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

干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响

王彪 陈立欣 吴应明 胡旭 付照琦 高雅洁 葛艳灵 田沁瑞 林峰

Impact of environmental and physiological factors during drought stress on sap flow in *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province of northern China

Wang Biao, Chen Lixin, Wu Yingming, Hu Xu, Fu Zhaoqi, Gao Yajie, Ge Yanling, Tian Qinrui, Lin Feng

引用本文:
王彪, 陈立欣, 吴应明, 胡旭, 付照琦, 高雅洁, 葛艳灵, 田沁瑞, 林峰. 干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(4):127–140. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230209
Wang Biao, Chen Lixin, Wu Yingming, Hu Xu, Fu Zhaoqi, Gao Yajie, Ge Yanling, Tian Qinrui, Lin Feng. Impact of environmental and physiological factors during drought stress on sap flow in *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4):127–140. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230209

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230209

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析

Soil infiltration characteristics and influencing factors of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 77–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200122

晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应

Response of soil nutrients and their stoichiometric ratios to stand density in *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81–93. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190287

水蚀风蚀交错区河北杨树干液流密度特征及其对环境因子的响应

Dynamics of sap flow density of *Populus hopeiensis* and its responses to environmental variables in the water–wind erosion crisscross region on the Loess Plateau

北京林业大学学报, 2018, 40(5): 73–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180003

黄土区刺槐和油松人工林土壤微生物PLFA分析

PLFA analysis of soil microorganism under *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantation in loess area

北京林业大学学报, 2019, 41(4): 88–98. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180287

人工林刺槐木材物理力学性质研究

Physical and mechanical properties of *Robinia pseudoacacia* wood in artificial forests

北京林业大学学报, 2018, 40(7): 104–112. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180030

太行山南麓刺槐人工林土壤呼吸与土壤温度间的滞后关系

Time lag between soil respiration and soil temperature in a *Robinia pseudoacacia* plantation in the south of the Taihang Mountains

北京林业大学学报, 2019, 41(4): 78–87. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180398

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230209

干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响

王 彪　陈立欣　吴应明　胡 旭　付照琦　高雅洁
葛艳灵　田沁瑞　林 峰
（北京林业大学水土保持学院，山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

摘要:【目的】探究干旱胁迫对晋西黄土区刺槐人工林蒸腾耗水的影响，揭示干旱胁迫下环境和生理对刺槐蒸腾耗水的调控机制，为晋西黄土区刺槐人工林的经营和水分管理提供理论依据。**【方法】**以晋西黄土区刺槐人工林为研究对象，通过降雨拦截试验（整个生长季减雨 50%），连续监测刺槐的树干液流变化，并同步监测环境因子和水分生理变化，分析环境和水分生理对树干液流的影响。**【结果】**(1)干旱处理显著降低了刺槐的液流速率(J_s)，干旱处理下平均 J_s (0.92 g/(cm^2·h))显著低于对照处理下的平均 J_s (1.87 g/(cm^2·h))，但其变化规律相似。(2)干旱处理影响了刺槐的枝、叶相对含水量，且随着干旱处理时间的延长，枝、叶相对含水量降低。不同处理条件下，刺槐枝、叶水势和水容均呈“V”字型变化，干旱处理下的枝、叶片水势(−1.22 MPa、−0.72 MPa)低于对照处理(−1.15 MPa、−0.60 MPa)。干旱处理下枝、叶水容降低，分别为 0.52 g/(cm^3·MPa)和 1.05 × 10^{-2} g/(cm^2·MPa)。(3)刺槐树干液流的变化受气象因子、土壤水分条件和水分生理因子的共同影响，不同处理条件下蒸散的主控因子均为太阳总辐射，干旱处理下枝、叶水容对刺槐树干液流速率的影响减弱，表明相较于干旱处理，对照条件下刺槐更依赖于组织水容储水来满足蒸腾耗水。**【结论】**研究揭示了干旱胁迫显著降低了刺槐液流速率，但未改变其液流活动规律。刺槐人工林树干液流变化受多种因子的共同影响，主导因子依次为气象因子、土壤水分和水分生理因子。研究结果有助于深入理解干旱条件下人工林的蒸腾耗水过程的变化特征，对评估气候变化条件下黄土区人工林生态系统的稳定性和生态水文过程具有重要意义。

关键词：树干液流；水分生理；干旱处理；结构方程模型；刺槐人工林
中图分类号：S792.26；S715　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)04−0127−14
引文格式：王彪，陈立欣，吴应明，等. 干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(4)：127−140. Wang Biao, Chen Lixin, Wu Yingming, et al. Impact of environmental and physiological factors during drought stress on sap flow in *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province of northern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 127−140.

Impact of environmental and physiological factors during drought stress on sap flow in *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province of northern China

Wang Biao　Chen Lixin　Wu Yingming　Hu Xu　Fu Zhaoqi　Gao Yajie
Ge Yanling　Tian Qinrui　Lin Feng
(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aims to investigate the impact of drought stress on the transpiration process of *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province, northern China. Additionally, it aims to explore the environmental and physiological mechanisms that regulate transpiration

收稿日期: 2023−08−22　**修回日期:** 2023−10−24
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1302501）。
第一作者: 王彪。主要研究方向：森林水文。Email: 1797049423@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号。
责任作者: 陈立欣，博士，副教授。主要研究方向：森林水文。Email: myclover17@126.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

in *R. pseudoacacia* under drought stress conditions. The findings of this study aim to establish a theoretical basis for the management and water regulation of *R. pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province. [**Method**] The research focused on *R. pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province. Continuous monitoring of sap flow changes in *R. pseudoacacia* was to conduct alongside a rainfall interception experiment (the 50% precipitation reduction during the entire growing season). Simultaneously, environmental factors and hydraulic physiological changes were monitored to analyze their collective influence on sap flow. [**Result**] (1) Drought treatment significantly reduced the sap flow rate (J_s) of *R. pseudoacacia*, with an average of 0.92 g/(cm^2·h) under drought treatment, markedly lower than the control treatment's J_s of 1.87 g/(cm^2·h). However, the trend of variation exhibited similarity. (2) Drought treatment had an impact on the relative water content of *R. pseudoacacia* branches and leaves. Over time, the relative water content decreased with extended drought treatment periods. In varying treatment conditions, both water potential and hydraulic capacitance of *R. pseudoacacia* branches and leaves exhibited a "V" shaped pattern. Under drought treatment, the water potential of branches and leaves (−1.22 MPa, −0.72 MPa) was lower compared with the control treatment (−1.15 MPa, −0.60 MPa). Moreover, under drought treatment, there was a decrease in the hydraulic capacitance of branches (0.52 g/(cm^3·MPa)) and leaves (1.05×10^{-2} g/(cm^2·MPa)). (3) Changes in *R. pseudoacacia*'s sap flow were influenced by meteorological factors, soil moisture, and hydraulic physiological factors. The primary controlling factors under different treatments were solar radiation. Under drought treatment, the influence of branch and leaf hydraulic capacitance weakened, indicating that *R. pseudoacacia* under control conditions relied more on tissue hydraulic capacitance to meet transpiration compared with drought treatment. [**Conclusion**] Drought treatment significantly reduces the sap flow rate of *R. pseudoacacia*, but the trend of variation exhibites similarity. Changes in *R. pseudoacacia*'s sap flow are influenced by meteorological factors, the primary controlling factors are meteorological factors, soil moisture, and hydraulic physiological factors. These findings contribute to a deeper understanding of transpiration alterations in plantations under drought conditions. Additionally, they hold significant importance in evaluating the stability of plantation ecosystems and eco-hydrological processes in the loess region amidst climate change.

Key words: trunk sap flow; hydraulic physiology; drought treatment; structural equation model; *Robinia pseudoacacia* plantation

随着全球气候变化的加剧，降水格局变化、极端气象事件频发等将加剧区域尺度的干旱程度[1−2]。1961—2012 年，黄土高原受全球升温的影响，不同等级的干旱程度呈递增的趋势[3]，师玉锋等[4]研究预计，21 世纪末，黄土区大部分地区干旱程度将会增加 1 ~ 2 个等级，这将增加植物的死亡风险，影响生态系统的稳定性[5]。因此，加强干旱胁迫对植物生理活动影响的研究，了解干旱条件下植物的水分生理，对黄土区生态修复工程的可持续开展和评估当地生态系统的稳定性具有重要意义。

蒸腾是土壤–植物–大气连续体（soil-plant-atmosphere-continuum，SPAC）中植物对水资源充分利用的关键环节[6]。在植物生长过程中，99.8% 以上的植物蒸腾耗水来自于树干液流，液流速率可以准确地描述植物蒸腾耗水过程[7]。已有学者针对干旱条件下环境因子对树干液流的影响做了一系列研究，如王一心等[8]研究发现内蒙古白刺（*Nitraria tangutourum*）在土壤水分长期匮缺的条件下，环境因子对液流速率影响程度依次为光合有效辐射 > 气温 > 饱和水汽压差（vapor pressure deficit，VPD）> 风速 > 相对湿度，土壤 30 ~ 150 cm 深度含水率对白刺液流速率均呈显著的正相关关系。张星宇等[9]研究表明，江苏杨树（*Populus deltoides*）在模拟干旱环境下，土壤含水量是影响液流速率变化的主导因子，其次是气象因子中的饱和水汽压差。Guillen 等[10]对美国西弗吉尼亚州黑栎（*Quercus velutina*）研究发现，干旱条件下饱和水汽压差是树干液流最重要的控制因子，其次是辐射、降水与 VPD 的交互作用、土壤水分与 VPD 的交互作用。明确人工林蒸腾耗水在干旱胁迫下对环境因子的响应机制对于评估气候变化背景下人工林稳定性具有重要意义。

