

降雨对河岸生态系统杨树树干液流及其环境控制的影响

魏鸾葳¹, 陈左司南^{1,2}, 陈胜楠¹, 李江霖¹,
陈立欣¹, 律江³, 石云³, 朱梦洵⁶, 张志强^{1,4,5}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083;
3.北京市共青林场,北京 101300;4.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;
5.国家林业和草原局水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100000;6.中咨集团生态技术研究所(北京)有限公司,北京 100048)

摘要: 降雨能够改变土壤水分状况进而促进林木蒸腾,然而场降雨量及其持续时间对林木树干液流及其环境控制机制的影响尚不明确。为此,在华北半干旱半湿润区的北京市顺义区共青林场,选取位于河岸生态系统不受土壤水分胁迫的欧美杨(*Populus × euramericana*)人工林为研究对象,在 2019 年和 2021 年生长季,使用 TDP 热扩散法测量树干液流,同步监测气象及土壤含水量等环境因子。根据对该区长期(2016—2017 年、2019 年和 2021 年)降雨数据统计分析结果,将 2 次降雨脉冲间隔超 22.5 h 的事件划分 2 场独立的降雨事件。按照降雨事件雨量及历时,将其中位数±1.5 倍标准误的事件定义为常见事件,而将累积概率大于 90%的事件定义为极端事件。结果表明:(1)太阳辐射是唯一显著控制该杨树人工林生长季树干液流的环境因子(偏相关系数 $r_p=0.539$),饱和水汽压差、风速和土壤含水量均与树干液流不相关($p>0.533$),降雨事件发生前后这一环境控制特征没有发生变化;(2)雨后树干液流随着场降雨量的增加而降低($R^2=0.78$, $p=0.004$),但与降雨事件历时无显著相关关系;(3)树干液流在常见降雨事件和极端事件后,在半小时尺度上随时间变化无显著差异($p\geq 0.264$),但 4 类降雨事件后主导的环境控制因子却不完全相同,太阳辐射和饱和水汽压差总能显著促进半小时尺度的树干液流($r_p\geq 0.374$),而土壤含水量仅在常见和极端的强降雨历时事件后,显著促进雨后半小时尺度液流($r_p\geq 0.215$)。风速显著抑制常见场降雨量事件后半小时尺度的树干液流($r_p=-0.258$),却能显著促进常见和极端场降雨历时事件后半小时尺度的树干液流($r_p\geq 0.183$)。研究成果为进一步深入揭示降雨特征对树干液流及其生物物理控制机制的影响,以及改进气候变化下生态水文过程的模拟与评估提供参考。

关键词: 降雨事件; 树干液流; 环境控制; 降雨量; 降雨历时; 极端降雨

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0284-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.04.035

Effects of Rainfall on Sap Flow and Its Environmental Controls in a Riparian Poplar Plantation Ecosystem

WEI Luanwei¹, CHEN Zuosinan^{1,2}, CHEN Shengnan¹, LI Jianglin¹, CHEN Lixin¹,

LÜ Jiang³, SHI Yun³, ZHU Mengxun⁶, ZHANG Zhiqiang^{1,4,5}

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

3.Gongqing Forest Farm, Beijing 101300; 4.National Station for Forest Ecosystem Research in Ji

County, Jixian, Shanxi 042200; 5.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating,

State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100000; 6.Ecological Technology Research Institute, Beijing 100048)

Abstract: Rainfall can alter soil moisture status and promote transpiration in forest trees, but the effect of rainfall amount and its duration on sap flow and its environmental control mechanism remains unclear. Therefore, the poplar (*Populus × euramericana*) plantation of a riparian ecosystem free from soil water stress was selected as the research object in Gongqing Forestry in Shunyi District of Beijing, a semi-arid and

收稿日期: 2023-01-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(31872711); 中国博士后科学基金项目(2021M700449)。

第一作者: 魏鸾葳(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: weilwei11@163.com

通信作者: 张志强(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文研究。E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

陈左司南(1990—), 女, 博士, 博士后, 主要从事生态水文研究。E-mail: zuosinan.chen@gmail.com

semi-humid zone in northern China. During the growing seasons of 2019 and 2021, the TDP sensors was used to measure sap flow, as well as the environmental conditions such as climatic factors and soil water content. Based on the results of statistical analysis of long term (2016—2017, 2019 and 2021) rainfall data in the region, the event with an interval of two rainfall pulses more than 22.5 h was divided into two separate rainfall events. According to the rainfall amount and duration of the rainfall event, the events with median ± 1.5 times standard error were defined as common events, while the events with a cumulative probability greater than 90% were defined as extreme events. The results showed that: (1) Solar radiation was the only environmental factor that significantly controlled sap flow in this poplar plantation during the growing season (partial correlation coefficient $r_p = 0.539$). Vapor pressure deficit, wind speed and soil moisture content were not correlated with sap flow ($p > 0.533$), and this environmental control did not change before and after the rainfall event; (2) Sap flow decreased with the increase of rainfall amount after the rainfall events ($R^2 = 0.78$, $p = 0.004$), but there was no significant correlation with the duration of rainfall events; (3) There were no significant differences in sap flow over time on the half-hourly scale following both common events and extreme events ($p \geq 0.264$), but the dominant environmental control factors after the four types of rainfall events were not identical. Specifically, solar radiation and vapor pressure deficit always significantly affected half-hourly sap flow ($r_p \geq 0.374$), while soil water content only significantly increased half-hourly sap flow after common and extreme rainfall duration events ($r_p \geq 0.215$). Wind speed significantly suppressed half-hourly sap flow after common rainfall amount events ($r_p = -0.258$), but significantly enhanced half-hourly sap flow after common and extreme rainfall duration events ($r_p \geq 0.183$). The results of the study provide further insight into the influence of rainfall characteristics on sap flow and its biophysical control mechanisms, as well as improving the modelling and assessment of ecohydrological processes under climate change.

