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

不同降水梯度下黄土高原油松人工林蒸腾特征及其生物物理响应

吴慧杰 汪海娇 许行 张志强

Transpiration characteristics and biophysical response of *Pinus tabuliformis* plantations on the Loess Plateau of northern China under different precipitation gradients

Wu Huijie, Wang Haijiao, Xu Hang, Zhang Zhiqiang

引用本文:
吴慧杰, 汪海娇, 许行, 张志强. 不同降水梯度下黄土高原油松人工林蒸腾特征及其生物物理响应[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10):42–53. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250068
Wu Huijie, Wang Haijiao, Xu Hang, Zhang Zhiqiang. Transpiration characteristics and biophysical response of *Pinus tabuliformis* plantations on the Loess Plateau of northern China under different precipitation gradients[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10):42–53. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250068

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250068

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

晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应
Response of radial growth of *Pinus tabuliformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 59–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240140

黄土高原高寒区不同人工林土壤养分及生态化学计量特征
Soil nutrients and ecostoichiometric characteristics of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau
北京林业大学学报, 2021, 43(1): 88–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200149

黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析
Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau
北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220381

黄土高原地区4种常见树种适宜区对气候变化响应
Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau region of northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 21–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220138

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

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
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
北京林业大学学报, 2024, 46(4): 127–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230209

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250068

不同降水梯度下黄土高原油松人工林蒸腾特征及其生物物理响应

吴慧杰[1,2] 汪海娇[1,2] 许 行[1,2] 张志强[1,2]
（1. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县 042200；2. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘要:【目的】黄土高原地区降水分布不均，常发生季节性干旱。本研究通过设置不同降水梯度，探讨油松人工林蒸腾特征及其对干旱的生物物理调节机制，以期为该地区油松人工林的经营管理与水资源合理配置提供实践思路。**【方法】**以黄土高原油松人工林为研究对象，采用热扩散液流探针技术，观测不同降水梯度下的油松蒸腾过程，并同步监测气象因子和土壤含水量，分析油松响应干旱的生物物理调节机制。**【结果】**(1)减雨处理显著降低了土壤含水量。小时尺度上，油松蒸腾速率呈单峰型变化，与蒸腾驱动因子的昼夜节律一致；季节尺度上，高水分条件下油松蒸腾速率变化幅度较大。两种尺度下，减雨处理均导致蒸腾速率下降。(2)不同降水条件下，油松日蒸腾量受气象因子的综合调控，太阳辐射和饱和水汽压差是主要环境驱动因子。(3)减雨处理不仅降低了油松冠层导度，还减弱了冠层导度对饱和水汽压差的敏感性；但在不同降水条件下，样地内油松仍具有较强的气孔调节能力。**【结论】**减雨处理显著降低了油松的蒸腾速率。除主要环境因子(太阳辐射、饱和水汽压差)外，油松还依赖较强的气孔调节来控制蒸腾，从而提高对干旱环境的适应能力。研究结果有利于深化理解干旱情境下油松人工林蒸腾耗水进程的变化规律。

关键词：黄土高原；油松；干旱；蒸腾；环境响应；生态水文
中图分类号：S791.254；S715 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)10−0042−12
引文格式：吴慧杰，汪海娇，许行，等. 不同降水梯度下黄土高原油松人工林蒸腾特征及其生物物理响应［J］. 北京林业大学学报，2025，47(10)：42−53. Wu Huijie, Wang Haijiao, Xu Hang, et al. Transpiration characteristics and biophysical response of *Pinus tabuliformis* plantations on the Loess Plateau of northern China under different precipitation gradients［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 42−53.

Transpiration characteristics and biophysical response of *Pinus tabuliformis* plantations on the Loess Plateau of northern China under different precipitation gradients

Wu Huijie[1,2] Wang Haijiao[1,2] Xu Hang[1,2] Zhang Zhiqiang[1,2]
(1. National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County, Jixian 042200, Shanxi, China;
2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］ The Loess Plateau is characterized by uneven precipitation distribution, with frequent seasonal droughts. This study aims to explore the characteristics of transpiration and the biophysical regulation mechanisms in response to drought of *Pinus tabuliformis* plantations by setting up different precipitation gradients. The findings were expected to provide practical insights for the management of *P.*

收稿日期: 2025−03−03 **修回日期:** 2025−05−19
基金项目: 国家自然科学基金项目(32271967、32301664)，国家重点研发计划(2022YFF1302501)，国家林业与草原局揭榜挂帅项目(202401-07)，中国科协青年人才托举工程(YESS20230091)。
第一作者: 吴慧杰。主要研究方向：生态水文。Email：18274876774@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 许行，博士，副教授。主要研究方向：生态水文。Email：hangxu@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

tabuliformis plantations and the rational allocation of water resources in this region. [**Method**] Taking the *P. tabuliformis* plantations on the Loess Plateau as the research object, the thermal dissipation probe (TDP) technique was employed to monitor the transpiration process of *P. tabuliformis* under different precipitation gradients. Meanwhile, meteorological factors and soil water content were synchronously measured to analyze the biophysical regulation mechanisms of *P. tabuliformis* in response to drought. [**Result**] (1) Rainfall reduction treatment significantly decreased soil water content. At the hourly scale, the transpiration rate of *P. tabuliformis* showed a single-peak pattern, consistent with the diurnal rhythm of transpiration-driving factors; at the seasonal scale, the transpiration rate of *P. tabuliformis* exhibited a relatively large variation amplitude under high moisture conditions. At both scales, rainfall reduction led to a decline in transpiration rate. (2) Under different precipitation conditions, the daily transpiration of *P. tabuliformis* was comprehensively regulated by meteorological factors, among which solar radiation and vapor pressure deficit were the main environmental driving factors. (3) Rainfall reduction treatment not only decreased the canopy conductance of *P. tabuliformis* but also weakened the sensitivity of canopy conductance to vapor pressure deficit. However, under different precipitation conditions, *P. tabuliformis* in the sample plots still maintains a strong stomatal regulation capacity. [**Conclusion**] Rainfall reduction significantly reduces the transpiration rate of *P. tabuliformis*. In addition to the main environmental factors (solar radiation and vapor pressure deficit), *P. tabuliformis* relies on strong stomatal regulation to control transpiration, thereby enhancing its adaptability to drought conditions. The conclusions of this study are conducive to deepening the understanding of variation law of transpiration water consumption process of *P. tabuliformis* plantations under drought conditions.

