



引文格式: 李灿. 毛乌素沙地旱柳水分调节机制研究[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 365–375. DOI: 10.12401/j.nwg.2026043

Citation: LI Can. Study on Water Regulation Mechanism of *Salix matsudana Koidz* in Mu Us Sandy Land[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 365–375. DOI: 10.12401/j.nwg.2026043

毛乌素沙地旱柳水分调节机制研究

李灿

(河北地质大学水资源与环境学院, 河北 石家庄 052161)

摘要: 在全球气候变化与区域水资源短缺背景下, 干旱半干旱区植被水分利用的多因子协同驱动机制研究亟待深化, 但现有研究对毛乌素沙地旱柳液流过程中气象因子-土壤水-地下水协同调控机制解析仍存在不足。因此, 本研究以毛乌素沙地 40 年生旱柳为对象, 通过原位连续监测气象要素、地下水埋深、土壤含水率及树干液流密度, 结合结构方程模型与增强回归树模型, 系统解析雨季气象因子与土壤水、地下水协同作用下旱柳的水分利用策略, 阐明气象因子调控旱柳液流的关键路径。结果表明: 旱柳为深层水分依赖型树种, 形成随生长季水文气象条件动态调整的水分利用策略, 优先利用 250~450 cm 深层土壤水与地下水, 对降雨形成的表层土壤水利用效率极低; 气象因子对旱柳液流存在直接驱动与间接调控的双重机制, 太阳辐射为核心直接驱动因子, 相对湿度为关键大气约束因子, 地下水位通过地下水-深层土壤水-植被液流水文传导链产生显著正向间接效应(总效应 0.39); 在气温 9.97~21.20℃、相对湿度适中时旱柳液流密度达峰值。本研究厘清了旱柳液流过程的多因子协同驱动机制, 为毛乌素沙地旱柳林经营与生态恢复工程提供了理论支撑。

关键词: 旱柳; 树干液流; 水分利用策略; 气象因子; 地下水; 毛乌素沙地

中图分类号: P641; Q948.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0365-11

Study on Water Regulation Mechanism of *Salix matsudana Koidz* in Mu Us Sandy Land

LI Can

(School of Water Resources and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang 052161, Hebei, China)

Abstract: Against the background of global climate change and regional water scarcity, in-depth research on the synergistic driving mechanisms of multiple factors controlling vegetation water use in arid and semi-arid regions is urgently required. Existing studies lack sufficient analysis on the synergistic regulation of meteorology-soil water-groundwater in the sap flow process of *Salix matsudana Koidz* in the Mu Us Sandy Land. Therefore, taking 40-year-old *Salix matsudana Koidz* in the Mu Us Sandy Land as the research object, this study systemati-

收稿日期: 2026-04-27; 修回日期: 2026-06-24; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1000404), 中国地质调查局项目(DD2016023), 河北省教育厅高等教育教学改革研究与实践项目(2020GJJG224)联合资助。

作者简介: 李灿(2006-), 女, 本科生, 主要从事干旱区植被水分利用机制研究。E-mail: 2736000679@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

cally analyzed the water use strategy of *Salix matsudana Koidz* under the synergistic effect of meteorological factors and groundwater in the rainy season, and clarified the key paths of meteorological factors regulating the sap flow process of *Salix matsudana Koidz*, through in-situ continuous monitoring of meteorological elements, groundwater depth, soil moisture content and stem sap flow density, combined with Structural Equation Model and Boosted Regression Tree model. The results show that *Salix matsudana Koidz* is a deep water-dependent tree species, forming a water use strategy dynamically adjusted with hydro-meteorological conditions in the growing season. It preferentially utilizes deep soil water and groundwater at 250–450 cm, with extremely low utilization efficiency of surface soil water recharged by rainfall. Meteorological factors regulate the sap flow of *Salix matsudana Koidz* through dual paths of direct driving and indirect synergy. Solar radiation ($\beta=0.71$, $P<0.001$) is the core direct driving factor, relative humidity ($\beta=-0.27$, $P<0.05$) is the key atmospheric constraint factor, and groundwater level exerts a significant positive indirect effect (total effect 0.39) through the hydrological transmission chain of groundwater-deep soil water-vegetation sap flow. The sap flow density of *Salix matsudana Koidz* peaks when the air temperature is 9.97–21.20°C and the relative humidity is moderate. This study clarifies the multi-factor coupled driving mechanism of the sap flow process of *Salix matsudana Koidz* and provides theoretical support for the management of *Salix matsudana Koidz* forests and ecological restoration projects in the Mu Us Sandy Land.

Keywords: *Salix matsudana Koidz*; stem sap flow; water use strategy; meteorological factor; groundwater; Mu Us Sandy Land

旱柳(*Salix matsudana Koidz*.)因其较强的抗旱耐贫瘠特性,近年来已成为毛乌素沙地生态修复与植被重建的核心树种之一,在防风固沙、水土保持及维持生态系统稳定性方面发挥着不可替代的重要作用。在全球气候变化的背景下,毛乌素地区的水资源短缺日益加剧(徐同仁等, 2025),水分作为旱区植被生存与发育的核心限制因素,直接关系到旱区植被的生长发育与生态修复成效,其植被耗水的水文响应与适应机制已成为生态水文学领域的重点研究方向之一(张亚峰等, 2025)。毛乌素沙地的降水时空差异显著、地下水位波动剧烈,极端干旱事件频发,导致旱柳生长面临土壤水分亏缺、地下水埋深动态失衡等现实胁迫(Zhao et al, 2020)。旱柳的水分利用策略及气象调控机制不确定性制约了区域生态修复进程,也给生态系统稳定性带来潜在风险。因此,系统地解析气象因子、土壤水分与地下水动态协同驱动下的旱柳水分利用策略,对于完善生态水文调控理论和科学指导区域植被建设与生态修复具有重要的现实意义。

树干液流是连接陆地生态系统水分循环与能量交换的关键过程,直接反映植物对环境水分的吸收、运输与消耗效率,其动态变化对气象因子具有高度敏感性(黄金廷等, 2013)。旱柳作为地下水依赖型树种,其水分利用策略同时受气象因素、土壤水分及地下水

位三重环境因子的调控,三者的协同作用深刻影响旱柳的生长状态与生态功能(尹立河等, 2015; 许文豪等, 2018)。气象因素包括空气温度(Air Temperature, T_a)、相对湿度(Relative Humidity, RH)、太阳辐射(Solar Radiation, R_s)、饱和水汽压差(Photosynthetically active radiation, VPD)、露点温度(Dew Point Temperature, T_d)、风速(Wind Speed, WS)等要素(赵亚迪等, 2018; 马鑫等, 2020)。近年来,国内外学者开展了大量环境因素对旱柳液流的驱动机制研究,认为气象与水文条件是驱动植物液流变化的核心因素。例如,通过原位监测证实,水汽压亏缺、潜在蒸散发与旱柳树干液流呈显著正相关(许文豪等, 2018);统计分析表明旱柳叶水势与气温、净辐射呈显著负相关,与空气相对湿度呈正相关,太阳辐射是影响叶水势变化的主导气象因子(尹立河等, 2016);前人研究也表明地下水作为稳定水源对旱柳液流产生明显影响(乔冈等, 2026)。此外,通过增温控制实验发现,气温升高可通过改变旱柳叶片水分特征与水力结构,进而增强其抗旱保水能力(何维明等, 2001)。前人研究也证实气象因素通过调控植物叶片的气孔开闭及相关的生理代谢过程影响旱柳液流的时空变化(Waseem et al., 2024; 乔冈等, 2026)。现有研究虽已初步阐明了气象因子、地下水对旱柳液流的单一调控机制,但关于其液流变化的主

