DOI: 10.20103/j.stxb.202412173101

杜珍,张赐成,肖雄,邹梓颖,胡彪,李嘉洁,张勇,付世川,蒋婉婧.亚热带典型次生林优势树木树干液流对夏秋极端干旱的响应.生态学报,2025, 45(13): - .

Du Z, Zhang C C, Xiao X, Zou Z Y, Hu B, Li J J, Zhang Y, Fu S C, Jiang W J.Response of sap flow in dominant trees of typical subtropical secondary forests to summer-autumn extreme drought. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

亚热带典型次生林优势树木树干液流对夏秋极端干旱 的响应

杜 珍,张赐成*,肖 雄,邹梓颖,胡 彪,李嘉洁,张 勇,付世川,蒋婉婧 湖南师范大学地理科学学院,长沙 410081

摘要:全球气候变化背景下,亚热带地区季节性干旱事件频发,对森林的碳汇潜力和生态系统的稳定性构成严重威胁。因此,研究亚热带次生林植物水分利用对干旱胁迫的响应规律,对提高植被对极端气候脆弱性方面的认识具有重要的理论意义。以亚 热带典型次生林三种优势树种樟树(*Cinnamonum camphora*)、马尾松(*Pinus massoniana Lamb.*)和枫香(*Liquidambar formosana Hance*)为研究对象,基于热扩散式探针技术,于 2022 年对树干液流进行连续监测,并结合气象因子和土壤水分的同步监测,对 比分析了 2022 年发生的极端干旱和 2023 年同期相对湿润期间三种树木树干液流对气象因子、土壤水分条件的响应规律。结 果表明:(1)2022 年极端干旱期的液流速率均显著低于 2023 年同期,干湿期间樟树液流速率的变化幅度最大;(2)2023 年干旱 期的液流速率呈现日间液流高于夜间液流的昼夜规律,而在 2022 年樟树和马尾松的夜间液流速率高于日间;(3)干旱期三种 树木液流速率与太阳辐射(*R_n*)、饱和水汽压差(VPD)呈正相关,均与土壤含水量(SWC)呈负相关;2022 年干旱期的液流速率 对环境因子的敏感性低于 2023 年同期;(4)在相对湿润的年份,液流速率主要受 VPD 和 *R_n*的影响;而在极端干旱的年份,液流 速率的主要控制因素由气象因子转变为土壤水分的可用性限制。

关键词:液流速率;极端干旱;环境因子;亚热带;次生林

Response of sap flow in dominant trees of typical subtropical secondary forests to summer-autumn extreme drought

DU Zhen, ZHANG Cicheng^{*}, XIAO Xiong, ZOU Ziying, HU Biao, LI Jiajie, ZHANG Yong, FU Shichuan, JIANG Wanjing

School of Geographical Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: Under accelerating global climate change, the increasing frequency of seasonal drought events in subtropical regions constitutes substantial challenges to the forest carbon sequestration potential and ecosystem stability. Consequently, elucidating hydraulic response mechanisms of subtropical secondary forest plants under drought stress holds crucial theoretical significance for predicting vegetation vulnerability to climatic extremes. Nevertheless, empirical evidence remains scarce regarding environmental determinants of xylem sap flow dynamics in secondary forest communities during extreme drought episodes. This investigation centered on three dominant tree species within a typical subtropical secondary forests ecosystem: *Cinnamonum camphora*, *Pinus massoniana Lamb.*, and *Liquidambar formosana Hance*. Employing the thermal dissipation probe methodology, we implemented continuous stem sap flow monitoring throughout 2022, concurrently

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42301034);湖南省大学生创新创业训练计划(S202210542107);地表过程与资源生态国家重点实验室 开放基金(2023-KF-3)

收稿日期:2024-12-17; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: cichengzhang@ hunnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

measuring meteorological parameters and soil moisture dynamics. A comparative examination was conducted to assess stem sap flow responses to meteorological variables and soil moisture conditions during the 2022 extreme drought event versus the hydrologically typical 2023 counterpart. The results reveal that: (1) The sap flow rates of the three tree species during the 2022 extreme drought period were significantly lower than those observed during the same period in 2023. Among the species, C. camphora exhibited the most pronounced reduction in sap flow rates during the transition from wet to drought conditions, followed by L. formosana, while P. massoniana showed the smallest decline. (2) Diurnal variation patterns revealed that during the 2023 drought period, the sap flow rates of all three species exhibited a clear diurnal cycle, with higher daytime sap flow rates compared to nighttime. In contrast, during the 2022 extreme drought period, C. camphora and P. massoniana displayed higher sap flow rates at night than during the day. (3) Correlation analysis between sap flow rates and environmental factors indicated that, irrespective of whether the year was wet or dry, during drought periods, the sap flow rates of all three species were positively correlated with solar radiation (R_n) and vapor pressure deficit (VPD), while negatively correlated with soil water content (SWC). However, the sensitivity of sap flow rates to environmental factors during the 2022 drought period was lower than that observed during the same period in 2023. (4) In relatively wet years, sap flow rates were primarily influenced by VPD and R_{ν} , whereas in extreme drought years, soil moisture availability became the dominant limiting factor. This shift indicates a transition in the regulation of sap flow rates from being driven by climatic factors to being constrained by soil water availability under drought conditions.

Key Words: sap flow rate; extreme drought; environmental factors; subtropical region; secondary forest

中国拥有世界上独特的亚热带森林,这片森林不仅承载着近4亿人口的生存与发展,更是长江经济带生态屏障,在维系区域生态安全具有重要的作用^[1]。自我国大力推行生态恢复与保护政策以来,亚热带地区植被覆盖率迅速提升,尤其是次生林面积持续增加,不仅为我国生态环境的改善发挥了巨大作用^[2],而且为区域的碳吸收和固存做出了重要贡献^[3]。由于季风系统的影响,亚热带区域水热组合存在显著的季节性变化,且干旱与高温同步发生,降水量的季节分布不均且较为集中,尤其是在夏秋季节,降水稀少易导致季节性干旱现象发生^[4]。然而,自工业革命以来,全球气候变化显著加剧。根据《IPCC第六次报告》,2011—2020年全球表面温度比1850—1900年升高1.09℃^[5]。全球绝大部分地区极端高温事件的发生频率和强度均有所增加。同时,随着气温升高,大气中的水汽含量呈现出增加的趋势,约每上升1℃水汽含量增加约7%,导致极端强降水事件的增加,进一步引发更多的洪涝灾害。随着全球气候变化的加剧,亚热带地区季节性干旱事件发生的频率、强度均呈现出增加趋势,这将对亚热带森林碳汇潜力和生态系统的稳定性构成严重威胁,深刻影响着该地区植被的恢复和植物水分利用策略,进而使该地区植物与水分之间的相互关系以及各自对环境因子的响应愈加复杂。因此,研究亚热带次生林树木水分利用对干旱胁迫的响应规律,具有重要科学意义,为该地区植被保护与恢复提供理论支持,同时增进对植物在极端气候条件下脆弱性的理解。