Key words: the Loess Plateau; *Pinus tabuliformis*; drought; transpiration; environmental response; ecohydrology

黄土高原是中国重要的生态功能区之一，该地区年降水量相对较低，且主要集中在夏季，植被生长对水分需求较为敏感[1]。频繁的干旱事件加剧了水资源短缺，气候变化导致干旱事件的频率和强度不断上升，这进一步加重了黄土高原生态系统的脆弱性，既威胁植物的生存，又加剧水土流失，引起生态系统服务功能的退化，因此黄土高原地区的生态修复问题已成为亟待解决的关键任务[2−3]。但该地区地下水位较深，加之植被恢复耗水量增加，导致该地区植物可利用的水资源更加匮乏[4]，严重制约着区域内林木的生长进程。因此，围绕降水驱动下土壤含水量动态变化对植物自身生理过程影响及对环境因子响应的研究，对推进黄土高原生态修复和提高人工林的稳定性具有重要意义[5]。植物作为 SPAC 系统（土壤—植物—大气连续体）中参与水分运移的关键纽带，对区域内水分分配和利用有重要影响[6]。以往研究[7]表明，树木叶片蒸腾耗水可高达总耗水量的 90% 以上，是其水分消耗的最主要形式；根系吸收的水分通过树干边材以液流形式进行向上运输，在这个过程中，超过 99.8% 的水分最终用于支持叶片蒸腾作用。

植物的蒸腾受到多种环境因素的影响，降水作为干旱半干旱地区植物利用水分的主要补给来源，对林分蒸腾具有显著影响[8]。树木蒸腾与降水通常呈正相关[9]。例如，Wullschleger 等[10]的研究显示，通过对样地进行增雨（+33%）和减雨（−33%）处理，蒸腾量发生了显著变化，其中增雨处理下，2000—2002 年季节蒸腾量平均增加 9%，而减雨处理中，季节性蒸腾量减少 26% ~ 30%。Fisher 等[11]在亚马逊东部盆地的研究表明，降水量减少 50% 时，树干液流减少了 41%，而在严重干旱期间树干液流降低了 80%。但也有研究显示，降水减少对植物蒸腾作用的影响并不显著[12]，或短期内并未立刻影响植物的蒸腾耗水量[13]，这种现象或归因于不同树种间的特性差异。此外，在植物蒸腾与其他环境要素的研究中，发现太阳辐射与植物蒸腾有着相似的昼夜变化规律[14]，日间随着太阳辐射的上升，树木的蒸腾作用也会不断增强，到达峰值后随太阳辐射的减弱不断减小。饱和水汽压差是反映大气干燥程度的综合参数，存在一定的昼夜规律，在对植物蒸腾作用的影响方面与太阳辐射有所差异，其通过直接影响叶片内外水汽压差来调控植物气孔的开闭状况，进而影响蒸腾[15]。

植物蒸腾不仅受到太阳辐射、饱和水汽压差等环境因子的影响，也会受到植物自身生理特性的影响。气孔的开闭影响着植物与外界的水气交换过程[16]，通常植物在面对外界环境变化时会通过调节

气孔来影响蒸腾。而树木的冠层是森林与大气进行水分交换的核心区域。冠层导度本质上是将叶片气孔导度扩大到整个林冠层面，能够综合反映森林冠层的结构特征与气孔活动状态[17]，同时受到多种因素的综合调控[18]。Yu 等[19]研究发现，干旱胁迫下，植物气孔导度随土壤水分的减少显著下降。树种蒸腾响应特征的不同，可能是因为气孔调节方式存在差异，而气孔行为与植物水分利用策略密切相关[20]。干旱情况下，等水势树木通过关闭气孔减少水分散失，从而维持较为稳定的水分状态，同时通过降低气孔开度避免木质部因失水过多而处于较大的负压状态，在一定程度上可降低木质部发生栓塞的风险，从而保护木质部水分运输功能并提高树木对干旱的适应能力[21−22]。与之相反，非等水势树木的气孔调节较弱，持续干旱可能导致其木质部栓塞[23]。但树木在不同环境下的水分利用策略并非一成不变，也可能是在两种状态之间不断转化[24]。研究不同降水条件下植物的气孔调节方式对评估黄土高原人工林应对多变环境时生态系统的稳定性具有重要意义。

在黄土高原地区，油松(*Pinus tabuliformis*)在水土保持、防风固沙及改善环境等方面发挥了重要作用[25]。面对多变的降水格局，分析油松的蒸腾特征和生理特性及其对环境因子的响应规律对于生态保护和水资源管理具有重要意义。以往关于监测油松蒸腾耗水及其如何响应不同降水条件与土壤水分梯度的定量研究尚显不足，油松如何通过调节气孔应对环境变化的机制还不明确。本研究以黄土高原油松人工林为研究对象，拟通过人工减雨及增雨措施，定量分析不同降水梯度下油松人工林蒸腾变化与水分生理响应特征。研究将深入解析植物面临气候变化的适应能力，特别是黄土高原油松人工林对水分状况的响应机理，为黄土高原油松人工林的经营管理与水资源合理配置提供实践思路。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

观测样地位于山西省临汾市吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站红旗林场。山西吉县(110°27′ ~ 111°07′E，35°53′ ~ 36°21′N)属于黄土残塬沟壑和梁峁丘陵沟壑区，位于吕梁山南端西侧，属于暖温带半湿润褐土落叶阔叶林。降水呈现显著季节性特征，年均降水量 579 mm，年蒸发量 1 729 mm，年平均气温 9.9 ℃。地势东高西低，海拔 440 ~ 1 820 m。区域内主要有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、油松、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等乔木，林下灌木以连翘(*Forsythia suspensa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和荆条(*Vitex negundo*)为主。此外常见草本植物包括艾蒿(*Artemisia argyi*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等[26]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设

本研究于 2023 年 5 月在油松人工纯林中建立观测样地。将样地划分为 3 个 15 m × 15 m 的样方，分别设置为自然对照样方(CK)、100% 减雨样方(T1)和 200% 增雨样方(T2)。自然对照样方不进行人为干预；在 100% 减雨样方的油松冠层上方约 2 m 处安装透明挡雨板(透光率 98%)，形成完全遮雨条件，同时挡雨板向 200% 增雨样方倾斜；200% 增雨样方位于 100% 减雨样方旁，接收本样方降水及来自 100% 减雨样方挡雨板汇入的降水，形成双倍降水条件(图 1)。前期增雨样方存在一定的坡度，在后面的监测过程中对存在一定坡度的地方进行了处理使降水尽可能均匀分布以减小误差。为了避免样方之间的土壤水分交换干扰试验结果，样方之间的边界采用 PVC 挡板(地下深 2 m，地上高 0.5 m)隔离，同时设置倾斜挡板防止边界水分的干扰(图 1)。

1.2.2 环境因子获取

为探究气象因子对油松生长的影响，在样地周围的空旷平地设置自动气象监测站(Dynamax Inc.，Houston，TX，USA)，对生长季内(2023−06−15—2023−09−30)的气象因子进行监测，监测指标包括空气相对湿度(relative humidity，H，%)、空气温度(air temperature，T，℃)、太阳辐射(solar radiation，R_s，MJ/m^2)、降雨量(precipitation，P，mm)、风速(wind speed，W_s，m/s)。所有气象因子每 30 s 扫描 1 次，每



a 图为样方边界设置的倾斜挡板，防止样方外雨水干扰；b 图为样方边界高出地表的 PVC 挡板，防止样方之间的水分交换；c 图为减雨样方上方的透明挡雨板；d 图为减雨样方挡雨板向增雨样方倾斜的角度和方向示意图。