控因子仍存在分歧,且现有研究仅开展原位监测与简单相关性分析,较少有定量解析各要素的独立作用及交互作用贡献度,旱柳液流多因子协同调控机制仍有待进一步明确。

针对以上存在的科学问题,本研究对毛乌素沙地的旱柳液流进行原位监测,基于气象、地下水位及土壤含水率数据,利用结构方程模型(Structural equation modeling, SEM)与增强回归树模型(Boosted regression tress, BRT)进行分析,旨在揭示气象因素、土壤含水率及地下水位协同作用下旱柳的水分利用策略,阐明各要素影响旱柳液流的关键路径,填补现有研究在多因子协同驱动作用及机制解析方面的空白。研究结果可为毛乌素沙地旱柳林的科学经营、水资源优化配置及生态恢复工程的可持续性提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验场位于毛乌素沙地与黄土高原的过渡带,地处黄河中游区段(图1),坐标为 E 109°11'42"、N 38°23'27",海拔为 1 100~1 360 m(乔冈等, 2026),属温带大陆性气候。年平均气温为 8.1 °C、多年平均降水量为 340 mm、蒸发量为 2 180~2 800 mm(赵宣等, 2016; 雒宇等, 2021)。降水时空分布极不均衡,7~9月降水量占全年 70% 以上,水资源匮乏与生态系统脆

弱性成为区域生态保护与可持续发展的核心制约因素(尹立河等, 2016; 徐永等, 2024)。该区原生植被以沙生灌草为主,旱柳为区域优势乡土乔木,在防风固沙与水土保持中发挥关键作用(李志熙等, 2005)。

1.2 试验设计

本研究以毛乌素沙地原生乔木旱柳为研究对象,在研究区内设置 3 块条件相似的平行样地,每个场地面积为 10 m×10 m,样地间距为 8 m。各样地内分别选取 3 株、2 株、1 株生长状况良好的旱柳作为观测样本。所选旱柳平均树高为 12 m,平均胸径为 36 cm,平均冠幅为 2.3 m²,植株间距为 4.5 m。

试验采用 Granier 热消散探针法(Granier, 1987)对研究区内旱柳树干液流进行连续监测。在旱柳样株树干 1.5 m 处,用砂纸打磨树干,穿透树皮至边材,将两组液流计探针(FLGS TDP 50 mm)等距插入树干,深度为 50 mm。传感器与树干间用导热硅胶密封,外部包裹铝箔以防止太阳辐射和雨水入渗。通过数据采集仪(CR1000)测得探头温差 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 。

采用 ECH2O 土壤水分监测系统在原位对土壤含水率进行连续监测。每个样地设置 2 个土壤监测剖面,监测深度为 5 m,分别于地下 5 cm、15 cm、30 cm、50 cm、100 cm、150 cm、200 cm、250 cm、300 cm、400 cm、450 cm 及 500 cm 深度处布设传感器。为保证监测精度,每 30 天采用烘干法对监测结果进行校正。

在距离试验林约 100 m 的空地处,安装自动气象

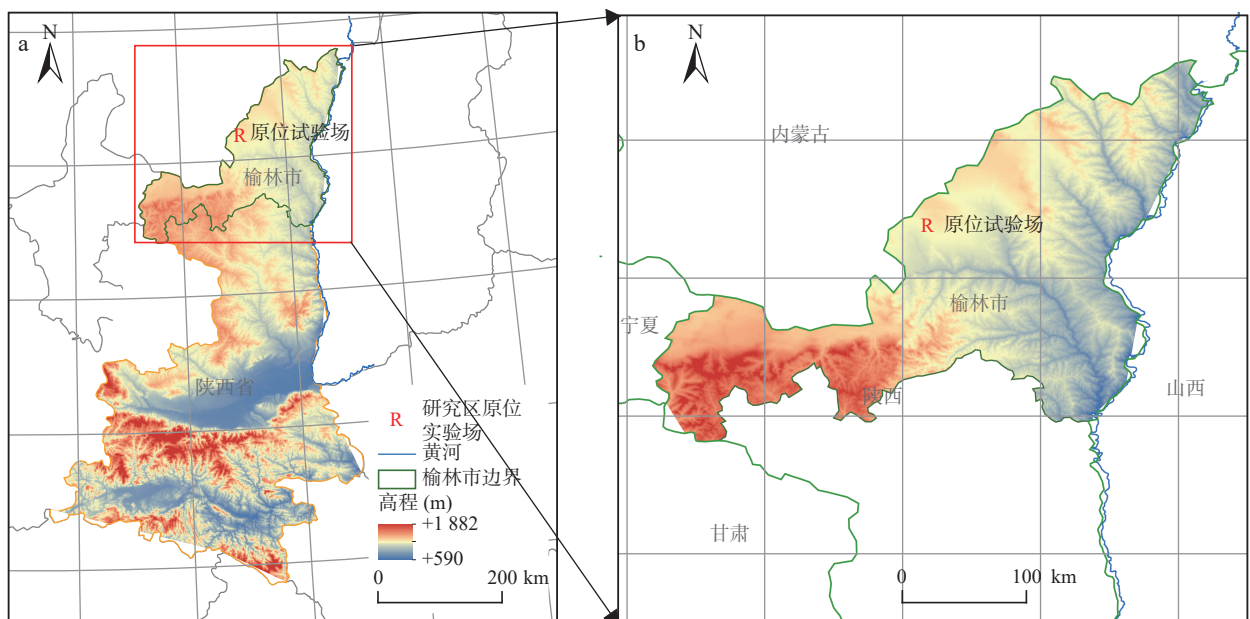


图1 研究区(a)及试验场地理位置(b)

Fig. 1 (a) Geographical location of the study area and (b) the experimental site

站(HOBO-30U)监测气象因子。监测数据包括:空气温度(T_a , °C)、露点温度(T_d , °C)、相对湿度(RH , %)、风速(WS , m/s)、降水量(P , mm)、太阳辐射(R_s , w/m²), 配合 RX3001-00-01(ETH)数据采集器进行数据采集。

采用哈司特(Hastelloy)合金式压阻硅传感器监测地下水位(GWL , m), 测量精度为 $\pm 0.05\%$ FS(满量程)。配套白金电阻式探头监测地下水温度(T_{gw} , °C), 测量精度为 ± 0.05 °C。野外监测井井深为 20 m, 井管采用 PVC 材质, 直径为 200 mm, 水位计固定于井管内 9 m 深处。气象要素、土壤含水率和地下水数据采集的时间间隔均为 1 h。