Keywords: rainfall events; sap flow; environmental controls; rainfall amount; rainfall duration; extreme rainfall

气候变化通过改变地表及大气的热力学分布特征和能量平衡影响全球及区域陆地生态系统水汽输送和降水特征^[1],如降水强度、持续时间和间歇性^[2]。其中,中国极端降水量和频次已经发生改变^[3],华北降雨量的显著增加将较华南地区、长江流域、华东地区发生时间更早^[4]。这种区域性降水变化对森林生态系统的水文过程产生直接影响。比如,高强度降雨可以直接增加地表径流^[5];同时,降雨引起的溅蚀也能破坏土壤表层毛细水,增大表层土壤渗透性,增加深层土壤水分^[6]。因此,当降雨特征发生改变时,能改变且复杂化当地的流域水文特征^[7]。从全球尺度看,蒸腾占森林生态系统蒸散的61%^[8],而降雨减少可以使树木用水降低^[9]。同时,降雨持续不足导致的干旱增加大径阶树木的死亡率^[10],并使木材密度降低^[11]。因此,理解降雨如何影响生长季树干液流,以及降雨前后环境控制因子是否变化,能有助于了解树木的用水策略。同时可以更精准地模拟森林生态水文过程,也将有助于评估气候变化导致的降雨变化(尤其是极端降雨的增加)对森林生态系统水循环、能量平衡和固碳能力的影响,加强气候变化影响模型的预测能力^[12-13]。

在森林生态系统中,降雨穿过冠层,以穿透雨和树干径流的形式补给土壤水^[14]。水分通过入渗过程进入土壤并持续下渗^[6],使树木根际区水分增加,进而影响蒸腾。目前,植被蒸腾对降雨响应的研究,尤其是对天然降雨的研究,大多集中在(半)干旱地区草本和灌木对降雨脉冲的响应^[15]。降雨对树木蒸腾和树干液流的研究方法^[16-17],主要是使用树苗或幼苗盆栽、灌溉或控制穿透雨进行土壤水分胁迫的控制试验。即主要仅将降雨视为森林水分补给来源,认为其通过改变土壤供水条件而影响蒸腾,忽略天然降雨事件对树木用水及其环境控制可能存在的其他影响机制。

已有研究^[18]发现,降雨本身的量和强度等特征影响植被液流,比如,晚春时期持续2天的9.1 mm降雨可以增加数天的植物液流^[19]。Chen等^[12]研究表明,大降雨事件能够引起蒸腾的显著增加。降雨事件之间的间隔越长,土壤含水量随时间逐渐减少,从而影响树干液流。然而,这类研究^[19]也主要集中在干旱或半干旱区的草本和灌木中。关于天然降雨特征对树干液流的影响及深层机制,目前的理解仍需深入。

目前认为太阳辐射和饱和水汽压差是影响液流的主要因素^[20]。然而,雨后植被用水受到其他环境

因子的影响,如土壤水分分布^[21]和土壤特性^[22]。饱和水汽压差在降雨前后始终显著影响树干液流,植物液流随饱和水汽压差增加而增加^[12-13]。降雨后,土壤含水量对液流的影响程度增大,这一点在干旱区尤为明显^[12-13],深层土壤水分甚至可以有效性决定液流对饱和水汽压差和降雨的响应^[13]。但是,降雨事件的特征,尤其是极端降雨事件后,树干液流的环境控制是否被改变,还不十分清楚。

为了揭示降雨除通过增加土壤水外,对树木用水的其他潜在影响,本研究选取华北干旱半湿润区的 1 个河岸杨树人工林生态系统,连续自动观测树干液流及同步的环境因子。该河岸生态系统的土壤含水量除了在生长季接受降雨的补给,更直接受到季节性浅层地下水(2 m)波动的影响^[23],植被不受到土壤水分的胁迫^[24]。本研究旨在辨析雨后树干液流的特征,揭示降雨事件特征对树干液流的影响,探究极端降雨事件是否改变雨后树干液流的响应及其环境控制机制。

1 研究方法

1.1 研究区概况与样地选择

研究区为位于北京市顺义区青林场(40°06′27″N, 116°42′41″E)的河岸生态系统,平均海拔 9 m。根据柯本气候分类法^[25],顺义区的气候类型属于夏季炎热型冬干冷气候(Dwa)。根据国家气象数据网 1981—2010 年顺义气象站(40°08′N, 116°37′E)长期数据显示,顺义区年均气温为 12.3 °C,年均降水量 571.6 mm。年均相对湿度为 50%^[26]。根据叶面积指数的季节性变化,将其无明显波动的 6 月 1 日至 9 月 15 日定义为生长季。生长季多年平均气温 24.8 °C,年降水量 437 mm。研究区地势平坦,地下水位 2 m 左右,土质为河岸沙土^[23]。林内主要树种为欧美杨 107 (*Populus × euramericana*),于 1996 年种植,林分密度约为 367 棵/hm²。主要林下植被为丁香(*Syringa oblata*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、灰菜(*Chenopodium album*)等。全林分调查于每年生长季初期进行,2021 年欧美杨平均胸径为(30.56 ± 9.43) cm,平均树高为(15.50 ± 5.17) m。

本研究于 2019 年、2021 年的生长季(2020 年受疫情影响无观测数据),在研究区内选取 35 年生欧美杨纯林建立观测样地。土质为沙土。2021 年样地林木胸径为(29.26 ± 11.85) cm。杨树细根主要分布于 0—60 cm 表层土壤^[23]。

1.2 树干液流

在生长季初期,根据径阶分布选取 23 棵树木作为边材样木。用生长锥在树干 1.3 m 处取样,用染色法对样本边材、心材进行区分,测量边材宽度,获得样

木胸径与边材面积(A_s , cm²)的回归关系以计算样地树木的边材面积^[27]:

$$A_s = 0.5965 \text{DBH}^{1.8208} \quad (n = 23, R^2 = 0.98) \quad (1)$$

式中: A_s 为树木边材面积(cm²);DBH 为树木胸径大小(cm)。同时,建立边材宽度与胸径的回归关系,获取树干液流样木的边材宽度^[28]。

根据径阶分布,选取 11 棵生长良好、树干通直、树冠均匀健康的杨树作为树干液流样木^[27]。在 2019 年、2021 年生长季(6 月 1 日至 9 月 15 日),使用基于热扩散方法的 TDP 探针(Rainroot Scientific Ltd, Beijing, China)测定树干液流密度^[29]。其中,TDP 探针的长度根据样木的边材宽度决定,从而降低探针测量误差^[30]。为了降低方位变异对液流密度可能造成的潜在误差,探针安装于树木胸径高处的北面^[31]。为了避免探针及数据质量受降雨和太阳辐射的干扰,使用玻璃胶对探针密封,并用隔热铝箔包裹树干。使用 CR1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)连续自动每 10 s 扫描 1 次数据,将 30 min 均值记录于数据采集器。

将探针监测的温差数据根据公式(2)计算样木的树干液流密度^[29]。

$$J_s = 0.0119 \cdot \left(\frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (2)$$