图 1 样地布设图

Fig. 1 Sample plot layout map

30 min 记录 1 次数据。日尺度的太阳辐射和降雨量为 24 h 的累积量。同时本研究采用饱和水汽压差（vapor pressure deficit，V_{PD}，kPa）来表征大气整体的水汽状况[27]，计算公式如下。

$$V_{PD} = 0.611 e^{\frac{17.502T}{T+240.97}} \times (1-H) \quad (1)$$

为监测不同样方之间土壤水分状况，使用水分传感器（RREC5，中国雨根）分别测定 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 的土壤含水量（VWC，%）。将数据采集器 EM50（Decagon Device Inc，Pullman，WA，USA）与传感器连接，每 30 min 记录一次。为探究不同降水条件下土壤含水量的变化状况，使用单因素方差分析（one-way analysis of variance，ANOVA）判断不同样方间土壤含水量是否存在显著差异。

1.2.3　样木选取与蒸腾量计算

根据径阶分布，选取 19 棵生长良好、树干通直和冠幅均匀健康的油松作为测量样木，样树基本信息如表 1 所示。其中，自然对照样方组为 7 株，其余 2 个样方组均为 6 株。

为避免样木受损，预先在样地外随机选取 20 株油松，测量胸径，并用生长锥在树干 1.3 m 处取样，区分样木的心材和边材，测量边材宽度，计算边材面积，通过预试验建立胸径与边材面积的回归关系。将样方内的样木胸径代入，计算样木的边材面积[28]。本研究中油松边材面积与胸径的拟合关系如下。

表 1　样树信息

Tab. 1　Sample tree information

处理	样木编号	胸径/cm	树高/m	边材面积/cm²
CK	1	7.51	3.70	19.96
	2	11.82	9.00	46.92
	3	15.61	9.50	79.24
	4	16.68	10.80	89.78
	5	18.78	10.80	112.25
	6	19.88	9.40	124.96
	7	22.62	9.40	159.38
T1（100%减雨）	1	8.30	8.70	24.10
	2	10.60	4.50	38.21
	3	13.90	9.50	63.68
	4	20.90	13.50	137.32
	5	18.30	10.50	106.91
	6	18.80	10.90	112.48
T2（200%增雨）	1	8.78	5.60	26.79
	2	11.50	8.40	44.55
	3	14.30	8.60	67.17
	4	16.20	6.80	84.97
	5	18.71	11.50	111.47
	6	18.81	9.40	112.59

$$A_S = 0.447 D^{1.884\,2} \quad (2)$$

式中：D 为胸径（cm），A_s 为边材面积（cm²）。

在 2023 年生长季（6 月 15 日—9 月 30 日），使用热扩散方法的 TDP 探针（雨根，中国）测定树干液流密度[29]。其中，树干外层木质部液流活动较为明显，更能反映自身的蒸腾耗水状况；为降低误差，根据样木的边材宽度确定相应的探针长度[30]。为降低方位差异带来的误差，统一将探针安装在样木北向 1.3 m 高处[31]。为避免外界因素影响测定结果，在探针与样木接触处用隔热铝箔缠绕。把数据采集器 CR1000（Campbell Scientific Inc.，Logan，UT，USA）和加热器进行连接，将程序设置为每 30 min 记录 1 次，对仪器进行定期维护，同时下载已记录的数据。使用 Baseliner 软件（Version 3.0.7，developed by Ram Oren，Duke University，USA）识别一天中上下两探针之间的最大温差值（ΔT_M），根据公式计算样木的液流速率（J_s），对液流零点进行校正[32−33]。

$$J_S = 0.011\,9\left(\frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231} \quad (3)$$

式中：ΔT 为两探针之间的瞬时温差值。

后续通过水分密度（ρ = 1 000 kg/m³）及样地的垂直投影面积可得林分尺度的蒸腾量（E_c，mm/d）：

$$E_c = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{48}(J_{i,j}A_{s,i})1\,800}{1\,000 A_G \rho} \times 1\,000 \quad (4)$$

式中：$J_{i,j}$ 为样地内第 i 个径阶的液流样木在一天内的第 j 个液流密度值（g/(cm²·s)），$A_{s,i}$ 为第 i 个径阶的边材总面积（cm²）。每 30 min 记录一次数据，一天内共有 48 个值，A_G 为样地面积（225 m²）。

1.2.4　蒸腾速率差异性分析

为了探究不同的降水条件对油松蒸腾速率的影响和蒸腾速率自身的变化规律，从小时尺度和季节尺度上进行了分析。小时尺度上，通过绘制 3 个样方油松蒸腾速率与太阳辐射和饱和水汽压差的变化曲线，分析不同样方之间蒸腾速率存在的差异与昼夜节律；季节尺度上，利用观测期间 3 个样方蒸腾速率的变化趋势，分析各组蒸腾速率之间存在的大小差异与蒸腾速率整体变化趋势。

1.2.5　蒸腾量驱动因子分析

为了分析不同环境因子对油松蒸腾量的影响差异，使用 3 个样方中的日蒸腾量与不同环境因子指标，利用 Amos 22.0 软件构建结构方程模型，绘制 3

个样方日蒸腾量与各个环境因子之间的模型路径图，用来确定环境因子对不同处理组油松蒸腾量的影响。

1.2.6 冠层导度计算与分析

油松的蒸腾作用一方面受环境因子驱动，另一方面也会因气孔开闭而改变。气孔作为植物与外界进行水气交换的关键通道，其开合状态直接影响整体蒸腾状况，由于冠层导度在一定程度上可综合反映植物气孔的活跃程度，因此它在调节植物蒸腾作用与水分交换的过程中发挥着关键作用，常被用来表征植物冠层物质与能量的交换过程[17]。基于此，可通过计算并分析油松冠层导度的变化探究其对蒸腾作用的影响。

利用彭曼公式的简化公式计算油松冠层导度（G_c，mm/s）[32]。

$$G_c = \frac{\lambda \gamma E_c}{\rho_0 C_p V_{PD}} \tag{5}$$

式中：λ 为水蒸发潜热（2 465 000 J/kg），γ 为干湿表常数（65.5 Pa/℃），ρ_0 代表空气密度（1.25 kg/m^3），C_p 代表空气热容量（1 010 J/(kg·℃)）。由于冠层导度在低饱和水汽压时计算相对不准确，因此剔除所有雨天数据及空气潮湿时（$V_{PD} < 0.6$ kPa）的数据。

为探究不同降水条件下油松冠层导度对饱和水汽压差的敏感性，利用边界线分析方法[34]研究冠层导度的生理调节作用，冠层导度与饱和水汽压差的方程如下。

$$G_c = -m \ln V_{PD} + G_{cref} \tag{6}$$

式中：m 为冠层导度对饱和水汽压差的敏感性[35]；G_{cref} 为参考冠层导度（mm/s）。同时通过分析敏感性 m 与 G_{cref} 的线性拟合斜率与理论值 0.6[36]的差异显著性，推测其气孔调节能力。当两者之间关系方程的斜率显著低于 0.6 时，植物的气孔调节能力较弱，在高蒸发需求与水分不足情况下更容易受到干旱胁迫的影响；反之，对于气孔调节能力较强的植物，在干旱环境下能够通过及时关闭气孔来减少水分的过度损失。

1.3 数据统计

运用 Excel 软件整理原始数据，使用 SPSS 22.0 进行回归分析，使用 Origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 环境因子的动态变化

2023 年生长季观测期间，6—9 月太阳辐射、空气温度和饱和水汽压差呈先升高后降低的趋势，最大值均出现在 7 月，分别为 23.28 MJ/(m^2·d)、36.35 ℃、4.64 kPa（图 2）。