亚热带次生林不仅分布着常绿阔叶树种,还生长着部分落叶树种和人工针叶树种。不同树种在气孔导度、储水能力、水力导度和木材密度等生理特征方面存在差异^[6],这些差异会直接影响植物的蒸腾能力,并对水分利用策略产生重要影响。树干液流作为植物体内水分传输的关键过程,与生态系统的水文循环紧密相关,是衡量植物蒸腾耗水的一个重要生理指标^[7],能够反映植物生理特性和环境因子对植物水分利用的综合调节作用。热扩散式探针技术(Thermal Diffusion Probe, TDP)^[8]是国际上公认的能在不破坏植物生长的前提下长期、连续、直接测量植物树干液流最常用的方法之一,广泛应用于森林水文学和树木生理生态学等研究领域^[9–10]。然而,与植物树干液流相关的研究多集中在水资源比较匮乏的干旱和半干旱地区^[11–12],如 Du 等^[13]研究了水分限制地区不同水分条件下群众杨(Populus popularis)林分蒸腾和冠层导度动态,而关于亚热带地区的研究仍然较为匮乏。目前,已开展的亚热带地区关于植物蒸腾特征的研究大多集中于常绿树种^[14],如傅贺菁等^[15]研究了木荷(Schima superba)作为优势植物的树干液流特征,Luo 等^[16]和夏银华等^[17]通过不同

条件下的树干液流发现樟树的树干液流有明显的季节变化特征,而且日变化呈现昼夜节律性。尽管目前已有研究涉及亚热带树木树干液流对环境因子的变化的响应机制,然而,不同树种在极端干旱条件下树干液流特征对环境因子的响应规律,以及其在干旱和湿润条件下的差异性,目前仍缺乏系统性和深入研究。

本研究以长沙市附近的典型次生林的三种优势树种为研究对象,采用热扩散式探针技术于 2022 年期间 对常绿阔叶树种樟树(Cinnamonum camphora)、人工针叶树种马尾松(Pinus massoniana Lamb.)和落叶阔叶树 种枫香(Liquidambar formosana Hance)的树干液流进行长期连续监测,并结合对环境因子(如土壤含水量、太 阳辐射、饱和水汽压差和潜在蒸散发量等)的同步监测。研究主要包括:1)探讨亚热带次生林不同树种的液 流对干旱胁迫响应规律及其差异性;2)分析干旱和湿润期条件下,次生林不同树种液流对环境因子响应的差 异性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙市岳麓区西郊次生林样地(28°09′56″N,112°53′18″E),海拔 66 m,坡度约 12°,样 地面积约 630 m²。该地区属于典型的亚热带季风气候,多年平均气温为 17.4 ℃,年均降水量为 1421 mm,5— 7 月降水丰沛,8—9 月降水较少^[18]。研究区的土壤以黄壤为主,呈砂质黏土质地,土层较浅,发育程度较低, 20 cm 以下为紫色泥岩的风化产物。土壤中砂粒含量最高,其次是黏粒,而粉粒含量最低,0—100 cm 土壤容 重范围为 1.4—1.8 g/cm³,土壤孔隙度范围为 23.5%—34.9%,根系集中分布在 0—100 cm 的土壤深度内,其中 细根主要分布在 0—60 cm 的深度。研究样地属于亚热带人工次生林,主要树种包括乔木樟树(*Cinnamonum camphora*)、枫香(*Liquidambar formosana Hance*)、马尾松(*Pinus massoniana Lamb.*)、槲栎(*Quercus aliena*)、和灌 木锥栗(*Castanea henryi*(*Skan*) *Rehder*)、山矾(*Symplocos cochinchinensis*)、山茶(*Camellia japonica L.*)、南烛 (*Vaccinium bracteatum Thunb.*)和满树星(*Ilex aculcolata*)。本研究所选树种的基本特征如表 1 所示:

Table 1 Basic characteristics of the observed sample tree							
树种 Species	植物类型 Plant type	编号 Number	树高/m Tree height	胸径/cm Diameter at breast height	边材厚度/cm Sapwood thickness	边材面积/cm ² Sapwood area	树龄/a Tree age
樟树 C. camphora	常绿阔叶乔木	1	9.19	14.9	5.81	310.18	15
		2	11.51	24.4	9.50	443.18	15
马尾松 P. massoniana	常绿针叶乔木	3	10.93	15.4	6.10	178.94	15
		4	9.21	18.3	7.23	251.51	15
枫香 L. formosana	落叶阔叶乔木	5	9.43	17.9	5.81	220.56	15
		6	9.22	18.2	5.92	228.48	15

表1 观测样树的基本特征

树高、胸径(直径长度)与边材厚度均为现场测量得到

2022年是极端干旱年份,在湖南地区表现得尤为显著。中国气候公报显示^[19],2022年全年高温日数显 著偏多,持续高温事件频发,高温天数创下历史同期最高记录。同时,夏秋季降水显著偏少,长期的高温少雨 导致夏秋连旱,干旱日数远超常年,并达到历史极值。此外,全国降水量为 2012年以来最少,降水日数为 1961年以来最少,进一步加剧了干旱的严重性。这些气象特征表明,2022年湖南地区的极端干旱事件在历史 上具有显著的极端性特征。研究样地地形平缓,且采样点位于坡地顶部,土壤水分主要依赖降水补给,受坡地径 流影响较小。基于样地附近气象站点 1991—2021年的降水数据计算,8—11月的多年平均降水量为 354.61 mm, 2022年同时期的降水量仅为 108.20 mm。依据降水距平百分率 *P*^[20],2022年8—11月降水距平百分比为-69%, 属于极严重干旱的等级,可以判定在 2022年 8—11月研究样地在此期间经历了极端气象干旱事件(图 1)。

1.2 树干液流的监测与计算

在研究样地内选取了6棵长势良好的样树(樟树、枫香、马尾松各2株),采用热扩散式探针(RRTDP,北



图 1 研究区地形、遥感影像及多年降水距平百分率(1991—2022) Fig.1 Topography, remote sensing imagery, and multi-year precipitation anomaly percentage (1991—2022) in the study area