式中: J_s 为单株样木液流密度[g/(cm² · s)]; ΔT 为探针温差值(°C); ΔT_M 为液流达到零时温差的最大值(°C)。使用 Baseline 软件 (Version 3.0.7; developed by Ram Oren, Duke University, USA) 识别 ΔT_M 并计算液流密度^[32]。根据公式(3)计算日尺度林分液流量。

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{48} 1800 J_{st} A_{st}}{A_G} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: Q 为日尺度林分液流量(mm/d); J_{st} 为各径阶样木的平均液流密度[g/(cm² · s)]; A_{st} 为各径阶树木的总边材面积(cm²); j 为每日观测数据的取值范围(每 30 min 记 1 次,取值范围 1~48); A_G 为样地总面积(m²)。

$$Q_s = \sum_{i=1}^n Q \quad (4)$$

式中: Q_s 为累计液流量(mm); i 为观测天数; Q 为各观测日日尺度林分液流量(mm/d)。

1.3 环境因子

在样地周边的空旷平地距地面 2.5 m 处设置自动气象监测站 (Onset Computer Corp., Bourne, MA, USA),监测空气相对湿度(RH , %)、空气温度(T_a , °C)、太阳总辐射(R_s , W/m²)和降雨量(P , mm)。由于林内及林地周边的风速在降雨期间及雨后存在较高的空间异质性,林外气象站测定的风速无法很好地代表本站点约 15.5 m 高的杨树林冠层的风速。为了更准确地探究雨后树干液流对风速的响应,

本研究使用距样地约 250 m 的通量塔测定的冠层附近的风速(v , m/s)。所有气象因子每 30 s 扫描 1 次,每隔 30 min 记录 1 次。使用空气温度和空气相对湿度,根据公式(5)计算得出饱和水汽压差(VPD)^[33]。根据公式(6)计算得出累计降水量(P_s)。

$$VPD=0.611e^{\frac{17.502T_a}{T_a+240.97}}(1-RH)$$
 (5)

式中:VPD 为饱和水汽压差(kPa); T_a 为空气温度(°C); RH 为相对湿度(%)。

$$P_s=\sum_{i=1}^n P_D$$
 (6)

式中: P_s 为累计降雨量(mm); i 为观测天数; P_D 为各观测日降雨量(mm)。

对林木根系分布区 0—70 cm 的土层,利用土壤水分测量仪 CS616 (Campbell scientific, USA) 分别测定 0—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—70 cm 的土壤体积含水量(VWC, m³/m³)。使用 CR1000 数据采集器 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) 每 10 s 扫描 1 次数据,并每 30 min 记录 1 次

均值。根据公式(7)计算土壤水层厚度(VWC_h)。

$$VWC_h=VWC \times h$$
 (7)

式中:VWC_h 为土壤水层厚度(mm);VWC 为土壤体积分含水量(m³/m³); h 为土层厚度(mm)。

1.4 降雨事件划分和极端及常见降雨事件的定义

根据长期(2016—2017 年、2019 年和 2021 年)自动气象站测定的 30 min 尺度降雨脉冲数据,获取降雨脉冲发生间隔及其频次,得到脉冲间隔的累计概率。将累计概率达到 97%的脉冲间隔(22.5 h),作为进行生态水文学研究时区域特异的降雨事件划分标准^[34]。据此,使用长期(2016—2017 年、2019 年和 2021 年)降雨事件数据,根据场降雨量及场降雨历时的中位数及累计概率 90%,作为区域特异的常见及极端降雨事件划分标准(表 1)。由于本研究旨在分析单次降雨事件对树干液流及其环境控制的影响,因此,本研究主要探究降雨事件后的 22.5 h 内 30 min 尺度的雨后环境和雨后树干液流(Q_{post})关系。

表 1 常见和极端降雨事件区域特异的划分标准

降雨事件类型	区域特异的划分标准	本研究区的定义
常见降雨量事件	场降雨量为中位数±1.5 倍标准误的降雨事件	3.2~7.7 mm
极端降雨量事件	场降雨量高于累积概率为 90%的降雨事件	≥33.8 mm
常见降雨历时事件	场降雨历时为中位数±1.5 倍标准误的降雨事件	3.1~7.0 h
极端降雨历时事件	场降雨历时长于累积概率为 90%的降雨事件	≥34.0 h

1.5 数据分析

使用偏相关分析,分别获取生长季、雨后、常见及极端事件后,树干液流的环境控制主导因子及其模式。为了研究雨后树干液流对降雨特征(场降雨量和场降雨历时)的响应,采取分箱法并辅以回归分析。其中,分箱数依次使用 3—10,回归分析分别使用线性函数、二次函数、幂函数,最终采用最显著的回归关系。为了探究 30 min 尺度下雨后树干液流随时间变异是否显著,以及在常见与极端事件间有无显著差异,使用重复测量方差分析。其中,根据球形度检验结果,针对降雨量和降雨历时的分析,均采纳的是格林豪斯·盖斯勒法($\epsilon < 0.75$)。偏相关分析、线性拟合分析及重复测量方差分析使用 SPSS 26.0 软件完成。利用 OriginPro 2022b 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生长季环境因子的动态变化

2019 年生长季日均空气相对湿度为 80.9%±10.3%,日均气温为(25.3±2.5) °C,日均饱和水汽压差为(0.77±0.45) kPa,日均太阳辐射为(12.4±4.4) MJ/(m²·d),日均风速为(1.2±0.3) m/s。2021 年生长季期间日均湿度为 86.4%±13.0%,日均气温为(24.7±2.3) °C,日均饱和水汽压差为(0.54±0.52)

kPa,日均太阳辐射为(11.1±4.6) MJ/(m²·d),日均风速为(1.2±0.3) m/s(图 1)。

2019 年生长季共计 27 场降雨,平均场降雨量为(8.1±11.9) mm,场均历时为(14.6±15.6) h,场均雨强为(1.4±2.9) mm/h。2021 年生长季降水量总量及场次均较 2019 年更多,共计 29 场降雨,平均场降雨量为(18.1±21.3) mm,场均历时为(17.7±17.9) h,场均雨强为(1.5±2.0) mm/h(图 2)。其中,2021 年 7 月累计降水量高达 267.4 mm,这主要是由 2021 年 7 月 11 日(DOY=192)22:00 至 7 月 14 日(DOY=195)7:30 历时 58 h 的 100.0 mm 降雨导致的。该降雨事件将土壤水层厚度(0—70 cm)从 7 月 11 日的 53.7 mm,升高至 7 月 14 日的 70.9 mm(图 2)。

