

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.044.

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 Xingyu, Yang Jinyan, Ruan Honghua, 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.

模拟干旱下杨树树干液流特征及其对环境因子的响应

张星宇, 杨金艳, 阮宏华, 张瑞婷

(南京林业大学 生物与环境学院, 南京 210037)

摘 要: [目的] 研究干旱对杨树人工林树干液流的影响, 可以深入理解杨树人工林对全球降水格局改变的响应。[方法] 于 2018 年 9 月—2020 年 11 月以东台林场 10 年生杨树(*Populus deltoides*)人工林为对象, 采用穿透雨移除法模拟干旱处理: CK(对照)、D₁(30% 穿透雨移除)、D₂(50% 穿透雨移除), 利用热扩散探针技术连续测定杨树人工林的液流变化, 结合同步监测的环境因子, 揭示杨树人工林对环境因子的响应规律。[结果] (1) 3 个处理下杨树人工林树干液流年变化曲线呈现单峰型, 与饱和蒸汽压差、光合有效辐射的年际变化曲线相似。树干液流速率在夏季达到峰值, 接着随着时间推移逐渐下降, 到达林木休眠期时液流密度趋近于 0; (2) 模拟干旱下, 随着截流程度增大, 树干液流随之降低。D₁ 和 D₂ 生长季液流密度平均值比对照组显著下降了 24%~39% ($p < 0.05$); (3) 混合效应模型表明饱和蒸汽压差和土壤温度与液流变化极显著相关 ($p < 0.01$), 大气温度、降雨量和土壤温度与液流变化显著相关 ($p < 0.05$)。[结论] 移除 30% 的穿透雨提高了各环境因子对液流变化的解释程度, 即干旱条件下会提高树干液流对环境变化的敏感性, 其中土壤含水量对液流变化的解释率最高。未来仍需继续探讨树木自身性状对环境的响应。

关键词: 干旱; 树干液流密度; 土壤体积含水量; 热扩散探针技术

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0084-08

Characteristics of Poplar *Populus deltoides* Stem Sap Flow and Its Response to Environmental Factors Under Simulated Drought

Zhang Xingyu, Yang Jinyan, Ruan Honghua, Zhang Ruiting

(College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] The Objectives of this study are to estimate the effects of throughfall exclusion (drought) on the sap flow in a *Populus deltoides* plantations and to enhance our understanding of the response of poplar plantations to changes in global precipitation patterns. [Methods] The study was conducted from September 2018 to November 2020 in a 10-year old poplar plantation in Dongtai Forest Farm. There were three treatments in this study, including CK (control), D₁ (30% throughfall exclusion), and D₂ (50% throughfall exclusion). The sap flow density and environmental factors were continuously measured by thermal diffusion probe technology and the Micro Weather Monitoring System to evaluate the response of the poplar plantation to environmental factors. [Results] (1) In three treatments, the annual variation of sap flow in poplar plantations showed a single peak, similar to the interannual variation of vapor pressure deficit and photosynthetic active radiation. The sap flow rate reached its peak in summer, and then gradually decreased over time. In the dormant period, the sap flow density approached zero. (2) In the drought treatment, the sap flow decreased with the increasing throughfall exclusion. The average sap flow density in the growth seasons of D₁ and D₂ were 39.61 and 31.85 g/(m² s), respectively, which were significantly reduced

收稿日期: 2023-04-04

修回日期: 2023-05-09

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFD22004); 江苏省林业局揭榜挂帅项目(LYKJ[2022]01); 江苏省林业局造林专项([2021-2022])

第一作者: 张星宇(1998—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。E-mail: 13020557621@163.com

通信作者: 杨金艳(1975—), 女, 山东蒙阴人, 副教授, 从事森林生态系统与全球变化、森林生态系统碳水循环等研究。E-mail: yangjy@njfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

by 24% to 39% compared to the control ($p < 0.05$). (3) The mixed effect model showed that the vapor pressure deficit and soil temperature were extremely significantly correlated with sap flow ($p < 0.01$), while air temperature, rainfall, and soil temperature were significantly correlated with sap flow ($p < 0.05$). [Conclusion] In D₁ treatment, the power of explanation of environmental factors to sap flow increased, and the sensitivity sap flow to environmental changes could be increased in drought treatments. Among them, soil temperature was significantly correlated with sap flow. Further exploration of the response of tree traits to the environment is needed in the future.

