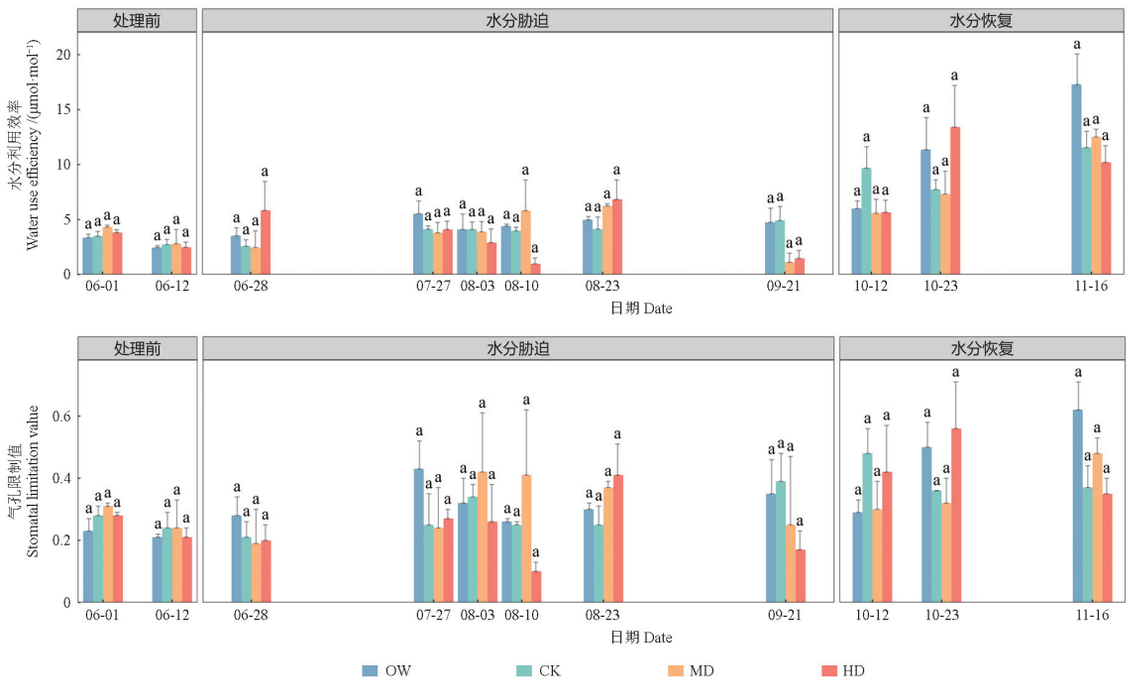


图 5　水分胁迫和恢复对水分利用效率和气孔限制值的影响

Fig. 5　The effects of water stress and recovery on water use efficiency and stomatal limitation value