2.2 生长季及雨后树干液流特征

由图 2 可知,2019 年 6—9 月日均树干液流量分别为(0.64±0.11),(0.44±0.15),(0.42±0.12),(0.44±0.13) mm/d。2021 年生长季各月的日均树干液流量分别为(0.76±0.27),(0.58±0.22),(0.74±0.20),(0.55±0.24) mm/d。在日尺度上,累计降雨量及土壤水层厚度的变化,与累计液流量的变异并不一致。

2.3 生长季及长尺度雨后树干液流的环境控制

由表 2 可知,在 2019 年、2021 年生长季期间,只

有太阳辐射显著促进树干液流($r_p = 0.539, p < 0.001$),饱和水汽压差、风速及土壤含水量均对树干液流量无影响($p > 0.05$)。降雨发生后,树干液流的

环境控制保持不变,仍仅有太阳辐射显著控制树干液流($r_p = 0.624, p < 0.001$)。降雨不改变树干液流主导的环境控制因子及其的显著促进作用。

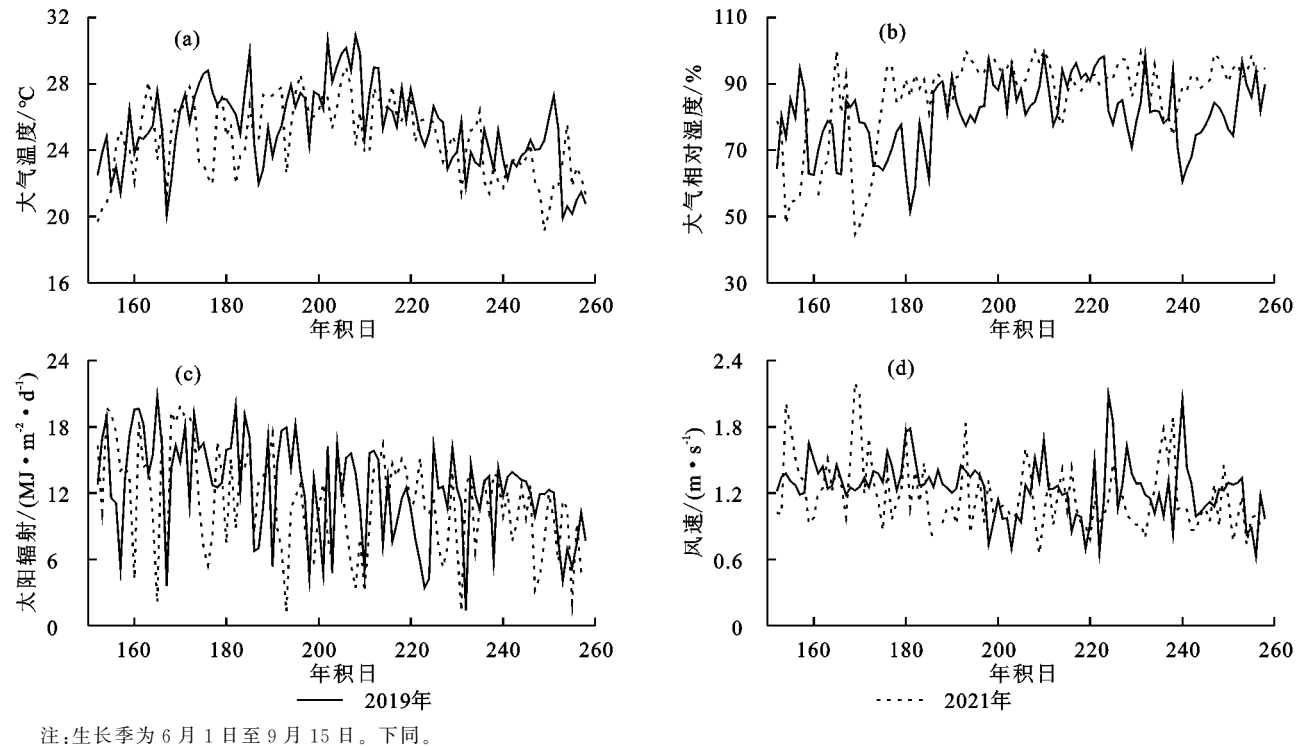


图 1 2019 年、2021 年生长季环境因子的日动态变化

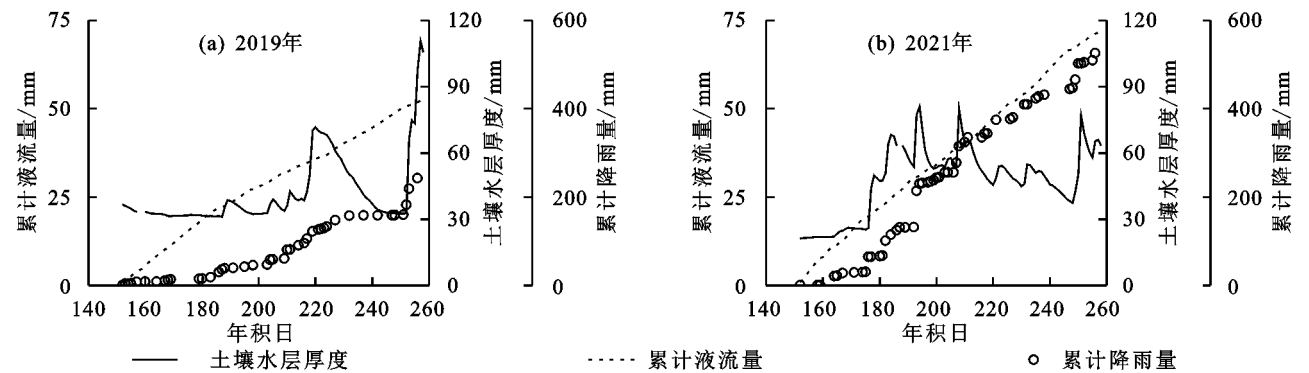


图 2 2019 年和 2021 年生长季累计树干液流、累计降雨量和土壤水层厚度曲线

表 2 生长季及场尺度降雨事件后树干液流与环境因子的偏相关关系

环境因子	生长季		降雨事件后	
	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性
太阳辐射	0.539	<0.001	0.624	<0.001
饱和水汽压差	-0.007	0.921	-0.051	0.724
风速	0.021	0.767	0.097	0.500
土壤水	0.044	0.533	0.036	0.803