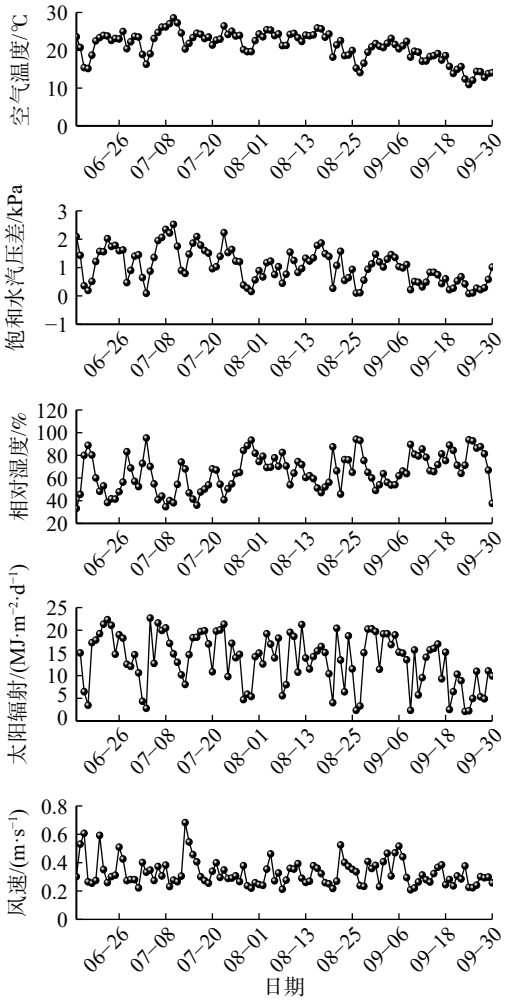


图 2 观测期间气象因子逐日变化

Fig. 2 Daily variations in meteorological factors during observation period

2023 年观测期间，林地总降水量为 253.75 mm，降水量呈逐月增加趋势。降水主要集中在 8、9 月，分别占比 28.83% 和 35.94%（图 3）。CK 和 T2 样方土壤含水量随降水的输入波动较大，降雨停止后，土壤含水量逐渐减少，直到下一次降雨补充水分，且整体上与降雨量逐月增加的变化趋势一致。相比之下，T1 样方由于没有降雨的补充，土壤含水量波动幅度较小，且均值显著低于 CK 和 T2 两个样方（$P < 0.05$）（表 2）。这表明降雨是影响 CK、T2 样方土壤含水量的关键因素，土壤含水量会随降雨量的变化同步波动；而 T1 样方因缺乏降雨补充，土壤含水量始终处于较低水平。

2.2 不同降水梯度下油松人工林蒸腾特征

2.2.1 小时尺度油松蒸腾速率变化

在生长季观测期间，3 个样方油松蒸腾速率小时尺度上随着太阳辐射和饱和水汽压差的增强逐渐增加，通常在 7:00 开始上升，峰值出现时间滞后于太阳辐射（约 13:00），达到峰值后，蒸腾速率随太阳辐射和饱和水汽压差的下降而逐步减小，变化趋势

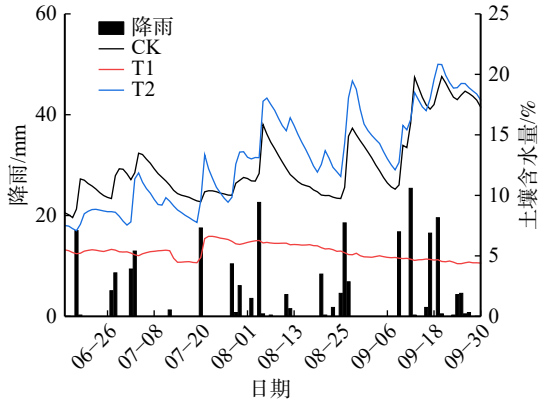


图 3　土壤含水量和降雨逐日变化

Fig. 3　Daily variations of soil water content and precipitation

表 2　平均土壤含水量（平均值 ± 标准差）

Tab. 2　Average soil water content (mean ± standard deviation)

处理	土壤含水量/%
CK	12.57 ± 3.04
T1	5.32 ± 0.62*
T2	13.11 ± 3.93

* 代表与对照相比在0.05水平上存在显著差异。

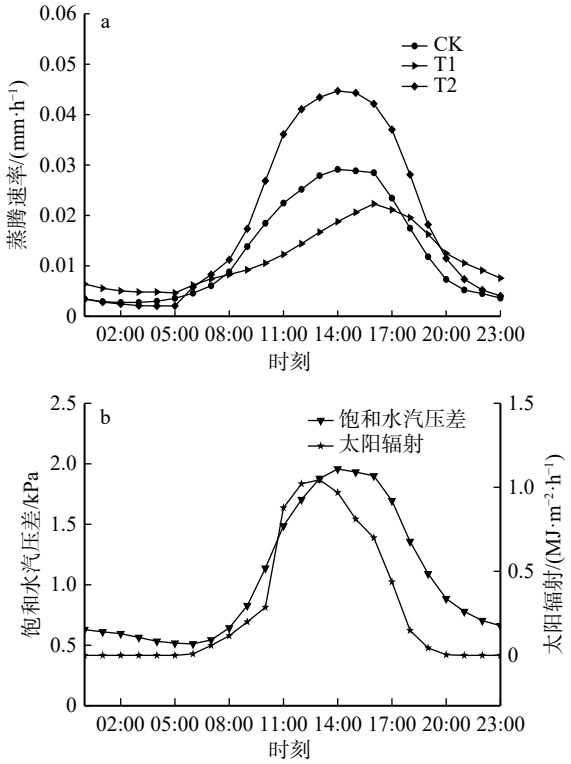


图 4　小时尺度环境因子与蒸腾速率变化

Fig. 4　Hourly scale variations of environmental factors and transpiration rate

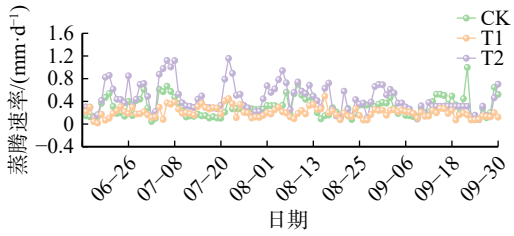


图 5　蒸腾速率逐日变化

Fig. 5　Daily variations of transpiration rate

呈单峰型(图 4)。3 个样方油松蒸腾速率峰值大小依次为 T2(0.04 mm/h) > CK(0.03 mm/h) > T1(0.02 mm/h); 此外, T1 下油松的蒸腾速率到达峰值时间(约 16:00)滞后于 CK、T2 样方(约 14:00)。这表明不同降水条件下, 油松蒸腾速率小时尺度变化受太阳辐射和饱和水汽压差调控, 呈“先升后降”的单峰型规律; 同时水分条件可影响油松蒸腾速率及峰值特征, 水分的减少降低了油松蒸腾速率, 同时延迟了峰值的出现。