Keywords: drought; sap flow density; soil volumetric water content; thermal diffusion probe

IPCC 评估报告指出,大气中的 CO₂ 和 CH₄ 浓度的增加居高不下,导致全球变暖,降水格局发生变化,这会增加局部地区干旱事件发生频率,尤其在中纬度地区^[1]。中纬度地区干旱事件频发显著影响了陆地生态系统的碳、水循环,甚至可能使得陆地生态系统从碳源转变为碳汇^[2-3]。

陆地向大气输送水分的唯一途径是森林蒸发散^[4],森林生态系统是陆地生态系统的主体,因此森林蒸发散是整个生态系统耗水量的重要组分。植物树干液流可以准确测量单木蒸腾耗水量,是估测林分耗水的关键指标之一^[5]。另外其与一系列环境因子紧密联系,气象因子可以直接影响植物的瞬时液流速率,而土壤水分直接决定了植物的可利用水量^[6]。已有学者针对干旱下植物树干液流对环境因子的响应作了一系列研究,如刘延惠等在茂兰喀斯特原生林细叶青冈树干液流对环境因子的试验中,发现影响树干液流的主要环境因子是光照、空气相对湿度和饱和水汽压差,与土壤含水量无显著相关^[7]。王艳兵等^[8]研究则认为土壤水分对干旱区或干旱立地条件下的树干液流格外重要。通过对干旱区植物茎干液流变化规律的研究,可以有效地反映出植物对干旱环境的适应机制^[9]。目前,关于植物液流速率差异特征已有较多研究,但大多集中于液流速率的个体差异及其在边材上的径向差异,对植株不同干旱下的液流差异研究较少。

我国人工林面积 8 003 万 hm²,其中,杨树人工林面积达到 853 万 hm²,居世界第一,江苏省作为杨树人工林重要栽培区域,其干旱的频度和强度近年也有增加^[10-11],尤其是在苏北区域。干旱频发造成杨树人工林水分利用率和光合生产效率均下降,而后其生产力降低^[12]。本文以江苏省盐城东台国有林场 10 a 生杨树(*Populus deltoides*)人工林为对象,运用干旱模拟试验,设置空白对照组(CK)、穿透雨移除 30%(D₁)和穿透雨移除 50%(D₂)试验组,结合同步监测的环境因子(2018 年 9 月—2020 年 11 月),揭示杨树人工林树干液流对干旱的响应规律与机制。旨在科学评估降水格局改变对森林生态系统碳收支影响提

供新的理论认知,也为进一步精确预测降水格局改变对人工林生态系统的影响提供理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于江苏省盐城市东台市境内的东台国有林场(120°49'E, 32°52'N)。东台林场是江苏省沿海重点防护林,临近黄海森林公园,地处黄海之滨,气候类型为过渡地带海洋性季风气候。年平均气温为 14.6℃,年平均相对湿度为 88.3%,无霜期为 225 d,年均降雨量为 1 050 mm,年平均日照时间为 2 200 h,10℃以上年积温为 4 565℃。土壤为脱盐草甸土,土壤质地为砂质壤土,土壤 pH 值为偏碱性。区域内主要林分类型为杨树(*Populus*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等。选取 10 a 生杨树人工林(黑杨派无性系 I-35, *Populus deltoides* CL'35')为研究对象,平均树高为 21 m,平均胸径为 23 cm,林分郁闭度为 0.60,间距为 4 m×6 m。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 采取随机区组设计(RCBD)进行干旱处理的野外控制试验。干旱处理包括 3 个水平:对照(CK)、穿透雨移除 30%(D₁)和穿透雨移除 50%(D₂)。杨树人工林依据样地内生境条件和前期本底调查分为 3 个区组(区组间距在 300~500 m),每种处理设定 3 个重复样地,共选定 9 块观测样地(不同样地随机交叉布置),每个样地面积为 25 m×25 m,其中 15 m×15 m 为核心测定区域,余下为缓冲区域。每个样地间距为 20 m。

1.2.2 杨树树干液流测定与计算 在 2018 年 9 月—2020 年 11 月,在杨树 1.20 m 处安装 TDP 插针式植物茎流计(Probe12;美国, Dynamax 公司),经过 48 h 以上的缓冲后,记录树干液流数值。树干液流全年连续测定,每 0.5 h 记录一次数据。液流通过在选定的样树 1.20 m 处安装 TDP 插针式植物茎流计(Probe12, Dynamax, USA)测定相关温度数据,公式计算^[13]:

$$J_s = 0.0119 \times \left(\frac{d_{T_m} - d_T}{d_T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中: J_s 为液流密度 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; d_{T_m} 为 24 h 内上下探针的最大温差值 ($^{\circ}\text{C}$); d_T 为某时刻瞬时温差值 (即实时测定的温差值) ($^{\circ}\text{C}$)。

1.2.3 环境因子测定与计算 根据样地生境差异情况,所有样地划分为 3 个区组,在 2018 年 9 月—2020 年 11 月每个区组利用一套 EM50 微型气象监测系统 (Decagon, USA) 对环境因素进行全年连续监测。环境因素指标有空气温度 (T_a , $^{\circ}\text{C}$)、大气相对湿度 (R_h , %)、降雨量 (P , mm)、光合有效辐射 [Q_0 , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、土壤 15 cm 深度的土壤温度 (T_s , $^{\circ}\text{C}$)、土壤体积含水量 (VSM, %)、土壤水势 (SWP, kPa)。利用 EM50 数据采集器,每 0.5 h 记录一次数据。饱和水汽压差 (VPD, kPa) 公式计算^[14]:

$$\text{VPD} = 0.611 \times \left(\frac{17.502 T_a}{T_a + 240.97} \right) \times (1 - R_h) \quad (2)$$