植物树干液流不仅受环境因子的影响，也与植

物水分生理因子密切相关。植物的相对含水量是指组织中的水分量与其最大水持有能力的比率。植物细胞相对含水量下降会降低细胞液压，降低根部吸水和水分运输的能力，导致树干液流降低。细胞内的相对含水量过低会导致细胞脱水和生理功能紊乱[11−12]。相对含水量下降会降低植物细胞内的液压，从而减少了根部吸水和水分运输的能力，导致树干液流降低。因此，相对含水量的维持对于植物的液流调控至关重要。植物水势是植物的重要水分生理参数之一，也是植物缺水最敏感的指标之一[13]。水势差是植物根部吸水和液流运输的驱动力之一。当植物受到干旱或高温等环境压力时，水势降低，导致水分从根部向上运输的速率减慢，植物通过维持适宜的水势差来调控液流，以保持正常的水分供应和代谢活动[14]。张庆印[15]研究表明：在土壤水分降低时，刺槐与土壤间的水势差变大，植物为减弱蒸腾作用，会通过降低叶片水势来降低蒸腾速率以应对干旱胁迫。也有研究发现：干旱条件下，植物体内各器官的水势日变化幅度不同，表现为叶 > 茎 > 根，呈单峰“V”型的日变化[16−17]。水容是植物组织储存释放水分缓冲植物水势剧烈变化的能力[18]，在植物水分传输过程中，水容调节是植物适应环境的一种安全机制[19]，可以使植物木质部和叶片的水分不会在干旱胁迫中立刻损失，调节植物自身的水分吸收和蒸腾，维持相对稳定的生理状态[20−21]。李广德等[22]研究银杏（*Ginkgo biloba*）枝叶水容对树干液流的调节和影响，发现银杏枝条和叶片水容存在“V”型日变化，且与树干液流速率呈负相关关系，可以和水势共同作用调节植物蒸腾耗水。不同水分生理因子对蒸腾耗水存在潜在影响，但目前研究较少关注水分生理特征对植物液流的作用机制。因此，应进一步在树木蒸腾耗水的影响机制的解释框架中引入水分生理特征。

结构方程模型是一种整合了因素分析与路径分析的多变量统计方法，可同时发掘研究系统中多个因子之间潜在的、相互影响的关系，获得自变量对因变量影响的直接效果、间接效果和总效果，并能对整体模型进行拟合和判断，可更全面地了解研究系统[23−24]。目前，结构方程模型在液流研究中已有广泛应用。Chen 等[25]对荒漠沙柳（*Salix cheilophila*）的水文研究中通过构建结构方程模型，研究树干液流与环境因子的关系，明确了环境因子的潜在影响机制。赵文芹等[26]在不同灌溉条件下杨树蒸腾研究中，对蒸腾量与环境因子进行通径分析，分析不同因子对杨树蒸腾量的影响。Chen 等[27]利用结构方程研究油松树干液流的生物物理控制，确定量化各因素对夜间树干液流的直接和间接的影响。因此，在对植物液流与环境因子及生理因子间的分析中，利用结构方程模型可以获得各因子间潜在的影响关系，明晰各因子对植物液流的影响路径。

在黄土高原，刺槐的栽种面积占人工林造林面积的 90% 以上[28]，刺槐人工林在黄土区的水源涵养、水土保持和生态服务等方面发挥着重要作用。近年来对黄土高原半干旱区刺槐林的研究多集中于分析刺槐蒸腾耗水规律及对环境因子的响应机制。植物的水分生理特性及其对干旱环境的适应能力是植物在干旱胁迫下能够正常生长的内部因素[29]，只有将植物树干液流和水分生理的相关指标结合起来，才能全面了解树木蒸腾耗水对干旱胁迫的响应规律。因此，本研究以晋西黄土区典型造林树种刺槐为研究对象，探讨黄土高原刺槐人工林在干旱胁迫下的蒸腾耗水规律和水分生理变化，揭示干旱胁迫下刺槐蒸腾耗水的变化规律和水分生理因子的调控机制，为黄土高原刺槐人工林经营与水分管理提供新的思路。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县境内，黄河中游三级支流蔡家川流域（110°39′45″ ~ 110°47′45″E、36°14′27″ ~ 36°18′23″N），是典型的晋西黄土梁状丘陵沟壑区，属于暖温带大陆性季风气候。年平均气温 10.2 ℃，极端最高温为 38.1 ℃，极端最低温 –20.4 ℃。年平均降水量为 580 mm，主要集中在 7—9 月份，约占全年降水量的 60%，年均潜在蒸散量 1 724 mm，无霜期 170 d 左右。区域内森林覆盖率大于 80%，以辽东栎（*Quercus liaotungensis*）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、油松（*Pinus tabuliformis*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）为主，其中天然次生林约占总流域的 45%，灌木主要为荆条（*Vitex negundo*）、黄刺玫（*Rosa xanthina*）、胡枝子（*Lespedeza bicolor*）、连翘（*Forsythia suspensa*）、杠柳（*Periploca sepium*）等，草本植物主要有狗尾草（*Setaria viridis*）、艾蒿（*Artemisia argyi*）、冰草（*Agropyron cristatum*）等，农地经济树种主要为苹果（*Malus pumila*）等。

1.2　样地设置及样木选取

本研究选取刺槐人工林为研究对象，于 2022 年 5 月开始布设对比试验样地。研究设置一个 20 m × 20 m 自然降水对照样地，一个 20 m × 20 m 的减雨干旱样地，减雨样地约排除林内降雨 50%。在干旱减雨样地，离地面 1 ~ 2 m 处搭建减雨棚支架，顺样地坡度铺设透光挡雨膜，挡雨膜长度超出样地边缘，以保证拦截的降雨顺坡完全排出样地。同时在样地

四周挖 80 cm 深的沟壕，立塑料膜，并高于地表 10 cm，回填土壤，防止土壤水分横向交换。6 月完成样地布设并启动监测，同时对样地的林分进行每木检尺，测量胸径和树高(图 1)。

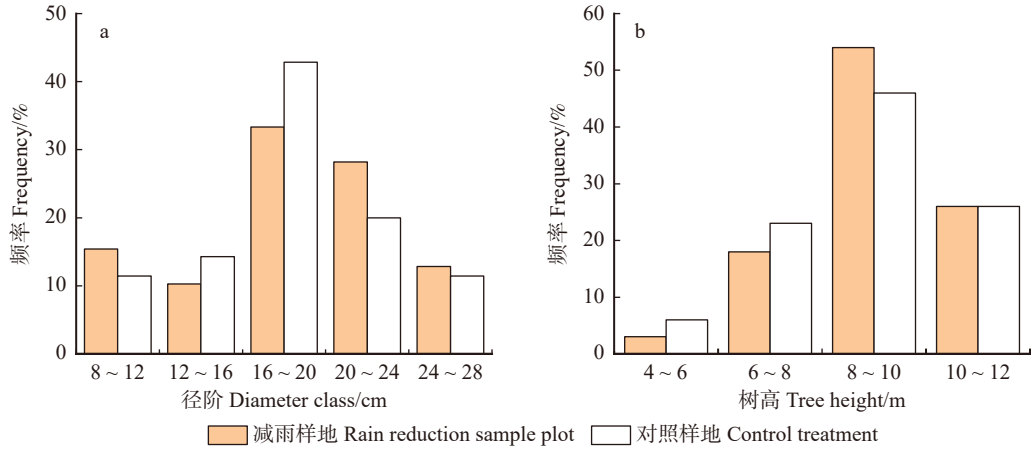


图 1 径阶、树高分布频率

Fig. 1 Distribution frequency of diameter class and tree height

为尽可能减小树木形态和生长差异，根据样地内树木径阶分布，在各处理样地内分别挑选径阶一致，与周围树木间距、生长状况相似，成熟健康的树木为观测样木。本研究中，在不同处理样地内分别挑选 4 株观测样木(表 1)。

表 1 试验样木基本信息

Tab. 1 Basic information of experimental sample trees

样木编号 Sample tree No.	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	边材面积 Sapwood area/cm^2
DT1	12.9	8.6	41.9
DT2	15.9	9.5	62.9
DT3	18.8	10.3	87.1
DT4	23.2	11.6	131.0
CK1	13.7	8.1	47.1
CK2	16.4	9.5	66.8
CK3	19.2	10.5	90.7
CK4	22.0	11.7	118.1

注：DT. 干旱处理；CK. 对照处理。Notes: DT, drought treatment; CK, control treatment.