1.3 植株液流密度与饱和水汽压差

旱柳液流密度通量(SF)采用通用的 Granier 液流经验公式公式(1)(Granier, 1987)计算。

$$SF = 0.0119 \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中: SF (cm/d)为液流密度通量; ΔT_m (°C)为零流量时的温差; ΔT (°C)为两个传感器之间的实测温差。

饱和水汽压差(VPD , kPa)可使用公式(2)(Allen et al., 1998)计算。

$$VPD = 0.6108e^{\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}} (1 - RH) \quad (2)$$

式中: T_a (°C)为空气温度, RH (%)为相对湿度。

1.4 土壤水分数据处理与分层

为综合识别气象因素、土壤含水率及地下水位对旱柳液流密度的协同驱动效应, 量化各因子对旱柳液流密度的直接与间接影响, 对土壤水进行分层处理(符超峰等, 2015; Zhou et al., 2023; Han et al., 2025)。根据不同土层水分的分布特征与量化指标, 将土壤划分为浅层(0~50 cm)、中层(50~200 cm)和深层(200~500 cm)。利用厚度加权平均法计算浅层土壤含水率($M50$)、中层土壤含水率($M200$)和深层土壤含水率($M500$)(焦峰等, 2006; 宁婷等, 2015; 刘磊等, 2017)。土壤含水率利用公式(3)计算。

$$\theta_{vi} = \frac{1}{D_i} \sum_{j=1}^n d_{ij} \times \theta_{mij} \times \rho_{bij} \quad (3)$$

式中: θ_{vi} 为 i 层土壤的平均含水量(%); D_i 为 i 层土壤的取样深度(cm); n 为该层土壤采样点个数; d_{ij} 为 i 层土壤第 j 个采样点对应土层厚度(cm); θ_{mij} 为 i 层土壤第 j 个采样点的 3 个样地剖面土壤质量百分比的平均值(%); ρ_{bij} 为 i 层土壤第 j 个采样点的土壤容重。

1.5 结构方程模型

本研究采用结构方程模型(Structural Equation

Modeling, SEM)探究气象因子、土壤含水率以及地下水水位对旱柳液流密度的影响路径及调控机制。假定各要素能通过直接或者间接途径影响旱柳液流密度, 自变量为 T_a 、 WS 、 VPD 、 R_s 、 RH 、浅层土壤含水率($M50$)、中层土壤含水率($M200$)、深层土壤含水率($M500$)以及地下水位(GWL), 因变量为 SF 。参考已有研究的 SEM 模型构建与分析方法(谢俊杰等, 2025), 分析各要素对旱柳液流密度的影响路径。

结构方程模型拟合结果中, 卡方自由度比值 Chi-square/df=1.504, 处于 1.0~3.0 的理想区间内(温忠麟等, 2004); 近似误差均方根 RMSEA=0.065, 小于判别阈值 0.08; 比较拟合指数 CFI=0.995、TLI=0.980、规范拟合指数 NFI=0.986, 均大于 0.90 的优良标准(Bentler., 1990)。研究表明, 本研究构建的 SEM 模型与实测数据拟合程度良好, 可用于因子驱动效应的定量解析。

1.6 增强回归树模型

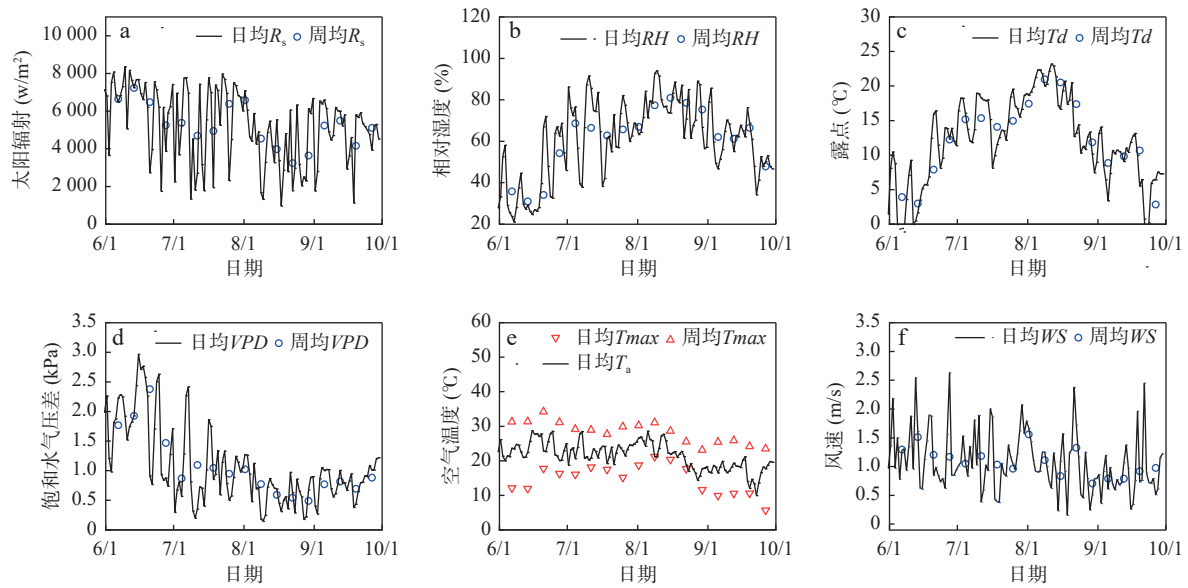
为分析环境因素对旱柳液流密度通量的贡献占比及确定其主要贡献区间, 本研究构建了增强回归树模型(Boosted regression tress, BRT)。BRT 模型的关键参数包括决策树复杂程度(tree complexity, tc)、学习速率(learning rate, lr)、分割比率(bag fraction, bg)及树数量(tree number, nt)。本研究基于 R4.4.1 软件开展 BRT 模拟(郑永宏等, 2021; 李成等, 2023), 共设置 10 000 组迭代计算。测试集决定系数 $R^2=0.83$, 表明模型拟合效果良好、结果可靠。在此基础上, 利用最优 BRT 模型, 进一步解析气温(T_a)、相对湿度(RH)、风速(WS)、光合有效辐射(PAR)及饱和水汽压差(VPD)等气象因子与浅层土壤含水率($M50$)、中层土壤含水率($M200$)、深层土壤含水率($M500$)及地下水位(GWL)对旱柳液流的相对贡献度 I_c 与主要贡献区间。