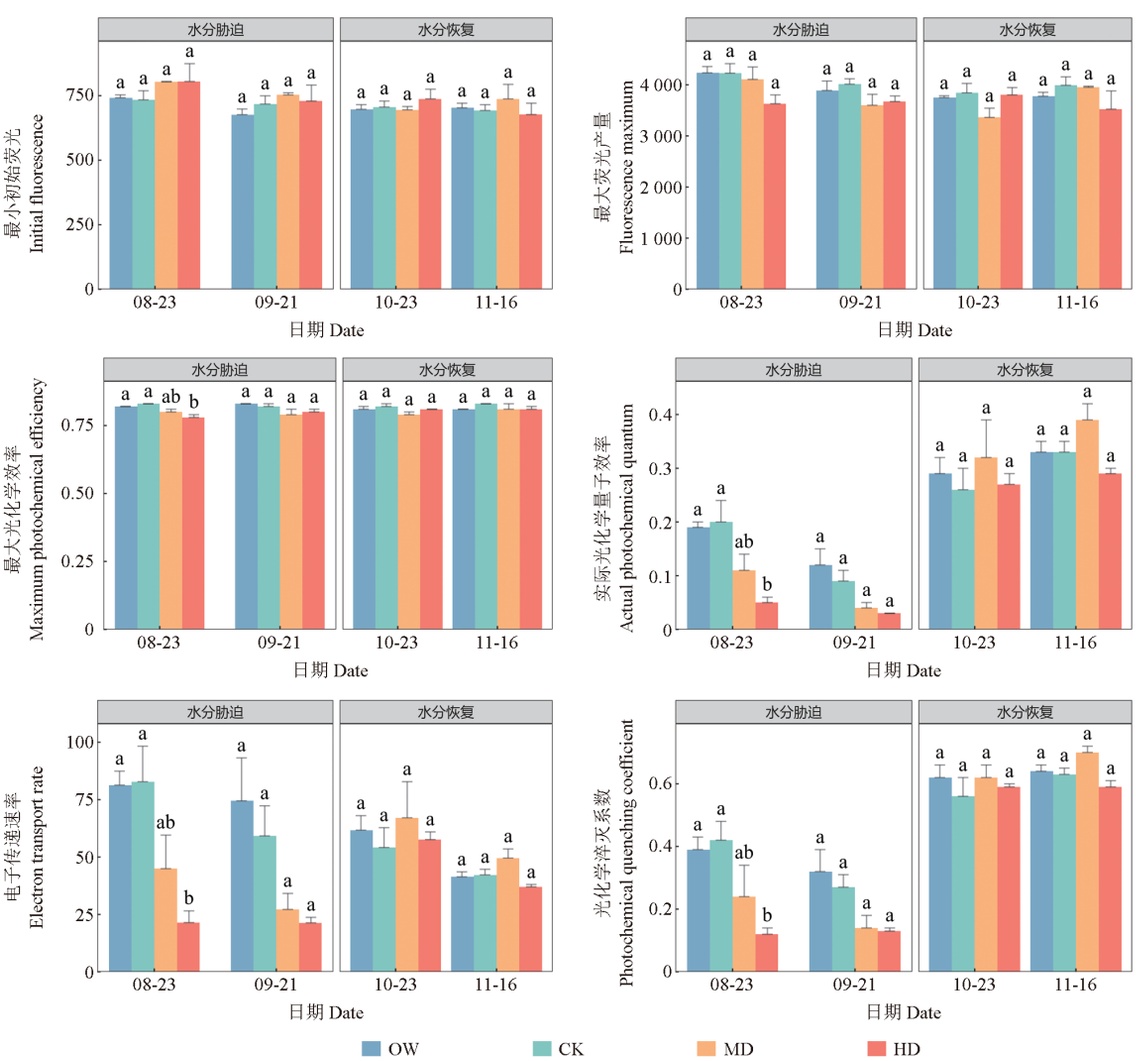


图 6　水分胁迫和恢复对叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig. 6　The effects of water stress and recovery on chlorophyll fluorescence parameters in leaves

下F_v/F_m、ETR、ΦPS Ⅱ和q_p值均为最小，且显著低于CK和OW（$P<0.05$）。在水分胁迫后期（9月21日），HD处理下白兰叶片的F_v/F_m、ΦPS Ⅱ、ETR和q_p尽管小于CK和OW，但各处理间没有显著差异（$P>0.05$）。在水分恢复后期（10月23日—11月16日），白兰叶片的F_o、F_m、F_v/F_m、ETR、ΦPS Ⅱ和q_p值在各水分处理间均不存在显著差异（$P>0.05$）。

3 讨 论

3.1 水分胁迫对白兰幼树叶片水势、光合和荧光的影响

当干旱发生时，土壤含水量下降，土壤水势随之降低，植物可通过降低叶片水势来提高吸水能力[5]。与此同时，植物可通过调控气孔导度来保持水碳平衡，进而对蒸腾作用和光合作用等关键生理活动进行调节[7,19]。这类调控机制不仅影响光合产物的合成、积累及分配，最终还会影响植物的生长进程。有研究指出，随着干旱胁迫程度的加剧，2个苹果*Malus domestica*品种（Hongro和Fuji）幼树叶片的正午水势、气孔导度、蒸腾速率和净光合速率均呈持续下降趋势[5]。本研究证实，在土壤水分处于对照（CK）水平时，植物根系可高效吸收土壤水分，维持较高的水势水平；当土壤水分处于重度干旱（HD）水平时，正午水势显著降低，该水势变化与同一气候带的林业优势树种对干旱的响应模式高度相似[2]。在水分胁迫中期，中度干旱（MD）处理下白兰叶片的蒸腾速率和气孔导度也显著低于CK，且HD处理下的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均显著低于CK，这是因为干旱改变了白兰叶片气孔特性，使其气孔导度变小，从而导致蒸腾速率显著降低，最终在重度干旱情况下显著降低了白兰叶片的净光合速率。在整个水分胁迫时期，轻度水淹（OW）处理下白兰叶片的正午水势、气孔导度、蒸腾速率、净光合速率、PS Ⅱ最大光化学效率、PS Ⅱ实际光化学效率、电子传递速率、光化学淬灭系数均与CK没有显著差异，说明本研究设置的水淹胁迫水平暂未对白兰的生长产生明显的影响，白兰对水淹胁迫具有一定的抗逆性。

