北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

西双版纳8种乔木树苗叶片对雾水的吸收及生理响应

陈桢杰 杨斌 孙艳 严雪琴 吴琦娇 孟宪菁 胡跃华 宋亮

Absorption of fog water by seedling leaves of 8 tree species and their physiological responses in Xishuangbanna of southwestern China

Chen Zhenjie, Yang Bin, Sun Yan, Yan Xueqin, Wu Qijiao, Meng Xianjing, Hu Yuehua, Song Liang

引用本文:
陈桢杰, 杨斌, 孙艳, 严雪琴, 吴琦娇, 孟宪菁, 胡跃华, 宋亮. 西双版纳8种乔木树苗叶片对雾水的吸收及生理响应[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10):54–62. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250116
Chen Zhenjie, Yang Bin, Sun Yan, Yan Xueqin, Wu Qijiao, Meng Xianjing, Hu Yuehua, Song Liang. Absorption of fog water by seedling leaves of 8 tree species and their physiological responses in Xishuangbanna of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10):54–62. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250116

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250116

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

毛乌素沙地4种典型植物叶片凝结水吸收能力及其水分生理响应
Foliar condensate absorption capacity of four typical plant species and their physiological responses to water in the Mu Us Sandy Land of northwestern China
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 72–80. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200024

宁夏盐池油蒿叶片水分利用效率的生长季动态变化及对环境因子的响应
Dynamics of water use efficiency of *Artemisia ordosica* leaf in growing season in response to environmental factors in Yanchi, Ningxia of northwestern China
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 98–105. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190206

基于转录组的ABA介导的旱柳枝条失水响应
Transcriptome based ABA mediated dehydration response of *Salix matsudana* branches
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 19–27. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240103

基于氢稳定同位素技术对中国地区红脂大小蠹溯源追踪的可行性分析
Feasibility analysis on species origin traceability by hydrogen stable isotope: sample case of *Dendroctonus valens* (Coleoptera: Scolytidae)
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 93–98. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190437

北京市21种植物的叶片吸水性能与冠层雨水截留能力研究
Leaf water absorption and canopy rainfall interception of twenty–one plant species in Beijing
北京林业大学学报, 2020, 42(9): 100–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190379

珍贵阔叶树种胡桃楸幼苗光合生理特性对模拟氮沉降的响应
Response of photosynthetic physiological characteristics of rare broadleaved tree species *Juglans mandshurica* seedlings to simulated nitrogen deposition

北京林业大学学报, 2024, 46(1): 10−18. https://doi.org/10.12171/j.1000−1522.20220225

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250116

西双版纳 8 种乔木树苗叶片对雾水的吸收及生理响应

陈桢杰[1,2] 杨 斌[1] 孙 艳[1,2] 严雪琴[1,2] 吴琦娇[1,3]
孟宪菁[4] 胡跃华[1] 宋 亮[1]

（1. 云南省森林生态系统稳定性与全球变化响应重点实验室，云南 勐仑 666303；2. 中国科学院大学，北京 101408；
3. 云南大学，云南 昆明 650500；4. 赛默飞世尔科技（中国）有限公司，上海 201206）

摘要:【目的】探究西双版纳地区乔木树苗叶片对雾水的吸收及其生理响应，为热带季雨林保护和区域水资源管理提供参考。**【方法】**以热带季雨林 8 种常见乔木树苗为研究对象，通过浸泡试验评估乔木树苗的叶片吸水能力，结合氢同位素（δ^2H）标记技术和室内雾水模拟试验，通过对照组（无雾水）和试验组（有雾水）植物叶片水 δ^2H 变化揭示乔木树苗叶片的雾水吸收特征，并通过测定植物叶片气体交换特征（净光合速率、气孔导度和蒸腾速率）以及叶片水势解析受试植物对雾水的生理响应。**【结果】**（1）8 种乔木树苗的叶片单位面积吸水量在 0.32 ~ 0.91 mg/cm^2 之间，吸水能力的排序为钝叶榕 > 番龙眼 > 聚果榕 > 鹊肾树 > 翅果刺桐 > 羯布罗香 > 千果榄仁 > 望天树。（2）无雾水环境下，对照组所有树苗叶片水 δ^2H 在试验后上升 0.70‰ ~ 16.60‰；模拟施加雾水（δ^2H 范围−143.78‰ ~ −140.31‰）环境下，试验组所有树苗叶片水 δ^2H 下降 3.08‰ ~ 19.24‰。（3）试验前后，无雾水环境下，对照组树苗叶片净光合速率均相对上升，而施加雾水的试验组树苗叶片净光合速率上升幅度小于对照组；试验后，对照组树苗叶片水势普遍降低，试验组均相对升高，乔木幼苗叶片水势变化与叶片水 δ^2H 变化呈显著负相关。**【结论】**8 种乔木树苗叶片均具有吸水能力，同位素标记试验进一步验证了叶片能够直接吸收雾水。不同树种叶片吸水性及其雾水吸收能力具有协同一致性。与无雾水对照相比，施加雾水使乔木幼苗叶片的净光合速率增幅减小，但通过吸收雾水显著提高叶片水势，从而改善植株的水分生理状态。

关键词：雾水；稳定同位素；叶片吸水；净光合速率；水势

中图分类号：S791 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)10−0054−09

引文格式：陈桢杰，杨斌，孙艳，等. 西双版纳 8 种乔木树苗叶片对雾水的吸收及生理响应 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(10)：54−62. Chen Zhenjie, Yang Bin, Sun Yan, et al. Absorption of fog water by seedling leaves of 8 tree species and their physiological responses in Xishuangbanna of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 54−62.