2 结果

2.1 旱柳生境气象因子-土壤水-地下水变化规律

2.1.1 气象因子变化特征

研究期内试验区各气象因子变化规律(图 2)显示, 在试验期内平均 R_s 为 5 229.90 w/m², 整体呈现波动下降的趋势, 6 月平均 R_s 为 6 378.75 w/m², 随后逐渐下降, 到 8 月 18 日达到观测期内最低值 976.10 w/m²。 RH 呈现先升高后降低的变化趋势, RH 在 7~8 月均值达到 71.51%, 6 月和 9 月仅为 40.31% 和 58.49%, 月际



a. 太阳辐射; b. 相对湿度; c. 露点; d. 饱和水汽压差; e. 空气温度; f. 风速

图2 气象因素随时间变化趋势

Fig. 2 Temporal variation trends of meteorological factors

差异性较大。 T_d 与 RH 的变化趋势类似,均呈先升高后降低的变化趋势,6月平均 T_d 为 7.18°C ,随后逐渐上升至8月的峰值(17.42°C)。9月骤降至 8.01°C ,降幅54.0%。观测期内最低露点为9月23日的 -6.15°C ,最高露点为8月12日的 23.20°C ;9月露点波动幅度最大($-6.15\sim 14.08^{\circ}\text{C}$)。 VPD 整体呈现波动下降的变化趋势,观测期内 VPD 平均值为 1.07 kPa ,6月平均值达到最高 1.83 kPa ,8月平均值最低为 0.65 kPa 。单日最高 VPD 为6月16日的 2.97 kPa ,最低为8月10日的 0.15 kPa 。6月至8月为研究期内的高温期,月平均 T_a 达到 22.97°C ,日均 T_a 波动范围为 $14.41\sim 28.72^{\circ}\text{C}$,6月16日的日最高 T_a 是 38.84°C ;9月 T_a 明显回落,月平均 T_a 为 17.24°C ,日平均 T_a 在 $9.97\sim 21.20^{\circ}\text{C}$ 范围内波动,9月23日 T_a 最低为 -1.30°C 。 WS 整体呈现逐月降低的变化趋势,观测期内平均风速为 1.08 m/s ,日均风速在 $0.15\sim 2.63\text{ m/s}$ 范围内波动。月平均风速6月(1.27 m/s)>7月(1.41 m/s)>8月(1.04 m/s)>9月(0.89 m/s),6月28日风速最大为 2.63 m/s ,8月19日最小为 0.15 m/s 。

2.1.2 水环境因素与旱柳液流变化特征

研究区降水较为集中(图3a),整个研究期内降水天数共计36d,降水频率偏低,整体降水量呈现“两端少、中间多”的分布格局。降水量总计 238.2 mm ,降水事件主要发生在7~8月,降水量占观测期总降水量

的90.8%,单日最大降水量为8月9日的 35.6 mm 。6月和9月降水稀少,月降水量分别为 18.0 mm 和 3.8 mm 。观测期内地下水位埋深介于 $6.15\sim 7.32\text{ m}$,呈先下降后回升的变化趋势(图3b)。6月地下水位埋深从 6.23 m 逐渐下降至 7.32 m ,随后因降水补给略微回升至 6.54 m 。

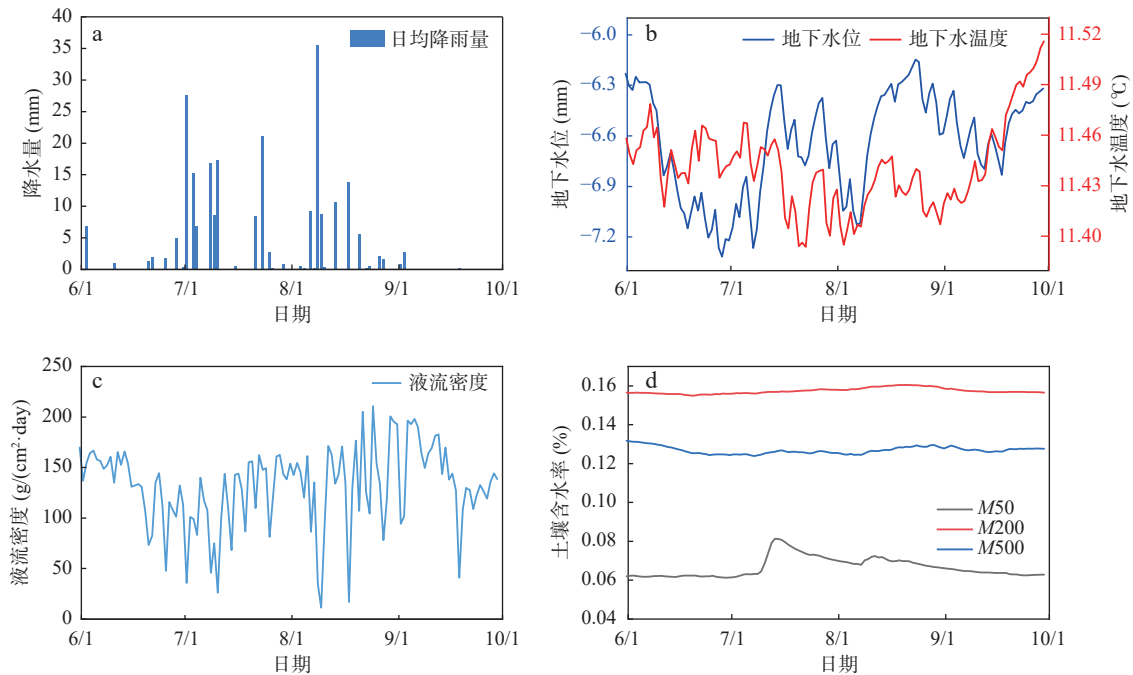
旱柳树干液流密度与 R_s 和 T_d 的变化趋势类似(图3c)。液流密度通量9月均值最高($144.52\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$),7月最低($114.68\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$)。月平均树干液流密度动态变化特征表现为9月($144.52\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$)>6月($134.27\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$)>8月($132.68\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$)>7月($114.68\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$),其中9月总液流量达 $4335.70\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{day})$,占生长季总量的27.0%。

不同深度的土壤含水率呈现分层特征(图3d),在旱柳生长季呈现中层(0.157)>深层(0.127)>浅层(0.067)的趋势。浅层土壤含水率($M50$)最低(月均值 $0.062\sim 0.07$),受降水和蒸发影响强烈,在每次降水后1~2天内含水率可提升30%~50%,但干旱期迅速回落,整体变化幅度较小;中层土壤含水率($M200$)最高,波动范围介于 $0.156\sim 0.159$;深层土壤含水率($M500$)介于 $0.126\sim 0.128$,整体保持相对稳定,空间与时间变异性较弱。

2.2 多因子协同驱动旱柳液流密度过程

2.2.1 旱柳液流密度驱动因素的结构方程模型分析

结构方程模型(SEM)路径分析结果(图4)表明,



a. 降水量; b. 地下水位与温度; c. 液流密度; d. 土壤含水率

图3 水环境因素与旱柳液流变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of water environment factors and sap flow in *Salix matsudana* Koidz