1.3 环境因子

气象指标的观测、采集主要在距离样地 1 km 的吉县水土保持监测站点气象站(AWS，Campbell，Logan，USA)。本研究所选择的气象因子主要包括：太阳总辐射(solar radiation，R_s，W/m^2)(CMP-3 总辐射传感器，Campbell，USA)，空气温度(air temperature，T，℃)(HMP155A 空气温湿度传感器，Campbell，USA)，相对湿度(relative humidity，H，%)(HMP155A 空气温湿度传感器，Campbell，USA)，风速(wind speed，W_s，m/s)(010C-1 风速传感器，Campbell，USA)和降水量(precipitation，PP，mm)(TE525MM 翻斗式雨量桶，Campbell，USA)。本研究还选择了饱和水汽压差(VPD，kPa)这一指标，以综合反映大气中水汽亏缺状况。其公式[30]为

$$\mathrm{VPD} = 0.611 \times \mathrm{e}^{[17.502T/(T+240.97)]} \times (1-H) \quad (1)$$

式中：VPD 为饱和水汽压差(kPa)，T 为空气温度(℃)，H 为相对湿度(%)。

林地土壤水分的测定为一个月 5 次。人工使用土钻采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 90、90 ~ 120、120 ~ 160、160 ~ 200 cm 土层土样，装入铝盒中带回实验室烘干处理。将装有新鲜土壤的铝盒擦净，放置在电子天平上称质量(m_1，g)，精度为 0.01 g。揭开盒盖，放在盒底下，置于已预热至 105 ℃ 的烘箱中烘烤 24 h。之后取出，立即称质量(m_2，g)。土样倒掉，将铝盒称质量(m_0，g)。土壤含水量(soil water content，SWC，%)的计算公式如下。

$$\mathrm{SWC} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

采用线性插值法得到土壤水分日变化特征[31]。

1.4 树干液流监测及计算

根据对样地树干边材厚度的前期调查，研究使用热扩散茎流计(TDP，雨根，中国)监测树干液流速率。安装探针前，利用生长锥对样地内树木进行树芯取样，得到边材厚度与胸径的数量关系，并基于此确定样木边材厚度。此外，鉴于树干外层液流活动较为活跃，能够较为准确地反映树木蒸腾活动对环境因子的响应，本研究最终确定选用长 10 mm、直径 2 mm 的液流探针。在树干胸径处剔除 5 cm × 5 cm 树干表面树皮，沿边材深度方向上下间隔 3 cm 分别钻孔，安装探针，上部为加热探针，下部为参考探针。将液流探针插入使探针与树干木质部紧密接触，并用厚铝箔纸覆盖包裹用于保护探针，减小太阳

辐射及环境温度引起的温度波动。探针连接 CR1000 数据采集器（CR1000，Campbell Scientific，USA），采用供电装置给探针和数据采集器供电以维持设备的正常运行。每 15 min 计算一次平均值并自动存入数据采集器，根据观测数据，利用 Granier 经验公式计算树干液流速率，计算公式[32]为

$$J_s = 0.011\,9 \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231} \times 3\,600 \tag{3}$$

式中：J_s 为树干液流速率 g/(cm²·h)，ΔT_m 为 24 h 内最大探针温差值，ΔT 为两探针间的瞬时温差值。

在两个样地随机选择除用于监测树干液流的样木外的 20 株刺槐，用生长锥在每株刺槐树干胸径高度处钻取树芯。刺槐边材与心材区别明显，因此通过生长锥钻取的木芯上可以直接判断边材与心材分界线，并用游标卡尺量取边材厚度、树皮厚度与胸径，计算该树的边材面积。边材面积的计算公式[33]为

$$A_s = \pi\left[\left(\frac{D}{2} - r_1\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - r_1 - r_2\right)^2\right] \tag{4}$$

式中：A_s 为边材面积(cm²)，D 为胸径(cm)，r_1 为树皮厚度(cm)，r_2 为边材厚度(cm)。

根据全部调查的样树胸径与边材面积，拟合 A_s 与 D 的关系方程。

$$A_s = 0.29D^{1.94}\ (R^2 = 0.91,\ P < 0.01) \tag{5}$$

根据拟合关系，将安装探针的样木胸径值带入拟合公式，算出样木的边材面积。

1.5　水分生理因子测定

每月中旬随机选取不同样地植株各 4 株，从早上 9 点至次日 9 点，每隔 2 h 分别采集生长良好的叶片、枝条，采集 3 个重复样，用游标卡尺测定枝条的长度及直径，用于计算枝条体积(V)，叶片面积(S)用叶面积仪测量软件 LeafByte 测定，同时用露点水势测量仪（PSYPRO，WESCOR，USA）进行初始叶片水势(Ψ_L)、枝条水势(Ψ_B)测量。后将采集样品装入干燥称质量后的自封袋中，用精度为 0.001 g 电子天平测得器官鲜质量(m_{FW})。然后放入遮光条件下冷藏处理的蒸馏水中，浸泡 1 d，使植物样品充分吸水，然后用干燥吸水纸迅速吸去样品表面水分，称取质量，即得到样品饱和质量(m_{SW})，同时进行样品饱和水势测量。将样品器官放入烘箱中，105 ℃ 杀青 30 min，65 ℃ 烘干至质量恒定，得到干质量(m_{DW})。

相对含水量(w)计算公式为

$$w = \frac{m_{FW} - m_{DW}}{m_{SW} - m_{DW}} \times 100\% \tag{6}$$

枝条水容(C_B，g/(cm³·MPa))计算公式[34]为

$$C_B = \frac{\mathrm{d}w_B}{\mathrm{d}\Psi \times V} \tag{7}$$

叶水容(C_L，g/(cm²·MPa))计算公式为

$$C_L = \frac{\mathrm{d}w_L}{\mathrm{d}\Psi \times S} \tag{8}$$

式中：w_B、w_L 分别为枝条、叶片相对含水量。V 为枝条的体积(cm³)，S 为叶片面积(cm²)。

1.6　统计分析

使用 Excel 2016 整理和计算数据，使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析，数据符合正态分布和方差齐次，使用 Origin 2018 绘图。用独立样本 t 检验分析干旱处理和对照组土壤含水量平均值的差异和植物 J_s 平均值的差异显著性。用单因素方差分析（one-way analysis of variance，ANOVA）判断生长季内各月份植物平均 J_s 的差异。使用 Amos 22.0 软件构建结构方程模型，以确定和量化环境因子、水分生理因子对树干液流的直接和间接影响。通过 R 语言（Version 4.2）对影响 J_s 的因子进行主成分分析。

2　结果与分析

2.1　试验期间样地环境因子的变化特征

2022 年观测期各气象因子存在明显变化（图 2，表 2）。7 月至 9 月 R_s 及 VPD 整体呈下降趋势。7 月 R_s 和 VPD 均值最大，分别为 679.87 W/m² 和 1.96 kPa，R_s 均值最小值在 8 月（57.35 W/m²），VPD 最小值在 9 月（0.05 kPa）。7 月平均风速最大（1.41 m/s），各月份风速差异不显著（$P > 0.05$）。

观测期林地总降水量为 222.9 mm，共发生 35 次降雨事件，多集中于 7 月，7 月共降雨 122.8 mm，占比 55.12%，8、9 月降雨量（占比）依次为 90.2 mm（40.48%）、9.8 mm（4.40%）（表 2）。试验样地各土层平均土壤含水量统计结果表明（表 3），干旱处理显著降低了 0 ~ 60 cm 土壤含水量（$P < 0.05$）。其中，0 ~ 10 cm 土层深度土壤含水量差值最大，分别为 8.20%（干旱处理）和 14.59%（对照处理）。整个观测期间，干旱处理和对照处理 60 cm 以下的土壤深度平均土壤含水量无显著差异（$P > 0.05$）。

2.2　干旱处理下刺槐液流动态变化

整个观测期不同处理条件下，刺槐 J_s 动态变化（图 3）表明干旱处理显著降低了刺槐 J_s，但两种条件下的液流变化规律相似。在干旱处理初期，7 月干旱处理并未使刺槐 J_s 显著降低。随着干旱处理时间的延长，8、9 月干旱处理条件下刺槐 J_s 显著低于对照处理（$P < 0.05$）。同时随着生长季的推移，月均 J_s 下降，即 7 月 > 8 月 > 9 月。不同处理下 J_s 日变化趋势一致，总体呈现先增后减的单峰型曲线变化趋势。树干液流启动时间在 06:00 左右，于 12:00 左右达到峰值。干旱处理下日均 J_s（0.92 g/(cm²·h)）显著低于

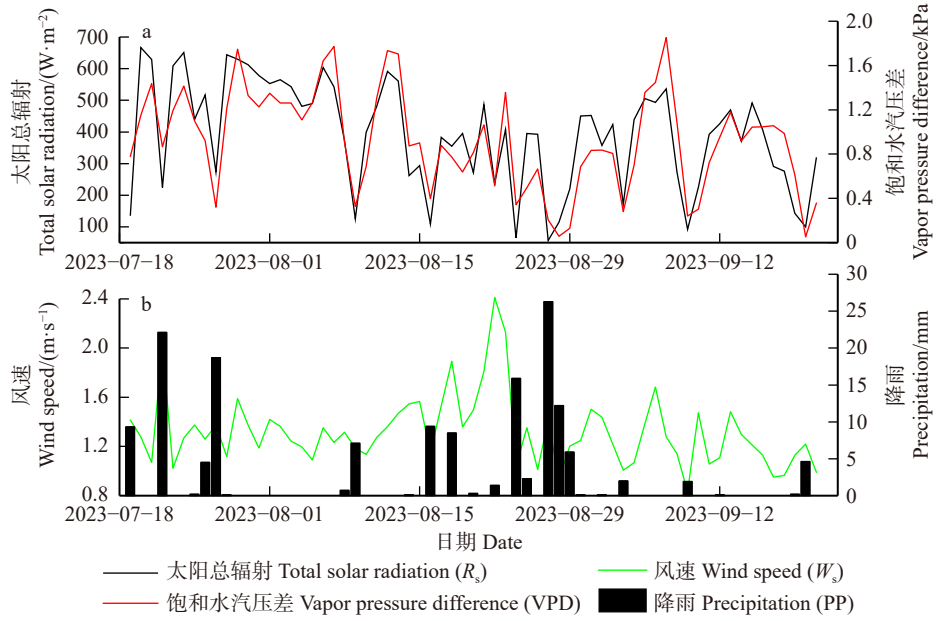


图 2 观测期气象因子的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in meteorological factors during the observation period