Absorption of fog water by seedling leaves of 8 tree species and their physiological responses in Xishuangbanna of southwestern China

Chen Zhenjie[1,2] Yang Bin[1] Sun Yan[1,2] Yan Xueqin[1,2] Wu Qijiao[1,3]
Meng Xianjing[4] Hu Yuehua[1] Song Liang[1]

(1. Yunnan Key Laboratory of Forest Ecosystem Stability and Global Change, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
3. Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;
4. Thermo Fisher Scientific, Shanghai 201206, China)

Abstract: [**Objective**] We examined the seedling foliar water absorption characteristics of 8 tree species and their physiological responses to fog water in Xishuangbanna region of southwestern China, which will

收稿日期: 2025−04−03 **修回日期:** 2025−09−27

基金项目: 国家自然科学基金项目（32171557），中国科学院西双版纳热带植物园“十四五”科技创新规划（E3ZKFF2B01），中国科学院“青年创新促进会”（2021397），国家留学基金项目（20220491180）。

第一作者: 陈桢杰。主要研究方向：生态水文。Email: chenzhenjie124@163.com 地址：666303 云南省勐腊县勐仑镇中国科学院西双版纳热带植物园。

责任作者: 杨斌，副研究员。主要研究方向：稳定同位素生态学。Email: yangbin@xtbg.ac.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

provide references for the tropical rainforest conservation and regional water resource management. ［**Method**］This study focused on 8 common tree seedlings. The leaf water absorption capacities of seedlings were evaluated through an immersion experiment. Using the hydrogen isotope (δ^2H) labeling technique and indoor fog water simulation experiments, this study revealed the fog water absorption characteristics of tree seedlings by comparing the δ^2H differences in plant leaves between control group (i.e., without fog water) and the experimental group (i.e., with fog water). Meanwhile, we measured the gas exchange characteristics of seedling leaves, including net photosynthesis rate, stomatal conductance, transpiration rate, and leaf water potential to analyze the physiological responses of the test plants to fog water. ［**Result**］(1) The foliar water absorption per unit area of all tree seedlings ranged from 0.32 to 0.91 mg/cm^2. The ranking order of their water absorption capacities was as follows: *Ficus curtipes*, *Pometia pinnata*, *Ficus racemosa*, *Streblus asper*, *Erythrina subumbrans*, *Dipterocarpus turbinatus*, *Terminalia myriocarpa*, and *Parashorea chinensis*. (2) In the environment without fog water, the δ^2H of leaf water in control group for all seedlings increased by 0.7‰ to 16.60‰ after the experiment. In the simulated fog water environment (with δ^2H ranging from −143.78‰ to −140.31‰), the δ^2H of leaf water in the experimental group for all seedlings decreased by 3.08‰ to 19.24‰. (3) Before and after the experiment, the net photosynthetic rate of seedling leaves in the control group without fog water increased; in contrast, the increase was smaller in the fog-water-treated group. Conversely, the leaf water potential of seedlings in control group decreased, while the leaf water potential increased in the experimental group. The changes in leaf water potential were significantly negatively correlated with leaf water δ^2H. ［**Conclusion**］Leaves of all eight tree species show foliar water uptake, and isotope labeling further confirms that they can directly absorb fog water. Across species, leaf water absorption capacity and fog-water uptake are tightly coupled. Compared with the fog-free control, fog application reduces the increment in net photosynthetic rate of seedling leaves, yet significantly raises leaf water potential via fog-water uptake, thereby improving the plant's water status.

Key words: fog water; stable isotopes; foliar water absorption; net photosynthesis rate; water potential

雾水是悬浮于近地面空气中的水汽凝结物，直径通常介于 40 ~ 100 μm[1−2]。当地表大气水汽接近饱和并伴随空气冷却时，水汽逐渐凝结成小水滴，并携带丰富的养分进入森林生态系统[3−4]。雾水在全球森林中广泛存在，影响范围涵盖热带[5]、温带[6]和极地等[7]。作为生态系统的重要水分来源，雾水不仅显著提升森林水分涵养能力，还影响着森林的水量平衡[8]。在雾水频发地区，即使降水量有限，植被仍可通过吸收雾水来促进存活与生长[9−10]。研究表明，雾水能够降低植物的蒸腾作用，提高叶片水势，并增强光合作用等生理过程[11−12]。此外，雾滴落地后可浸润干燥土壤，间接改善植物生境[13]。

叶片吸水是指植物经叶片“逆蒸腾”直接吸收大气水分的过程[14]，是植物获取水分的重要途径[15]。受技术手段限制，早期研究主要侧重于植物叶片的水分截留和蒸发，而忽略了叶片对雾水等空气水分的直接吸收[16]。近年来，稳定同位素示踪技术为探讨雾水在生态系统中的传输路径、水分及养分循环过程提供了新的契机[17]。通过该技术，研究者已证实雾水是热带喀斯特森林乔木[3]、圣巴巴拉干旱地区落叶灌木[18]以及加利福尼亚沿海地区多年生草本[13]的重要水源。然而，存在显著干、湿两季的亚洲热带季节性雨林中，乔木是否能够通过叶片吸收雾水，以及雾水对植物生理状况的影响，仍缺乏试验性证据。

中国西南的西双版纳地区全年多雾，年均雾日超过 180 d，且主要集中在旱季，常在清晨以辐射雾的形态出现[19]。以往研究表明，西双版纳热带雨林乔木及其树苗主要通过根系来吸收落到地面的雾水[20]。然而，叶片吸水也可能是植物在旱季获取水分的重要途径之一[21]。为此，本研究以西双版纳热带雨林 8 种常见乔木树苗为研究对象，干旱处理后利用稳定同位素标记雾水开展模拟试验，定量叶片吸水并同步测定净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及叶片水势，旨在阐明乔木树苗叶片吸收雾水特征及其生理响应，为热带雨林保护与水资源管理提供依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

本研究设置在中国科学院西双版纳热带植物园（21°52′ ~ 21°57′N，101°14′ ~ 101°18′E）温室内。该地

区属于滇南热带季风气候。据中国科学院西双版纳热带植物园生态气象站(2022—2023 年)资料显示,该区域年均气温 23.4 ℃,年均降水量 1 050.3 mm。全年降水分配不均,干季(11—次年 4 月)和雨季(5—10 月)分明。其中,干季降水仅占年降水量 20%左右[20]。