水分利用效率能够直观地反映植物对环境的适应能力[20]。在水分胁迫下，植物一般会提高水分利用效率来维持正常的光合作用，此时气孔导度和蒸腾速率降低，随着胁迫程度的不断加剧，植物的生理平衡被破坏，净光合速率下降，最终导致水分利用效率降低[21]。一般认为，当气孔导度降低、气孔限制值升高引发净光合速率下降时，植物光合速率的降低主要受气孔限制的影响；而当气孔导度降低、气孔限制值降低导致净光合速率下降时，则主要受非气孔限制的影响[10]。本研究发现，在水分胁迫中期（8月10日），尽管水分利用效率和气孔限制值在各处理间均没有显著差异，但相对于CK，MD处理的水分利用效率和气孔限制值呈上升趋势，而HD的水分利用效率和气孔限制值均表现为下降趋势。这与岳桦*Betula ermanii*、马尾松*Pinus massoniana*和银杏*Ginkgo biloba*等树种对干旱胁迫响应的研究结果一致[22-24]。白兰幼树叶片受轻度干旱环境的影响，可通过自身调控使气孔导度降低、气孔限制值上升，因此可以认为白兰光合速率下降主要受气孔限制的影响。植物通过减少水分散失，维持较高净光合速率，水分利用效率随之呈上升趋势。而重度干旱下，植物本身调节能力失衡，气孔关闭，气孔限制值下降，表明白兰可能受到非气孔限制的影响，出现净光合速率、水分利用效率均下降的现象。

叶绿素荧光能够有效地表征植物的光合能力，其参数主要反映叶片对光能的吸收、传递和转化情况[25]。在环境胁迫研究中，叶绿素荧光参数常被用作光合作用的探针[26]。在干旱胁迫下，植物会通过调节叶绿素荧光来减少光能的吸收，以避免光损伤[27]。有研究表明，随着干旱胁迫程度的加剧，植物幼苗叶片的最小初始荧光呈持续上升趋势，而PS Ⅱ最大光化学效率、PS Ⅱ实际光化学效率、电子传递速率、光化学淬灭系数等光合荧光参数均呈下降趋势[28-29]。本研究中，在水分胁迫后期（8月23日），HD处理受低土壤水分含量的影响，其叶片PS Ⅱ最大光化学效率、PS Ⅱ实际光化学效率、电子传递速率、光化学淬灭系数等叶绿素荧光参数显著下降，且低于CK。这与南亚热带巨尾桉*Eucalyptus grandis*×*urophylla*和竹柳*Salix* spp.对干旱胁迫处理响应的研究结果一致[30]。PS Ⅱ最大光化学效率可以反映PS Ⅱ损伤程度[7,12]。在重度干旱胁迫下，白兰叶片PS Ⅱ最大光化学效率显著下降，说明PS Ⅱ反应中心遭受一定程度的破坏，出现严重的光抑制；PS Ⅱ实际光化学效率、电子传递速率和光化学淬灭系数下降，说明PS Ⅱ反应中心的数量和功能受到影响，同时也改变了电子传递链的效率，显著削弱了植物对光能的吸收、转化和利用能力。MD和OW对白兰光反应和暗反应的叶绿素荧光参数均无显著差异，表明在发生该程度的胁迫时，白兰叶片的PS Ⅱ反应中