2.4 场尺度雨后树干液流对场降雨特征的响应

由图 3 可知,2019 年、2021 年生长季期间,场降雨量(P)在 0.2~100.0 mm 波动,频次最高的为 0.4 mm ($n=4$)。场降雨历时为 0.5~60.0 h,频次最高的为 0.5 h ($n=5$)。其中,50%的降雨事件小于 5.6 mm,45%的降雨事件短于 6.0 h。随着场降雨量的增加,雨后树干液流(Q_{post})呈线性下降趋势($Q_{\text{post}} =$

$-5.6 \times 10^{-5} P + 0.0131, R^2 = 0.78, p = 0.004$)。而 Q_{post} 对降雨历时的响应,在场尺度上无明显关系。

2.5 常见及极端降雨事件后半小时尺度的树干液流及其环境控制

由图 4 可知,在 2019 年、2021 年生长季期间,发生常见场降雨量事件 8 次;常见场降雨历时事件 9 次。同时,发生极端场降雨量事件 7 次,极端场降雨历时事件 11 次。常见场降雨量事件后 Q_{post} 为 (0.011 ± 0.007) mm/0.5 h,极端场降雨量事件后更低,为 (0.008 ± 0.004) mm/0.5 h;常见场降雨历时事件后 Q_{post} 为 (0.013 ± 0.006) mm/0.5 h,而极端场降雨历时事件后为 (0.011 ± 0.003) mm/0.5 h。即极端场降雨量和极端场降雨历时事件均减少场尺度的 Q_{post} 。然而,相较于常见事件,在半小时尺度上极端场降雨量事件

($p=0.325$)及极端场降雨历时事件($p=0.264$)并不会显著改变半小时尺度降雨事件后的 Q_{post} 。

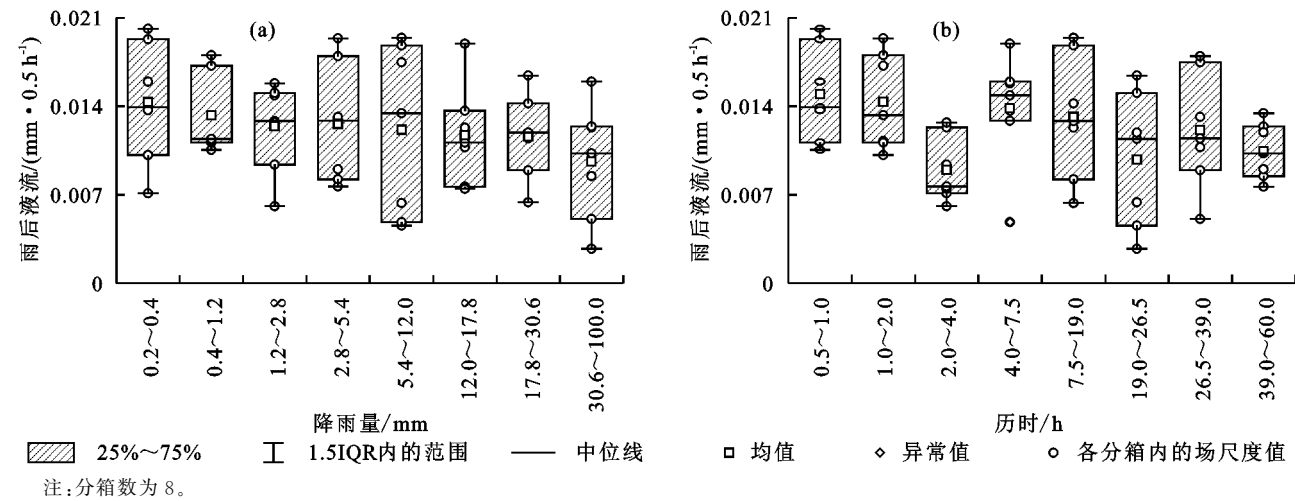


图 3 雨后树干液流对场降雨事件特征的响应

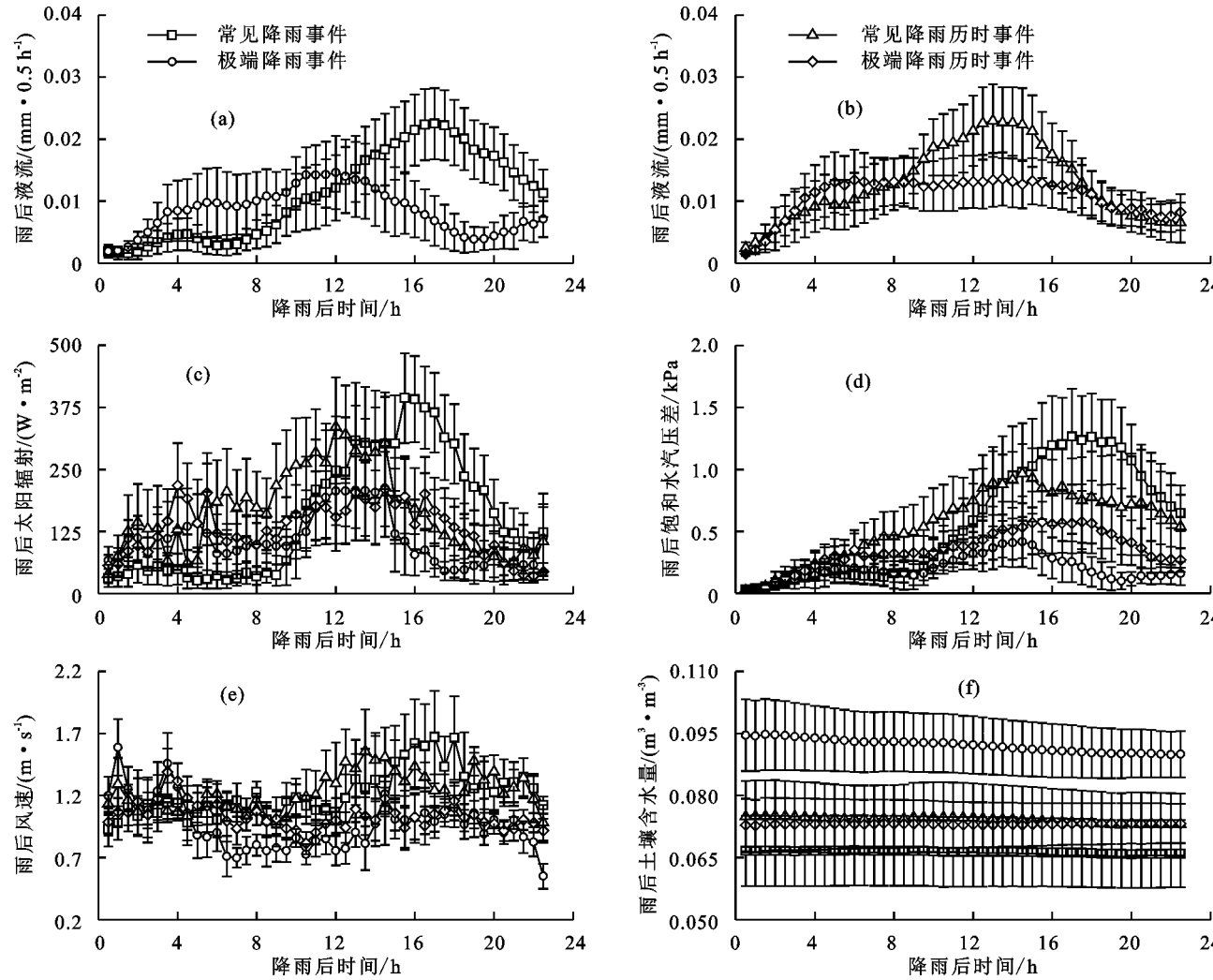
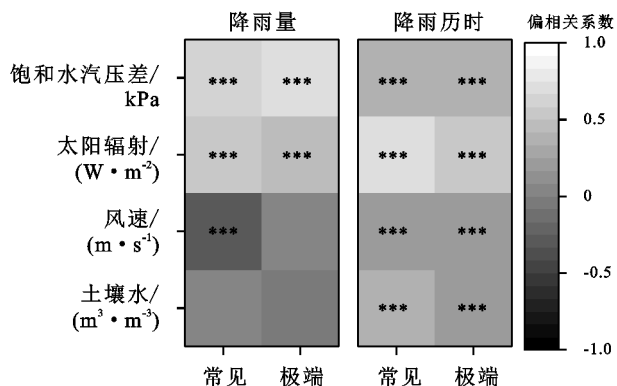