1.2 试验材料

选取西双版纳热带季雨林 8 种常见乔木树苗:鹊肾树(*Streblus asper*)、番龙眼(*Pometia pinnata*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、钝叶榕(*Ficus curtipes*)、翅果刺桐(*Erythrina subumbrans*)、望天树(*Parashorea chinensis*)、羯布罗香(*Dipterocarpus turbinatus*)和聚果榕(*Ficus racemosa*)。在苗圃培育 2 年后,苗高 16 ~ 99 cm,移栽至同质混合土塑料盆(口径 24.7 cm,底径 22.5 cm,高 17.0 cm)中。每物种选 6 株,完全随机区组设计,均分至试验棚和对照棚,每棚 3 株。两棚为独立透明塑料棚(长 4 m,宽 3 m,高 2 m),试验棚和对照棚的间距 < 1 m,顶部覆盖黑色聚乙烯遮阳网,模拟成树冠层遮阴并防止强光灼伤。试验前对两个温室内的温度等环境条件进行监测,确保两个处理环境稳定且无显著差异后启动试验。为统一初始植物组织内同位素丰度值,每盆一次性浇足地下水(δ^2H 范围−43.28‰ ~ −40.00‰)100 mL,之后每 3 d 浇 100 mL,持续 12 d;随后停止供水,自然干旱 10 d,至土壤含水量降至 12% ~ 15%之间。

1.3 试验设计

1.3.1 叶片吸水能力测定

为测定叶片自身吸收水分的能力,需排除叶脉切口导水造成的干扰。每株采摘 3 片新鲜叶片,使用叶面积仪(LI-3100C,LI-COR,USA)测量叶片面积,基部切口涂抹环氧树脂胶,风干并使用封口膜包裹,确保水分仅通过叶片进入。随后依次进行:(1)电子天平称取初始质量(m_1);(2)浸入去离子水 3 h,取出后用吸水纸快速吸去表面水膜,称量得 m_2;(3)空气中稍晾(≈ 15 min)至表面完全无水迹,称量得 m_3;(4)再次将叶片快速浸入去离子水 1 s 并吸干,称量得 m_4。每种植物重复 3 次,最后得到叶片吸水量(foliar water uptake,FWU)[21]。

$$\mathrm{FWU} = (m_2 - m_1) - (m_4 - m_3) \tag{1}$$

1.3.2 模拟雾水试验

为排除根系吸水干扰,试验前先用保鲜膜 + 自封袋把花盆及茎基密封,确保雾水无法接触土壤。06:00—08:30 在试验组温室内持续施雾(水源:5100 矿泉水,δ^2H 范围−143.78‰ ~ −140.31‰;雾化器:CL-5KG5-G1,和哼,中国),两台电风扇驱动雾滴循环;对照组不施雾。每 20 min 取 1 次样,取 6 次。使用温湿度仪(RS-MH-4G-C5,仁科,中国)同步记录试验组与对照组的室内空气温度、相对湿度和光照强度,每 10 min 一次。所有温湿度仪都安装在温室的中心,高度为 1.2 m。

1.4 指标测定

1.4.1 乔木树苗叶片水同位素测定

为比较雾水处理前后叶片水分同位素组成(δ^2H),于施雾前 1 d 及施雾结束即刻分别采集试验组与对照组叶片各约 2 g,立即装入 15 mL 螺口玻璃瓶,编号后盖紧特氟龙垫片盖,置冰盒运回实验室,−20 ℃ 保存。抽提前室温解冻,擦净瓶外壁,瓶口塞入少量洁净脱脂棉,称重后置于全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100,LICA United,中国)抽提 90 ~ 120 min。低温真空抽提结束后,将装有固态水样品的小试管密封,在室温下平衡解冻,获得的液态水样品经滤膜过滤器过滤后,取约 1 mL 装入 2 mL 进样瓶,使用液态水稳定同位素红外光谱分析仪(Los Gatos Research,USA)测定。

$$\delta^2\mathrm{H} = (R_{\mathrm{sample}}/R_{\mathrm{standard}} - 1) \times 1\,000‰ \tag{2}$$

式中:R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和标准水(标准平均海水,SMOW)氢稳定同位素比值。

基于低温真空冷凝抽提技术和稳定同位素红外光谱分析仪测定植物叶片水 δ^2H,可能受到甲醇类和乙醇类有机质影响[22]。为消除干扰,为本研究中稳定同位素红外光谱分析仪建立校正曲线。

$$\delta^2\mathrm{H_e} = \delta^2\mathrm{H_m} - ((0.169\,9x^2 + 0.737\,9x + 1.030\,5) + (-6.468\,7y + 6.608\,8)) \tag{3}$$

式中:x 为甲醇实测氢同位素组成对数值,y 为乙醇实测氢同位素组成值,$\delta^2\mathrm{H_m}$ 为液体水样测量值,$\delta^2\mathrm{H_e}$ 为校正值。

1.4.2 乔木树苗气体交换特征测定

施雾前 1 日 08:30—11:00 及施雾当日同一时段,选取试验组和对照组植物中上部位成熟健康叶片(n = 3),并做标记。使用 LI-6400 便携式光合仪(Li-Cor, USA)在 700 μmol/(m^2·s)光强、400 μmol/mol CO_2 浓度下测定植物净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等生理生态指标。

1.4.3 乔木树苗叶片水势测定

施雾前 1 日 11:30—12:30 及施雾当日同一时段,剪取带叶小枝末端,湿纸巾包裹后密封于自封袋,黑色塑料袋避光、保温箱运回实验室,即刻用 PMS150SD 压力室水势仪(PMS Instrument,USA)测叶水势。每组 3 次重复。

1.5　数据分析

基于单因素方差分析(one-way ANOVA)进行同一受试对象试验前后对比，并基于 Tukey's HSD 进行多重比较。当数据不满足正态性假设和方差齐性时，则采用 Kruskal-Wallis 检验。采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验施雾处理、物种及其交互作用对叶片水 δ^2H 与生理指标变化的影响。显著性水平设定为 $P < 0.05$，$P < 0.001$ 表示极显著。图表中数据统一表示为平均值 ± 标准误差。