表 2 各月日均气象因子单因素方差分析（平均值 ± 标准差）

Tab. 2 One-way ANOVA of daily mean meteorological factors for each month (mean ± standard deviation)

月份 Month	R_s/(W·m^{-2})	VPD/kPa	T/℃	H/%	W_s/(m·s^{-1})	PP/mm
7	466.53 ± 50.60a	1.27 ± 0.10a	24.66 ± 0.70a	64.01 ± 2.46b	1.41 ± 0.07a	122.80
8	375.93 ± 29.17b	0.90 ± 0.09b	24.33 ± 0.84a	77.49 ± 1.50a	1.39 ± 0.06a	90.20
9	345.53 ± 29.78b	0.85 ± 0.06b	18.46 ± 0.46b	68.35 ± 3.03b	1.27 ± 0.05a	9.80

注：*T*. 温度；*H*. 相对湿度。不同小写字母代表不同月份下气象因子的差异性显著（$P < 0.05$）。Notes: *T*, temperature; *H*, relative humidity. Different lowercase letters represent difference in significance of meteorological factors in varied months ($P < 0.05$).

表 3 不同土层深度的平均土壤含水量（平均值 ± 标准差）

Tab. 3 Average soil water content for different soil depths (mean ± standard deviation) %

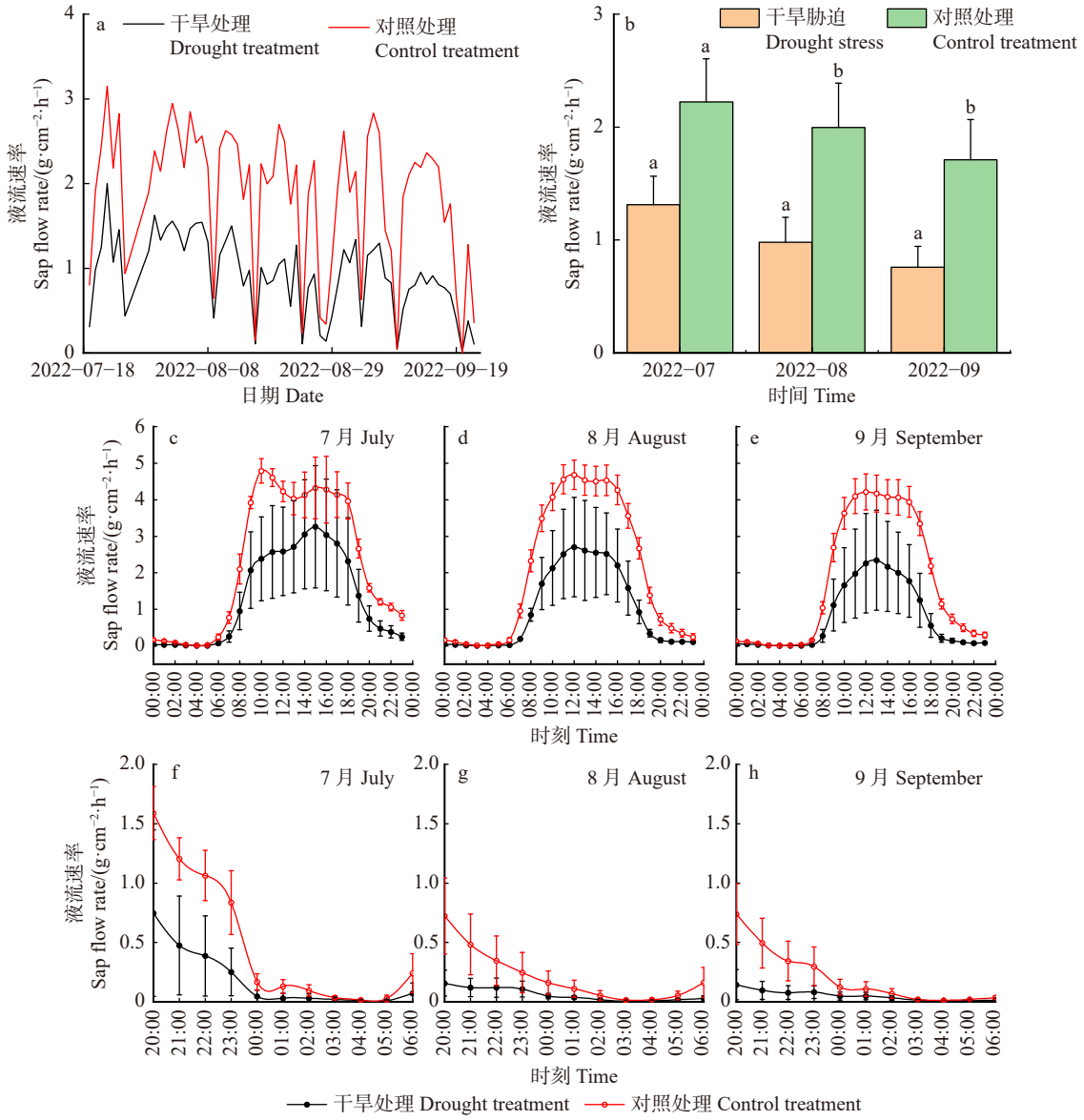
处理 Treatment	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 90 cm	90 ~ 120 cm	120 ~ 160 cm	160 ~ 200 cm
干旱 Drought	8.20 ± 1.54a	7.89 ± 0.83a	8.09 ± 0.39a	8.50 ± 0.60a	8.44 ± 0.63a	8.44 ± 0.28a	8.01 ± 0.34a	7.59 ± 0.37a
对照 Control	14.59 ± 1.01b	11.93 ± 1.08b	10.57 ± 0.75b	9.16 ± 0.46b	8.70 ± 0.43a	8.37 ± 0.37a	7.92 ± 0.41a	7.67 ± 0.38a

注：不同小写字母代表不同处理下平均土壤含水量的差异性显著（$P < 0.05$）。Note: different lowercase letters represent the significant differences in average soil moisture content under different treatments ($P < 0.05$).

对照处理下日均 J_s（1.87 g/(cm^2·h)）($P < 0.05$)。不同处理下均在夜间（20:00—次日 06:00）仍然可观测到明显树干液流，前半夜（20:00—24:00）J_s 大于后半夜（24:00—次日 06:00）。

2.3 干旱处理下刺槐水分生理因子的变化

整个观测期，干旱处理未显著改变刺槐的叶片相对含水量和枝条相对含水量（图 4）。不同处理下刺槐叶片相对含水量变化规律一致，随着生长季的推移，叶片相对含水量降低。不同处理条件下刺槐叶片水势和枝条水势的动态变化（图 5）发现：当土壤受到干旱胁迫时，刺槐枝、叶水势日变化的总趋势与正常水分条件下基本一致，但干旱处理下的刺槐叶片水势（−1.22 ± 0.28）MPa 低于对照处理（−1.15 ± 0.29）MPa，枝条水势（−0.72 ± 0.34）MPa 低于对照处理（−0.60 ± 0.34）MPa。日尺度上，刺槐的叶片、枝条水势均呈“V”字型变化，叶片水势动态为黎明前（05:00）叶片水势为全天最大值，随着蒸腾作用增强，叶片水势开始下降，叶片水势最低值出现在正午（11:00），之后叶片水势开始回升。枝条水势动态为上午 07:00 达到峰值，最低值出现在 13:00，晚于叶片约 2 h，随后枝条水势开始回升。日尺度上，刺槐的枝条、叶片水容均呈现“V”字型变化（图 6），且在不同处理间无显著差异。叶片水容的最小值出现在正午（11:00）左右，但枝条最小值时间晚于叶片约 2 h。



不同小写字母代表干旱处理和对照处理下刺槐液流速率的差异显著性（$P < 0.05$）。Different lowercase letters represent the significance of difference in the flow rate of *Robinia pseudoacacia* under drought treatment and control treatment ($P < 0.05$).