心并未遭到破坏，这可能与其在长期生长环境中形成的水分胁迫抗性有关。

3.2 水分恢复对白兰幼树叶片水势、光合和荧光的影响

在水分胁迫末期（9 月 21 日），经测定叶片水势、光合和荧光参数可知，MD 和 HD 处理下白兰幼树叶片的正午水势、气孔导度、蒸腾速率、净光合速率、PS Ⅱ实际光化学效率、光化学淬灭系数和电子传递速率均与 CK 没有显著差异。推测与以下机制相关：叶片表面的气孔、角质层表面毛状体等结构具备吸收大气水分的能力，在持续降水条件下，叶片吸收的水分可被运输至表皮细胞壁、海绵状叶肉细胞以及栅栏组织中 [31]。桑清田 [32] 通过空气加湿的控制试验证实，空气加湿可降低 VPD，进而显著提升气孔导度、蒸腾速率和净光合速率。在水分胁迫后期（8 月 23 日—9 月 21 日），自然降水量大、降水频次高 [33]，大气极度潮湿，白兰叶片通过吸收大气中的水分，从而提升叶片水势。该发现与李一丁等 [34] 通过空气加湿的控制试验证实空气加湿可以显著增加植物叶片持水率的证据形成呼应。白兰幼树叶片水势回升，缓解了土壤干旱对白兰叶片光合和荧光参数的限制作用，使 MD 和 HD 处理下的气孔导度、蒸腾速率、净光合速率指标恢复，以及 HD 处理的荧光、PS Ⅱ实际光化学效率、光化学淬灭系数和电子传递速率参数指标恢复。这表明白兰叶片可从潮湿的大气中吸收水分，从而缓解土壤干旱对白兰幼树叶片的光合生理胁迫。

在土壤水分恢复后（10 月 12 日—11 月 16 日），各水分处理间的白兰幼树叶片水势、光合和荧光指标均没有显著差别，这说明虽然干旱胁迫对白兰幼树造成了一定的损伤，但在胁迫解除后均能较快恢复，表明白兰叶片光系统的光抑制作用是可逆的，具有一定的恢复力。

4 结 论

本研究探讨了近自然条件下南亚热带城市园林绿化树种——白兰幼树叶片的光合生理特性对水分胁迫及恢复的响应。研究发现，干旱胁迫使白兰幼树叶片的水势、光合和荧光受到抑制，具体而言，叶片正午水势、气孔导度、蒸腾速率、净光合速率、PS Ⅱ实际光化学效率、光化学淬灭系数和电子传递速率等指标随干旱程度的加剧而降低。持续大气自然降水可缓解土壤干旱对白兰幼树叶片的光合生理胁迫，白兰幼树叶片可从大气中吸收水分，表现为正午水势、气孔导度、蒸腾速率、净光合速率、PS Ⅱ实际光化学效率、光化学淬灭系数和电子传递速率等指标随着持续的大气自然降水恢复至对照水平。在土壤水分恢复阶段，不同水分胁迫处理后的白兰幼树光合生理特性均可维持在对照水平，表明受干旱胁迫处理的白兰幼树叶片具有一定的恢复力。过量水灌溉对白兰幼树叶片水势、光合参数和荧光参数影响均不显著，表明其对水淹环境具备一定的耐受能力。本研究结果可为全球气候变化背景下城市园林绿化植物的水分养护管理提供重要的参考依据。

参考文献：

[1] ZHANG W X, ZHOU T J, WU P L. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century[J]. Science,2024, 385:427-432.

[2] DUAN H L, LI Y Y, XU Y, et al. Contrasting drought sensitivity and post-drought resilience among three co-occurring tree species in subtropical China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,272-273:55-68.

[3] 周星健 , 唐丽 , 蒋龙 , 等 . 干旱胁迫对 9 个楸树无性系生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2025,52(1):37-44.
ZHOU X J, TANG L, JIANG L, et al. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence parameters of nine *Catalpa chinensis* clone[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2025, 52(1):37-44.

[4] 李佳赢 , 侯立伟 , 鲁绍伟 , 等 . 水分条件变化对典型园林灌木叶片水势及光合特征的影响 [J]. 东北林业大学学报 , 2024,52(1):30-37.
LI J Y, HOU L W, LU S W, et al. The impact of changes in water conditions on leaf water potential and photosynthetic characteristics of typical garden shrubs[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(1):30-37.

[5] BHUSAL N, HAN S G, YOON T M. Impact of drought stress on photosynthetic response, leaf water potential, and stem sap flow in two cultivars of bi-leader apple trees (*Malus*×*domestica* Borkh.)[J]. Scientia Horticulturae,2019,246:535-543.