式中: T_a 为大气温度 ($^{\circ}\text{C}$); R_h 为相对湿度 (%)。

1.3 数据统计分析

液流数据、环境因子进行自动化记录,利用 Excel 进行数据整理及制图,利用 Origin 软件绘制液流及环境因子时间动态图;利用 R 语言构建混合效应模型,研究期内,为进行多个解释变量的相对重要性分析,本文使用 R 语言中的 MuMIn 包进行模型的选择,分析哪些变量是解释干旱条件下杨树树干液流变化的重要生态因子。 J_s 作为响应变量,VPD, T_a , P , Q_0 , T_s , SWP 作为解释变量,拟合一个多元非线性回归。首先,使用全部的解释变量,构建一个其与响应变量 (J_s) 的全模型;使用 MuMIn 包进行模型选择,获得最优子集,寻求简约模型 (利用对变量间关系的解读) 的同时最大程度地保留模型解释能力。接着使用 rdacca.hp 包分析解释变量的相对重要性。

2 结果与分析

2.1 液流与环境因子的动态变化

在 2019—2020 两年试验期内,部分环境因子 (T_a , Q_0 和 T_s) 变化曲线具有相似的动态格局 (图 1)。温度范围年际差异小,为 $-7.5 \sim 33.53^{\circ}\text{C}$ 。 T_s 与 T_a 基本同步,且 T_s 变化较为稳定,为 $3 \sim 27.4^{\circ}\text{C}$,变化幅度比 T_a 小 44%; Q_0 在两年时间内变化曲线具有相似性,全年变化大致呈双峰型,在 1 月—2 月 Q_0 最低,为 $5\,664 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,之后逐渐增加,在 6 月抵达第一个峰值,为 $1\,036 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,之后逐渐减缓,8 月降至 $780 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,之后稍回升至第 2 个峰值后再次下降。

研究区有明显的雨季旱季区别,雨季时间为 7—9 月 3 个月份,两年研究期内雨季 P 均占全年 P 一半以上,2019 年和 2020 年分别占 54% 和 65%。VPD 最大值出现在 5 月 24 日 (2.77 kPa),前后连续 5 d VPD > 1.9 kPa,两年均值为 0.50 kPa (0.2~1.06 kPa)。

在不同干旱处理下对 J_s 和 VSM 的影响 (图 2)。2019 年 VSM 在 D_2 组较 CK 组和 D_1 组均显著降低 ($p < 0.05$),但 D_1 组 VSM 并未显著下降,在 2020 年,经过一年的干旱处理后, D_1 组和 D_2 组的 VSM 均较 CK 组显著下降。 J_s 在两年监测期内 D_1 组和 D_2 组较 CK 组均显著下降。

杨树生长季的时间为 4 月中下旬至 10 月中旬,早于雨季 (图 3)。 J_s 年变化呈单峰型曲线,与 VPD, Q_0 的年际变化曲线相似。在 3 种干旱处理下,2019 年和 2020 年 J_s 均值排名始终为 CK [$32.06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], $25 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] $> D_1$ [$22.72 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $18.15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] $> D_2$ [$17.97 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $15.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; J_s 年际差异变化大,主要集中在生长季, J_s 最大日均值 [$104.26 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 出现在 2019 年的 CK 样地; CK, D_1 和 D_2 三组在 2019 年生长季均值 [$61.06, 47.25, 36.25 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 均高于 2020 年生长季均值 [$42.49, 31.98, 27.46 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。但在两年试验期内,全年均值差别不大 [$\pm 4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。VSM 在生长季前会到达年峰值,生长季后大幅下降;生长季内的雨季来临时, VSM 缓慢回升,但在年尺度上,仍是一年总最低的水平 (28%);雨季即将结束时, VSM 会有较明显的回升;生长季结束后, VSM 先降后升。在 CK, D_1 和 D_2 三组中,随着截流程度增加, VSM 降幅随之增大,差异最大时空空白组的含水量是移除 D_1 组的 1.24 倍,是 D_2 组的 1.5 倍;两年平均值也存在明显差异。

在两年生长季 (4 月下旬—10 月中旬) 期间的典型连续晴天内, J_s 的峰值时间均为 10:00—12:00 (图 4),基本 17:00 开始 J_s 急速下降,夜间 J_s 均值为 $0.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。非生长季的液流峰明显较窄,且出现时间晚于生长季。但在夜间仍然存在微弱液流 [$0.24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 占液流峰值的 10%, 同年生长季的液流峰值几乎是而非生长季的 30 倍。

2.2 模拟干旱下杨树树干液流与环境因子的关系

将各环境因子与杨树人工林树干液流在全模型的基础上进行模型选择得以确定影响树干液流的最佳解释变量 (图 5)。3 个样地环境因子揭示树干液流变化均在 0.6 以上,因此能较好地预测不同干旱条件下液流对环境因子的响应。因为各环境因子能够彼此影响并不是独立的,如降雨改变时,土壤含水量会随之改变,本文更准确地探讨了各环境因子的方差解释率。