2.2.2　油松蒸腾速率的季节动态

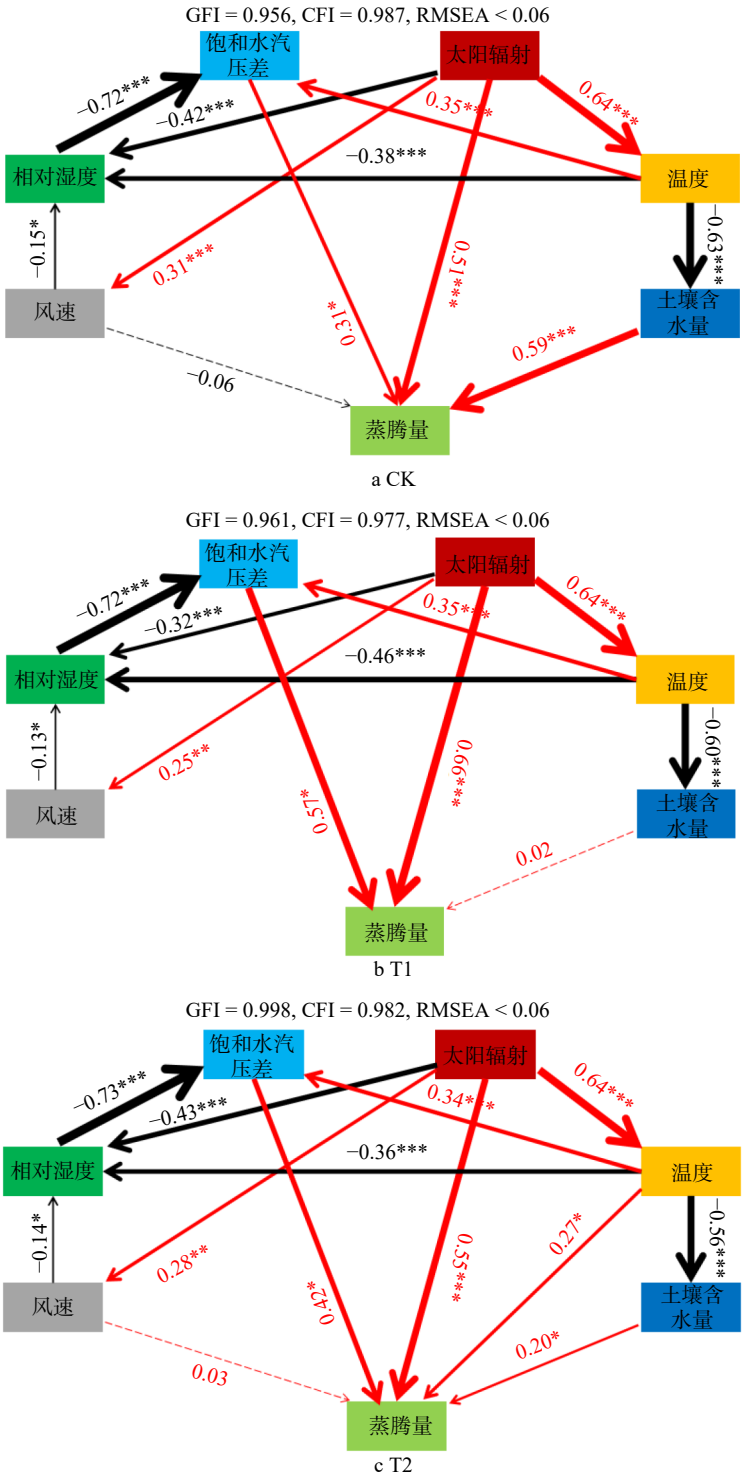
观测期间, T2 样方油松的蒸腾速率波动相对更明显, 且多数时段蒸腾速率高于 CK 和 T1 样方; CK 样方蒸腾速率也存在一定的波动, 但整体低于 T2; T1 样方的蒸腾速率相对较平稳, 且多数时段在 3 个样方中处于较低水平(图 5)。这表明油松蒸腾速率在季节尺度上也会因水分条件的不同出现波动和大小差异。水分条件充足时, 油松具有较高的蒸腾速率且随水分状况和大气条件的变化出现明显波动; 减雨处理则会降低油松的蒸腾速率与变化幅度。

2.3　不同降水梯度下油松人工林蒸腾量对环境因子的响应

通过分别构建 3 个样方油松日蒸腾量与环境因子的结构方程模型, 分析各个环境因子对蒸腾量的影响(图 6)。太阳辐射与 CK、T1、T2 样方日蒸腾量的标准化通径系数分别为 0.51、0.66 和 0.55, T1 处理下太阳辐射对油松蒸腾量的直接效应强于 CK 和 T2; 饱和水汽压差对 3 个样方日蒸腾量的标准化效应呈显著正相关, 系数大小为 T1(0.57) > T2(0.42) > CK(0.31), T1 处理下饱和水汽压差对日蒸腾量的影响增强; 土壤含水量对 T1 样方日蒸腾量的影响不显著, 对 CK、T2 样方日蒸腾量有显著影响; 风速对 3 个样方日蒸腾量的影响均不显著。以上结果表明, 在 3 个样方中, 太阳辐射和饱和水汽压差是影响日蒸腾量的主要环境因子; 而在减雨处理中, 相比太阳辐射和饱和水汽压差, 土壤含水量对油松日蒸腾量的调控作用减弱。

2.4　不同降水梯度下油松人工林冠层导度动态变化及气孔调节作用

在观测期间 6—9 月, 3 个样方油松冠层导度通常在清晨 5:00 左右随太阳辐射和饱和水汽压差的增加逐渐升高, 日变化整体呈先升高后降低的规律



GFI. 拟合良好性指标；CFI. 比较拟合指标；RMSEA.均方根近似误差；正效应为红箭头，负效应为黑箭头；结果显著为实线，不显著为虚线；*、**、***分别代表 $P < 0.05$、$P < 0.01$、$P < 0.001$。

图 6 环境因子与日蒸腾量间的结构方程模型

Fig. 6 Structural equation model between environmental factors and daily transpiration

（图 7）。其中 T2 样方冠层导度波动最明显，T1 样方整体波动较为平稳，且低于 CK 和 T2 样方；此外，8、9 月 CK 和 T2 样方的冠层导度高于 6、7 月，可能与太阳辐射、饱和水汽压差和土壤水分变化有关。这表明不同降水条件下，油松冠层导度日变化受太阳辐射和饱和水汽压差的影响，日变化整体呈先升高后降低的趋势；减雨处理会降低油松的冠层导度，与前文减雨处理对蒸腾速率的影响一致，在一定程度上说明油松蒸腾速率不仅受到环境因子的影响，还与自身冠层气孔的开放程度有关。