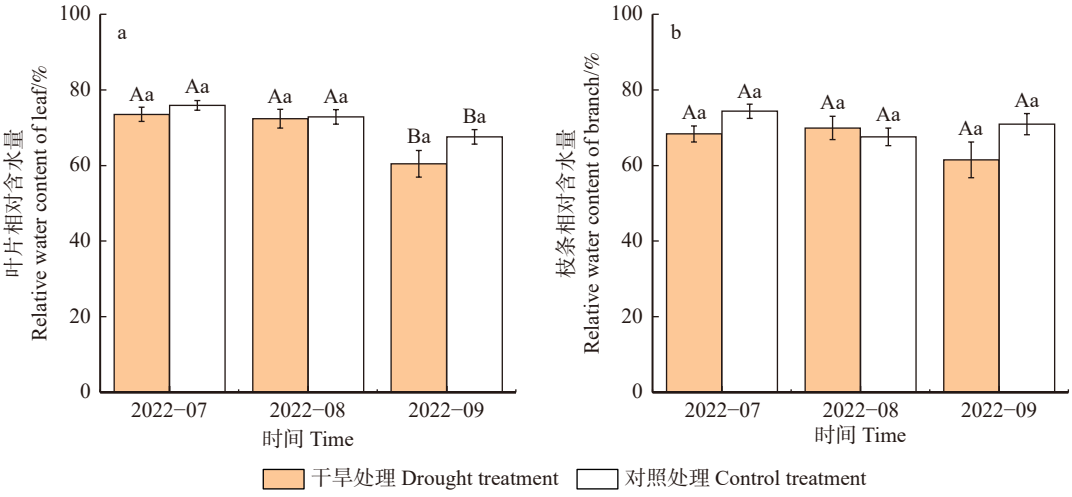
图 3　不同处理下刺槐树干液流速率变化

Fig. 3　Changes in sap flow rate of *Robinia pseudoacacia* under different treatments

2.4　干旱处理下树干液流的影响因素

对影响刺槐树干液流的 4 个环境因子和 6 个水分生理因子在小时尺度上进行主成分分析，提取特征值大于 0.5 的 5 个主成分。由表 4 可知：干旱处理和对照处理上前 5 个主成分累积方差贡献率分别为 91.99% 和 91.38%，能够较为全面地解释 J_s 的影响因子，其中主成分 1 的方差贡献率最大，分别为 49.51% 和 50.73%。各影响因子在各主成分上的荷载反映其对该主成分的贡献率（表 5），第一主成分与太阳总辐射、饱和水汽压差、风速呈较强的正相关，主要表明了晴朗、干燥和有风的大气条件有利于驱动树干液流。第二主成分上 SWC 的荷载绝对值接近 70%，对主成分 2 起主要作用。主成分 3、4、5 与枝条含水量、叶片水势等呈较强的相关关系。分析表明气象因子是影响刺槐 J_s 的主导因子，其次是 SWC、水分生理因子。

构建结构方程模型进一步分析气象因子、土壤水分条件、水分生理因子对液流速率的直接效应和间接效应（图 7）。在不同处理条件下，R_s 是影响 J_s 变化的最重要因子，干旱处理和对照处理下其标准化通径系数分别为 0.46 和 0.50，其总效应（即直接效应和间接效应）均为 0.92，这是由于 R_s 是改变大气水热的直接因子，直接影响了植物气孔的开放度，间接影响植物叶片（茎）的水势、水容等因子的变化，同时干旱处理下，R_s 对 J_s 的直接效应减弱，间接效应增强。VPD 对 J_s 有直接效应，干旱处理和对照处理下标准化通径系数分别为 0.47 和 0.34，干旱处理下 VPD 对 J_s 的影响增强，表明干旱处理下，植物



大写字母表示同一处理下，不同月份的相对含水量的差异显著（$P < 0.05$）；小写字母表示同一月份下不同处理的相对含水量差异显著（$P < 0.05$）。Capital letters indicate the difference in relative water content of different months under the same treatment ($P < 0.05$); lowercase letters indicate the difference in relative water content of different treatments in the same month ($P < 0.05$).

图 4 叶片和枝条相对含水量

Fig. 4 Relative water content of leaves and branches

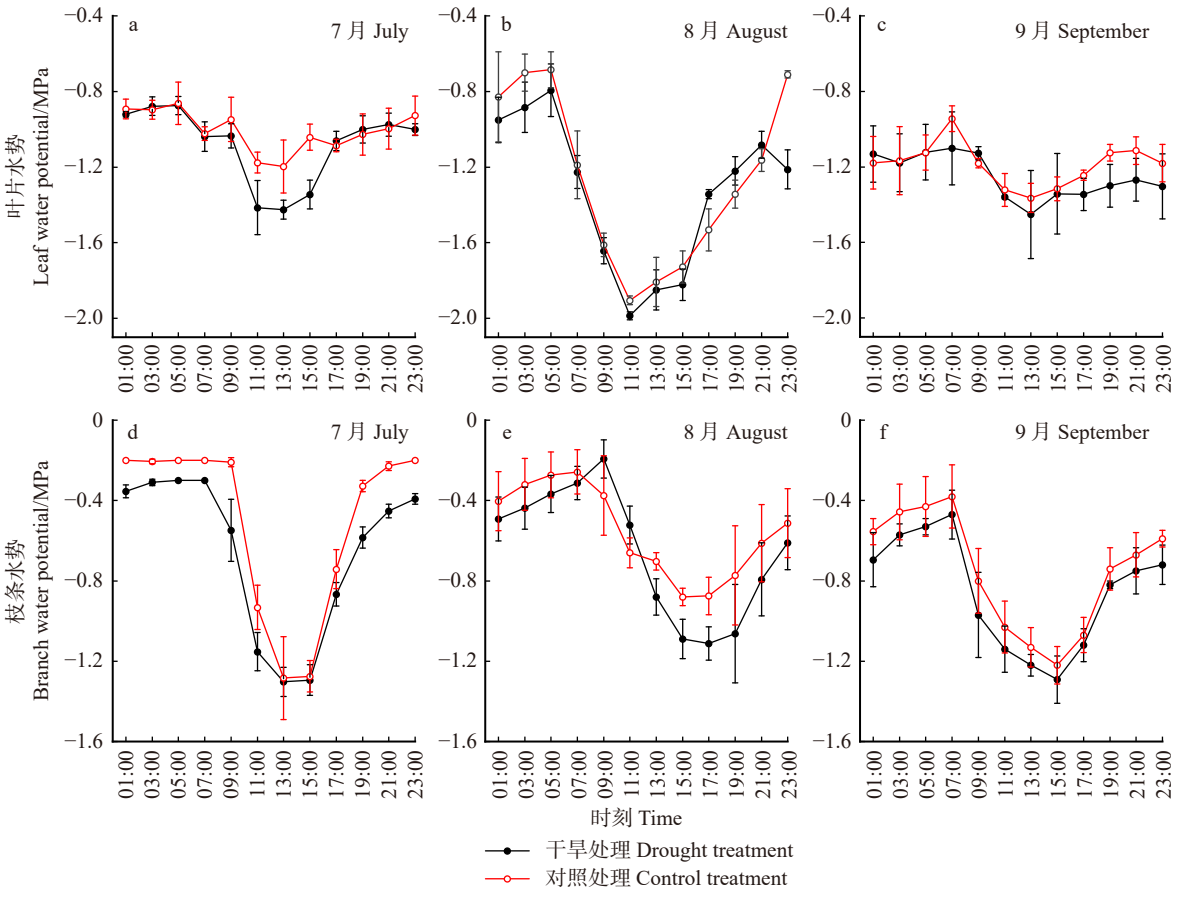


图 5 不同处理下刺槐叶、枝条水势日变化

Fig. 5 Diurnal variations in leaf water potential and branch water potential of *Robinia pseudoacacia* under different treatments

气孔对 VPD 变化更敏感。SWC 对 J_s 的影响不显著（$P > 0.05$）。干旱处理下，Ψ_L 和 C_B 的标准化效应呈显著的负相关，分别为−0.16 和−0.16。对照处理下，Ψ_L 和 C_B 对 J_s 的影响增强，其直接效应分别为−0.33 和−0.29，因为对照处理下，J_s 对 Ψ_L 的变化更敏感，同时植物更依赖于枝条储水满足蒸腾需求。