旱柳的液流密度不仅受到气象因素的影响,还受到土壤水、地下水影响。 R_s 是影响旱柳液流密度的核心气象驱动因子, R_s 对 SF 呈极显著正向驱动,直接路径系数为0.71,间接路径系数为0.10,以直接影响为主; RH 对 SF 呈显著负向影响,直接路径系数为-0.27,以直接影响为主; T_a 、 VPD 、 WS 对 SF 的直接效应均未达显著水平($P>0.05$)。土壤水中,中层土层含水率($M200$)对 SF 表现为极显著正向直接作用,直接路径系数为0.52,间接路径系数为-0.07;地下水位(GWL)、浅层土层含水率($M50$)与深层土层含水率($M200$)对 SF 的直接效应均未达显著水平($P>0.05$),间接路径系数分别为-0.07、-0.23、0.24。路径分析结果显示,不显著的因子均可通过间接路径对旱柳液流产生影响。 GWL 通过影响土层含水率对 SF 产生正向间接效应,路径系数为0.24,总效应达0.39。 R_s 则通过 T_a 和 RH 对 SF 产生间接效应; T_a 、 VPD 、 WS 等气象因子通过影响 RH 、 R_s 间接调控 SF ; $M50$ 、 $M500$ 通过影响 $M200$ 对 SF 产生负向间接效应。

2.2.2 旱柳液流密度驱动因素的增强回归树模型分析

通过BRT模型计算得到试验期间各环境因素对旱柳液流密度通量的贡献(图5),折线图表示在其他自变量均取平均值时,旱柳液流密度随该自变量的变化趋势。在各个环境因子中, R_s 是旱柳液流密度通量

最主要的贡献因素,相对贡献率 I_c 达到45.21%,主要贡献区间大于5000 w/m^2 ,当 R_s 低于5000 w/m^2 时,对旱柳液流密度起抑制作用。相对湿度 RH 对旱柳液流主要起抑制作用,当相对湿度大于70%后,对旱柳液流的抑制作用快速增大。空气温度 T_a 对旱柳液流密度的主要贡献区间为17~22 $^{\circ}C$,相对贡献度为4.89%,整体的贡献水平比较低。当温度低于17 $^{\circ}C$ 或高于22 $^{\circ}C$ 时,空气温度对于旱柳液流主要起抑制作用。风速 WS 对于旱柳液流密度的相对贡献度为2.85%,对液流密度的影响程度较低,主要贡献区间为0.5~1 m/s。浅层土壤含水率整体水平偏低,对旱柳液流的贡献度为3.90%,相对贡献程度较低,对旱柳液流密度整体起抑制作用。中层土壤含水率与深层土壤含水率对旱柳液流贡献相对较高,相对贡献率分别为8.95%和11.78%,主要贡献区间分别大于0.15和0.12。地下水位的相对贡献率为5.27%,主要贡献区间小于6.4 m,当地下水位埋深大于6.8 m时,地下水位对旱柳液流密度起抑制作用。

3 讨论

3.1 地下水位对旱柳液流影响机理阐释

研究表明,毛乌素沙地旱柳采用多因子协同

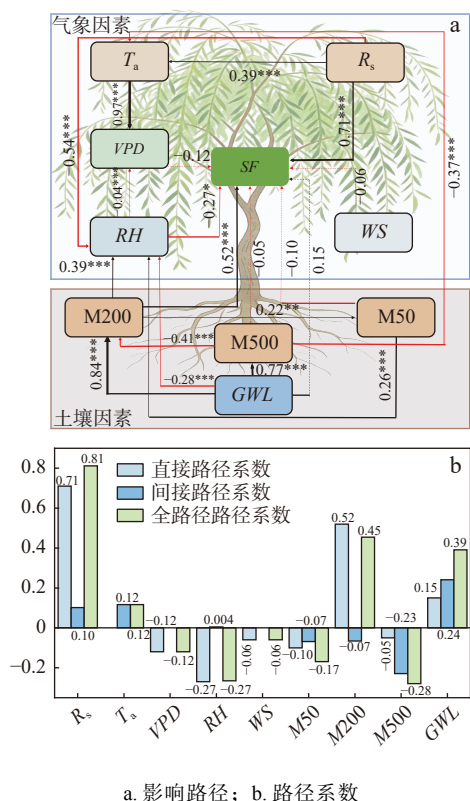


图4 气象、土壤水和地下水对旱柳液流密度的影响

Fig. 4 Effects of meteorological factors, soil moisture and water table on sap flow of *Salix matsudana* Koidz

驱动的水分利用策略。旱柳对土壤水的水分利用策略主要表现为以稳定性优先为核心,多种环境因素协同调控的特征,主要利用中层土壤和深层土壤的水分,有效规避了表层土壤水受降水脉冲式补给带来的波动性与不确定性,从而维持水分供应的持续性与可靠性。旱柳优先利用中深层土壤水的水分利用策略,反映了其对研究区干旱生境与水分分布的生态适应。毛乌素沙地风沙土质地疏松,砂粒含量高、孔隙结构发达,整体呈现保水能力差、毛管上升高度有限的水文特征(张强等, 2004; 成龙等, 2024)。地下水原位监测数据(图 3b)显示,研究区地下水埋深稳定在 6.15~7.32 m,而旱柳主要吸水根系集中分布在 2.5~4.5 m 土层(乔冈等, 2026),且根系主体与潜水面之间存在较厚干燥包气带。这些特殊土壤物理结构决定了该区植物极难通过根系直接利用地下水,而是依托“地下水-土壤水-植被”水文传导链来汲取地下水。研究区风沙土包气带内存在连续的基质势梯度(刘秀花等, 2024),地下水位抬升时,潜水面与根系层的基质势梯度明显增大,水分垂向上传导通量提升,根系层土壤水分利用率增加,旱柳液流密度升高;地下

水位下降时,土水势梯度减小,包气带水分向上运移能力减弱,根系层水分供给不足,植株水分供需失衡,液流密度受到抑制。许文豪等(2018)在研究环境因素对毛乌素沙地旱柳树干液流的影响时也发现类似规律,充分表明干旱区植被以基质流为主的地下水利用方式,展现了旱柳可主动适应地下水埋深变化以及其对干旱半干旱区降水时空分布不均、大气蒸发需求旺盛等区域环境特征的综合适应能力。这一结果也印证了地下水可以通过改变土壤水分供给条件,调控植物生长过程(赵亚迪等, 2018)。

3.2 表层土壤水分与旱柳液流密度负相关机理阐释

研究发现,表层土壤含水率对旱柳液流密度贡献程度较低,这一现象是因为表层土壤含水率与降水事件存在直接关联,降水事件会削弱太阳辐射、提升大气湿度,降低叶片蒸腾需求,进而抑制液流活动(刘勇等, 2025; 尤勇刚等, 2026)。毛乌素沙地表层土壤为风沙土,保水性差、水分初始入渗速率快(张强等, 2004; 成龙等, 2024),降水入渗形成的表层土壤水持续时间短,难以被旱柳根系有效吸收利用(宁婷等, 2015),反而会通过降低土壤通气性,抑制浅层根系呼吸与吸水活性(王淑芬等, 2006);旱柳作为深层根系树种,其水分利用策略以优先吸收深层土壤水与地下水为主(乔冈等, 2026),对表层土壤水的依赖性极低,表层土壤水的变化无法对其水分供给产生正向贡献。这一结果揭示了干旱风沙土区乡土树种水分利用的特征,即植被对表层不稳定水分的利用效率极低,主要依赖深层稳定的土壤水与地下水维持生理活动,这与黄土丘陵区撂荒坡地土壤水水循环特征的研究结论相呼应(宁婷等, 2015),反映了干旱区植被对土壤水分异质性的适应性分化。