2　结果与分析

2.1　乔木树苗叶片吸水

叶片浸泡试验表明，8 种乔木树苗叶片单位面积吸水量为 0.32 ~ 0.91 mg/cm^2(图 1)。钝叶榕的吸水量显著高于望天树($P < 0.05$)，其余树种间两两差异均未达显著水平。

2.2　土壤水和乔木树苗叶片水的 δ^2H 变化

试验前，对照组土壤水 δ^2H 平均为(−40.49 ± 3.35)‰，变化范围为−50.28‰ ~ −33.09‰(图 2)。试验后，对照组土壤水 δ^2H 略微上升至(−39.53 ± 5.16)‰，变化范围为−47.98‰ ~ −30.26‰。试验前，试验组土壤水 δ^2H 平均为(−40.36 ± 6.72)‰，变化范围为−52.08‰ ~ −31.83‰。试验后，试验组土壤水 δ^2H 平均为(−39.96 ± 5.36)‰，变化范围为−51.52‰ ~ −31.09‰。对照组和试验组土壤水 δ^2H 在模拟雾水试验前后均无显著性差异，这表明在试验期间土壤水 δ^2H 保持了相对稳定，未受到外部雾水模拟等因素影响。

模拟雾水试验前，对照组与试验组树苗叶片水 δ^2H 值范围相近，分别为−36.98‰ ~ −22.74‰和−38.09‰ ~ −23.01‰。试验后，对照组树苗叶片水 δ^2H 因自身蒸腾作用而呈现富集升高，范围变为−28.98‰ ~ −17.42‰，相对试验前，增幅为 0.70‰ ~ 16.60‰(图 3)。其中，千果榄仁增幅最小，羯布罗香增幅最大。施雾处理下，试验组树苗叶片水 δ^2H 富集效应被吸收的雾水(δ^2H 范围−143.78‰ ~ −140.31‰)掩盖，并整体呈现下降趋势，范围降为−50.47‰ ~ −28.49‰，相对试验前降低了 3.08‰ ~ 19.24‰。其中，望天树下降幅度最小，番龙眼下降幅度最大。双因素方差分析表明，施雾处理对树苗叶片水 δ^2H 变化产生显著影响($P < 0.05$)，物种因素及其与施雾处理交互效应未对树苗叶片水 δ^2H 变化产生显著影响。

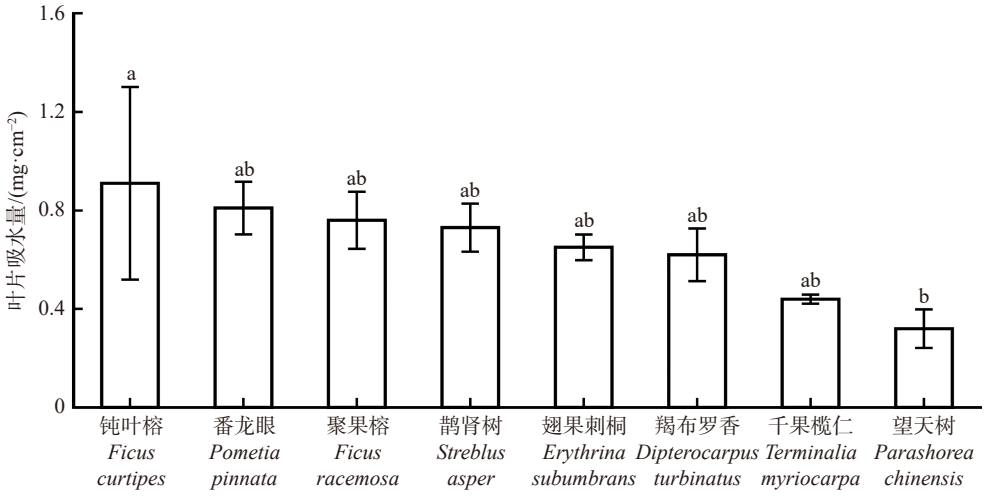
2.3　乔木树苗叶片对雾水的生理响应

2.3.1　试验环境

表 1 显示，试验前 1 日对照组和试验组温室背景一致，温度、湿度和光照均无显著差异($P > 0.05$)。试验当日，对照组温度(28.75 ± 1.43)℃ 与试验组温度(27.77 ± 1.65)℃ 两者差异显著($P < 0.05$)；与此同时，对照组平均相对湿度(82.68 ± 6.38)% 与试验组平均相对湿度(97.71 ± 5.47)% 差异显著($P < 0.05$)；而光照强度，对照组与试验组无显著差异。对照组的平均光强在试验前后差异显著，试验组的相对湿度在试验前后差异显著。

2.3.2　叶片气体交换特征变化

试验前，对照组树苗净光合速率(以 CO_2 计，下同)范围为 0.67 ~ 5.12 μmol/(m^2·s)，试验组 0.89 ~ 5.61 μmol/(m^2·s)(表 2)。对照组和试验组的气孔导度(以 H_2O 计，下同)分别为 0.01 ~ 0.06 mol/(m^2·s)和 0.01 ~ 0.09 mol/(m^2·s)。对照组和试验组的蒸腾速率分别为 0.27 ~ 1.89 mmol/(m^2·s)和 0.54 ~ 3.77