观测期间，经分析可知，3 个样方油松冠层导度对饱和水汽压差的响应呈负对数关系，随着饱和水

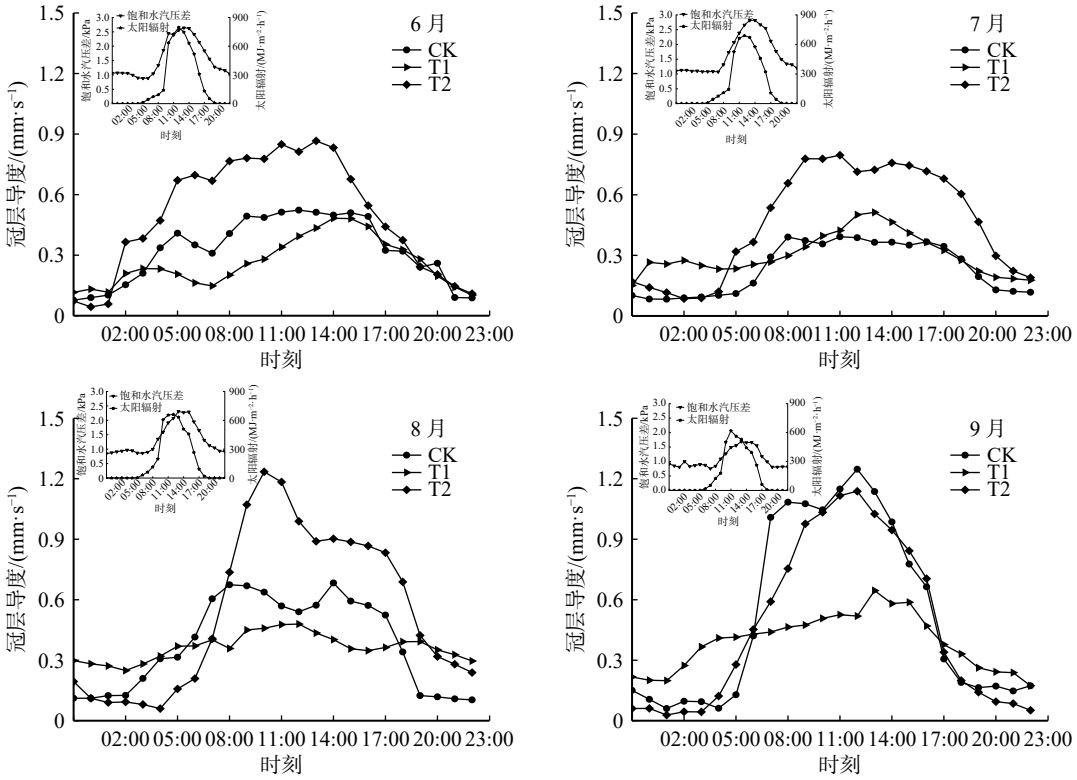


图 7　小时尺度冠层导度与环境因子变化

Fig. 7　Hourly scale variations of canopy conductance and environmental factors

汽压差的上升，冠层导度呈递减趋势；T1 样方油松冠层导度对饱和水汽压差的敏感性低于 CK、T2 样方(图 8)。油松参考冠层导度与敏感性之间的斜率为 0.54(R^2 = 0.72)，与理论值 0.6 的差异不显著(P > 0.05)。这表明减雨处理下油松冠层导度对饱和水汽压差的敏感性降低，但在不同降水条件下，油松仍然可以通过有效调节气孔的方式来维持体内水分稳定。

3　讨　　论

油松作为黄土高原地区关键的造林树种，在水土涵养和生态环境建设方面展现出不可替代的作用；然而，黄土高原地区频繁出现的干旱状况，对油松生存和生长形成严峻威胁[25]。只有综合考虑油松蒸腾耗水规律和生理特性及其对环境因子的响应机制，才能全面了解油松蒸腾耗水对不同水分状态的响应规律。因此，本研究通过对黄土高原油松人工林在不同降水条件下蒸腾规律与生理特性的研究，以期揭示不同降水条件下油松蒸腾耗水的变化特征和生理调节方式，为黄土高原油松人工林的稳定经营提供思路。

3.1　不同降水梯度下油松林分蒸腾变化特征

本研究中油松在不同降水条件下的蒸腾速率存在明显的变化。小时尺度上蒸腾速率通常呈单峰型变化趋势(图 4)，与太阳辐射和饱和水汽压差昼夜变化规律相似，这表明油松蒸腾速率的动态变化受

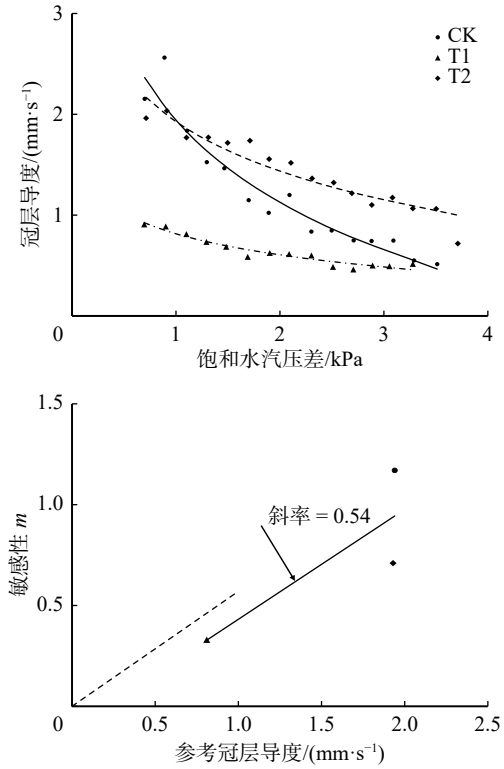


图 8　冠层导度对饱和水汽压差的响应及气孔调节方式

Fig. 8　Response of canopy conductance to vapor pressure deficit and stomatal regulation mode

蒸腾驱动因子的调控。由于减雨处理下土壤含水量低于其他两个样方(图 3)，其蒸腾速率峰值远低于自然对照样方和增雨样方。季节尺度上，油松蒸腾

速率因土壤水分条件和气象要素的综合调控存在差异。土壤水分的增加有利于驱动植物水分与大气的交换[37]，减雨处理下油松的蒸腾速率低于对照样方和增雨样方。这表明不同降水条件下，当外界气象要素处于相似水平时，油松的蒸腾速率会受到土壤水分状况的影响。这与何秋月[38]在黄土高原对刺槐进行降水截留试验时发现的结果一致，经减雨处理后，刺槐的液流密度显著下降。Besson 等[39]对栓皮栎的研究也表明，降水截留处理使栓皮栎的年蒸腾量下降了 8%~ 13%。当土壤水分增加时，油松根系通过自身调节增强了树干蒸腾。然而，也有研究指出，树木蒸腾与降水量之间并无显著规律，可能是由于干旱处理下，树木通过吸收地下水或样地中土壤水分的供应得到缓解，对气孔开闭的限制不显著，因而对植物蒸腾影响不明显[40]。在本研究中，由于油松人工林处于地下水位较深、远超出油松根系吸水范围的黄土残塬沟壑类型地区，因此油松可利用的水分来源只有大气降水补充而成的土壤水，所以减雨处理下的油松会因土壤水分不充足而降低蒸腾速率(图 5)。

3.2 不同降水梯度下影响油松蒸腾的主要影响因素

在本研究中，太阳辐射、饱和水汽压差是影响油松蒸腾量的主要环境因子。其中太阳辐射会促使植物气孔开放，进而促进蒸腾[41]；而饱和水汽压差通过改变树木与大气间的水势差来形成蒸腾拉力，这与何秋月[38]的研究结果一致。此外，相较于对照样方和增雨样方，减雨处理下土壤含水量对油松日蒸腾量的调控作用减弱(图 6)。韩新生等[42]也表明自然降水条件下水分对华北落叶松的影响比减雨处理更显著；这表明在受到干旱影响时，油松通过减少蒸腾量避免体内水分损失加剧，从而削弱了水分条件对日蒸腾量的直接影响。