图 4 常见和极端降雨事件后树干液流和环境因子在半小时尺度上的时间变化

由图 4 可知,常见和极端场降雨量事件后,半小时尺度的平均 R_s 、VPD、风速和土壤含水量分别为 $(155.2 \pm 121.7) \text{ W/m}^2$ 、 $(0.6 \pm 0.4) \text{ kPa}$ 、 $(1.2 \pm 0.2) \text{ m/s}$ 、 $(0.07 \pm 0) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $(108.4 \pm 49.7) \text{ W/m}^2$ 、 $(0.2 \pm 0.1) \text{ kPa}$ 、 $(1.0 \pm 0.2) \text{ m/s}$ 、 $(0.09 \pm 0) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。常见和极端强降雨历时事件后,半小时尺度的平均 R_s 、VPD、风速和土壤含水量分别为 $(163.3 \pm 81.8) \text{ W/m}^2$ 、 $(0.6 \pm 0.3) \text{ kPa}$ 、 $(1.2 \pm 0.2) \text{ m/s}$ 、 $(0.07 \pm 0) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $(130.7 \pm 50.6) \text{ W/m}^2$ 、 $(0.4 \pm 0.2) \text{ kPa}$ 、 $(1.0 \pm 0.1) \text{ m/s}$ 、 $(0.07 \pm 0) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。由图 5 可知,在常见和极端场降雨量事件后,VPD($r_p \geq 0.616$, $p < 0.001$)和 R_s ($r_p \geq 0.424$, $p < 0.001$)均极显著促进半小时尺度的

Q_{post} , VWC 对 Q_{post} 无影响 ($p \geq 0.469$)。而风速则在常见场降雨量事件后, 极显著抑制半小时尺度的 Q_{post} ($r_p = -0.258, p < 0.001$)。对于场降雨历时事件, 无论在常见还是极端的情况下, 4 个环境因子(饱和水汽压差、太阳辐射、风速及土壤水)均显著促进半小时尺度的 Q_{post} ($r_p = 0.183 \sim 0.682, p < 0.001$)。



注: 环境控制用偏相关系数表征; *** 表示在 0.001 级别(双尾)相关性显著。

图 5 常见和极端强降雨事件后半小时尺度雨后液流的环境控制差异

3 讨论

3.1 场尺度降雨后树干液流的环境控制

太阳辐射可以直接调控气孔导度^[35], 能显著促进植物液流, 是影响树干液流的主要环境因子(表 2)^[27,32]。此外, VPD 也被认为是树干液流的主要控制因子^[32]。风速对树干液流的影响则较为复杂。风速既可以减小叶片周围空气阻力, 增加植物液流, 也可以通过增加饱和水汽压差, 促进叶片向大气的水汽扩散, 从而直接增加树干液流, 或间接通过降低冠层导度关闭气孔抑制植物液流^[36]。在白天, 风速可以促进液流, 而在晚上, 又可抑制液流^[27]。实际上, 各环境因子对树干液流的影响是相互依存的。因此, 本研究在半小时尺度上, 剔除其他环境因子的潜在影响时发现, 常见的树干液流主导因子, 如 VPD 与风速, 尤其是土壤含水量, 对本半湿润半干旱区站点无显著影响(表 2)。这是因为本站点的森林生态系统同时也是河岸生态系统, 大气虽然较为干旱, 但地下水位偏高^[23], 使得该生态系统并不遭受水分胁迫^[24]。这通过调控叶片气孔导度、调节树木体内水势梯度, 进而影响树干液流的环境因子(如 VPD、风速和土壤含水量), 在本研究区对于树干液流的影响并不敏感(表 2)。

与前期多位于干旱、半干旱区, 降雨稀少、土壤水分亏缺环境的研究结果不同, 本研究场尺度降雨事件后, 环境因子对树干液流的控制作用并未改变, 太阳

辐射仍为唯一影响因子(表 2)。目前降雨对树干用水影响的研究大多位于干旱、半干旱区, 降雨后的环境因子, 尤其是土壤含水量及其控制方式发生改变。比如, 树木用水来源从雨前的深层水转变为雨后的浅层水^[37]; 土壤含水量由促进变为抑制植物液流^[38]。这是因为在这些地区, 植被用水的主要限制因子为水分供应。降雨作为水分来源补给土壤水, 缓解植被水分胁迫, 促进植物液流。而本半湿润半干旱研究区, 降雨虽然可以进一步补充土壤水(图 2), 但由于生态系统在整个生长季已然不受水分胁迫^[24], 因此降雨事件不会改变树干液流的环境控制(表 2)。