不同小写字母表示物种间差异显著($P < 0.05$)。

图 1　乔木树苗的叶片吸水量特征

Fig. 1　Characteristics of leaf water absorption of tree seedlings

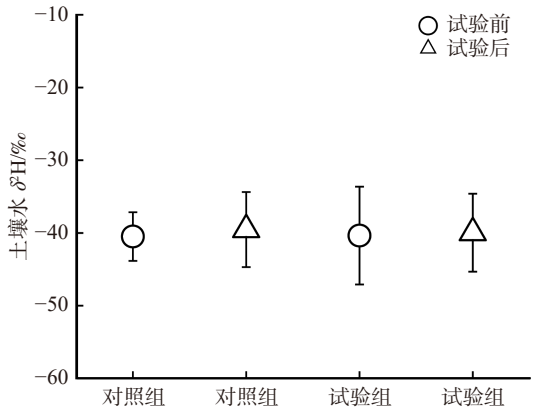
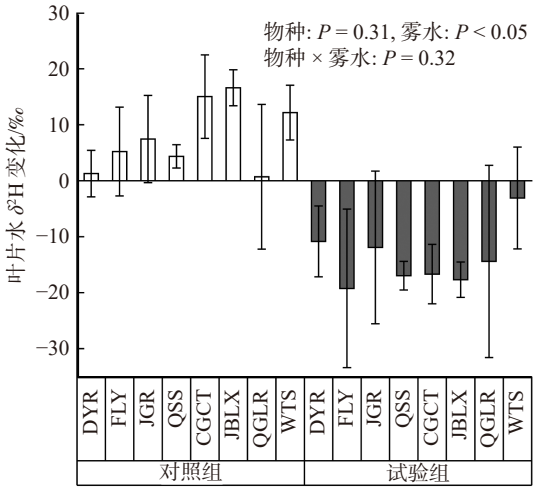


图 2 试验前后土壤水 δ^2H 变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of soil water δ^2H before and after experiment



DYR.钝叶榕; FLY.番龙眼; JGR.聚果榕; CGCT.翅果刺桐; JBLX.羯布罗香; QGLR.千果榄仁; WTS.望天树。

图 3 试验前后乔木树苗叶片水 δ^2H 变化

Fig. 3 Changes in leaf water δ^2H of tree seedlings before and after experiment

mol/(m^2·s)。试验后，对照组树苗净光合速率范围为 3.99 ~ 9.31 μmol/(m^2·s)，施雾试验组为 2.60 ~ 7.01 μmol/(m^2·s)；对照组和试验组树苗气孔导度范围为 0.01 ~ 0.07 mol/(m^2·s)和 0.01 ~ 0.11 mol/(m^2·s)；对照组和试验组蒸腾速率分别为 0.22 ~ 2.25 mmol/(m^2·s)和 0.05 ~ 1.97 mmol/(m^2·s)。

试验前后，对照组树苗净光合速率呈上升趋势。试验组树苗净光合速率除了羯布罗香外同样表现为上升趋势，但上升幅度普遍低于对照组。在气孔导度方面，对照组中番龙眼和望天树呈下降趋势，钝叶榕和羯布罗香呈上升趋势，其余物种无变化；试验组中，钝叶榕、番龙眼、聚果榕、羯布罗香呈上升趋势，其余物种无变化。对于蒸腾速率而言，对照组中钝叶榕、鹊肾树、翅果刺桐、羯布罗香表现出上升趋势，其余物种相对下降；试验组中，所有树苗均表现出下降趋势。经过双因素方差分析(表 3)，物种因素、施雾因素以及两者交互效应均对树苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率变化产生显著影响($P < 0.001$)。

2.3.3 叶片水势变化

试验前，对照组和试验组叶片水势分别为−0.96 ~ −0.27 Mpa 和−1.33 ~ −0.35 MPa(表 4)。试验后，对照组略降至−0.97 ~ −0.27 MPa，施雾试验组升至−0.69 ~ −0.12 MPa。对照组仅羯布罗香叶片水势不变，其余物种均表现为下降。而试验组所有树种均表现为上升趋势。双因素方差分析表明，施雾处理对水势变化有显著影响($P < 0.001$)，物种及其交互效应不显著。叶片 δ^2H 与水势呈显著负相关($R^2 = 0.37$, $P < 0.05$)，说明雾水处理通过补充雾水改善了植株水分状况，而持续干旱则使水势进一步下降。

3 讨 论

3.1 乔木树苗对雾水的吸收

本研究叶片吸水能力测定结果表明，8 种乔木树苗均能够通过其叶片吸收水分，并表现出一定的种间差异(图 1)。在此基础上，模拟雾水试验中试验组所有树苗叶片水 δ^2H 均表现出下降趋势，进一步表明植物叶片吸收利用了同位素 δ^2H(−143.78‰ ~ −140.31‰)较低的雾水(图 3)。对比试验前后土壤水 δ^2H 特征发现二者无显著差异，排除了植物根系吸收滴落到土壤中雾滴的可能性(图 2)。与之相对，无雾水环境的对照组树苗叶片水 δ^2H 均表现出上升趋势。这是由于植物蒸腾过程中轻同位素较重同位素更易蒸发，进而导致叶片水中的重同位素相对富集(叶片水 δ^2H 升高)，这种现象在植物调节水分平

表 1 室内环境条件

Tab. 1 Indoor environmental conditions

环境条件	对照组		试验组	
	前1日	当日	前1日	当日
平均温度/℃	27.93 ± 0.84Aa	28.75 ± 1.43Aa	28.35 ± 0.92Aa	27.77 ± 1.65Ab
平均相对湿度/%	82.88 ± 4.58Aa	82.68 ± 6.38Aa	82.08 ± 4.67Aa	97.71 ± 5.47Bb
平均光强/lx	663.69 ± 202.25Aa	822.08 ± 271.51Ba	686.31 ± 331.49Aa	913.31 ± 258.92Aa

注：不同大写字母表示组内差异显著($P < 0.05$)；不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