植物的蒸腾在受到外界环境因子影响的同时，其内部的生理特性也会影响自身蒸腾。研究[43]表明，树木总蒸散量中 80% ~ 90% 以上来源于气孔蒸腾，气孔的开合状态及其变化过程显著影响植物蒸腾，该过程主要由植物生理生态机制驱动。本研究中，不同降水条件下油松的冠层导度日变化呈先升高后降低的趋势(图 7)。对照样方和增雨样方中，油松冠层导度在 6、7 月低于 8、9 月，可能是由于前期土壤含水量较低，导致部分气孔关闭。减雨处理下油松的冠层导度整体水平低于对照样方和增雨样方。Jian 等[44]在黄土高原的研究表明，油松冠层导度整体上会在水分充沛条件下处于较高水平。赵平等[45]表明在土壤水分不足时，植物的冠层导度显著降低；此外当土壤水分下降到一定程度时，黄土高原刺槐、油松、华北落叶松的气孔也会减小甚至关闭[46]。所以干旱条件不仅会降低油松的蒸腾速率，也会通过减小油松冠层导度影响蒸腾。

3 个样方油松冠层导度与饱和水汽压差可用负对数函数进行描述。本研究发现，由于土壤水分不足，减雨处理下油松冠层导度对饱和水汽压差的敏感性降低(图 8)。在干旱胁迫条件下，植物为了生存，通过持续关闭气孔抑制蒸腾来维持体内水分的相对稳定，从而导致气孔对饱和水汽压差的敏感性下降[47]。陈胜楠等[48]对油松蒸腾特征的研究表明，随着土壤含水量逐渐减小，气孔对环境因子的敏感性降低，冠层导度也会随之下降。

在面对水分胁迫时，植物会通过控制气孔关闭，使植物的蒸腾耗水量与所处环境中水分供给能力相匹配[49]。油松在面对环境胁迫时，一般具有较为灵敏的气孔调节能力[50]。本研究中的气孔调节方式是根据油松冠层导度与饱和水汽压差间的关系进行划分的，通过对 3 个样方油松冠层导度对饱和水汽压差的敏感性 m 与参考冠层导度进行拟合，发现回归斜率为 0.54，略低于理论值 0.6，但差异不显著($P > 0.05$)(图 8)。这一结果表明，本研究中油松人工林具有较强的气孔调节能力，在面对干旱时有利于油松通过气孔调控体内的水分，提高其适应干旱环境的能力。

短期内，油松通过维持光合作用来最大化生长潜力；长期则依赖深层水源和生理调节来保证生存，但这也增加了土壤干化的风险[51]。随着季节性干旱的不断加剧，植物气孔的关闭虽然可以在一定程度上减少水分过度消耗，但同时也会降低植物蒸腾影响自身的生长进程。因此，在探究植物蒸腾耗水特征时，也需要考虑长时间序列下气孔调节方式的演变特征以及植物如何平衡水分消耗与固碳之间的平衡关系。

4 结 论

本研究针对黄土高原多变的降水格局以及干旱事件频繁发生，不断威胁着植被的生长状况，将黄土高原油松人工林在不同降水条件下蒸腾特征和生理特性及其对环境因子的响应机制结合起来，综合分析油松在面对干旱环境时的响应机制。研究得到以下结论。

(1)小时尺度上，油松蒸腾速率呈单峰型；季节尺度上，高水分条件下油松蒸腾速率变化幅度较大。两种时间尺度下，减雨均降低了油松的蒸腾速率。

(2)不同降水条件下，影响油松蒸腾量的主要环境因子有太阳辐射和饱和水汽压差；减雨处理导致

土壤水分不足，油松通过关闭气孔避免过度耗水，因而土壤含水量对日蒸腾量的直接影响较对照与增雨处理减弱。

(3)减雨处理下，油松冠层导度有所下降，从而导致蒸腾速率减小，降低了油松冠层导度对饱和水汽压差的敏感性；但在不同降水条件下，油松的气孔调节能力相对较强，能够通过主动调节气孔控制蒸腾维持自身水分状况。

研究结果可为黄土高原人工林的合理经营和水资源的配置提供思路。未来可从植物自身水力性状方面更加综合全面地分析蒸腾耗水特征。

参 考 文 献

[1] 吉珍霞, 侯青青, 裴婷婷, 等. 黄土高原植被物候对季节性干旱的敏感性响应 [J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 557−565.
Ji Z X, Hou Q Q, Pei T T, et al. Sensitive response of vegetation phenology to seasonal drought in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 557−565.

[2] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 等. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 [J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4902−4910.
Zhang L X, Fan J W, Zhang H Y, et al. Spatial-temporal variations and their driving forces of the ecological vulnerability in the Loess Plateau[J]. Environment Science, 2022, 43(9): 4902−4910.

[3] 张更喜, 王慧敏, 粟晓玲, 等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 339−346.
Zhang G X, Wang H M, Su X L, et al. Assessing the vegetation vulnerability of Loess Plateau under compound dry and hot climates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 339−346.

[4] 王洪英. 黄土高原人工刺槐林土壤水分动态及生物量的密度效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
Wang H Y. Study on soil water and density effect of the stand biomass of artifical *Robinia psedoaeacio* on the Loess Plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.

[5] 杨菲. 晋西黄土区典型林分水分利用策略及水分生态位特征 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Yang F. Water use strategies and water niche characteristics of typical forests in the loess region of western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[6] 贡璐, 潘晓玲, 常顺利, 等. SPAC 系统研究进展及其在干旱区研究应用初探 [J]. 新疆环境保护, 2002, 24(2): 1−4.
Gong L, Pan X L, Chang S L, et al. Achievements of study on soil-plant-atmosphere continuum and discussion its application in arid zone[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2002, 24(2): 1−4.

[7] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究 [J]. 林业科学, 2004, 40(2): 174−177.
Cao W Q, Han H R, Ma Q Y, et al. Sap flow flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leaf forest of Taiyue Mountain in Shanxi Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2): 174−177.

[8] Pataki D E, Oren R. Species differences in stomatal control of water loss at the canopy scale in a mature bottomland deciduous forest[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(12): 1267−1278.

[9] Cienciala E, Kucera J, Malmer A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1−2): 109−120.

[10] Wullschleger S D, Hanson P J. Sensitivity of canopy transpiration to altered precipitation in an upland oak forest: eidence from a long-term field manipulation study[J]. Global Change Biology, 2006, 12: 97−109.

[11] Fisher R A, Williams M, da Costa A L, et al. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 2361−2378.

[12] Burgess O S S. Measuring transpiration responses to summer precipitation in a Mediterranean climate: a simple screening tool for identifying plant water use strategies[J]. Physiologia Plantarum, 2006, 127(3): 404−412.

[13] 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: 214.

[14] 凡超, 邱燕萍, 李志强, 等. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2401−2410.
Fan C, Qiu Y P, Li Z Q, et al. Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2401−2410.

[15] 黄海霞, 王刚, 陈年来. 荒漠灌木逆境适应性研究进展 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1060−1067.
Huang H X, Wang G, Chen N L. Advances of studies on adaptation of desert shrubs to environment stress[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1060−1067.