3.2 场尺度降雨特征对雨后树干液流的影响

除环境因子控制外, 降雨特征(降雨量、降雨历时、降雨频率、降雨强度)也可以对植物液流产生影响^[39]。随着降雨量的升高, Q_{post} 逐渐降低(图 3a)^[40]。这可能是因为降雨前土壤含水量越高、土壤越湿润, 雨后液流对降雨量升高的响应就越小^[12,40]。同时, 降雨量和降雨历时增加使冠层潮湿程度增加, 雨后短时间内植物液流量减少^[41]。在土壤含水量充足的地区, 大降雨量和长历时降雨事件可能造成超渗产流或蓄满产流。若土壤含水量在短时间内增加至过高, 据此升高的根系水势释放相应信息素, 影响树木细胞的正常生理功能, 损害水分运输能力, 进而导致液流降低^[16]。然而, 在土壤水分受限地区, 大降雨量事件可以增加植物液流, 这可能是因为, 该研究区土壤含水量偏低, 树木液流受限于水分供应, 数次的大降水量事件可以补充深层地下水, 短暂地缓解树木的水分胁迫, 促进树干液流^[13]。

对于强降雨历时, 本研究发现, 其对树干液流的影响并不明确(图 3b)。Wang 等^[39]根据降雨量、降雨历时和降雨强度将降雨事件分为 3 类, 发现降雨会使液流降低, 且日尺度液流的最大降幅发生在中等平均降雨量、降雨强度和最高平均降雨历时类降雨事件中。这是因为此类降雨事件平均降雨历时和日均湿度最大, 日均太阳辐射和 VPD 最低, 从而导致树冠干燥时间可能最长, 长期的气孔关闭或减少开放将限制植被的蒸腾^[42]。关于降雨历时对树干液流的影响值得进一步地研究。

3.3 极端降雨事件对雨后半小时尺度树干液流及其环境控制的影响

不同于日尺度或场尺度的环境控制, 半小时尺度的雨后树干液流可以受到除太阳辐射以外的环境因子的影响(表 2 和图 5)。在半小时尺度下, 无论是常

见还是极端降雨事件后,太阳辐射和饱和水汽压差均是树干液流的显著促进因素(图5)。这可能是因为相较于日尺度或场尺度,气孔开闭及树干液流在短时间内(如半小时尺度)对环境的响应更为敏感^[43]。比如,降雨期间冠层叶片表面和大气湿度增加,可能降低树干液流^[44]。降雨结束后,被抑制的气孔导度可能可以迅速正响应于升高的太阳辐射和 VPD,进而使半小时尺度的树干液流显著升高(图4、图5)。同时,由于气孔对环境的高敏感度响应,太阳辐射及饱和水汽压差对雨后半时树干液流的影响模式,在常见事件和极端事件间并无差异(图5)。

对于风速和土壤水,无论是在常见还是极端强降雨历时事件后,若剔除其余环境因子的潜在影响,二者均能显著促进半小时尺度的树干液流(图5)。这是因为,瞬时风速能直接降低空气阻力,增加液流^[36]。同时,研究区沙质土壤持水性差,下渗速度快^[40],0—70 cm 土壤水分在半小时尺度的波动,可以通过水势梯度连续体较为直接地影响细根分布于0—60 cm 的杨树根系水势,进而影响整棵树的水势梯度,从而显著影响雨后树干液流^[45]。由于风速及土壤含水量这2个环境因子对半小时树干液流的影响模式以物理过程为主导,因此强降雨历时极端与否,并没有改变这2种显著促进的关系。

然而,在常见场降雨量事件后,风速显著抑制半小时尺度的树干液流。这可能是因为风速可以通过增加饱和水汽压差来增大冠层阻力(即减小冠层湿度),据此在短时间内(半小时尺度)抑制液流(图4、图5)^[36]。在极端场降雨量事件后,冠层叶片充分湿润,冠层截留更倾向于达到饱和^[43],气孔的水汽通道可能与大气解耦,进而使得风速对树干液流无显著影响(图5)。

3.4 展望

显然,在水分供应不同的地区,降雨能否改变以及如何改变环境对树干液流的影响,树干液流对降雨特征的响应以及降雨特征对环境控制的影响,都可以存在明显差异。在水分供应充足的地区,大气条件较土壤水分状况,更能影响雨后树干液流。在该类地区开展树木用水对降雨响应的研究时,如果无法具备分析天然降雨的条件,则在人工控制试验时,也应对真实天气条件进行模拟。针对极端降雨事件,其既可能通过极高的水分补给或极长的降雨历时,影响降雨期间及雨后的树木生理活动,进而影响雨后树木用水特征,也可能通过极端事件后伴随的大气条件,影响雨

后树木用水。本文无法对这些可能的独立影响过程,以及可能的交互影响过程进行系统地捕捉并分析,也缺乏雨后树木生理活动指标的观测。但未来研究可对这一方向,进一步开展广泛且深入的研究,以更好地模拟和预测气候变化下降雨特征的改变及对森林生态水文过程的影响。

4 结论

(1)在半湿润半干旱的河岸人工林生态系统,太阳辐射是唯一显著影响欧美杨 107 (*Populus × euramericana*) 树干液流的环境因子,且降雨事件不改变这一环境因子对树干液流的影响。

(2)场降雨历时对雨后液流无明显影响,而随着场降雨量的增加,树干液流呈下降趋势。

(3)无论是常见还是极端事件后,树干液流随时间无显著差异性变化。太阳辐射和饱和水汽压差能够显著促进 30 min 尺度的雨后液流。风速及土壤含水量在特定的降雨特征下,也能在短时间内(30 min)出现显著促进或抑制树干液流的现象。

参考文献:

- [1] IPCC. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Z]. World Meteorological Organization, 2021.
- [2] Döll P, Trautmann T, Gerten D, et al. Risks for the global freshwater system at 1.5 °C and 2 °C global warming[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(4): e44038.
- [3] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 718-730.
- [4] Sun Y, Ding Y H. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 55(2): 284-300.
- [5] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover[J]. Catena, 2005, 61(2/3): 131-154.
- [6] A Y L, Wang G Q, Sun W C, et al. Stratification response of soil water content during rainfall events under different rainfall patterns[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(20): 3128-3139.
- [7] 王少丽, 臧敏, 王亚娟, 等. 降水 and 下垫面对流域径流量影响的定量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 1-5.
- [8] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. Nature, 2013, 496(7445): 347-350.
- [9] 卢志朋. 降雨变化对辽西北沙地樟子松树干液流的影响