从图 5 中可以看出,在 CK 样地, Q_o ,SWP, T_s ,VPD 与树干液流极显著相关,能解释液流变化的 65.8%;其中 T_s (61.53%) 对液流变化的贡献最大,其次是 VPD (19.30%)。在 D_1 样地中,VPD, T_s ,SWP 能解释液流变化的 68.7%,仍是 T_s (68.44%) 对液流变化的影响贡献最大,SWP 与液流变化呈负相关,VPD, T_s 与液流变化呈

正相关。在 D_2 样地中,VPD, T_s , T_a ,SWP,P 能解释此样地液流变化的 64.1%, D_1 样地杨树人工林比其他两组,对环境因子,尤其是 T_a 更敏感($R^2=0.36$)。混合效应模型结果表明:VPD 和 T_s 与液流变化极显著相关($p<0.01$), T_a ,P 和 SWP 与液流变化显著相关($p<0.05$),此模型能解释液流变化的 61.9%。

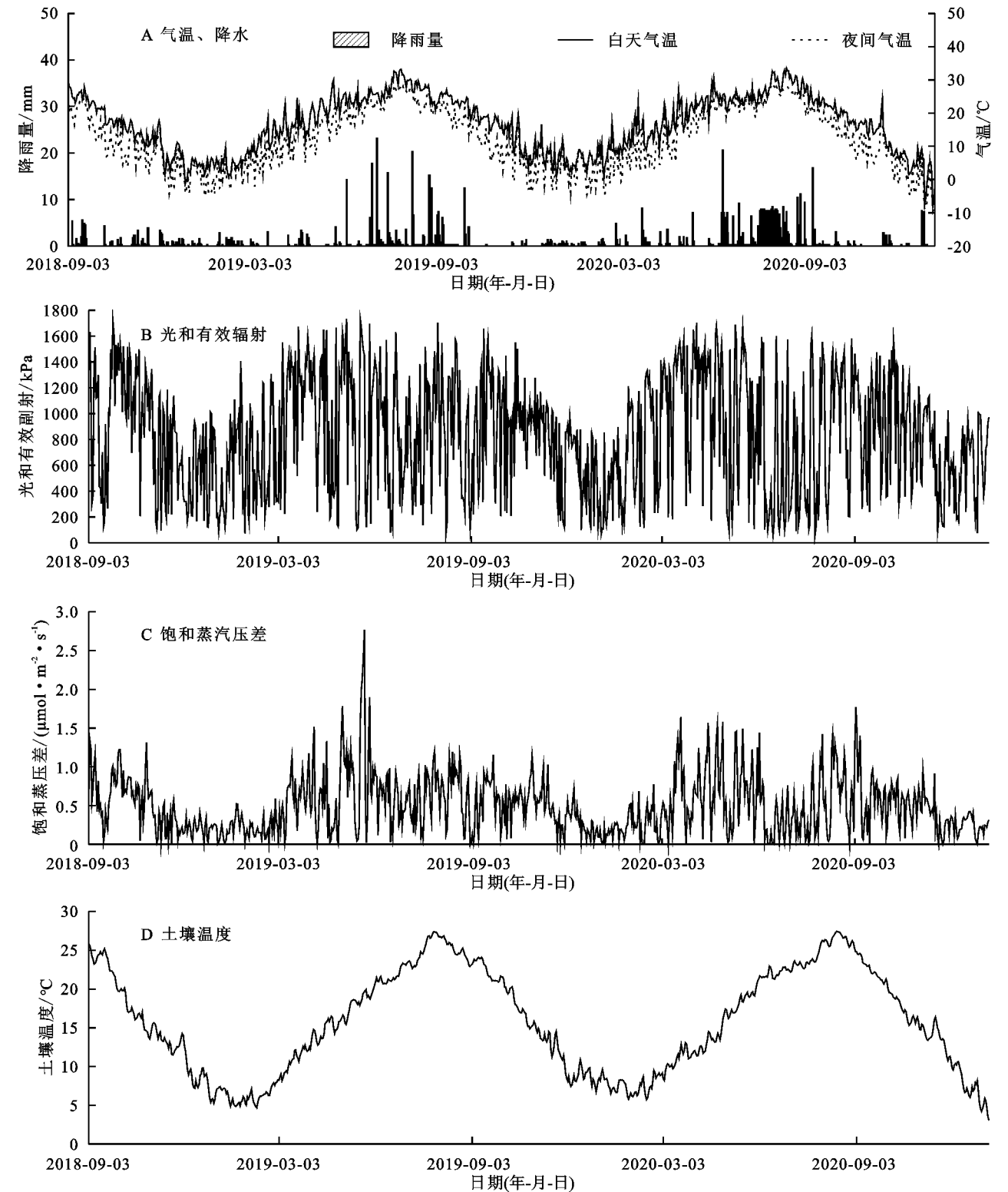


图 1 液流研究期内环境因子的变化

Fig. 1 Changes of environmental factors during the study period of sap flow (A) T_a and P; (B) Q_o ; (C) VPD; (D) T_s .