京雨根科技有限公司)对目标树木的树干液流进行监测,通过数据采集仪(CR1000,北京雨根科技有限公司) 自动记录两根探针之间的温差变化,每隔 10 s 采集一次数据,每隔 30 min 自动记录一次平均值,整个测量周 期从 2022 年 4 月至 2023 年 11 月。选择樟树作为研究对象,主要因其为亚热带典型代表树种且为长沙市绿 化树种;枫香作为阔叶树种因其导水组织特性和相对较大胸径适合液流探针测量;马尾松作为人工林主要树 种,早期作为植被恢复树种引进种植,是次森林的先锋树种。所使用的 TDP20 和 TDP30 型探针均由 2 根探针 组成,其中上方探针为加热探针,下方探针为参考探针。所有探针之间的距离都为 40 mm,探针直径为 1.25 mm,每个探针内部的热电偶结点均放置在探针的中间位置,加热探针内部为集成的线状加热器,加热电 阻的大小随探针的长度不同而不同,分别为 55 Ω 和 65 Ω,加热电压为 2 V 和 2.5 V;参考端探针内部无加热 电阻。探针头部和尾部用环氧树脂胶密封用于防水。统一将探针安装于每株样本树离地约 1.3 米的高度。 预处理作业包括刮去表皮后使用配套钻头钻 2 个上下间隔与 TDP 探针的预设距离精确匹配的孔,针孔的深 度根据边材厚度进行确认。接着将 2 根热扩散探针插入钻孔内。随后将探针根部以及电缆线固定在树干上, 并与 12 V 直流电的电源连接^[10]。为有效隔绝外界环境因素(如雨水侵蚀和太阳光直射)对测量结果可能产 生的干扰,采用了防辐射膜对探针及其毗邻的树干区域实施了全面的包裹防护。

温差(ΔT)与木质部的液流密度之间存在明确的定量关系,即温差变化用于反映树木的液流速率。 Granier 通过一系列标定试验,推导出了ΔT 与液流密度之间的关系式,其经验公式^[21]如下:

$$F_v = 0.0119 \times \left[\frac{(\Delta T_{\text{max}} - \Delta T)}{\Delta T}\right]^{1.231} \times 3600$$
(1)

式中, F_{v} 为单位边材面积的液流速率(cm/h); ΔT 为上下探针之间的瞬时温度差(\mathbb{C}),由数据采集仪得到; ΔT_{max} 为液流为0时上下探针间的瞬时温度差(\mathbb{C}),即为一天中的瞬时温度差最大值;3600为单位转换值。 考虑到降水日环境因子波动较大,且液流数据受噪声干扰显著,为了能够更加直观的观察分析不同树种在不 同时期液流速率的日变化趋势,在后续数据处理中剔除掉了降水日数据,只选取各时期的非降水日进行分析。 **1.3**环境因子的监测与处理

1.3.1 土壤含水量与潜在蒸散发量的测定

本研究利用云智能管式土壤水分温度检测仪(RWET-100,智墒,中国)测定土壤体积含水量(Soil water content,SWC,m³/m³)和潜在蒸散发量(Potential evapotranspiration,PET,mm/d)。仪器探头设置于样地中心,分布在0—100 cm 土层内,每 10 cm 间隔布设一个测点,测量精度分别为±2.5%(含水量),±0.5 ℃(温度)。 监测时间为 2022 年 4 月—2023 年 11 月,数据采集时间间隔为 1 h。为提高测量准确性,采用烘干法测得的土 壤含水量数据对仪器数据进行校正,此外,潜在蒸散发量的计算基于 Penman-Monteith 方程^[21],以确保蒸散发 数据的科学性和可靠性。

1.3.2 土壤相对含水量的计算

土壤调查结果表明,研究样地次生林树木的根系主要分布在 0—60 cm,因此,在本研究中将土壤含水量 分为浅层(0—60 cm)土壤含水量与深层(60—100 cm)土壤含水量。研究过程中,采用加权平均法计算综合 土壤含水量,并进一步采用 Granier^[8]提出的计算林下土壤相对含水量(Relative extractable soil water content, REW)的计算方法,得到最终的土壤相对含水量,其计算公式为:

$$REW = \frac{SWC - SWC_{min}}{SWC_{max} - SWC_{min}} \times 100\%$$
(2)

式中,SWC 为实测土壤含水量(m³/m³);SWC_{max}为样地土壤水分饱和时的最大土壤含水量(m³/m³);SWC_{min}为研究时段内最小的土壤含水量(m³/m³)。依据 Granier 等^[22]和 Chen 等^[23]对于干旱的划分标准,REW <40%为干旱期,考虑到本研究针对的是极端干旱条件,因此,当 REW <10%时土壤水分严重亏缺,树木受水分胁迫显著,被定义为极端干旱期;REW >40%时土壤水分充足,为湿润期;10% <REW <40%时,定义为一般干旱期。

本研究采用安装在次生林附近开阔地上的微型自动气象站(WeatherrHawk-232,美国)进行气象数据采集,每隔1h自动记录一次气象数据,监测时段与树干液流监测时间保持同步。测定的气象因子包括空气温度 $T_a(\mathbb{C})$ 、相对湿度 RH(%)、太阳总辐射 $R_a(W/m^2)$ 、风速 $U_2(m/s)$ 和降水量 P(mm)。同时,可以根据 $T_a(\mathbb{C})$ 和 RH(%)计算饱和水汽压差 VPD(kPa),计算公式^[24]如下:

$$VPD = 0.611 \times e^{\frac{17.27T_a}{T_a + 240.97}} \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$
(3)

1.4 数据处理

本研究采用 SPSS 27.0.1 软件对数据进行统计分析,并进行以下处理步骤:(1)采用非参数检验评估了三种树木 2022 年与 2023 年同期液流速率之间的差异显著性;(2)利用线性逐步回归方程法,构建了液流速率与环境因子的关系;(3)使用 AreGIS 10.8 和 Origin 2021 进行制图;(4)借助 Matlab 2019 软件分析不同年份干旱期三种树木液流速率与环境因子的相关性,并进行可视化呈现。

2 结果与分析

2.1 环境因子的时间变化特征

研究样地的环境因子存在明显的季节变化。样地内太阳辐射 R_n 的变化范围为 0.7—25.9 MJ m⁻² d⁻¹,平 均值为 11.9 MJ m⁻² d⁻¹,受降水影响较大,低值基本出现在降水日(图 2);温度 T_a 的变化范围为 -4.7—