研究发现,表层土壤水分与旱柳液流密度呈负相关的规律,与已有研究“表层水分升高促进植被蒸腾”的结论存在分歧。主要原因是前人研究针对的是沙蒿、油蒿等浅根灌木(宋炳煜等, 1997; 何维明等, 2001; 曹恭祥等, 2020)或是农作物(刘昌明等, 1992),研究对象均为无稳定地下水补给的浅层根系植物,所得出的结论不适用于存在浅层地下水补给的沙地乔木系统。本研究明确了沙地乔木对地下水分利用的特有机制,阐明了干旱半干旱区植被与地下水之间的关系,弥补了仅依托单一环境因子评判植被液流密度变化规律的局限,可对西北同类风沙区生态水文过程研究与植被修复提供相关理论参考。

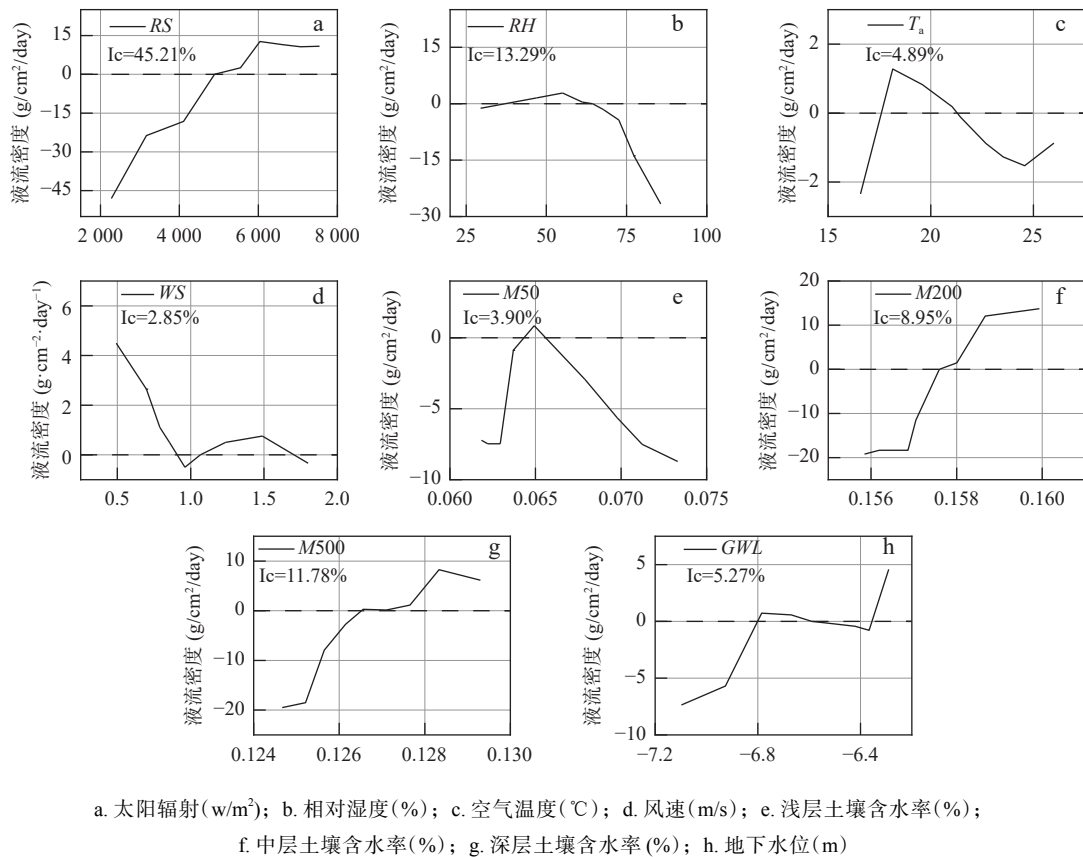


图5 环境因素贡献度分析

Fig. 5 Contribution analysis of environmental factors

3.3 旱柳液流密度动态变化规律与主要气象因素

研究发现,旱柳液流密度呈现9月>6月>8月>7月的变化特征,9月液流密度均值明显高于6~8月。旱柳液流密度月尺度分异是 R_s 、 RH 、 VPD 、 T_a 等因素综合调控的结果。 R_s 是核心正向驱动因子,总路径系数为0.81; RH 是主要抑制因子,总路径系数为-0.27; VPD 为次要抑制因子,总路径系数为-0.12; T_a 发挥弱驱动作用,总路径系数为0.12(图4)。6~9月土壤含水率无明显月际波动,地下水位变幅微弱(图3),水分供给充足,风速及其他气象因子对旱柳月平均液流密度影响不明显。 R_s 、 RH 、 VPD 、 T_a 是旱柳液流密度的主要影响因子,是其出现月均差异的主导因素。

气象因素随时间变化规律(图2)显示,9月 R_s 供给充足, RH 、 VPD 两类抑制因子处于偏低水平,避免了6月高 VPD 、7月高 RH 造成的抑制作用以及8月低 R_s 导致的驱动力明显减弱的现象,且该时段 T_a 适宜(图2),无极端高温环境产生气孔胁迫(Waseem et al., 2024),月平均液流密度达到研究时段峰值。这与前人提出的黄土沙区柳属植被多在生长季后期出现耗水峰值的研究结论相互印证(刘潇潇等, 2017),

进一步证实9月旱柳液流密度出现峰值与该时段温湿均衡、辐射适中的环境条件有关。

从单一因子作用机制角度分析,本研究证实 RH 对旱柳液流密度具有明显抑制作用,该观测结果与现有研究结论一致(彭小平等, 2013),表明雨季湿度升高会显著降低沙生柳树蒸腾耗水。本研究 VPD 与旱柳液流呈负相关关系,这与前人结论存在差异(徐丹丹等, 2017),产生差异的原因是 VPD 对旱柳液流的调控存在阈值,当 VPD 小于调控阈值时促进液流密度,超过阈值时则抑制液流密度。本次试验时空范围内的 VPD 超过了该阈值,与旱柳液流呈负相关关系,前人的研究中 VPD 则始终未超过该阈值(徐丹丹等, 2017),在研究时段内与旱柳液流呈正相关关系。这一现象与已有研究的观测结果一致(杨睿智等, 2019),共同印证 VPD 对旱柳液流的调控机制存在临界阈值。

3.4 气象因子-土壤水-地下水驱动下旱柳水分利用

旱柳液流密度的动态变化并非受单一环境因子独立驱动,而是气象因素、土壤水分与地下水共同作用的结果。太阳辐射为液流密度提供了能量驱动,相对湿度形成大气蒸发约束,土壤水与地下水则决定可