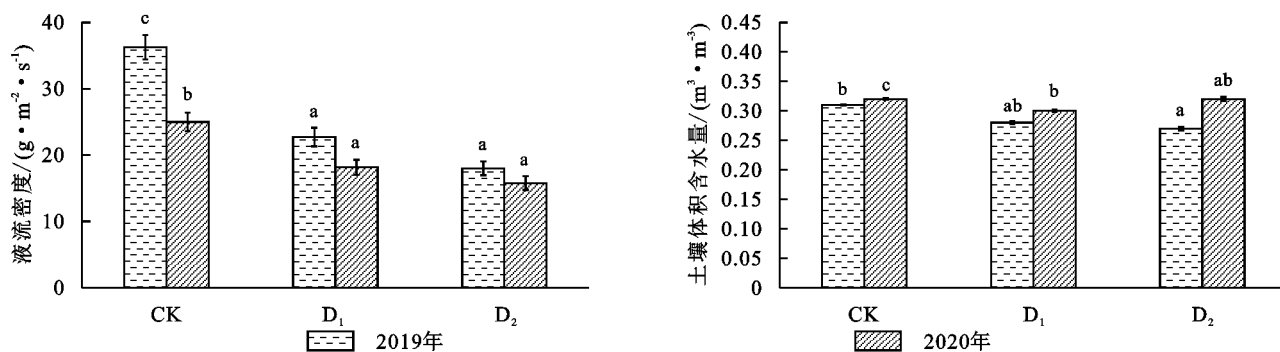
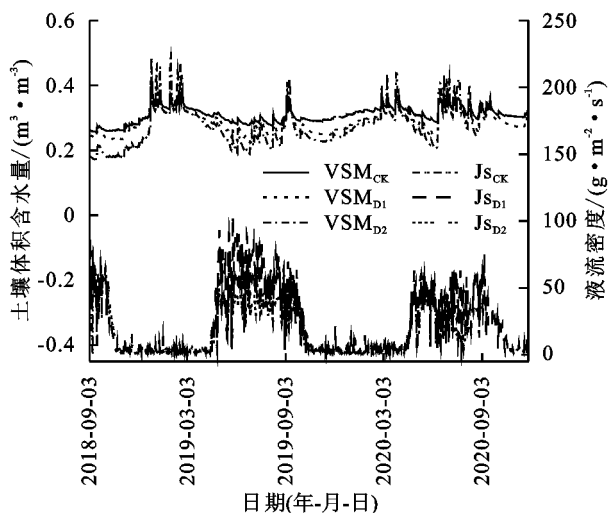


图 2 不同干旱处理下对液流密度和土壤体积含水量的影响

Fig. 2 Effects of Different Drought Treatments on sap flow density and soil volumetric water content



注: VSM_{CK} : CK 样地的土壤体积含水量; VSM_{D1} : D_1 样地的土壤体积含水量; VSM_{D2} : D_2 样地的土壤体积含水量; Js_{CK} : CK 样地的树干液流密度; Js_{D1} : D_1 样地的树干液流密度; Js_{D2} : D_2 样地的树干液流密度。

图 3 模拟干旱试验中土壤体积含水量及液流的年变化

Fig. 3 Annual changes of soil volumetric water content and sap flow in simulated drought test

3 讨论

3.1 液流与环境因子的动态变化

研究区内树干液流速率在夏季达到峰值,接着随着时间推移逐渐下降,到达林木休眠期时液流密度趋近于 0。在生长季内,为维持生长发育,液流活动强烈,而在非生长季内,液流活动受到树木生长状况的影响而减弱^[15]。树木液流受环境影响具有较大复杂性。这与 Q_s 的年际变化相似,但 Q_s 的 R^2 (0.47) 较小,我们认为未将生长季与非生长季区分的原因。

根据混合效应模型(图 5),在环境因子中, T_s (36.85%) 和 T_a (36.40%) 对液流变化的贡献最大,但 T_a 每日昼夜温差波动较大, T_s 则较为稳定。其次为 VPD (13.72%)。这与诸多学者研究一致。 T_s 升高能促进树干液流的启动,并控制土壤水分要素进而改变林地蒸散。苏军德等使用 TDP 技术测定祁连山圆柏 (*Sabina chinensis*) 的液流变化,发现 T_a 是主

要限制因子^[16]; Hayat 等通过多元回归模型分析 T_a , VPD 和气孔导度 (G_s) 共同解释了半干旱区沙柳 (*Salix psammophila*) J_s 中 63% 的变化量^[2]。另外进一步说明了 VPD 与树干液流密切相关, VPD 能改变植物表面与大气的水汽压差,进而影响空气阻力和气孔导度等导致植物蒸腾速率的差异,当饱和水汽压差处于较小的范围时,随气孔导度增大,气孔对饱和水汽压差的敏感度逐渐增加^[17]。温度、 Q_s 和 VPD 是影响液流变化的主要气象因素;土壤含水量是相关性较强的土壤因素,结果与前人研究一致。