40.7 ℃,最大值出现在 2022 年 8 月 23 日,日平均值最高为 34.9 ℃,最低为 0.1 ℃,平均 *T*_a为 20.7 ℃,其变化 趋势与 *R*_a一致,具有显著的季节性变化,即春夏高,秋冬低(图 2);相对湿度 *RH* 的变化范围为 14%—100%,最大值出现在 2023 年 6 月 22 日,日平均值最高为 99.9%,最低为 33.0%,平均值为 70.4%(图 2);饱和水汽压差 VPD 的日平均值变化范围为 0—2.5 kPa,平均值为 0.8 kPa,最大值出现在 2022 年 8 月 20 日(图 2)。*T*_a与 VPD 的受化趋势同步,而 *RH* 与 VPD 则呈现反相关的变化模式。日降水量 *P* 的变化范围为 0.2—84.1 mm,降水季节分布不均,4—6 月份降水较多,而 8—10 月份降水较少(图 2)。潜在蒸散发量 PET 的日变化范围为 0—7.3 mm/d,平均值为 3.6 mm/d,最大值出现在 2022 年 8 月 21 日,最小值出现在 2022 年 12 月 1 日(图 2)。2022 年 8—11 月期间 PET 和 *P* 存在严重失衡,表明该时期存在气象干旱。土壤相对含水量 REW 的日平均值为 33.6%,最低值出现在 2022 年 10 月 3 日,总体呈现出夏秋季节逐渐下降、冬春季节逐步回升的季节性波动趋势。在 2022 年的极端干旱的影响下,REW 降至最低水平。尽管在干旱结束后土壤含水量有所恢复,但未能完全回升至干旱发生前的湿润状态。总体而言,2022 年气候条件显著干旱,而 2023 年则相对湿润。在 2022 年的 8—11 月期间土壤相对含水量长期低于 10%(图 2),表明随着气象干旱的持续,土壤中的水分逐渐减少,最终导致了研究样地土壤干旱的发生。在研究期间,2022 年 8 月 8 日至 2022 年 11 月 17 日 REW 持续低于 10%,故这段时间为干旱期。





Fig.2 Temporal changes of environmental factors and soil relative water content in the sample plots during the study period 阴影部分表示的是干旱期;由于仪器故障,2022 年 11 月 5 日至 2022 年 11 月 17 日的 PET 数据缺失,2023 年 8 月 31 日至 2023 年 9 月 14 日的 REW 数据缺失;图中的虚线代表 REW 为 10%。

2.2 不同树种液流速率的时间特征

不同树种间的液流速率均呈现出明显的季节变化特征,整体呈现夏季显著高于冬季的趋势,其中樟树和

枫香的季节变化幅度显著大于马尾松(图3)。樟树(*C. camphora*)的液流速率变化范围为0—10.2 cm/h,高值 出现在 2022 年 5—7月,低值出现在 2022 年 12月至次年 1月,平均值为 2.7 cm/h;其次是落叶阔叶乔木枫 香,其液流速率的变化范围为 0—4.0 cm/h,高值出现在 2022 年 6月,低值出现在 2022 年 11月—2023 年 1 月,平均值为 1.1 cm/h;液流速率变化最小的是人工针叶乔木马尾松,其变化范围为 0—2.6 cm/h,高值出现在 2022 年 6—7月,低值出现在 2023 年 1—2月,平均值为 0.6 cm/h。同时可以看到,三种树木的液流速率均存 在润湿期显著高于干旱期的现象。此外,在湿润期与干旱期之间的这段时间里(即 2023 年 7月 9日至 2023 年 8月 30日)可以看到明显的下降趋势,其中樟树液流速率的下降幅度最大,从 9.9 cm/h 下降至 0.2 cm/h, 枫香和马尾松也分别从 2.3 cm/h 和 2.9 cm/h 下降至 0.3 cm/h 和 0.1 cm/h。



图 3 不同树种液流速率的时间变化



由于仪器故障,2022年5月11日至2022年5月19日和2023年8月8日至2023年8月18日的液流数据缺失;且由于后期马尾松死亡,从2023年4月15日开始马尾松没有液流数据。

不同树种的液流速率不仅呈现明显的时间变化趋势,同时在不同树种之间也存在显著差异。统计结果发现,2022年与2023年同期的液流速率差异均高度显著(P<0.001)。相较于2022年湿润期,2023年同期的液流速率差异均高度显著(P<0.001)。相较于2022年湿润期,2023年同期的液流速率显著下降。具体而言,樟树在2022年湿润期液流速率的平均值为7.11 cm/h,显著高于2023年的4.83 cm/h(P<0.001,表2);枫香在2022年湿润期液流速率的平均值为2.82 cm/h,显著高于2023年的1.58 cm/h(P<0.001,表2)。这一现象可能与2022年的极端干旱对樟树和枫香的生理生态特征的长期影响有关,使其在2023年(相对湿润年份)仍表现出较低的液流速率。与2022年干旱期相比,2023年同期的液流速率显著下降。在干旱期,樟树2022年液流速率的平均值为1.40 cm/h,显著低于2023年的1.97 cm/h(P<0.001,表2)。

Table 2 Comparison of Sap Flow Rates Between the Drought and Wet Periods in 2022 and the Corresponding Periods in 2023								
树种	时间	年份	平均值	样本数 n	曼-惠特尼 U	标准化检验统计 Z	显著性P	
Species	Time	Year	Mean	Sample size	Mann-Whitney U	Standardized Test Statistic	Significance	
樟树	湿润期	2022	7.113	44	447	-5.744	< 0.001	
C. camphora		2023	4.827	60				
	干旱期	2022	1.396	93	3579	3.821	< 0.001	
		2023	1.967	56				
枫香	湿润期	2022	2.815	44	274	-6.882	< 0.001	
L. formosana		2023	1.583	60				
	干旱期	2022	0.697	93	3603	3.915	< 0.001	
		2023	1.007	56				

表 2 2022 年干旱和湿润期的液流速率与 2023 年同期的对比

由于后期马尾松死亡,无法比较 2022 年与 2023 年同期的液流速率差异

http://www.ecologica.cn

总体趋势来看,2022年树干液流在湿润期高于2023年同期,2022年干旱期的液流速率则低于2023年同 期。这一现象可能与土壤水分状况的滞后效应相关。尽管2023年总体气候较湿润,但2022年的极端干旱可 能对土壤深层水分储备造成长期影响,导致土壤含水量未能完全恢复,进而影响了植物根系的水分吸收能力, 导致2023年湿润期的液流速率仍然较低。此外,极端干旱不仅可能引起叶片气孔关闭,还可能因土壤含水量 的极度亏缺,进一步减少植物可利用的水分,从而抑制液流速率。不同树种间的液流速率存在显著差异。在 湿润期,樟树的液流速率显著高于枫香,表明其在湿润环境下具有更高的水分利用能力。相比之下,枫香在湿 润期液流速率下降幅度更大,可能反映了其对环境不利变化的适应能力相对较弱。这一结果进一步说明,不 同树种对气候波动的响应存在显著差异,需结合具体生理特性深入探讨其生态适应策略。