[6] MIRFENDERESGI G, MATHENY A M, BOHRER G. Hydrodynamic trait coordination and cost-benefit trade-offs throughout the isohydric-anisohydric continuum in trees[J]. Ecohydrology,2019,12:e2041.

[7] ASHRAF M, HARRIS P J C. Photosynthesis under stressful environments: an overview[J]. Photosynthetica,2013,51(2): 163-190.

[8] 全小强 , 王燕茹 , 李小玉 , 等 . 氮添加和铵硝态氮配比对杉木幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 植物生态学报 ,

2024,48(8):1050-1064.
QUAN X Q, WANG Y R, LI X Y, et al. Effects of nitrogen addition level and NH_4^+-N to NO_3^--N ratio on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in *Cunninghamia lanceolata* seedling[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2024,48(8):1050-1064.

[9] WU T, TAN N D, TISSUE D T, et al. Physiological traits and response strategies of four subtropical tree species exposed to drought[J]. Environmental and Experimental Botany,2022,203: 105046.

[10] 孙娅楠 , 赵杨 , 赵渊祥 , 等 . 棕榈幼苗光合和叶绿素荧光对干旱胁迫及复水的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021, 41(9):45-52.
SUN Y N, ZHAO Y, ZHAO Y X, et al. Effects of drought and rewatering on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Trachycarpus fortunei* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(9): 45-52.

[11] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo[J]. Annual Review of Plant Biology,2008,59:89-113.

[12] ZHUANG J, WANG Y L, CHI Y G, et al. Drought stress strengthens the link between chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic traits[J]. PeerJ,2020,8:e10046.

[13] 张青青 , 周再知 , 王西洋 , 等 . 施肥对柚木光合生理和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(4): 31-38.
ZHANG Q Q, ZHOU Z Z, WANG X Y, et al. Effects of fertilization on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Tectona grandis*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(4):31-38.

[14] 王亚楠 , 董丽娜 , 丁彦芬 , 等 . 遮阴对 4 种紫堇属植物光合特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 应用生态学报 ,2020,31(3): 769-777.
WANG Y N, DONG L N, DING Y F, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of four *Corydalis* species[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(3):769-777.

[15] 刘亚丽 , 王庆成 , 杨远彪 , 等 . 水分胁迫对脂松幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 东北林业大学学报 ,2011,39(4):33-36.
LIU Y L, WANG Q C, YANG Y B, et al. Effects of water stress on growth and photosynthetic characteristics of red pine seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(4):33-36.

[16] 广州市市场监督管理局 . 园林绿化植物材料 :DB4401/T 37—2019[S].
Guangzhou Municipal Market Supervision and Administration Bureau. Landscaping plant materials: DB4401/T 37-2019[S].

[17] 于贵瑞 , 牛书丽 , 李发东 , 等 . 陆地生态系统环境控制实验的研究方法及技术体系 [J]. 应用生态学报 ,2021,32(7):2275-2289.
YU G R, NIU S L, LI F D, et al. Manipulative experiments networks on response and adaptation of terrestrial ecosystems to environmental changes: building the research methods and technology system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(7):2275-2289.

[18] DUAN H L, DE DIOS V R, WANG D F, et al. Testing the limits of plant drought stress and subsequent recovery in four provenances of a widely distributed subtropical tree species[J]. Plant, Cell & Environment,2022,45:1187-1203.

[19] 赵娜 , 吕建魁 , 李少宁 , 等 . 不同干旱处理刺槐、侧柏光合特性与内源脱落酸含量的相关关系 [J]. 生态学报 ,2024,44(5): 2100-2114.
ZHAO N, LYU J K, LI S N, et al. Relationship between photosynthetic characteristics and endogenous abscisic acid content of *Robinia pseudoacacia* and *Platyclus orientalis* under different drought treatments[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(5):2100-2114.

[20] HOU J Z, D'ANDREA W J, MACDONALD D, et al. Evidence for water use efficiency as an important factor in determining the δD values of tree leaf waxes[J]. Organic Geochemistry,2007,38: 1251-1255.

[21] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology,1982,33: 317-345.