[16] 郭江红, 王百田, 田晶会. 黄土半干旱区土壤水分对侧柏叶片水气交换影响 [J]. 水土保持学报, 2004(2): 157−160,165.
Guo J H, Wang B T, Tian J H. Influence of soil moisture on exchange between water and gas of oriental arborvitae at semi-arid region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004(2): 157−160,165.

[17] 贾剑波. 北京山区典型森林生态系统水分运动过程与机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Jia J B. Water movement process and mechanism analysis on forest ecosystems in Beijing mountainous area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[18] Klein T, Shpringer I, Fikler B, et al. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 302: 34−42.

[19] Yu M H, Ding G D, Gao G L, et al. Leaf temperature fluctuations of typical psammophytic plants and their application to stomatal conductance estimation[J]. Forests, 2018, 9(6): 313−326.

[20] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought[J]. New Phytologist, 2008, 178(4): 719−739.

[21] Sperry J S. Hydraulic constraints on plant gas exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104(1): 13−23.

[22] Zhang Y J, Meinzer F C, Qi J H, et al. Midday stomatal conductance is more related to stem rather than leaf water status in subtropical deciduous and ever-green broadleaf trees[J]. Plant Cell & Environment, 2013, 36(1): 149−158.

[23] Franks P J, Drake P L, Froend R H. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance[J]. Plant Cell & Environment, 2007, 30(1): 19−30.

[24] 张鹏. 不同饱和水汽压亏缺和土壤干旱环境对作物水分利用效率的影响机理及模拟研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Zhang P. Measurement and simulation of the effects of varied vapour pressure deficits and soil water deficits on crop water use efficiency[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[25] Oogathoo S, Houle D, Duchesne L, et al. Vapour pressure deficit and solar radiation are the major drivers of transpiration of balsam fir and black spruce tree species in humid boreal regions, even during a short-term drought[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291: 108063.

[26] 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 B, Chen L X, Wu Y M, 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.

[27] 魏鸾葳, 陈左司南, 陈胜楠, 等. 降雨对河岸生态系统杨树树干液流及其环境控制的影响 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 284−293.
Wei L W, Chen-Zuo S N, Chen S N, et al. Effects of rainfall on sap flow and its en-vironmental controls in a riparian poplar plantation ecosystem[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 284−293.

[28] 孔喆, 陈胜楠, 律江, 等. 欧美杨单株液流昼夜组成及其影响因素分析 [J]. 林业科学, 2020, 56(3): 8−20.
Kong Z, Chen S N, Lü J, et al. Characteristics of *Populus euramericana* sap flow over day and night and its influencing factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(3): 8−20.

[29] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. Annalesdes Sciences Forestieres, 1985, 42(2): 193−200.

[30] Clearwater M J, Meinzer F C, Rade J L, et al. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes[J]. Tree Physiology, 1999, 19(10): 681−687.

[31] 党宏忠, 冯金超, 却晓娥, 等. 晋西黄土区苹果树边材液流速率的方位差异研究 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(2): 46−52.
Dang H Z, Feng J C, Que X E, et al. Study on azimuthal variation of sap flow velocity of apple trees in Loess Plateau area, western Shanxi Province[J]. Forest Research, 2019, 32(2): 46−52.

[32] 陈左司南. 不同密度林龄油松和元宝枫人工林冠层蒸腾和夜间液流特征及机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Chen-Zuo S N. Influences of stand density and age on canopy transpiration, nocturnal sap flow, and their biophysical controls[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[33] 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]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 284: 107904.

[34] Schafer K V R, Oren R, Tenhunen J D. The effect of tree height on crown level stomatal conductance[J]. Plant, Cell & Environment, 2000, 23(4): 365−375.

[35] Ewers B E, Mackay D S, Gower S T, et al. Tree species effects on stand transpiration in northern Wisconsin[J]. Water Resources Research, 2002, 38(7): 8−11.

[36] Oren R, Sperry J S, Katul G G, et al. Survey and synthesis of intra- and inter-specific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit[J]. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(12): 1515−1526.

[37] Chen S N, Wei W. Effects of environmental variables on canopy transpiration in two coniferous forests at different growing-season stages[J]. Forest Ecosystems, 2025, 14: 100342.

[38] 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, 2020.
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, 2020.

[39] 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.

[40] 夏银华, 章新平, 戴军杰, 等. 亚热带季风区樟树树干液流对降水的响应 [J]. 水土保持研究, 2020, 28(6): 144−152.
Xia Y H, Zhang X P, Dai J J, et al. Response of stem sap flow of *Cinnamomum camphora* to precipitation under different environments in the subtropical monsoon region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 28(6): 144−152.

[41] 韩辉, 张学利, 党宏忠, 等. 科尔沁沙地南缘樟子松林蒸腾强度的年际变化及与降水、地下水位间的关系 [J]. 林业科学, 2020, 56(11): 31−40.
Han H, Zhang X L, Dang H Z, et al. Inter-annual variation of transpiration intensity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stand on the southern margin of Horqin Sandy Land and its relationship with precipitation and groundwater level[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(11): 31−40.

[42] 韩新生, 王晓, 王彦辉, 等. 2 种水分条件下华北落叶松林的林下日蒸散量变化差异 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 949−958.

Han X S, Wang X, Wang Y H, et al. Difference of daily understory evapotranspiration under two water conditionsin *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(5): 949−958.

[43] 徐军亮, 马履一, 阎海平. 油松树干液流进程与太阳辐射的关系 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 103−107.
Xu J L, Ma L Y, Yan H P. Relationship between process of sap flow of *Pinus tabulaeformis* and solar radiation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 103−107.

[44] Jian S Q, Wu Z N, Hu C H. Estimation of water use of *Pinus tabuliformis* Carr. in Loess Plateau of northwest China[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2019, 67(3): 271−279.

[45] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 655−665.
Zhao P, Rao X Q, Ma L, et al. Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 655−665.

[46] 孙林, 管伟, 王彦辉, 等. 华北落叶松冠层平均气孔导度模拟及其对环境因子的响应 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2122−2128.
Sun L, Guan W, Wang Y H, et al. Simulations of *Larix principis-rupprechtii* stand mean canopy stomatal conductance and its responses to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2122−2128.

[47] Zhu L W, Zhao P, Wang Q, et al. Stomatal and hydraulic conductance and water use in a eucalypt plantation in Guangxi, southern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 202: 61−68.

[48] 陈胜楠, 孔喆, 陈立欣, 等. 半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子 [J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1269−1280.
Chen S N, Kong Z, Chen L X, et al. The stand transpiration characteristics of *Pinus tabuliformis* and its influential factors in a semi-arid urban environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1269−1280.

[49] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(11): 482−488.

[50] Jia G D, Liu Z Q, Chen L X D, et al. Distinguish water utilization strategies of trees growing on earth-rocky mountainous area with transpiration and water isotopes[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(24): 10640−10651.

[51] 李军, 王学春, 邵明安, 等. 黄土高原 3 个不同降水量地点油松林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟 [J]. 林业科学, 2010, 46(11): 25−35.
Li J, Wang X C, Shao M A, et al. Simulation of water-limiting biomass produc-tivity of Chinese pine plantations and the soil desiccation effect in 3 sites with different annual precipitation on Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(11): 25−35.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）