2.3 干旱条件下液流速率及环境因子的日变化差异

对比 2022 年与 2023 年同期的各环境因子的日变化特征(图 4)发现,各环境因子的日变化趋势在不同年 份总体一致,均表现出明显的单峰变化模式,即在白天上升并在一定时间内达到峰值后下降。在干旱期,这两 年的 *R*_a在 13:00 左右达到最大值,2022 年与 2023 年分别为 54.3 MJ m⁻² d⁻¹和 47.4 MJ m⁻² d⁻¹(图 4);由于大 气和地面吸收和积累热量需要时间,*T*_a的峰值相较于 *R*_a存在一定的滞后效应,最大值出现在 15:00 左右, 2022 年与 2023 年分别为 30 ℃和 27.6 ℃(图 4);*RH* 的变化趋势与其他环境因子相反,在 7:00 左右达到最大 值,2022 年与 2023 年分别为 71.7%和 89.8%,在 15:00 左右出现最小值,分别为 35.5%和 52.1%(图 4);VPD 最大值出现时间与 *T*_a一致,在 15:00 左右达到最大值,2022 年与 2023 年分别为 3.1 kPa 和 1.9 kPa(图 4);*U*₂ 的最大值在 13:00 左右,2022 年与 2023 年分别为 0.9 m/s 和 0.5 m/s(图 4)。这些环境因子的日变化表明, 2022 年的气候条件较 2023 年更为干旱。相较于 2023 年,2022 年的干旱导致地表水分减少、气温升高、蒸发



图 4 2022 年干旱期与 2023 年同期的环境因子及不同树种的液流速率日变化

Fig.4 Diurnal variations in environmental factors and sap flow rates of different tree species during the drought period in 2022 and the corresponding period in 2023

由于马尾松在后期死亡,2023年同期的数据缺失

增强,进而引起相对湿度下降、饱和水汽压差增大,同时风速和太阳辐射的日变化幅度更大。而 2023 年相对 湿润的气候条件使得这些环境因子的日变化幅度相对较小,相对湿度较高。

相比之下,2022年干旱期的液流速率变化较为平稳,波动幅度明显小于 2023年。枫香的液流速率日变 化仍呈现典型的昼夜节律,最大值出现在正午前后,为1.4 cm/h(图4),然而,樟树和马尾松的液流速率日变 化模式明显不同,呈现夜间液流高于日间的"U"型单峰曲线特征,最小值出现在正午前后,分别为0.7 cm/h 和0.2 cm/h(图4)。通过图4可以发现,2022年干旱期的日平均液流速率显著低于2023年同期。此外,不同 树种的昼夜液流速率分布存在显著差异。在 2022年干旱期,樟树和马尾松的夜间液流显著高于日间液流,而 枫香则表现为日间液流显著高于夜间液流(图5)。与之相比,2023年同期,樟树和枫香的日间液流速率均显 著高于夜间液流(图5),显示出较为典型的蒸腾驱动模式。这一现象可能受到土壤水分状况和植物生理调节 机制的共同影响。



图 5 2022 年干旱期与 2023 年同期不同树种夜间与日间液流速率差异的对比

Fig.5 Comparison of nighttime and diurnal sap flow rate differences among different tree species during the drought period in 2022 and the same period in 2023

2.4 干旱条件下液流速率对环境因子的响应

极端干旱条件下,不同树种的液流速率对环境因子的敏感性存在显著差异,且在不同年份表现出不同的 响应特征。基于 2022 年和 2023 年干旱期液流速率与环境因子的相关性分析(图6)结果表明:干旱期的液流 速率均与*R_n*、VPD 及 PET 呈正相关,与 SWC 主要呈负相关(图6)。在 2022 年的干旱期,SWC 受限,限制了液 流速率,导致植物水分利用受限。樟树和马尾松的液流速率仅与*R_n*存在较强的正相关(决定系数 *R*²分别为 0.3和 0.2,图6),而与 VPD 相关性较弱(决定系数 *R*²分别为0 和 0.1,图6);相比之下,枫香的液流速率对环境 因子的敏感性更强,与*R_n*、VPD 相关系数 *R*²分别为 0.6、0.7(图6)。表明其受环境因子影响较大。这种树种 间的差异可能与树种生理特性(如水力结构、气孔调节能力等)相关。

在 2023 年同期,由于 SWC 比 2022 年有所提高,液流速率受到水分限制减少,*R*^{*n*}与 VPD 对液流的敏感性 增强。樟树和枫香的液流速率与 *R*^{*n*}的相关性分别提高到 0.8 和 0.9(图 6),与 VPD 的相关性分别增加到了 0.5 和 0.7(图 6)。此外,樟树在 2022 年干旱期和 2023 年同期的液流速率随土壤含水量增加呈负相关,但 *R*²均为 0,表明其对 SWC 敏感性较低(图 6);相比之下,枫香的液流速率对 SWC 的敏感性略高于樟树,并在 2022 年 表现为负相关,而 2023 年则转变为正相关,表明其水分利用策略在不同气候条件下有所调整(图 6)。马尾松 在 2022 年的液流速率对 SWC 基本无响应,*R*²为 0(图 6)。值得注意的是,2023 年樟树和枫香在回归拟合斜 率的绝对值均高于 2022 年,表明在较高土壤含水量条件下,SWC 对液流速率的影响更为显著。此外,不同树 种在干旱条件下的液流速率响应模式存在明显差异,表明植被对环境变化的适应性具有物种特异性。

45 卷



图 6 2022 年干旱期与 2023 年同期不同树种液流速率与环境因子的关系

Fig.6 Relationship between sap flow rate and environmental factors of different tree species during the drought period in 2022 and the corresponding period in 2023

潜在蒸发量 PET 用于颜色条配色;第一行展示了樟树液流速率与环境因子的拟合关系;第二行为马尾松的拟合关系;第三行为枫香的拟合 关系;从左至右,环境因子分别为太阳辐射 R_a、土壤含水量 SWC 和饱和水汽压差 VPD;图中黑色虚线表示 2022 年的拟合曲线,蓝色虚线表 示 2023 年的拟合曲线; R²₁和 R²₂分别表示 2022 年和 2023 年拟合关系的决定系数;由于马尾松死亡,2023 年数据缺失