3 讨 论

3.1 干旱胁迫下刺槐蒸腾耗水和水分生理变化

干旱处理对刺槐人工林蒸腾耗水的影响是显著的，干旱处理下的刺槐液流速率显著低于对照样地，但其变化趋势相似，与前人的研究结果一致。何秋

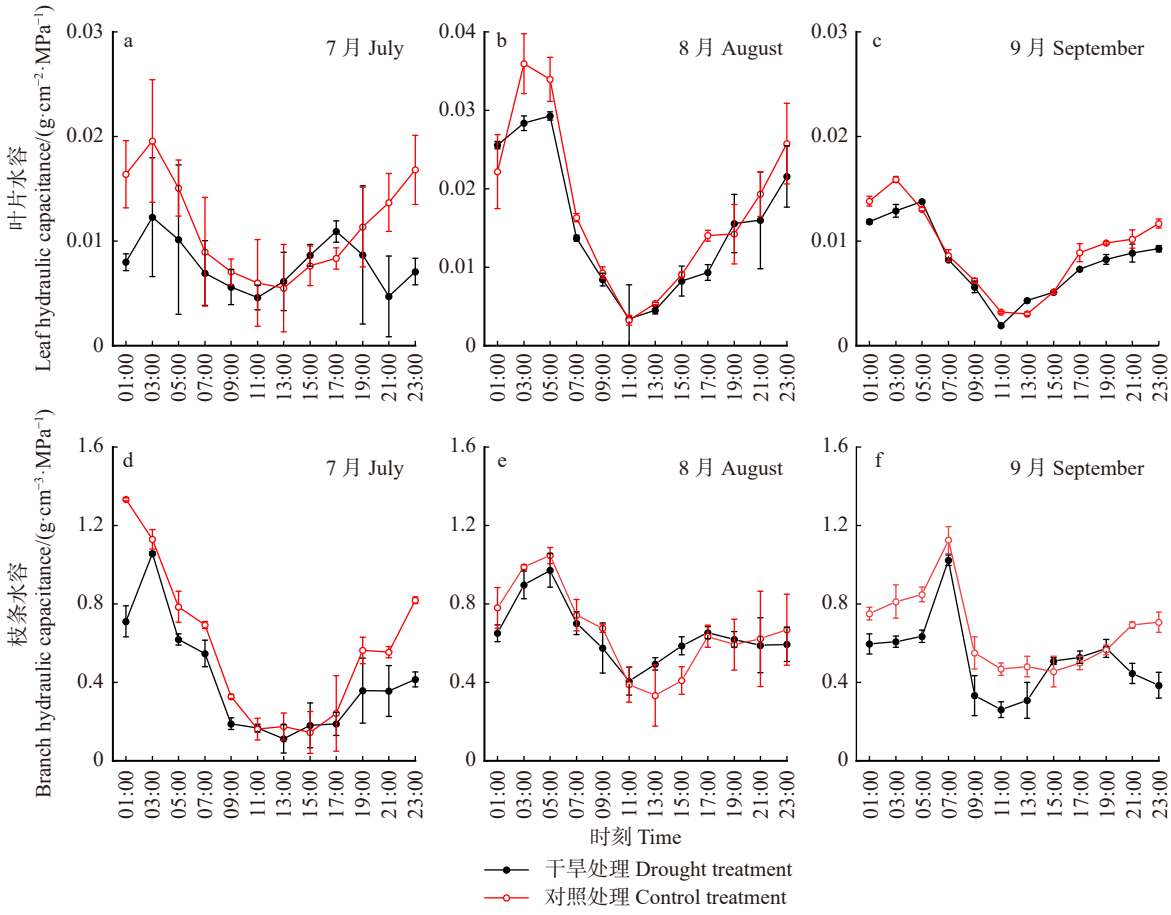


图 6　不同处理下刺槐叶片和枝条水容的日变化

Fig. 6　Diurnal variations in leaf hydraulic capacitance and branch hydraulic capacitance of *Robinia pseudoacacia* under different treatments

表 4　基于主成分分析的液流速率影响因子特征值及方差贡献率

Tab. 4　Eigenvalues and variance contribution rates of the sap flow rate influencing factors based on principal component analysis

主成分 Principal component	干旱处理 Drought treatment			对照处理 Control treatment		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积解释量 Cumulative explaination/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积解释量 Cumulative explaination/%
1	2.22	49.51	49.51	2.25	50.73	50.73
2	1.34	18.10	67.61	1.32	17.63	68.36
3	1.08	11.84	79.45	1.08	11.81	80.17
4	0.85	7.22	86.67	0.86	7.40	87.57
5	0.72	5.32	91.99	0.61	3.81	91.38

月等[35]对黄土高原沟壑区的刺槐在人工截留降雨输入的对比研究发现，人工截留 50% 穿透雨明显降低了刺槐液流日变化的峰值。Zhang 等[36]也发现，减雨处理造成刺槐液流密度和林分蒸腾量分别显著降低了 39% 和 28%。Besson 等[37]的人工控雨试验也得到了相似的结果，减雨使得林分蒸腾减少了 20% ~ 27%。然而，也有研究发现减雨对林分蒸腾耗水没有显著影响或者影响很小[38]，原因可能是干旱处理下当地的树木可以吸收地下水，缓解减雨造成的干旱。例如，研究表明刺槐根系较深，可以更好地利用到地下水[39]，使其在气候变化下更好地适应干旱。然而，本研究的刺槐人工林位于晋西黄土区，地下水在地下几十米至几百米，远超出了刺槐根系吸水范围，刺槐可利用水的范围内，水分来源只有降雨。因此，减雨导致的土壤干旱会直接影响刺槐的蒸腾耗水。

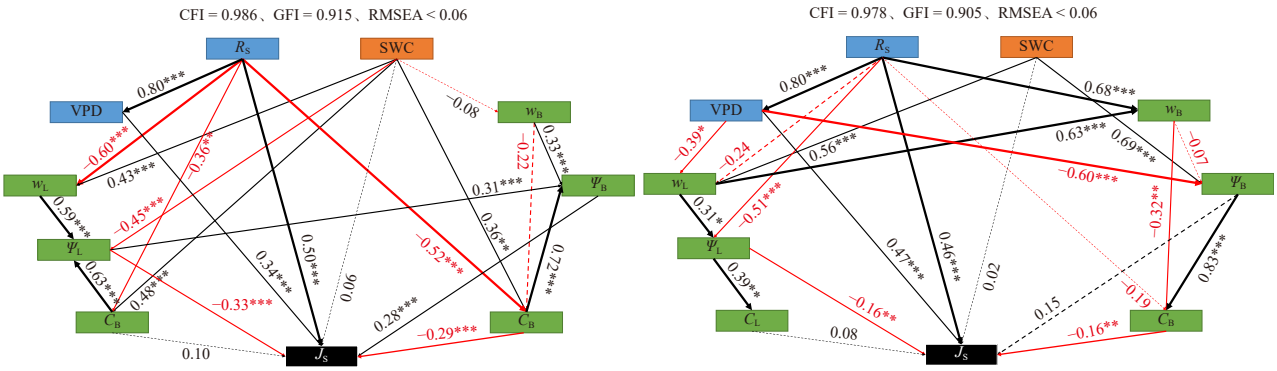
干旱胁迫会显著影响刺槐水分生理。植物组织水分是维持植物正常代谢的基础，相对含水量的高低表示干旱胁迫时植物保水能力的强弱[40]。徐扬等[41]研究不同干旱胁迫梯度对板栗（*Castanea mollissima*）嫁接苗的叶相对含水量的影响，发现随着干旱胁迫程度的增加，叶片相对含水量呈现下降的趋势。本

表 5 液流速率影响因子在不同主成分上的荷载

Tab. 5 Load of sap flow rate influencing factors on different principal components

变量 Variable	干旱处理 Drought treatment					对照处理 Control treatment				
	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4	主成分5 PC5	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4	主成分5 PC5
VPD	0.41	0.20	0.19		0.19	0.39	0.23		0.22	0.12
Rs	0.39	0.13	−0.16		−0.25	0.39				−0.57
Ws	0.35	0.30	0.32			0.34	0.38			0.5
SWC		0.69	0.22	−0.25			0.68		−0.44	−0.18
w_L	−0.32	0.44			0.11	−0.30	0.41	−0.21	0.24	0.26
w_B	−0.21	0.36	−0.57	0.17	−0.42			−0.89		−0.10
Ψ_L	−0.34		0.14	0.53	0.54	−0.33	0.12		0.68	−0.22
Ψ_B	−0.36		−0.15	−0.53	0.22	−0.37		−0.20	−0.41	−0.20
C_L	−0.28		0.51	0.36	−0.57	−0.33	0.35	0.24	0.13	−0.25
C_B	−0.30	−0.22	0.41	−0.46	−0.22	−0.37	−0.14	0.22	−0.22	0.38

注：w_L.叶片相对含水量；w_B.枝条相对含水量；Ψ_L.叶片水势；Ψ_B.枝条水势；C_L.叶片水容；C_B.枝条水容。Notes: w_L, the relative water content of leaves; w_B, relative water content of branch; Ψ_L, leaf water potential; Ψ_B, branch water potential; C_L, leaf hydraulic capacitance; C_B, branch hydraulic capacitance.



a 对照处理 Control treatment　　b 干旱处理 Drought treatment

CFI.比较拟合指标；GFI.拟合良好性指标；RMSEA.渐变均方根误差；*、**、***分别表示相关性 $P < 0.05$、$P < 0.01$、$P < 0.001$；正效应黑色线，负效应红色线，显著实线，不显著虚线。CFI, comparative fit index; GFI, goodness of fit index; RMSEA, root mean square error of approximation; *,**,*** represent the correlation at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$ levels, respectively. Positive effect, black line; negative effect, red line; significant, solid line; insignificant, dotted line.

图 7 不同处理条件下液流速率与气象因子、土壤水分、水分生理因子间的结构方程模型路径

Fig. 7 Structural equation model path diagram between the fluid flow rate and meteorological factors, soil moisture and hydraulic physiological factors under different treatment conditions

研究发现，干旱处理下刺槐枝、叶相对含水量没有显著降低，这可能是因为本研究干旱处理仅采取减雨 50% 的措施，该强度并未造成刺槐组织受到严重损伤，刺槐会通过自身调节包括调节水分吸收和忍耐水分亏缺等方式，从而保证其正常生理功能，这与金思雨等[42]的研究一致。植物组织水势既可以反映植物需水的程度以及土壤供水能力的大小，也可以反映其吸取水分的能力[43]。本研究发现干旱处理降低了刺槐枝、叶水势，但其变化幅度小，差异不显著。相关研究表明，当土壤含水量减少时，植物器官含水量降低，使得植物水分运输阻力增加，从而导致组织水势降低[44]。在植物的土壤−植物−大气连续体系统中，土壤水势和叶水势形成的水势差是水分运移的动力，在干旱处理下土壤含水量降低，为稳定吸水，刺槐通过降低枝、叶水势来增大水势差以应对土壤干旱。同时刺槐枝、叶水势未显著降低，是因为抗旱性强的植物，其组织水势下降幅度较小。植物的水容特征表示植物器官保水、释水的能力，能综合反映组织和器官含水量和水势变化关系[45]。在干旱处理下，刺槐枝、叶的相对含水量和水势的降低，导致刺槐枝、叶水容相应降低。