表 2　乔木树苗气体交换特征

Tab. 2　Gas exchange characteristics of tree seedlings

物种	生理参数	对照组		试验组	
		试验前	试验后	试验前	试验后
钝叶榕 *Ficus curtipes*	*A*	5.12 ± 1.31	9.31 ± 1.04	3.73 ± 1.42	7.01 ± 0.70
	g	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.11 ± 0.01
	E	1.89 ± 0.14	2.25 ± 0.20	2.15 ± 0.16	1.62 ± 0.16
番龙眼 *Pometia pinnata*	*A*	3.28 ± 0.46	6.38 ± 1.05	3.61 ± 1.19	4.14 ± 1.20
	g	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.01
	E	1.31 ± 0.06	0.78 ± 0.06	1.04 ± 0.10	0.72 ± 0.12
聚果榕 *Ficus racemosa*	*A*	2.56 ± 0.88	8.14 ± 1.02	2.00 ± 2.11	5.83 ± 1.83
	g	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.07 ± 0.01
	E	0.69 ± 0.14	0.64 ± 0.11	1.61 ± 0.07	0.77 ± 0.03
鹊肾树 *Streblus asper*	*A*	0.67 ± 0.18	5.76 ± 0.99	1.52 ± 0.33	2.83 ± 0.84
	g	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
	E	0.47 ± 0.02	0.79 ± 0.11	0.89 ± 0.02	0.05 ± 0.04
翅果刺桐 *Erythrina subumbrans*	*A*	1.20 ± 0.45	3.99 ± 0.56	2.29 ± 0.52	3.61 ± 0.43
	g	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
	E	0.27 ± 0.01	0.44 ± 0.01	0.54 ± 0.05	0.10 ± 0.02
羯布罗香 *Dipterocarpus turbinatus*	*A*	4.70 ± 0.80	8.85 ± 1.30	5.61 ± 1.91	5.44 ± 1.07
	g	0.05 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.10 ± 0.01
	E	1.68 ± 0.12	2.21 ± 0.18	3.77 ± 0.10	1.97 ± 0.06
千果榄仁 *Terminalia myriocarpa*	*A*	0.77 ± 0.22	4.05 ± 0.29	0.89 ± 0.37	2.60 ± 0.70
	g	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
	E	0.34 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.58 ± 0.04	0.32 ± 0.02
望天树 *Parashorea chinensis*	*A*	3.43 ± 0.45	7.51 ± 0.61	3.14 ± 0.34	3.73 ± 0.55
	g	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
	E	0.86 ± 0.05	0.81 ± 0.05	1.32 ± 0.04	0.66 ± 0.02

注: *A*为净光合速率, μmol/(m²·s); *g*为植物叶片气孔导度, mol/(m²·s); *E*为植物叶片蒸腾速率, mmol/(m²·s)。

表 3　乔木树苗气体交换特征变化双因素方差分析

Tab. 3　Two-factor ANOVA for changes in tree seedling gas exchange characteristics

指标	物种		雾水		物种 × 雾水	
	$F_{1,32}$值	*P*值	$F_{7,32}$值	*P*值	$F_{7,32}$值	*P*值
净光合速率	5.25	< 0.001	898.14	< 0.001	8.50	< 0.001
气孔导度	11.63	< 0.001	26.66	< 0.001	12.73	< 0.001
蒸腾速率	10.84	< 0.001	197.85	< 0.001	47.83	< 0.001

衡和应对环境变化时尤为明显[23]。此外, 植物叶片结构和生理特性的种间差异会进一步影响其叶片水富集程度[24–25]。以往的研究中, 主要通过植物叶片水势变化间接判断其对雾水的吸收[26]。本研究结合叶片浸泡试验和稳定同位素示踪技术, 为验证热带地区乔木树苗叶片对雾水的吸收提供了数据支持。

此外, 本研究发现植物叶片吸水能力(叶片浸泡试验)与其叶片水 δ^2H 贫化幅度(模拟雾水试验)结果相互印证。例如, 浸泡试验中望天树的叶片吸水能力最弱, 并显著低于钝叶榕(图 1)。模拟雾水试验组中的望天树叶片水 δ^2H 下降幅度最小, 表明其叶片对雾水吸收能力较差(图 3)。通过两种研究方法对比可知, 植物叶片吸水能力与其对雾水的直接吸收能力表现出较好的一致性。但钝叶榕叶片 δ^2H 贫化幅度却低于番龙眼。如上所述, 植物叶片在吸收贫化雾水的同时, 其叶片蒸腾过程中的同位素富集

表 4 试验前后树苗叶片水势

Tab. 4 Tree seeding leaf water potential before and after experiment

物种	对照组		试验组	
	试验前/MPa	试验后/MPa	试验前/MPa	试验后/MPa
钝叶榕 *Ficus curtipes*	−0.38 ± 0.10	−0.41 ± 0.02	−0.52 ± 0.11	−0.36 ± 0.05
番龙眼 *Pometia pinnata*	−0.89 ± 0.03	−0.97 ± 0.17	−0.71 ± 0.02	−0.12 ± 0.00
聚果榕 *Ficus racemosa*	−0.96 ± 0.35	−0.97 ± 0.29	−0.80 ± 0.07	−0.40 ± 0.09
鹊肾树 *Streblus asper*	−0.36 ± 0.13	−0.46 ± 0.05	−1.33 ± 0.81	−0.42 ± 0.10
翅果刺桐 *Erythrina subumbrans*	−0.29 ± 0.03	−0.31 ± 0.02	−0.52 ± 0.11	−0.25 ± 0.05
羯布罗香 *Dipterocarpus turbinatus*	−0.27 ± 0.02	−0.27 ± 0.04	−0.35 ± 0.02	−0.15 ± 0.01
千果榄仁 *Terminalia myriocarpa*	−0.82 ± 0.12	−0.95 ± 0.10	−0.85 ± 0.12	−0.69 ± 0.23
望天树 *Parashorea chinensis*	−0.51 ± 0.01	−0.64 ± 0.04	−0.53 ± 0.04	−0.21 ± 0.03

效应可能使已贫化的叶片水逐渐富集。换言之，同位素示踪技术虽然可以为植物叶片直接吸收雾水提供证据，同时也需要考虑叶片自身光合富集作用的影响。以往有些研究[27–28]通过施加 δ^2H 相对富集的水源示踪植物叶片对雾水的吸收，而植物叶片蒸腾作用和雾水吸收过程均会使其叶片水 δ^2H 富集，导致难以确切证明植物能通过叶片直接利用雾水。本研究使用 δ^2H 相对贫化的水源进行标记示踪可更精准地确定水分来源。