为进一步探讨不同树种在不同年份干旱期的液流速率与环境因子的关系,采用逐步线性回归分析分别构 建樟树、马尾松和枫香的回归模型(表3)。2022年干旱期,VPD、R_n和SWC是影响樟树、马尾松和枫香液流速 率的主要环境因子,其中樟树液流速率还受到PET的负向影响(P<0.001,表3)。三个树种的回归方程决定 系数分别为0.7(樟树)、0.3(马尾松)和0.9(枫香)。马尾松的回归模型拟合度相对较低,表明除气象因子外, 可能还有其他因素或环境交互作用影响其液流速率。2023年同期(相对湿润年份),VPD和R_n是影响枫香液 流速率的主要因素,其中VPD的影响最大,R_n主要表现为正向影响,但影响程度相对较小,回归方程的决定系

表 3	2022 年干旱期	与 2023 年同期树	干液流速率与理	环境因子的逐步	步回归方程
-----	-----------	-------------	---------	---------	-------

Table 3 Stepwise regression equations of stem sap flow rates and environmental factors during the drought period in 2022 and the corresponding period in 2023

树种 Species	年份 Year	回归方程 Regression equation	决定系数 R ² Coefficient of determination	显著性 P Significance
樟树 C. camphora	2022	$F_v = 0.1591R_n - 0.674$ VPD $- 0.244$ SWC $- 0.126$ PET $+ 2.708$	0.661	< 0.001
	2023	$F_v = 0.184R_n + 0.068$	0.788	< 0.001
马尾松 P. massoniana	2022	$F_v = -0.058R_n - 0.226$ VPD -0.132 SWC $+1.220$	0.298	< 0.001
枫香 L. formosana	2022	$F_v = 0.030R_n + 0.473$ VPD $+ 0.260$ SWC $- 2.860$	0.865	< 0.001
	2023	$F_v = 0.076R_n + 0.208$ VPD $+ 0.031$	0.861	< 0.001

F_v:液流速率 Sapflow velocity;*R_n*:太阳辐射 Solar radiation; VPD:饱和水汽压差 Vapour pressure deficit; SWC:土壤含水量 Soil water content; PET:潜在蒸散发量 Potential evapotranspiration

11

数为 0.8;樟树的液流速率仅与 R_n有关,且为正面影响,回归方程的决定系数为 0.9(P<0.001,表 3)。回归分 析结果表明,极端干旱条件下,SWC 成为限制液流速率的关键因子,并削弱 VPD 和 R_n的对液流速率的影响; 而在湿润年份,气象因子(VPD 和 R_n等)对液流速率的影响增强,土壤水分的限制作用相对减弱。

就树种而言,枫香的液流速率与环境因子的相关性最高,且其主要驱动因子是 VPD 和 R_n,而在极端干旱 条件下,SWC 作为限制因子影响其水分利用策略。这表明枫香对环境因子的敏感性较高,可能具备较强的适 应能力。相比之下,樟树的液流速率在 2022 年干旱期受 R_n、VPD 和 SWC 影响,而在 2023 年同期仅受 R_n影 响,表明其在湿润条件下表现出更高的水分利用适应性。马尾松的液流速率对环境因子的敏感性最弱,尤其 在极端干旱条件下,对 SWC 几乎无响应,可能具有较强的水分获取能力或采取了更严格的气孔调节策略以降 低水分损失。

3 讨论

3.1 树干液流的特征对比

3.1.1 液流速率的种间和季节差异

研究发现植物整体的液流速率受环境条件和树种特性的共同影响,表现出显著的树种间差异和季节性变 化规律,反映了植物对环境变化的适应性。本研究表明,液流速率呈现出樟树>枫香>马尾松的趋势,这一现 象进一步验证了阔叶树种通常比针叶树种表现出更高的蒸腾。树种间的液流速率差异可能主要受木质部解 剖结构和生理生态特征的影响。樟树和枫香作为阔叶树,其水分主要通过导管进行传输,而作为针叶树的马 尾松,水分主要通过管胞进行传输,相比之下,导管的直径和长度较大,管胞相对较小,在一定程度上限制了的 蒸腾速率,进而影响了液流速率;此外,不同树种的同化方式、气孔行为和水分利用效率也存在差异^[25],进一 步导致水分利用效率的差异。与其他学者的研究结果一致^[26-28],樟树、马尾松和枫香的液流速率存在显著的 季节性变化。在春夏季,树木生长旺盛,新叶具有更高的光合作用和蒸腾能力,需要消耗大量的水分。而春夏 季降水量较多,土壤含水量高,能够提供充足的水分,导致液流速率增加^[26,29]。秋冬季气温低、光照弱,树叶 老化甚至凋落,植物蒸腾作用减弱,液流速率相应降低^[29]。

3.1.2 干旱条件下液流速率的变化特征

不同年份之间的干湿程度不同,导致液流速率在不同气候条件下表现出明显的差异性。这种差异主要源 于极端干旱条件下土壤含水量的受限,当土壤供水不足时,植物蒸散发能力显著下降^[30]。分析结果表明, 2023 年干旱期液流速率日变化呈现日间液流高于夜间液流的单峰曲线,这与其他研究干湿季液流速率日变 化的研究结果^[14,31]一致。然而,在极端干旱 2022 年的干旱期,只有落叶树种枫香在 2022 年极端干旱期未出 现夜间液流高于日间的现象,樟树和马尾松的夜间液流速率则显著高于日间液流速率,这一现象与正常的昼 夜液流规律不同。有研究表明,落叶树种比常绿树种对土壤干旱的气孔敏感性更高,能更快地响应土壤水分 变化^[6,32]。同时,近年来关于夜间液流的研究^[14,33]认为,夜间液流的存在可能与夜间蒸腾与树干补水过程有 关。在极端干旱条件下,树木生存面临严重威胁,白天可能采取关闭气孔的策略以减少水分损失,而为了维持 生理需求,可能在夜间进行水分补充,从而导致夜间液流速率高于白天。然而,该现象的具体机制仍需进一步 研究。这一发现对于植物蒸腾过程的模型模拟具有重要意义,未来的研究应在模型构建中纳入夜间液流调节 机制,以提高模型对极端干旱条件下植物水分利用策略的预测能力。