除影响树干液流的众多环境因子外,树木自身的生物学结构特征,如木质部导水率径向生长,也会影响到树干液流^[18]。这需要展开进一步研究进行说明。本研究杨树人工林树龄、胸径均基本一致,有必要在模拟干旱下对不同树龄、多个树种进行进一步试验研究。此外,本文还发现土壤温度对液流变化起到较为直观的影响,且土壤温度变异程度较小,便于测算,可以考虑增加这部分研究,以了解液流对地下环境因子的响应机制。

3.2 模拟干旱对液流的影响

在本模拟干旱试验中,随着截流程度增大,干旱样地的土壤含水量和树干液流均低于对照样地(图 3),降雨通过影响土壤含水量,对树干液流变化的影响增大(图 5), Besson 在葡萄牙南部的地中海林地上通过分别采用干旱、环境和湿润处理试验得出截流降水使林分冠层年蒸腾作用降低了 10%,而灌溉使其增加了 11%,这与本试验研究结论相似^[19]。

许多学者对不同干旱梯度植物树干液流的影响开展了诸多研究,大量研究表明植物的树干液流随着截流程度的增大而降低,进而影响林地蒸散。如李永明在黄土高原利用包裹式液流计研究柠条和沙棘树干液流与环境因子的关系,结果表明土壤含水量对液流变化的影响较大,降雨补给了土壤水分,对树干液流密度存在脉冲效应^[20]。Brinkmann 等研究温带树种对夏季土壤干燥的液流响应研究中认为土

壤湿度下降可以通过降低树干液流从而引发树木的强烈生理反应^[21]。韩新生等研究认为山杏树干液流与土壤水分呈极显著负相关^[22]。本研究结论为在生长季前期杨树人工林树干液流与土壤含水量呈

正相关,后期转为负相关(图 4),即树干液流受到土壤温度和土壤水势的显著影响。我们认为树种生物学特性及根系适应土壤水分机制的差异,以及研究时间尺度的差异。

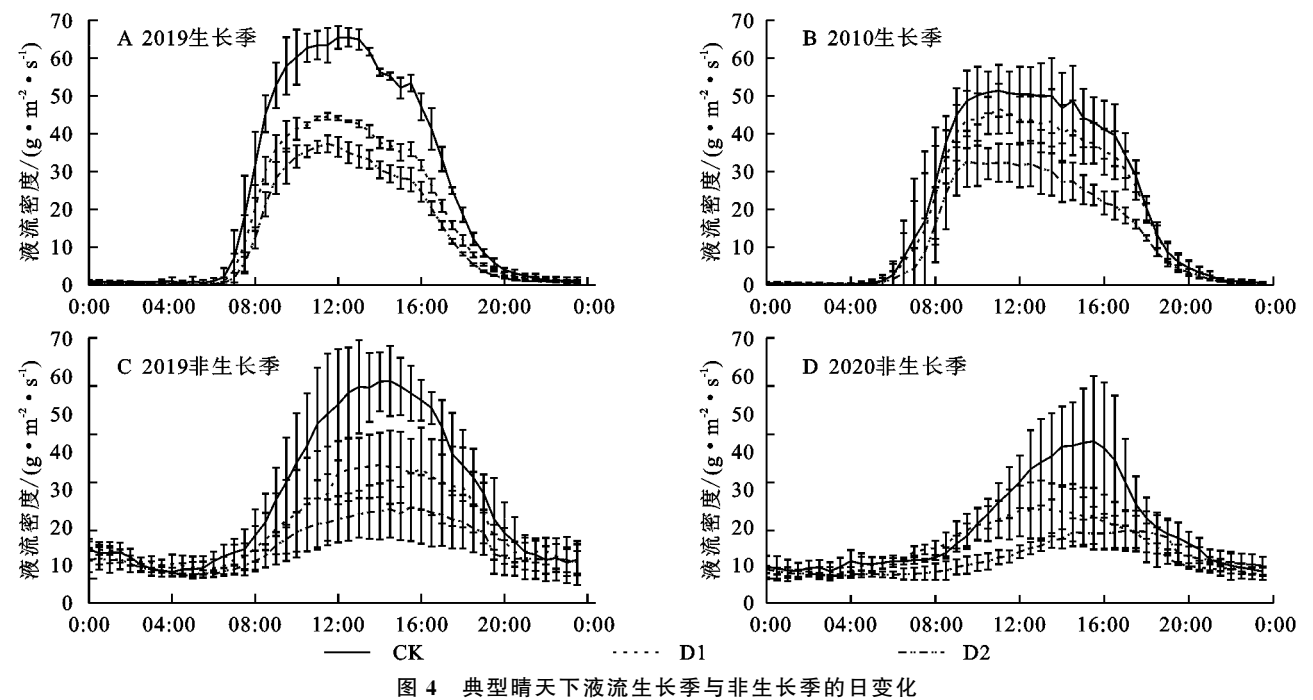
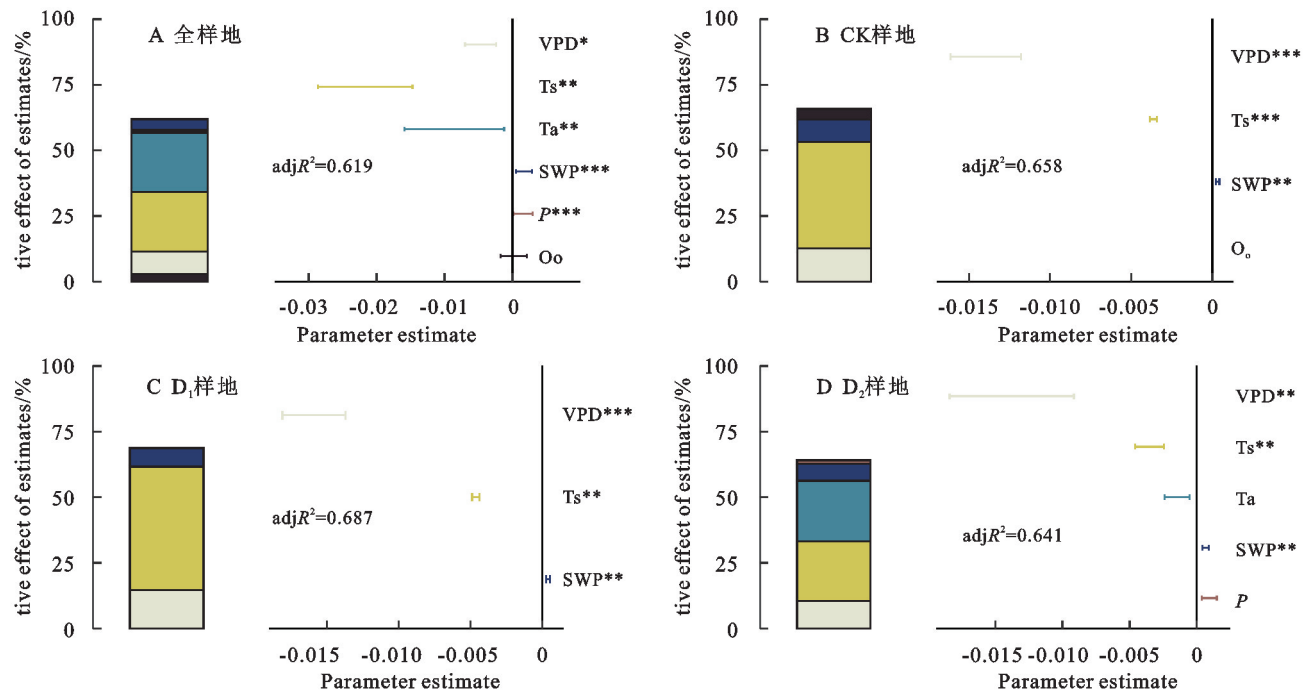