3.2 刺槐树干液流速率变化的主要影响因子

在不同时间尺度上，树干液流与环境因子的关系不同。本研究发现，小时尺度上 R_s 是影响刺槐 J_s 变化的最主要因子，J_s 与 VPD、W_s 呈显著正相关关系，与 SWC 关系不显著。这与张荣等[46]的研究结果

一致，可能是由于 SWC 在小时尺度上变化幅度极小，因此对 J_s 影响小。同时，费俊娥等[47]研究表明日尺度上 J_s 主要受 SWC 的影响，同时与 T、R_s、VPD 呈明显的正相关，但与 W_s 无显著相关。月尺度上刺槐 J_s 主要受到 SWC 和 T 的影响[48]。综上，在较小时间尺度下，J_s 受与叶片相关的环境因子影响较大，如 R_s、VPD、W_s 等。在较大时间尺度下，J_s 主要受根系相关的环境因子影响，如 SWC、土壤温度等。

树干液流是由多种因素共同控制的复杂过程，不仅受环境因子的影响，也与植物水分生理因子密切相关。本研究主成分分析和通径分析结果表明：不同处理下，R_s 和 VPD 是影响刺槐 J_s 变化的主要气象因子，这与崔鸿侠等[49]、王媛等[50]研究结果一致。干旱处理下，J_s 对 VPD 的变化更敏感，原因在于干旱处理下，VPD 除了对 J_s 有直接影响外，还通过影响 w_L 和 Ψ_B 间接影响了 J_s 的变化，w_L 和 Ψ_B 的降低，增大了植物水分传输的阻力，导致水分输送速率降低。对照处理下，SWC 通过影响 C_L 和 C_B 来间接影响 J_s 的变化，且相较于干旱处理下，C_L 和 C_B 对 J_s 的影响增强，表明对照处理下，刺槐更依赖于组织储水来满足蒸腾需求，可能是因为干旱处理下低的树干液流对植物组织储水的需求降低。根据 Zavadilova 等[51]的研究，挪威云杉(*Picea abies*)在潮湿的年份利用茎水储备进行蒸腾，但在土壤水分不足的年份则不然。Harmon 等[52]也发现美国黄松(*Podocarpus imbricatus*)干旱初期依靠内部储水来补充蒸腾需求，但随着干旱条件的加剧，树木储水对蒸腾的贡献减少。本研究中对照处理下植物水分生理变化主要由 SWC 影响，干旱处理下 SWC 的影响减弱，R_s 和 VPD 的作用增强。同时，不同处理下刺槐液流速率与枝叶水势、水容的变化节律存在明显的时滞现象，黎明前刺槐液流速率变化滞后于叶片水势和水容约 1 h，正午液流速率提前于枝条水势和水容约 2 h，而造成时滞现象的主要原因为枝叶水容。研究发现由于植物组织水容的作用，使的 SPAC 系统中水分常以不同的速度运行(非稳态)并产生滞后效应。同时，时滞现象存在于不同的气候区、树种间，甚至同一树种中[53]。梅婷婷等[54]研究发现树干储水可通过缓解蒸腾对根系吸水的压力间接影响时滞，而树木越高，水分从根部至冠层的阻力越大，J_s 峰值出现时间提前，时滞增大。

4　结　　论

本研究发现干旱处理显著降低了刺槐液流速率，但未改变其液流活动规律。日尺度上刺槐液流速率呈单峰曲线变化，存在明显的夜间液流，太阳总辐射和饱和水汽压差是影响刺槐液流速率变化的主要环境因子。同时，干旱处理下刺槐枝、叶相对含水量、水势、水容等均降低。观测期内刺槐液流速率与水分生理因子之间存在明显的时滞效应，黎明前液流速率变化滞后于叶片水势和叶片水容，正午液流速率提前于枝条水势和枝条水容，水容是造成时滞现象的主要原因。影响刺槐液流速率变化的主导因子，依次为气象因子、土壤水分和水分生理因子。太阳总辐射是刺槐液流速率的主要影响因子，因为太阳总辐射是改变大气水热的直接因子，直接影响了植物气孔的开放度，间接引起了植物叶片(茎)的水势、水容等因子的变化。树干液流变化受多种因子的共同影响，在评估干旱胁迫对植物蒸腾耗水的影响时，应建立一个涵盖多种因子的综合模型来表达液流的变化规律。

参　考　文　献

[1] Gerard S, Beth R, Solomon D, et al. Plant water content integrates hydraulics and carbon depletion to predict drought-induced seedling mortality[J]. Tree Physiology, 2019, 39(8): 1300−1312.

[2] Brendan C, Timothy B J, Brodersen C R. Triggers of tree mortality under drought[J]. Nature, 2018, 558(6): 531−539.

[3] 王利娜, 朱清科, 翁白莎, 等. 1961—2012 年黄土高原干旱时空分布特征 [J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 15−22.
Wang L N, Zhu Q K, Weng B S, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of drought in Loess Plateau from 1961 to 2012[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 15−22.

[4] 师玉锋, 彭守璋. 2018—2100 年黄土高原地区干旱的时空变化 [J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2020, 56(6): 785−792.
Shi Y F, Peng S Z. Spatiotemporal changes in drought across the Loess Plateau from 2018 to 2100[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(6): 785−792.

[5] Giana F E, Martínez-Meier A, Mastrandrea C A, et al. Intensity and number of thinning operations affect the response of *Eucalyptus grandis* to water availability and extreme drought events[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2023, 529(2) [2023−12−20]. https://www.elsevier.com/locate/foreco.

[6] 牛春梅. 黄土高原两个气候区刺槐树干液流及生理生态特性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Niu C M. Study on stem flow and physiological and ecological characteristics of *Robinia pseudoacacia* in two climatic zones of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.

[7] 张荣, 毕华兴, 焦振寰, 等. 生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(6): 1238−1246.
Zhang R, Bi H X, Jiao Z H, et al. Diurnal and nocturnal changes in stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* during growing season and its response to meteorological factors[J]. Journal of Zhejiang

A& F University, 2022, 39(6): 1238−1246.

[8] 王一心, 冯天骄, 肖辉杰, 等. 干旱胁迫和不同株高基径条件下的白刺液流速率特征差异 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 234−240, 249.
Wang Y X, Feng T J, Xiao H J, et al. Characteristics of sap flow rate of *Nitraria tangutorum* under drought stress and different plant height and basal diameter[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 234−240, 249.

[9] 张星宇, 杨金艳, 阮宏华, 等. 模拟干旱下杨树树干液流特征及其对环境因子的响应 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 84−91.
Zhang X Y, Yang J Y, Ruan H H, et al. Characteristics of poplar *Populus deltoides* stem sap flow and its response to environmental factors under simulated drought[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 84−91.

[10] Guillen L A, Brzostek E, McNeil B, et al. Sap flow velocities of *Acer saccharum* and *Quercus velutina* during drought: insights and implications from a throughfall exclusion experiment in West Virginia, USA[J/OL]. Science of the Total Environment, 2022, 850: 158029[2023−12−20]. http://www.sciencedirect.com/science/journal/.

[11] Geravandi M, Farshadfar E, Kahrizi D. Evaluation of some physiological traits as indicators of drought tolerance in bread wheat genotype[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2011, 58(1): 69−75.

[12] 梁晓华, 施娅云, 张燕. 干旱胁迫对三种蕨类植物生理生化的影响 [J]. 楚雄师范学院学报, 2022, 35(6): 55−61.
Liang X H, Shi Y Y, Zhang Y. Effects of drought stress on physiological and biochemical changes of several pteridophytes [J]. Journal of Chuxiong Normal University, 2022, 35(6): 55−61.

[13] 刘欣. 植物水势研究与应用综述 [J]. 吉林林业科技, 2015, 44(4): 35−37.
Liu X. Research and application review of plant water potential[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2015, 44(4): 35−37.

[14] 洪光宇, 王晓江, 刘果厚, 等. 树干液流研究进展 [J]. 内蒙古林业科技, 2020, 46(3): 50−55.
Hong G Y, Wang X J, Liu G H, et al. Research progress on stem sap flow[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2020, 46(3): 50−55.

[15] 张庆印. 半湿润黄土区坡面刺槐林对干旱胁迫的生理响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Zhang Q Y. Physiological response of sloped *Robinia pseudoacacia* forest to drought stress in semi-humid loess area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

[16] 秦洁, 司建华, 贾冰, 等. 巴丹吉林沙漠典型植物水势与导水率的时空变化 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1629−1638.
Qin J, Si J H, Jia B, et al. Temporal and spatial variations of water potential and hydraulic conductivity of typical plant species in Badain Jaran Desert[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1629−1638.

[17] Qin J, Si J H, Jia B, et al. Water use strategies of *Ferula bungeana* on mega-dunes in the badain jaran desert[J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 957421[2023−12−20]. https://www.frontiersin.org/journals/plant-science.

[18] Sperry J S, Meinzer F C, Mcculloh K A. Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees[J]. Plant, Cell & Environment, 2008, 31(5): 632−645.

[19] 李广德, 王晓辉, 贾黎明, 等. 国槐枝叶水分特征及其对树干边材液流的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(1): 23−28.
Li G D, Wang X H, Jia L M, et al. Water characteristics of *Sophora japonica* twig and leaf and its impact on sap flow[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(1): 23−28.

[20] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 木本植物水力系统对干旱胁迫的响应机制 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(9): 925−941.
Luo D D, Wang C K, Jin Y. Response mechanisms of hydraulic systems of woody plants to drought stress[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(9): 925−941.