3.2 干旱条件下树干液流的影响因素

在不同干湿程度的年份中,树干液流在干旱条件下对环境因子的响应存在显著差异。在湿润的年份,干 旱通常表现为季节性、短期或轻度干旱,即使在这种干旱期间,土壤水分仍能满足植物的基本需求。Meinzer 等人的研究表明,液流与气象因子(VPD 和 *R_a*)之间的耦合关系会随着水分胁迫程度的变化而调整^[34]。在不 同的土壤水分条件下,液流与气象因子的响应关系可能发生显著改变。当土壤水分充足时,气孔对蒸腾的控 制作用较弱,植物的蒸腾速率主要受外部气象因子(如 VPD 和 *R_a*)驱动;然而在水分胁迫条件下,气孔调节能

45 卷

应减弱,而更多地依赖于植物内部的水分传输能力。在本研究期间,2022年干旱期,樟树、马尾松和枫香液流 速率的主要受 R_n、VPD 和 SWC 的共同影响,然而在 2023 年同期(相对湿润年份),液流速率的主要驱动因子 为 VPD 和 R.。樟树和枫香具有良好的气孔调节能力和根系水分吸收调节,在一般干旱条件下,气孔关闭的 程度较低,仍能进行有效的蒸腾和液流运输。马尾松作为深根系针叶树种,在干旱年份对深层土壤水分依赖 性更强,因此 SWC 对液流变化的限制作用更为显著。然而,在湿润年份,气象因子对液流速率的驱动作用占 主导地位。这一结果与 Oren 等人的研究结果一致,其研究表明,当土壤水分不是主要限制因子时,气孔导度 主要响应于大气条件(如 VPD),蒸腾和液流的主要驱动因子为 VPD 和 R_n^[35]。但在土壤水分胁迫期间,蒸腾 受土壤水分限制,并不完全由气象因子决定^[36]。类似地,Granier等人也指出,在干旱年份,液流速率受到 R_{a} 、 VPD 和 SWC 的共同驱动^[37]。

植物在应对干旱胁迫时,会通过调节气孔导度、改变气孔分布以及一系列生理和生化调节机制来适应环 境,但当干旱程度超过一定的阈值时,植物将表现出受害现象,如落叶、枯梢枯枝甚至死亡等[38]。在极端干旱 条件下,土壤水分限制可能导致树木采取相对保守的水分利用策略,在严重水分亏缺时还会关闭气孔以减少 水分损失[39]。例如,罗紫东等[26]发现樟树在土壤水分亏缺时会通过调节气孔来应对水分胁迫。落叶是大多 数植物适应干旱的生存机制之一[26]。在研究期间,样地的樟树在干旱期有大量的树叶脱落,干旱结束后逐渐 恢复,并在树体下方萌发新芽叶;同时,枫香作为落叶树种,在2022年干旱期提前全部落叶,直到次年春季才 返青。而马尾松在干旱期结束后不久死亡,其死亡原因可能与长期干旱导致水力失效有关,但不排除是碳饥 饿导致的可能性,具体机制仍需进一步研究。戴军杰等^[40]在对长沙地区典型树木蒸腾的研究进一步证实了 本研究的结果。然而,本研究的主要局限在于样本量的限制,可能难以全面反映该树种的液流动态。此外,样 树之间的个体差异可能放大结果的波动性,从而使整体趋势受到单个样本的显著影响。尽管如此,本研究通 过对环境因子(R,、VPD 和 SWC)的精确监测和分析,确保了数据的可比性和可靠性。同时,采用非参数统计 方法尽可能降低了因样本不足带来的偏倚,为理解不同树种液流动态提供了重要的初步证据。未来研究可进 一步优化一下方面:(1)通过增加每种树种的样树数量,并涵盖不同年龄和生长条件下的个体,以进一步提升 结果的代表性和外推性;(2)结合遥感监测与生态模型,探讨不同尺度下的液流动态及其对气候变化的响应; (3)分析树木水分利用与碳平衡机制,探讨干旱导致的水力失效与碳饥饿之间的相互作用,以深入理解极端 干旱对森林生态系统的长期影响。

4 结论

本研究基于热扩散式探针技术,对亚热带次生林中樟树、马尾松和枫香的树干液流及环境因子进行了长 期监测,并分析了不同年份干旱期液流速率对环境因子的响应规律。研究得出以下结论:(1)不同树种的液 流速率具有显著的季节性变化,春夏季显著高于秋冬季。此外,2023年干旱期的液流速率高于 2022年。在 进入干旱期时,樟树的液流速率下降幅度最大,其次是枫香,马尾松下降幅度最小。(2)液流速率日变化模式 显示,在 2023 年干旱期,各树种的液流速率均呈现日间高于夜间的典型昼夜变化规律,而在 2022 年极端干旱 期,樟树和马尾松的夜间液流速率高于日间,这一现象可能与植物的水分补偿机制及夜间补水过程相关。 (3)液流速率与环境因子的相关性分析表明,无论是湿润还是干旱年份,干旱期各树种的液流速率均与 R_n、 VPD 及 PET 呈正相关,与 SWC 主要呈负相关。但湿润年份对 R_n与 VPD 的敏感性要高于干旱年份。(4)逐 步线性回归分析进一步揭示不同干湿年份的主要驱动因子,在湿润年份(2023年)气象因子 VPD 和 R "是影响 液流速率的主要因子;在极端干旱年份(2022年),SWC成为限制液流速率的关键因素,说明在严重水分胁迫 下,气孔调节能力受限,液流速率更多依赖于土壤水分供应。本研究从树干液流的角度揭示了亚热带次生林 树木对极端干旱的动态响应规律,为亚热带植被的保护和恢复提供了理论支持,深化了极端气候变化对植被 影响的认识,为亚热带植被的保护和恢复提供更加科学的依据。未来研究可进一步探讨不同树种对极端干旱

胁迫的长期适应机制,尤其是从水力结构、根系分布与功能等角度揭示其生理响应规律。

参考文献(References):