图 4 典型晴天液流生长季与非生长季的日变化



注:Q_o表示光和有效辐射;SWP表示土壤水势;T_s表示土壤15 cm深度的土壤温度;P表示降雨量;T_a表示空气温度;VPD表示饱和蒸汽压差;***, **和*分别表示 $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$ 上差异显著。

图 5 模拟干旱下液流对环境因子的下响应

Fig. 5 Simulated response of sap flow to environmental factors under drought conditions

在我们的试验中杨树人工林的林龄和胸径基本一致,截流降水树干液流与土壤水分呈极显著正相关,有诸多学者与本试验研究结论相同^[23-25]。进一步

说明了雨季引起的表层土壤含水量变化造成的,移除30%的穿透雨提高了各气象因子对液流变化的解释程度,我们认为在一定的干旱条件下会提高树干液流

对环境变化的敏感性,对此有利于完整地把握树木的水分利用策略。

4 结论

综上,树干液流年变化呈单峰型曲线,干旱处理下,随着截流程度增大,树干液流随着降低,且在 D₁样地对环境因子的敏感性提高。通过混合效应模型得出,土壤含水量对液流变化的解释率最高,气象因子中为饱和蒸汽压差,饱和蒸汽压差通过改变气孔导度进而改变树干液流,土壤含水量直接为植物根系供水从而影响植物树干液流,在一定的干旱条件下会提高树干液流对环境变化的敏感性,对此有利于完整地把握树木的水分利用策略。但在试验中杨树人工林的林龄和胸径差异不显著,鉴于野外试验条件限制以及森林生态系统水分循环影响因子的复杂性,本文仅对液流进行了浅层的研究和探索,仍需要继续探讨树木自身性状对环境的响应等,有助于提高对森林尺度水分收支的理解。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Summary for Policymakers. In IPCC Special Report on Climate Change and Land[R] // Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 2019.
- [2] Deng L, Peng C, Kim D, et al. Drought effects on soil carbon and nitrogen dynamics in global natural ecosystems[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 214(4): 103501.
- [3] Luo Y, Chen H Y H. Observations from old forests underestimate climate change effects on tree mortality[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 1-6.
- [4] 孙慧珍, 赵雨森. 水曲柳和樟子松树干液流对不同天气的响应[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(1): 1-3.
Sun H Z, Zhao Y S. A comparison of xylem sap flow of *fraxinus mandshurica* and *pinus sylvestris* var *mongolica* under different weather conditions[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(1): 1-3.
- [5] 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 X X, Li G Q, Yan M J, et al. Research progress on stem sap flow in major tree species on the loess plateau[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 369-373.
- [6] Ma L, Wu P, Wang Y. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1/2): 57-68.
- [7] 刘延惠, 丁访军, 舒德远, 等. 茂兰喀斯特原生林细叶青冈树干液流环境响应特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(3): 77-85.
Liu Y H, Ding F J, Shu D Y, et al. Characteristics of sap flow of *cyclobalanopsis gracilis* in maolan karst Original forest and its response to environmental factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(3): 77-85.
- [8] 王艳兵, 王彦辉, 熊伟, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松树干液流速率及主要影响因子的坡位差异[J]. 林业科学, 2017, 53(6): 10-20.
Wang Y B, Wang Y H, Xiong W, et al. Variation in the sap flow velocity of *larix principis-rupprechtii* and its impact factors in different slope positions in a semi-arid region of liupan mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(6): 10-20.
- [9] 卜繁靖, 郭月峰, 祁伟, 等. 不同方位沙棘液流差异与环境因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11): 154-160.
Bu F J, Guo Y F, Qi W, et al. The relationship between the differences in sap flow of seabuckthorn from different positions and environmental factors[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(11): 154-160.
- [10] Mao Y, Wu Z Y, He H, et al. Spatio-temporal analysis of drought in a typical plain region based on the soil moisture anomaly percentage index[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576(1): 752-765.
- [11] 龚艳冰, 胡娜, 刘高峰, 等. 江苏省苏北地区季节性干旱特征及动态风险评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 275-281.
Gong Y B, Hu N, Liu G F, et al. Research on seasonal drought characteristics and its dynamic drought risk assessment of five cities in northern jiangsu province[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2016, 34(5): 275-281.
- [12] 刘忠孝, 翟文涛. 干旱区杨树人工林水分利用率与光合作用的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2010(34): 260-260.
Liu Z X, Zhai W T. Study on Water Use Efficiency and Photosynthesis of Poplar Plantation in Arid Areas[J]. Agricultural and Forestry Research, 2010(34): 260-260.
- [13] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(12): 309-320.
- [14] Campbell G S, Noeman J M. An introduction to environmental physics[J]. Biologia Plantarum, 1977, 21(2): 104-104.

- [15] 郑家银,李绣宏,李少宁,等.典型天气下经济林液流特征及其对环境因子的响应[J].西部林业科学,2022,51(6):62-70.
- Zheng J Y, Li X H, Li S N, et al. Characteristics of sap flow in non-wood forest under typical weather and its response to environmental factors[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022,51(6):62-70.
- [16] 苏军德,李国霞,祁连山东部祁连圆柏树干液流变化特征及其与气象因子的响应研究[J].安徽农业科学,2020,48(2):98-102.
- Su J D, Li G X. Characteristics of sap flow of *sabina przewalskii* and its response to meteorological factors in eastern qilian mountains[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020,48(2):98-102.
- [17] O'Grady A P, Worledge D, Battaglia M. Constraints on transpiration of *Eucalyptus globulus* in southern Tasmania, Australia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148(3):453-465.
- [18] 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):23-28,33.
- 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):23-28,33.
- [19] 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(1):230-242.
- [20] 李永明,王丽洁,荐圣淇,黄土高原丘陵沟壑区柠条与沙棘树干液流变化特征[J].生态学报,2023,43(04):1553-1562.
- Bo Y M, Wang L J, Jian S Q. Variations of sap flow of *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(04):1553-1562.
- [21] Brinkmann N, Eugster W, Zweifel R, et al. Temperate tree species show identical response in tree water deficit but different sensitivities in sap flow to summer soil drying [J]. Tree Physiology, 2016,36(12):1508-1519.
- [22] 安钰,韩新生,许浩,等.不同天气条件下山杏树干液流速率对环境因子变化的响应[J].西南林业大学学报:自然科学,2023,43(4):1-11.
- An Y, Han X S, Xu H, et al. Responses of trunk sap flow of *Armeniaca sibirica* to varied environmental factors in different weather conditions[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2023,43(4):1-11.
- [23] Butz P, Hölscher D, Cueva E, et al. Tree water use patterns as influenced by phenology in a dry forest of southern Ecuador [J]. Frontiers in Plant Science, 2018,9(6):945-956.
- [24] 吕金林,何秋月,闫美杰,等.黄土丘陵区辽东栎树干液流特征对边材面积和土壤水分的响应[J].应用生态学报,2018,29(3):725-731.
- Lv J L, He Q Y, Yan M J, et al. Sap flow characteristics of *Quercus liaotungensis* in response to sap wood area and soil moisture in the loess hilly region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(3):725-731.
- [25] 凌海燕,刘世荣,栾军伟,等.模拟穿透雨减少对锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)树干液流密度的影响[J].生态学报,2020,40(8):2726-2734.
- Ling H Y, Liu S R, Luan J W, et al. Effects of manipulated throughfall reduction on sap flux density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(8):2726-2734.