利用水分的供给能力,三者协同塑造了液流密度的日变化规律。降水、土壤水(浅层 $M50$ 、中层 $M200$ 、深层 $M500$)与地下水共同构成旱柳可利用水分的供给体系,浅层土壤水为旱柳根系快速吸收提供即时水分支撑,中层与深层土壤水则保障水分供给的稳定性,地下水是深层水分补给来源,扩大了可利用水分阈值。与此同时,旱柳还可通过气孔调节、水力结构调整等生理过程(何维明等, 2001; 乔冈等, 2026),对环境因子变化做出主动适应性响应,进一步增强其在复杂异质环境下的生存与适应能力。旱柳的生理调控过程与环境因子、水分供给相互协同,共同保障了旱柳在毛乌素沙地干旱、半干旱生境下的正常生长与生态功能发挥。

4 结论

(1)平均液流密度并非随气温的升高而单调增加,而是在气象因子、水分供给、植被生理特征三者协同作用下呈现出明显的时间分异,表现为9月>6月>8月>7月的非单调变化规律。

(2)在气象-土壤水-地下水协同作用下,旱柳形成了深层水分依赖的利用策略,优先利用深层土壤水及地下水,对降雨形成的表层土壤水利用效率极低,实现了水分利用的稳定性优先。

(3)气象因子与地下水、土壤水对旱柳液流密度存在双重调控,既可以通过降水等直接影响液流密度,又可利用地下水-深层土壤水-植被液流水文传导链,间接调控旱柳液流密度。

(4)本研究仅监测生长季,缺乏全年连续数据,难以揭示旱柳液流完整季节与年际变化;缺乏对植株根系分布的定量分析,无法精确解析根系吸水贡献与分层调控机制。未来应开展全年原位连续监测,并结合根系观测技术量化吸水贡献,为区域植被适应性管理提供更全面依据。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

曹恭祥,王云霓,郭中,等.六盘山南侧华北落叶松人工林蒸腾

对土壤水分和潜在蒸散的响应[J].应用生态学报, 2020, 31(10): 3376-3384.

CAO Gongxiang, WANG Yunni, GUO Zhong, et al. Response of transpiration to soil water content and potential evapotranspiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the south of Liupan Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3376-3384.

成龙,吴波,贾晓红,等.基于连续观测数据的毛乌素沙地生长季土壤水分动态及其对降雨的响应[J].干旱区地理, 2024, 47(4): 648-661.

CHENG Long, WU Bo, JIA Xiaohong, et al. Soil moisture dynamics and its response to rainfall during growing season based on continuous observation data in Mu Us Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(4): 648-661.

符超峰,赵景波,卞子浩,等.毛乌素沙地中部不同类型沙丘土壤水分分布特征[J].地球科学与环境学报, 2015, 37(4): 74-83.

FU Chaofeng, ZHAO Jingbo, BIAN Zihao, et al. Soil moisture distribution characteristics of different types of sand dunes in the central Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(4): 74-83.

何维明,董鸣.不同气温条件下旱柳(*Salix matsudana* Koidz)幼苗的水分和构型特征[J].生态学报, 2001, 21(7): 1084-1090.

HE Weiming, DONG Ming. Water status and architectural characteristics of *Salix matsudana* Koidz. seedlings under different air temperatures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7): 1084-1090.

黄金廷,尹立河,董佳秋,等.毛乌素沙地地下水浅埋区沙柳蒸腾对降水的响应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 217-222+228.

HUANG Jinting, YIN Lihe, DONG Jiaqiu, et al. Response of *Salix psammophila* transpiration to precipitation in shallow groundwater area of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(11): 217-222+228.

焦峰,温仲明,陈云明,等.基于GIS的安塞县土壤水分制图及其数量分析[J].中国水土保持科学, 2006, 4(1): 75-80.

JIAO Feng, WEN Zhongming, CHEN Yunming, et al. Soil moisture mapping and quantitative analysis in Ansai County based on GIS[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(1): 75-80.

李成,李兆哲,王让会,等.基于增强回归树的麦-玉轮作农田蒸散影响因素分析[J].农业机械学报, 2023, 54(1): 317-25.

LI Cheng, LI Zhaozhe, WANG Ranghui, et al. Analysis of influencing factors of evapotranspiration in wheat-maize rotation farmland based on boosted regression tree[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 317-325.

- 李志熙, 廖允成, 白岗栓. 毛乌素沙地植被特征与建设[J]. 水土保持通报, 2005, 25(5): 70-74+78.
- LI Zhixi, LIAO YunCheng, BAI Gangshuan. Vegetation characteristics and construction of Mu Us Sandy Land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(5): 70-74+78.
- 刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算[J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 255-263.
- LIU Changming, DOU Qingchen. Calculation of evapotranspiration in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) model[J]. Advances in Water Science, 1992, 3(4): 255-263.
- 刘磊, 李小雁, 蒋志云, 等. 青海湖流域不同海拔高度土壤水分时空变化特征[J]. 资源科学, 2017, 39(2): 263-275.
- LIU Lei, LI Xiaoyan, JIANG Zhiyun, et al. Spatiotemporal variation characteristics of soil moisture at different altitudes in Qinghai Lake Basin[J]. Resources Science, 2017, 39(2): 263-275.
- 刘潇潇, 李国庆, 闫美杰, 等. 黄土高原主要树种树干液流研究进展[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 369-373.
- LIU Xiaoxiao, LI Guoqing, YAN Meijie, et al. Research Progress on Sap Flow of Main Tree Species on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 369-373.
- 刘秀花, 田书林, 马延东, 等. 毛乌素沙地包气带气态水同位素特征及其运移规律[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 112-120.
- LIU Xiuhua, TIAN Shulin, MA Yandong, et al. Isotopic characteristics and migration of water vapor in the vadose zone of Mu Us Sandy Land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 112-120.
- 雒宇, 马莉, 靳川, 等. 毛乌素沙地油蒿光合电子传递速率生长季动态及其对环境因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 54-62.
- LUO Yu, MA Li, JIN Chuan, et al. Growing season dynamics of photosynthetic electron transport rate of *Artemisia ordosica* and its response to environmental factors in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 54-62.
- 刘勇, 张欣, 魏良帅, 等. 长江源气候变化及生态植被变迁分析[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 257-269.
- LIU Yong, ZHANG Xin, WEI Liangshuai, et al. Analysis of Climate Change and Vegetation Change in the Yangtze River Source[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 257-269.
- 马鑫, 秦富仓, 李龙, 等. 黄土丘陵区山杏人工林蒸腾速率与环境因子的关系[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(12): 146-154.
- MA Xin, QIN Fucang, LI Long, et al. Relationship between transpiration rate of *Prunus sibirica* plantation and environmental factors in loess hilly region[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(12): 146-154.
- 宁婷, 郭忠升. 半干旱黄土丘陵区撂荒地土壤水分循环特征[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5168-5174.
- NING Ting, GUO Zhongsheng. Characteristics of soil water cycle in abandoned sloping lands in semi-arid loess hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5168-5174.
- 彭小平, 樊军, 米美霞, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同立地条件下旱柳树干液流差异[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 38-45.
- PENG Xiaoping, FAN Jun, MI Meixia, et al. Sapflow Dynamic Changes of *Salix matsudana* in the Water-Wind Erosion Crisscross Region on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(9): 38-45.
- 乔冈, 尹立河, 徐永, 等. 毛乌素沙地地下水动态对旱柳根系吸水的影响机制[J]. 地学前缘, 2026, 33(1): 39-49.
- QIAO Gang, YIN Lihe, XU Yong, et al. Influence mechanism of groundwater dynamics on root water uptake of *Salix matsudana* in Mu Us Sandy Land[J]. Earth Science Frontiers, 2026, 33(1): 39-49.
- 宋炳煜. 草原群落蒸发蒸腾的研究[J]. 气候与环境研究, 1997, 2(3): 25-38.
- SONG Bingyu. A study on evapotranspiration of grassland communities[J]. Climatic and Environmental Research, 1997, 2(3): 25-38.
- 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32.
- WANG Shufen, ZHANG Xiying, PEI Dong. Effects of different water supply conditions on root distribution, yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 27-32.
- 温忠麟, 侯杰泰, 马什赫伯特. 结构方程模型检验: 拟合指数与卡方准则[J]. 心理学报, 2004, 36(2): 186-194.
- WEN Zhonglin, HOU Jietai, Herbert W. Marsh. Structural equation model testing: fit indices and chi-square criteria[J]. Acta Psychologica Sinica, 2004, 36(2): 186-194.
- 谢俊杰, 王秀丽, 李恒凯. 基于SEM的水利工程移民安置意愿影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2025, (7): 164-171.
- XIE Junjie, WANG Xiuli, LI Hengkai. Analysis of influencing factors on resettlement willingness of water conservancy project immigrants based on SEM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2025, (7): 164-171.
- 徐丹丹, 尹立河, 侯光才, 等. 毛乌素沙地旱柳和小叶杨树干液流密度及其与气象因子的关系[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 375-382.
- XU Dandan, YIN Lihe, HOU Guangcai, et al. Relationship between Sap Flow Density of *Salix matsudana* and *Populus simonii* and Meteorological Factors in the Mu Us Sandland[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 375-382.
- 徐同仁, 刘绍民, 李小雁, 等. 北京师范大学生态水文与水资源研究进展与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2025, 61(1): 24-33+127.
- XU Tongren, LIU Shaomin, LI Xiaoyan, et al. Progress and prospect