- [1] 马泽清, 王辉民, 杨风亭, 付晓莉, 方华军, 王景升, 戴晓琴, 寇亮, 赵博. 基于长期观测研究支撑亚热带红壤丘陵区森林生态系统恢复 与可持续发展. 中国科学院院刊, 2020, 35(12): 1525-1536.
- [2] 欧阳帅,项文化,陈亮,曾叶霖,胡彦婷,雷丕锋,方晰,邓湘雯.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制.水土保持学报, 2021,35(5):1-9.
- [3] 杨卫东,曾联波,李想.碳汇效应及其影响因素研究进展.地球科学进展,2023,38(2):151-167.
- [4] 黄晚华,隋月,杨晓光,代姝玮,李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 V.南方地区季节性干旱特征分区和评述. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2917-2925.
- [5] 黄晶, 仲平, 何霄嘉. 国家安全视角下的气候变化问题. 阅江学刊, 2025, 17(1): 61-69, 172. [2025-01-22]. https://doi.org/10.13878/j. enki.yjxk.20241212.001.
- [6] Siddiq Z, Chen Y J, Zhang Y J, Zhang J L, Cao K F. More sensitive response of crown conductance to VPD and larger water consumption in tropical evergreen than in deciduous broadleaf timber trees. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 399-407.
- [7] Bai Y, Li X Y, Liu S M, Wang P. Modelling diurnal and seasonal hysteresis phenomena of canopy conductance in an oasis forest ecosystem. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 98-110.
- [8] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [9] 张振振,杨轲嘉,顾字璐,赵平,欧阳磊.模拟降雨格局变化对亚热带地区两树种液流特征的影响.植物生态学报,2019,43(11): 988-998.
- [10] 夏银华,章新平,戴军杰,王锐,罗紫东.亚热带季风区樟树树干液流对降水的响应.水土保持研究, 2021, 28(6): 144-152, 161.
- [11] Jiang X L, Kang S Z, Li F S, Du T S, Tong L, Comas L. Evapotranspiration partitioning and variation of sap flow in female and male parents of maize for hybrid seed production in arid region. Agricultural Water Management, 2016, 176: 132-141.
- [12] Kume T, Otsuki K, Du S, Yamanaka N, Wang Y L, Liu G B. Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees: its impact on standscale transpiration estimates. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1161-1168.
- [13] Du J L, Dai X Q, Huo Z L, Wang X W, Wang S, Wang C Z, Zhang C L, Huang G H. Stand transpiration and canopy conductance dynamics of Populars popularis under varying water availability in an arid area. The Science of the Total Environment, 2023, 892: 164397.
- [14] 吕同汝,蒋勇军,吴泽,茆杨,邱菊,吴超.亚热带岩溶区典型常绿和落叶树种的蒸腾特征及其对环境因子的响应.生态学报,2022,42 (3):1047-1058.
- [15] 傅贺菁,崔煜婕,黄锦璐.长汀水土流失区3种优势植物树干液流特征分析.福建农业科技,2021,52(11):69-74.
- [16] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, Zhang C C, Liu N, Li G. Responses of plant water use to a severe summer drought for two subtropical tree species in the central Southern China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 8: 1-9.
- [17] 夏银华,章新平,戴军杰,王锐,罗紫东,饶志国,肖雄,张赐成.亚热带季风区樟树的水分利用特征.水土保持学报,2022,36(6): 195-205.
- [18] Dai J J, Zhang X P, Luo Z D, Wang R, Liu Z L, He X G, Rao Z G, Guan H D. Variation of the stable isotopes of water in the soil-plantatmosphere continuum of a *Cinnamomum camphora* woodland in the East Asian monsoon region. Journal of Hydrology, 2020, 589: 125199.
- [19] 中国气象局. 中国气候公报(2022). 北京: 中国气象局, 2023.
- [20] 屈艳萍,吕娟,苏志诚,张海滨.湖南长沙市城市干旱预警研究.中国防汛抗旱,2012,22(6):12-15,25.
- [21] Allen R, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper. Rome, FAO. 300:D05109.
- [22] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(4): 291-308.
- [23] Chen L X, Zhang Z Q, Zha T G, Mo K L, Zhang Y, Fang X R. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation. New Forests, 2014, 45(2): 235-250.
- [24] Huang L, Zhang Z S. Effect of rainfall pulses on plant growth and transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area: Tengger Desert, China. Catena, 2016, 137: 269-276.
- [25] Gong X Y, Chen Q, Lin S, Brueck H, Dittert K, Taube F, Schnyder H. Tradeoffs between nitrogen- and water-use efficiency in dominant species of the semiarid steppe of Inner Mongolia. Plant and Soil, 2011, 340(1): 227-238.
- [26] 罗紫东,关华德,章新平,刘娜,张赐成,姚天次.亚热带樟树树干液流通量变化规律.热带地理,2016,36(4):658-665.

- [30] 张强、姚玉璧、李耀辉、黄建平、马柱国、王芝兰、王素萍、王莺、张宇. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望. 气象学报、 2020, 78(3): 500-521.
- [31] 张素青. 解析针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系. 绿色科技, 2017, (5): 7-8.
- [32] Wu Y Z, Huang M B, David N W. Black locust transpiration responses to soil water availability as affected by meteorological factors and soil texture. Pedosphere, 2015, 25(1): 57-71.
- [33] 魏潇,常学向,杨淇越,刘冰,王国华.祁连山青海云杉(Picea crassifolia)夜间树干液流特征及影响因素.冰川冻土, 2015, 37(1): 87-94.
- [34] Meinzer F C, Andrade J L, Goldstein G, Holbrook N M, Cavelier J, Jackson P. Control of transpiration from the upper canopy of a tropical forest: the role of stomatal, boundary layer and hydraulic architecture components. Plant, Cell & Environment, 1997, 20(10): 1242-1252.
- [35] Oren R, Sperry J S, Katul G G, Pataki D E, Ewers B E, Phillips N, Schäfer K V R. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(12): 1515-1526.
- [36] Granier A, Biron P, Bréda N, Pontailler J-Y, Saugier B. Transpiration of trees and forest stands: Short and long-term monitoring using sapflow methods. Global Change Biology, 1996, 2(3): 265-274.
- [37] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, Williams C A, Bohrer G, Oishi A, Papuga S A, Blanken P D, Noormets A, Sulman B N, Scott R L, Wang L X, Phillips R P. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. Nature Climate Change, 2016, 6: 1023-1027.
- [38] 王旭,郭吴,宝音满达,周光益,陈跃华,李党仁.极端干旱条件下亚热带杉木人工混交林林木受损特征及影响因素.林业科学,2024; 1-16. (2024-09-24) [2024-12-13]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1908.S.20240924.1417.002.html.
- [39] Liu P R, Tong X J, Meng P, Zhang J S, Li J, Zhang J R, Zhou Y. Biophysical controls on water use efficiency of six plantations under different sky conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 320: 108938.
- [40] 戴军杰,章新平,罗紫东,刘仲藜,黎祖贤.长沙地区典型树木蒸腾对环境因子的响应及模拟.长江流域资源与环境,2021,30(3): 699-711.