[22] 刘晓静 , 刘佩迎 , 张谦 , 等 . 土壤干旱胁迫对银杏幼苗光合特性的影响 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版),2018, 49(3):467-472.
LIU X J, LIU P Y, ZHANG Q, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics of *Ginkgo biloba* seedlings[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),2018,49(3):467-472.

[23] 邓秀秀 , 施征 , 肖文发 , 等 . 干旱和遮荫对马尾松幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 生态学报 ,2020,40(8):2735-2742.
DENG X X, SHI Z, XIAO W F, et al. Effects of drought and shading on growth and photosynthetic characteristics of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(8): 2735-2742.

[24] 马玥 , 苏宝玲 , 韩艳刚 , 等 . 岳桦幼苗光合特性和非结构性碳水化合物积累对干旱胁迫的响应 [J]. 应用生态学报 ,2021, 32(2):513-520.
MA Y, SU B L, HAN Y G, et al. Response of photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate accumulation of *Betula ermanii* seedlings to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(2):513-520.

[25] 闫小莉 , 刘贵梅 , 李小玉 , 等 . 不同氮添加水平和铵硝态氮配比环境下木荷幼苗光合及叶绿素荧光特性 [J]. 植物生态学报 , 2025,49(4):624-637.
YAN X L, LIU G M, LI X Y, et al. Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in *Schima superba* seedlings under different level of nitrogen addition and NH_4^+-N to NO_3^--N ratio[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2025,49(4): 624-637.

[26] 陶凌剑 , 涂淑萍 , 金莉颖 , 等 . 光照强度对圆齿野鸦椿叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 经济林研究 ,2022,40(2): 225-231.
TAO L J, TU S P, JIN L Y, et al. Effects of light intensity on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of leaves of *Euscaphis konishii*[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(2):225-231.

[27] 李泽 , 谭晓风 , 卢锟 , 等 . 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学报 ,2017,37(5): 1515-1524.
LI Z, TAN X F, LU K, et al. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(5):1515-1524.

[28] 魏清江 , 冯芳芳 , 马张正 , 等 . 干旱复水对柑橘幼苗叶片光合、叶绿素荧光和根系构型的影响 [J]. 应用生态学报 ,2018,29(8): 2485-2492.
WEI Q J, FENG F F, MA Z Z, et al. Effects of drought and rewatering on leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and root architecture of citrus seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(8):2485-2492.

[29] 李瑞姣 , 陈献志 , 岳春雷 , 等 . 干旱胁迫对日本荚蒾幼苗光合生理特性的影响 [J]. 生态学报 ,2018,38(6):2041-2047.
LI R J, CHEN X Z, YUE C L, et al. Effects of drought stress on the photosynthetic characteristics of *Viburnum japonicum* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):2041-2047.

[30] 白晶晶 , 吴俊文 , 李吉跃 , 等 . 干旱胁迫对 2 种速生树种叶绿素荧光特性的影响 [J]. 华南农业大学学报 ,2015,36(1):85-90.
BAI J J, WU J W, LI J Y, et al. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters of two fast-growing tree species[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015,36(1):85-90.

[31] 潘志立 , 郭雯 , 王婷 , 等 . 叶片吸收水分的研究进展 [J]. 植物生理学报 ,2021,57(1):19-32.
PAN Z L, GUO W, WANG T, et al. Research progress on foliar water uptake[J]. Plant Physiology Journal,2021,57(1):19-32.

[32] 桑清田 . 基于控制实验研究干旱对银中杨水分利用效率的影响 [D]. 洛阳 : 河南科技大学 ,2023.
SANG Q T. The effect of drought on water use efficiency of *Populus alba*×*P. berolinensis* was studied based on control experiment[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology,2023.

[33] 广州市气象台 . 2023 年广州市气候公报 [Z].2024.
Guangzhou Meteorology. 2023 Guangzhou climate bulletin[Z]. 2024.

[34] 李一丁 , 桑清田 , 张灏 , 等 . 内蒙古半干旱地区空气和土壤加湿对幼龄樟子松生长的影响 [J]. 植物生态学报 ,2022,46(9): 1077-1085.
LI Y D, SANG Q T, ZHANG H, et al. Effects of air and soil humidification on the growth of young *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees in semi-arid area of Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2022,46(9):1077-1085.

[本文编校：谢荣秀]