[21] 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 等. 植物水分传输过程中的调控机制研究进展 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4427−4436.
Yang Q L, Zhang F C, Liu X G, et al. Research progress on regulation mechanism for the process of water transport in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4427−4436.

[22] 李广德, 付海曼, 贾黎明. 银杏树干边材液流及水容特性研究 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 54−58.
Li G D, Fu H M, Jia L M. Studies on the characteristics of xylem sap flow and water capacitance of *Ginkgo biloba*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 54−58.

[23] 刘娇. 塔克拉玛干沙漠防护林植物对咸水滴灌的响应及灌溉制度优化 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Liu J. Response of plants to saline drip irrigation and optimization of irrigation system in Taklimakan Desert shelterbelt[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.

[24] 乔英, 马英杰, 辛明亮. 基于改进 S-W 与结构方程模型的干旱区枣园蒸散特征分析 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 307−317.
Qiao Y, Ma Y J, Xin M L. Analysis of evapotranspiration characteristics of *Ziziphus jujuba* Mill. orchards in arid areas based on improved S-W and structural equation model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 307−317.

[25] Chen Y, He J, He Y, et al. Seasonal hydrological traits in *Salix psammophila* and its responses to soil moisture and meteorological factors in desert areas[J/OL]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108626[2023−12−20]. https://www.elsevier.com/locate/ecolind.

[26] 赵文芹, 席本野, 刘金强, 等. 不同灌溉条件下杨树人工林蒸腾过程及环境响应 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(4): 370−382.
Zhao W Q, Xi B Y, Liu J Q, et al. Transpiration process and environmental response of poplar plantation under different irrigation conditions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(4): 370−382.

[27] Chen Z, Zhang Z, Sun G, et al. Biophysical controls on nocturnal sap flow in plantation forests in a semi-arid region of northern China[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 284:

107904[2023−12−20]. https://www.elsevier.com/locate/agrformet.

[28] 汲玉河, 周广胜, 李宗善. 气候变化驱动下黄土高原刺槐林气候适宜性和脆弱性 [J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3348−3358.
Ji Y H, Zhou G S, Li Z S. Climate suitability and vulnerability of *Robinia pseudoacacia* forest driven by climate change on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3348−3358.

[29] Renninger H J, Carlo N, Clark K L, et al. Physiological strategies of co-occurring oaks in a water- and nutrient-limited ecosystem[J]. Tree Physiology, 2014, 34(2): 159−173.

[30] 李浩, 胡顺军, 朱海, 等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究 [J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7187−7196.
Li H, Hu S J, Zhu H, et al. Characterization of stem sap flow *Haloxylon ammodendr* on by using thermal dissipation technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7187−7196.

[31] Xu X, Tong L, Li F, et al. Sap flow of irrigated *Populus alba* var. *pyramidalis* and its relationship with environmental factors and leaf area index in an arid region of Northwest China[J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(2): 144−152.

[32] 刘崴, 魏天兴, 朱清科. 半干旱黄土丘陵区河北杨和油松生长季树干液流特征 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(6): 1045−1053.
Liu W, Wei T X, Zhu Q K. Growing season sap flow of *Populus hopeiensis* and *Pinus tabulaeformis* in the semi-aridloess plateau, China[J]. J Zhejiang A&F University, 2018, 35(6): 1045−1053.

[33] 王翼龙. 黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合耗水特性及影响因素研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2010.
Wang Y L. Study on photosynthetic water consumption characteristics and influencing factors of the main tree species of two typical forest stands in the semi-arid area of the Loess Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010.

[34] 奚如春, 马履一, 樊敏, 等. 油松枝干水容特征及其对蒸腾耗水的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 160−165.
Xi R C, Ma L Y, Fan M, et al. Water capacity of branches and stems of *Pinus tabulaeformis* and its impact on transpiring water consumption[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 160−165.

[35] 何秋月. 黄土高原半湿润区刺槐人工林蒸腾耗水特征对降雨减少的响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
He Q Y. Response of transpiration consumption characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantations in the semi-humid area of the Loess Plateau to rainfall reduction[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[36] Zhang Q Y, Jia X X, Shao M A, et al. Sap flow of black locust *Robinia pseudoacacia* in response to short-term drought in southern Loess Plateau of China[J/OL]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6222[2023−02−28]. https://www.nature.com/articles/s41598-018-24669-5.

[37] Besson C K, Lobo-Do-Vale R, Rodrigues M L, et al. Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 230−242.

[38] Wightman M G, Martin T A, Gonzalez-Benecke C A, et al. Loblolly pine productivity and water relations in response to throughfall reduction and fertilizer application on a poorly drained site in northern Florida[J]. Forests, 2016, 7(10): 1−19.

[39] Nadal-Sala D, Hartig F, Gracia C A, et al. Global warming likely to enhance black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) growth in a Mediterranean riparian forest[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2019, 449: 117448[2023−01−29]. https://europepmc.org/article/AGR/IND606496357.

[40] 王寒茹, 刘华, 李丕军, 等. 4 个核桃类树种苗木应对持续干旱的生理响应 [J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(5): 722−729.
Wang H R, Liu H, Li P J, et al. Impact of simulated drought stress on ecophysiological characteristics of four tree species in walnut family[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(5): 722−729.

[41] 徐扬, 赵健, 张雷, 等. 干旱胁迫对板栗二年生嫁接苗叶片相对含水量和可溶性糖含量的影响 [J]. 农学学报, 2017, 7(1): 91−94.
Xu Y, Zhao J, Zhang L, et al. Effect of drought stress on leaf relative water content and soluble sugar content of 2-year-old grafted *Castanea mollissima*[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(1): 91−94.

[42] 金思雨, 彭祚登. 刺槐苗木碳水生理参数对长期干旱及复水的响应变化 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 43−56.
Jin S Y, Peng Z D. Changes in response of carbon and water physiological parameters of *Robinia pseudoacacia* seedlings to long-term drought and rehydration[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 43−56.

[43] 曹永慧, 周本智, 倪霞, 等. 模拟干旱下毛竹叶片水势的动态变化 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 183−191.
Cao Y H, Zhou B Z, Ni X, et al. The dynamic change of leaf water potential for Moso bamboo under throughfall exclusion[J]. Forest Research, 2018, 31(4): 183−191.

[44] 邵畅畅, 罗仙英, 丁贵杰, 等. 干旱对马尾松茎叶水力特征及解剖特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(5): 937−945.
Shao C C, Luo X Y, Ding G J, et al. Effects of drought on hydraulic and anatomical characteristics of stem and leaf in *Pinus massoniana*[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(5): 937−945.

[45] 谢东锋, 王华田, 张光灿, 等. 山杏苗木对干旱胁迫的生理响应 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 122−129.
Xie D F, Wang H T, Zhang G C, et al. Physiological responses of *Prunus sibirica* seedlings to drought stress[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 122−129.

[46] 张荣, 毕华兴, 王宁, 等. 不同时间尺度下刺槐蒸腾耗水与环境因子关系 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 204−211.
Zhang R, Bi H X, Wang N, et al. Relationship between transpiration of *Robinia pseudoacacia* and environmental factors at different time scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 204−211.

[47] 费俊娥, 焦陇慧, 吴贤忠, 等. 陇东黄土高原区人工刺槐树干液流特征 [J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(6): 131−139.
Fei J E, Jiao L H, Wu X Z, et al. Study on sap flow characteristics of *Robinia pseudoacacia* artificially grown in hilly and gully region of Loess Plateau in eastern Gansu[J]. Journal of Gansu

Agricultural University, 2020, 55(6): 131−139.

[48] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 树干液流研究进展与展望 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 98−105.
Zhao C Y, Si J H, Feng Q, et al. Stem sap flow research: progress and prospect[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 98−105.

[49] 崔鸿侠, 唐万鹏, 潘磊, 等. 神农架华山松树干液流特征及其影响因素 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(9): 89−93.
Cui H X, Tang W P, Pan L, et al. Characteristics of sap flow and its influencing factors of *Pinus amandii* in Shennongjia[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(9): 89−93.

[50] 王媛, 魏江生, 刘兵兵, 等. 环境因子对大兴安岭南段白桦树干液流变化特征的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(2): 11−17.
Wang Y, Wei J S, Liu B B, et al. Effect of environmental factors on characteristics of sap flow of *Betula platyphylla* in southern Daxing'an Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(2): 11−17.

[51] Zavadilova I, Szatniewska J, Petrík P, et al. Sap flow and growth response of Norway spruce under long-term partial rainfall exclusion at low altitude[J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1089706[2023−12−20]. https://www.frontiersin.org/journals/plant-science.

[52] Harmon R E, Barnard H R, Day-Lewis F D, et al. Exploring environmental factors that drive diel variations in tree water storage using wavelet analysis[J/OL]. Frontiers in Water, 2021, 3: 682285[2023−12−20]. https://www.frontiersin.org/journals/water.

[53] 郭锦荣, 白天军, 邓文平, 等. 不同胸径日本柳杉树干液流及其蒸腾耗水差异 [J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2019, 39(2): 70−77.
Guo J R, Bai T J, Deng W P, et al. Differences in sap flow and transpiring water consumption of *Cryptomeria japonica* with different DBH[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2019, 39(2): 70−77.

[54] 梅婷婷, 赵平, 倪广艳, 等. 树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应 [J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7018−7026.
Mei T T, Zhao P, Ni G Y, et al. Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7018−7026.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 杨晓晖）