3.2 乔木树苗对雾水的生理响应

施雾后试验组与对照组净光合速率相较于前 1 日均显著升高，这可能是由于试验当日光照强度显著强于前 1 日(表 1)。但是，试验组所有植物净光合速率相对于对照组降低，表明雾水的存在可能遮挡了部分光照进而限制了植物光合作用。尽管大多数研究认为雾水对植物光合作用有积极作用[29]。但是，当叶片表面湿润时雾水会导致 CO_2 进入叶片受阻，在一定程度上抑制植物光合作用[30–31]，这可能是试验组净光合速率相对降低的原因。在多数情况下，气孔导度与净光合速率呈正相关关系[32]。但本研究中部分植物净光合速率显著上升，气孔导度却下降。这是因为植物作为一个复杂的有机体，各个功能性状之间是相互关联共同协作的[33–34]。Jarvis 等[35]发现气孔导度与光合速率之间存在非线性关系，当光合速率增加时，气孔导度的降低可能是由于植物试图平衡水分损失和碳固定的需要。在本试验中，雾水通过增加环境湿度降低了叶片和空气之间的蒸气压差，使得一些乔木树苗蒸腾速率相对降低，从而减少了水分流失。在温室研究中，高湿度条件下的雾水能够显著延长叶片湿润时间并降低叶片温度，从而抑制蒸腾[31]。

叶片水势是衡量植物体内水分亏缺最敏感的指标[36–37]。本研究发现施加雾水能不同程度提高植物的水势(表 4)，这与前人研究结果基本一致[21,27]。这主要是由于雾水可以通过增加植物周围环境的湿度，增强植物叶片的渗透性，从而增强水分向植物体内的传输速率[38]。此外，本试验结果表明 8 种乔木树苗叶片 δ^2H 与其叶片水势之间呈现显著的负相关关系(图 4)。进一步证明，植物可以通过吸收雾水提升叶片水势，特别是在干旱胁迫条件下。未来在分析雾水与环境对植物叶片生理活动的定量影响时，需设置不同雾水浓度梯度作进一步研究。

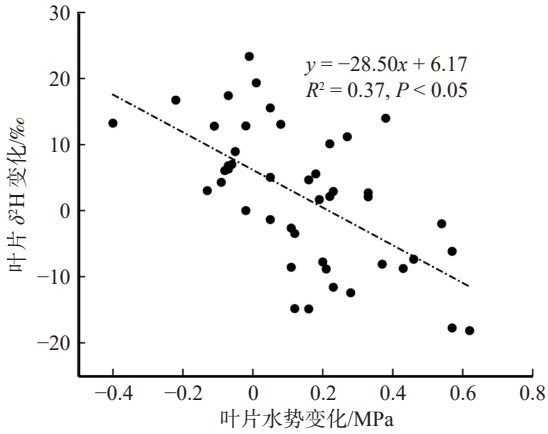


图 4 叶片 δ^2H 变化与叶片水势变化的相关性

Fig. 4 Correlations between leaf δ^2H changes and leaf water potential changes

4 结 论

西双版纳 8 种常见的乔木树苗叶片均具有吸水能力，具体表现为钝叶榕 > 番龙眼 > 聚果榕 > 鹊肾树 > 翅果刺桐 > 羯布罗香 > 千果榄仁 > 望天树。模拟雾水试验证明，所有乔木树苗叶片水 δ^2H 均受贫化的雾水影响呈现下降趋势，其叶片水 δ^2H 降幅与自身吸水能力具有高度关联性。在有雾水环境中，乔木树苗叶片净光合速率相较于对照组上升幅度更小，叶片水势却因吸收雾水而提升，说明雾水能够一

定程度缓解植物叶片的干旱胁迫。本研究为理解热带季雨林植物对雾水的利用策略提供了新的视角，同时为增强区域水资源管理和生态保护提供理论支持。未来研究需要进一步扩大物种库，结合叶片结构、角质层等指标深入探讨热带季雨林植物与雾水之间的关系。

参 考 文 献

[1] Frumau K F A, Burkard R, Schmid S, et al. A comparison of the performance of three types of passive fog gauges under conditions of wind‐driven fog and precipitation[J]. Hydrological Processes, 2010, 25(3): 374−383.

[2] Eugster W, Burkard R, Holwerda F, et al. Characteristics of fog and fog water fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 139(3−4): 288−306.

[3] Fu P L, Liu W J, Fan Z X, et al. Is fog an important water source for woody plants in an Asian tropical karst forest during the dry season?[J]. Ecohydrology, 2015, 9(6): 964−972.

[4] 李鹭辰, 桂子洋, 秦树高, 等. 毛乌素沙地 4 种典型植物叶片凝结水吸收能力及其水分生理响应 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 72−80.
Li L C, Gui Z Y, Qin S G, et al. Foliar condensate absorption capacity of four typical plant species and their physiological responses to water in the Mu Us Sandy Land of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 72−80.

[5] 于辉, 宋清海, 张一平, 等. 西双版纳热带季节雨林辐射长期变化特征 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 56−67.
Yu H, Song Q H, Zhang Y P, et al. Long-term variation characteristics of radiation in the tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(4): 56−67.

[6] Katata G, Nagai H, Kajino M, et al. Numerical study of fog deposition on vegetation for atmosphere–land interactions in semi-arid and arid regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(3): 340−353.

[7] 陈标, 吴东. 基于 CALIOP 和 MODIS 的北极地区海雾检测研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(2): 267−278
Chen B, Wu D. Arctic sea fog detection using CALIOP and MODIS[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2022, 17(2): 267−278

[8] Templer P H, Weathers K C, Ewing H A, et al. Fog as a source of nitrogen for redwood trees: evidence from fluxes and stable isotopes[J]. Journal of Ecology, 2015, 103(6): 1397−1407.

[9] 刘文杰, 张克映, 张光明, 等. 西双版纳热带雨林干季林冠雾露水资源效应研究 [J]. 资源科学, 2001, 23(2): 75−80.
Liu W J, Zhang K Y, Zhang G M, et al. Canopy interceptive effect of dew and fog resources from dry season tropical rainforest in Xishuangbanna[J]. Resource Science, 2001, 23(2): 75−80.

[10] Henschel J R, Seely M K. Ecophysiology of atmospheric moisture in the Namib Desert[J]. Atmospheric Research, 2008, 87(3−4): 362−368.