- [D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [10] Itoh A, Nanami S, Harata T, et al. The effect of habitat association and edaphic conditions on tree mortality during El Niño-induced drought in a Bornean dipterocarp forest[J]. *Biotropica*, 2012, 44(5): 606-617.
- [11] Phillips O L, Heijden G V D, Lewis S L, et al. Drought-mortality relationships for tropical forests [J]. *New Phytologist*, 2010, 187(3): 631-646.
- [12] Chen L X, Zhang Z, Zeppel M, et al. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation[J]. *International Journal of Biometeorol*, 2014, 58(7): 1569-1581.
- [13] Chen L, Zhang Z Q, Zeppel M, et al. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation[J]. *New Forest*, 2014, 45(2): 235-250.
- [14] 张一平,王馨,刘文杰.热带森林林冠对降水再分配作用的研究综述[J]. *福建林学院学报*, 2004, 24(3): 274-282.
- [15] Ignace D D, Huxman T E, Weltzin J F, et al. Leaf gas exchange and water status responses of a native and non-native grass to precipitation across contrasting soil surfaces in the Sonoran Desert[J]. *Oecologia*, 2007, 152(3): 401-413.
- [16] 詹瑾.模拟降雨对核桃苗木蒸腾耗水、生理及生长特性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2019.
- [17] Durand M, Brendel O, Buré C, et al. Impacts of a partial rainfall exclusion in the field on growth and transpiration: Consequences for leaf-level and whole-plant water-use efficiency compared to controlled conditions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 282/283: e107873.
- [18] Ivans S, Hips L, Leffler A J, et al. Response of water vapor and CO₂ fluxes in semiarid lands to seasonal and intermittent precipitation pulses [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(5): 1181-1187.
- [19] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [20] Urban J, Rubtsov A V, Urban A V, et al. Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 271: 64-72.
- [21] Wullschlegel S D, Hanson P J. Sensitivity of canopy transpiration to altered precipitation in an upland oak forest: Evidence from a long-term field manipulation study[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 97-109.
- [22] Fravolini A, Hultine K R, Brugnoli E, et al. Precipitation pulse use by an invasive woody legume: The role of soil texture and pulse size[J]. *Oecologia*, 2005, 144(4): 618-627.
- [23] Zhu M X, de Boeck H J, Xu H, et al. Seasonal variations in the response of soil respiration to rainfall events in a riparian poplar plantation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: e141222.
- [24] Xu H, Zhang Z Q, Xiao J F, et al. Environmental and canopy stomatal control on ecosystem water use efficiency in a riparian poplar plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 287: e107953.
- [25] Peel M C, Finlayson B L, Mc Mahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(5): 1633-1644.
- [26] Xu H, Zhang Z, Chen J Q, et al. Regulations of cloudiness on energy partitioning and water use strategy in a riparian poplar plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 135-146.
- [27] 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.
- [28] Bai Y, Li X Y, Liu S M, et al. Modelling diurnal and seasonal hysteresis phenomena of canopy conductance in an oasis forest ecosystem[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 98-110.
- [29] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. *Annales des Sciences Forestieres*, 1985, 42(2): 193-200.
- [30] Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade 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.
- [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.
- [33] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (Second Edition) [M]. New York: Springer Science and Business Media, 1998.
- [34] Chen Z, Wei L, De Boeck H, et al. The end-timing of rainfall events modulates post-rainfall sap flow and its environmental controls [Z]. (2022-08) [2023-05-22]. https://www.researchgate.net/publication/362733820_The_end-timing_of_rainfall_events_modulates_post-rainfall_sap_flow_and_its_environmental_controls.
- [35] Oren R, Phillips N, Ewers B E, et al. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest[J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(6): 337-347.
- [36] Kim D, Oren R, Oishi A C, et al. Sensitivity of stand

- transpiration to wind velocity in a mixed broadleaved deciduous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 187: 62-71.
- [37] 朱雅娟, 卢琦, 吴波, 等. 增雨对巴丹吉林沙漠东南缘白刺水分利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 41-48.
- [38] 卢森堡, 陈云明, 唐亚坤, 等. 黄土丘陵区混交林中油松和沙棘树干液流对降雨脉冲的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3469-3478.
- [39] Wang D, Gao G, Li J, et al. Sap flow dynamics of xerophytic shrubs differ significantly among rainfall categories in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585(10): e124815.
- [40] Morgan H D, Barton C V M. Forest-scale sap flux responses to rainfall in a dryland eucalyptus plantation[J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1): 131-144.
- [41] Bosveld F C, Bouten W. Evaluating a model of evaporation and transpiration with observations in a partially wet Douglas-fir forest[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 108(3): 365-396.
- [42] Yue G Y, Zhao H L, Zhang T H, et al. Evaluation of water use of *Caragana microphylla* with the stem heat-balance method in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1668-1678.
- [43] 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.
- [44] 李宝, 常顺利, 孙雪娇, 等. 天山北坡雪岭云杉森林的蒸腾耗水规律[J]. *西部林业科学*, 2022, 51(5): 106-112.
- [45] 罗超, 查同刚, 朱梦洵, 等. 浅层地下水对华北地区河岸杨树林树干液流的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1401-1407.
- (上接第 283 页)
- [32] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [33] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55: 9604-9622.
- [34] Buendia C, Bussi G, Tuset J, et al. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 144-157.
- [35] 余魏兢, 丁文峰, 刘宇轩, 等. 基于典型次洪泥沙动力学过程的岔巴沟流域水沙关系分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(11): 20-26.
- [36] 王振飞. 子洲县退耕还林(草)之我见[J]. *陕西水利*, 2002(2): 25.
- [37] 翟婷婷, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(1): 57-63, 41.
- [38] 姜泓旭, 田鹏, 穆兴民, 等. 不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 86-92, 215.
- [39] 雷孝章, 杨玉坡, 赵文谦. 森林对坡面流的影响研究[J]. *四川水力发电*, 2001, 20(增刊 1): 51-53.
- [40] 王健, 吴发启, 蒋学玮. 作物覆盖与径流能量的关系[J]. *人民黄河*, 2005, 27(8): 34-36, 64.
- [41] 蒋忙舟. 黄土高原典型退耕草地植被特征对土壤入渗过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 99-104, 111.
- [42] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 713-722.