- of ecohydrology and water resources research at Beijing Normal University[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2025, 61(1): 24–33, 127.
- 许文豪, 尹立河, 贾伍慧, 等. 环境因素对毛乌素沙地旱柳树干液流的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 102–108+116.
- XU Wenhao, YIN Lihe, JIA Wuhui, et al. Analysis of environmental factors on sap flow of *Salix matsudana* in Mu Us Sandy Land[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, 45(2): 102–108+116.
- 徐永, 聂浩刚, 冀显坤, 等. 陕北榆林地区植被好转背景下面临的生态环境新挑战[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 308–318.
- XU Yong, NIE Haogang, JI Xiankun, et al. Ecological Risk of Yulin Area in Northern Shaanxi Under the Condition of Vegetation Coverage Improving[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 308–318.
- 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 Ruizhi, MA Jingyong, LIANG Chunxuan, 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.
- 尹立河, 黄金廷, 王晓勇, 等. 毛乌素沙地地下水与旱柳的相互作用[J]. 地质论评, 2015, 61(S1): 57.
- YIN Lihe, HUANG Jinting, WANG Xiaoyong, et al. Interaction between groundwater and *Salix matsudana* in Mu Us Sandy Land[J]. Geological Review, 2015, 61(S1): 57.
- 尹立河, 黄金廷, 王晓勇, 等. 毛乌素沙地4种植物叶水势变化及其影响因素分析[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(1): 17–23.
- YIN Lihe, HUANG Jinting, WANG Xiaoyong, et al. Changes of leaf water potential of four plant species and its influencing factors in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2016, 25(1): 17–23.
- 尤勇刚, 秦于倩, 高荣, 等. 毛乌素沙地沙柳枝条液流特征及其对环境因子的响应[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2026, 24(2): 139–150.
- YOU Yonggang, QIN Yuqian, GAO Rong, et al. Sap flow characteristics of *Salix psammophila* branches and their response to environmental factors in Mu Us Sandy Land[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026, 24(2): 139–150.
- 张强, 孙向阳, 黄利江, 等. 毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(S1): 9–14.
- ZHANG Qiang, SUN Xiangyang, HUANG Lijiang, et al. Study on soil water characteristic curve and infiltration capability in Mu Us Sandy Land[J]. Forest Research, 2004, 17(S1): 9–14.
- 张亚峰, 潘颜霞, 霍建强, 等. 人工固沙植被系统生态水文研究进展[J]. 中国沙漠, 2025, 45(3): 50–59.
- ZHANG Yafeng, PAN Yanxia, HUO Jianqiang, et al. Research progress in ecohydrology of artificial sand-fixing vegetation systems[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3): 50–59.
- 赵宣, 韩霁昌, 王欢元, 等. 毛乌素沙漠—黄土高原过渡带土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7446–7452.
- ZHAO Xuan, HAN Jichang, WANG Huanyuan, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in the transitional zone between Mu Us Desert and Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7446–7452.
- 赵亚迪, 刘永和, 李建林, 等. 1960—2013年中国地表潜在蒸散发时空变化及其对气象因子的敏感性[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(3): 1–9.
- ZHAO Yadi, LIU Yonghe, LI Jianlin, et al. Spatiotemporal variation of surface potential evapotranspiration and its sensitivity to meteorological factors in China during 1960–2013[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2018, 12(3): 1–9.
- 郑永宏, 张芸毓, 王丹, 等. 庐山日本柳杉径向生长对气候响应的边际效应[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(7): 63–69.
- ZHENG Yonghong, ZHANG Yunyu, WANG Dan, et al. Marginal effects of radial growth of *Cryptomeria japonica* on climate in Lushan Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(7): 63–69.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[Z]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 17–27.
- Bentler P M. Comparative fit indexes in structural models[J]. Psychological Bulletin, 1990, 7(2): 238–246.
- Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309–320.
- Han M, Guo Y F, Zhang C F, et al. Multivariate analysis of soil particle size distribution and spatial correlation with soil moisture characteristics in different vegetation types of Mu Us Sandy Land[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 25659.
- Waseem M, Yao G Q, Hasan M M, et al. Divergent hydraulic and gas-exchange strategies in two closely related *Salix* species[J]. Journal of Plant Ecology, 2024, 17(6).
- Zhou J X, Wang Y Q, Tong Y P, et al. Regional spatial variability of soil organic carbon in 0–5 m depth and its dominant factors[J]. Catena, 2023, 231: 12.
- Zhao M, Wang W K, Wang Z F, et al. Water use of *Salix* in the variably unsaturated zone of a semiarid desert region based on in-situ observation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125579.