[11] Goldsmith G R, Matzke N J, Dawson T E. The incidence and implications of clouds for cloud forest plant water relations[J]. Ecology Letters, 2013, 16(3): 307−314.

[12] Alvarado-Barrientos M S, Holwerda F, Asbjornsenab H, et al. Suppression of transpiration due to cloud immersion in a seasonally dry Mexican weeping pine plantation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 186: 12−25.

[13] Corbin J D, Thomsen M A, Dawson T E, et al. Summer water use by California coastal prairie grasses: fog, drought, and community composition[J]. Oecologia, 2005, 145(4): 511−521.

[14] Stone E C. Dew as an ecological factor(I): a review of the literature[J]. Ecology, 1957, 38(3): 407−413.

[15] Simonin K A, Santiago L S, Dawson T E. Fog interception by *Sequoia sempervirens* (D. Don) crowns decouples physiology from soil water deficit[J]. Plant, Cell & Environment, 2010, 32(7): 882−892.

[16] Liang X, Su D, Yin S, et al. Leaf water absorption and desorption functions for three turfgrasses[J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(1−2): 243−248.

[17] Kaseke K F, Tian C, Wang L, et al. Fog spatial distributions over the central Namib Desert: an isotope approach[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, 18(1): 49−61.

[18] Emery N C. Foliar uptake of fog in coastal California shrub species[J]. Oecologia, 2016, 182(3): 731−742.

[19] 刘文杰, 张一平, 李红梅, 等. 西双版纳热带季节雨林内雾特征研究 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 264−270.
Liu W J, Zhang Y P, Li H M, et al. Fog characteristics in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(2): 264−270.

[20] Liu W J, Liu W Y, Li P J, et al. Dry season water uptake by two dominant canopy tree species in a tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, SW China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(3): 380−388.

[21] Limm E B, Simonin K A, Bothman A G, et al. Foliar water uptake: a common water acquisition strategy for plants of the redwood forest[J]. Oecologia, 2009, 161(3): 449−459.

[22] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, et al. Identification and correction of spectral contamination in $^{2}H/^{1}H$ and $^{18}O/^{16}O$ measured in leaf, stem, and soil water[J]. Rapid Commun Mass Spectrom, 2011, 25(21): 3360−3368.

[23] 李龙, 唐常源, 曹英杰. 亚热带地区常绿阔叶林 SPAC 系统水分的氢氧稳定同位素特征 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2875−2884.
Li L, Tang C Y, Cao Y J. Hydrogen and oxygen stable isotope characteristics of water in SPAC system of evergreen broadleaved forest in subtropical region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 2875−2884.

[24] Leaney F W, Osmond C B, Allison G B, et al. Hydrogen-isotope composition of leaf water in C_3 and C_4 plants: its relationship to the hydrogen-isotope composition of dry matter[J]. Planta, 1985, 164(2): 215−220.

[25] Flanagan L B, Comstock J P, Ehleringer J R. Comparison of modeled and observed environmental influences on the stable oxygen and hydrogen isotope composition of leaf water in *Phaseolus vulgaris* L.[J]. Plant Physiology, 1991, 96(2): 588−596.

[26] 郑玉龙, 冯玉龙. 西双版纳地区附生与非附生植物叶片对雾水的吸收 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 977−981.
Zheng Y L, Feng Y L. Fog water absorption by the leaves of epiphytes and non-epiphytes in Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 977−981.

[27] Carmichael M J, White J C, Cory S T, et al. Foliar water uptake of fog confers ecophysiological benefits to four common tree species of southeastern freshwater forested wetlands[J]. Ecohydrology, 2020, 13(7): e2240.

[28] Berry Z C, White J C, Smith W K. Foliar uptake, carbon fluxes and water status are affected by the timing of daily fog in saplings from a threatened cloud forest[J]. Tree Physiology, 2014, 34(5): 459−470.

[29] Eller C B, Lima A L, Oliveira R S. Foliar uptake of fog water and transport belowground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae)[J]. New Phytologist, 2013, 199(1): 151−162.

[30] Cynthia G S, Koohafkan M C, Michaella C, et al. Dew deposition suppresses transpiration and carbon uptake in leaves[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 305−316.

[31] Boanares D, Kozovits A R, Lemos-Filho J P, et al. Foliar water-uptake strategies are related to leaf water status and gas exchange in plants from a ferruginous rupestrian field[J]. American Journal of Botany, 2019, 106(7): 935−942.

[32] Mao J, Luo Y, Jin C, et al. Response of leaf photosynthesis–Transpiration coupling to biotic and abiotic factors in the typical desert shrub *Artemisia ordosica*[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10216.

[33] Pezeshki S R, Santos M I. Relationships among rhizosphere oxygen deficiency, root restriction, photosynthesis, and growth in baldcypress (*Taxodium distichum* L.) seedlings[J]. Photosynthetica, 1998, 35(3): 381−390.

[34] Elcan J M, Pezeshki S R. Effects of flooding on susceptibility of *Taxodium distichum* L. seedlings to drought[J]. Photosynthetica, 2002, 40(2): 177−182.

[35] Jarvis A J, Davies W J. The coupled response of stomatal conductance to photosynthesis and transpiration[J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49: 399−406.

[36] 杨睿智, 马景永, 梁椿烜, 等. 基于液流和叶片水势测定的沙柳水分利用特征分析 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 87−94.
Yang R Z, Ma J Y, Liang C H, et al. Analyses on water use characteristics of *Salix psammophila* based on sap flow and leaf water potential[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 87−94.

[37] 冉苒, 张祥雪, 伍敏, 等. 华北高唐地区 4 种常见树木叶片水力学和等水特性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 24−35.
Ran R, Zhang X X, Wu M, et al. Analysis of hydraulic and isohydraulic characteristics of leaves of four common trees in Gaotang area of North China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 24−35.

[38] Zhao Q, Shi Y, Wang Y, et al. Temperature and humidity regulate sporulation of *Corynespora cassiicola* that is associated with pathogenicity in cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Biology, 2022, 11(11): 1675.

（责任编辑 孟 瑶 李 契
责任编委 臧润国）