

亚热带季风区樟树树干液流对降水的响应

夏银华¹, 章新平^{1,2}, 戴军杰¹, 王锐¹, 罗紫东¹

(1.湖南师范大学 地理科学学院, 长沙 410081;

2.湖南师范大学 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081)

摘 要:为探究樟树(*Cinnamomum camphora*)树干液流对降水的响应,利用热扩散式探针技术(TDP)于 2019 年 6 月—2020 年 5 月在长沙地区连续观测了樟树树干液流,且同步测定了土壤含水量和气象因子,分析了樟树树干液流在不同天气条件下的日变化特征、不同量级降水条件下的特征以及不同土壤水分条件下对环境因子的响应。结果表明:(1)樟树树干液流随天气的变化而变化,晴天高于雨天。晴天液流日变化呈倒“U”型单峰曲线,雨天液流随降水的分布呈单峰、多峰曲线或一直处于较低值。晴天气象因子对液流的解释程度比雨天高。(2)液流对不同降水量的响应不同,0~5 mm 降水前后液流差异性不显著;大于 5 mm 降水后液流较降水前显著提高,但液流增幅与降水量之间没有明显的规律。5~10 mm,10~25 mm,25~50 mm 和大于 50 mm 降水后液流增幅分别为 13.2%,47.3%,20.6%和 5.5%。(3)液流在少雨的土壤水分相对亏缺时期(RDP)较多雨的土壤水分相对充足时期(RSP)低,两个时期的液流与气象因子呈二次函数关系。不同土壤水分条件下液流与蒸腾变量的关系可以采用指数饱和函数进行拟合。RDP 时期樟树的蒸腾作用受到抑制,降水后 RSP 时期土壤水分条件改善,樟树对太阳辐射、温度、饱和水汽压差和相对湿度的敏感性增加,导水能力增强。研究发现,树干液流对降水的响应因降水量的不同表现出较大的差异性,存在一定的降水阈值使降水后液流上升。降水可以通过引起气象因子的改变以及土壤水分的改善从而使樟树树干液流的水平提高。

关键词:树干液流;热扩散式探针技术;降水;土壤含水量;蒸腾变量

中图分类号:S715.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0144-09

Response of Stem Sap Flow of *Cinnamomum Camphora* to Precipitation Under Different Environments in the Subtropical Monsoon Region

XIA Yinhua¹, ZHANG Xinping^{1,2}, DAI Junjie¹, WANG Rui¹, LUO Zidong¹

(1.College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2.Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract:In order to explore rainfall effects on sap flow of *Cinnamomum camphora*, thermal dissipation probe (TDP) was used to measure the stem sap flow of sample trees in Changsha from June 2019 to May 2020. Moreover the soil moisture content and meteorological factors were observed simultaneously. This study analyzed the diurnal variation characteristics of the stem sap flow under different weather conditions and its response to precipitation in different intensities. What's more, the response of sap flow to environmental factors under different soil moisture conditions had also been investigated. The results show that: (1) the sap flow changed with the weather, and it was higher on sunny days than on rainy days; daily variations of sap flow exhibited inverted 'U' mono-peak patterns during sunny days and showed single-peak or multi-peak curves or were always at a low level with the distribution of precipitation during rainy days; weather factors on sunny days could explain sap flow better than on rainy days; (2) precipitation with different intensities exerted different impacts on sap flow; sap flow was little change after 0~5 mm precipitation, whereas the sap flow increased significantly while the precipitation was more than 5 mm; however, there was no obvious regularity between the increase of sap flow and precipitation intensity; the sap flow after precipitation with 5~10 mm, 10~25 mm, 25~50 mm and greater than 50 mm increased by 13.2%, 47.3%, 20.6% and 5.5%, respectively; (3) the sap flow in the relative deficient period of soil moisture (RDP) and lack of rain

收稿日期:2020-11-10

修回日期:2020-12-30

资助项目:国家自然科学基金(41571021);湖南省人影办自立项科研课题(201901)

第一作者:夏银华(1995—),女,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为亚热带生态水文。E-mail:939973367@qq.com

通信作者:章新平(1956—),男,湖南长沙人,教授,博士,博导,主要从事气候变化及水文研究。E-mail:zxp@hunnu.edu.cn

was lower than that in the relative sufficient period of soil moisture (RSP) and plenty of precipitation; the sap flow in the two periods showed a quadratic function relation with meteorological factors; the relationship between liquid flow and variable transpiration under different soil water conditions could be fitted by the exponential saturation function; it was found that the transpiration of *C. camphora* was inhibited in RDP, and the sensitivity of transpiration reacting to solar radiation, temperature, saturated vapor pressure difference and relative humidity improved in RSP; moreover, the conductivity of the stem was enhanced too. In this study, the response of the stem sap flow to precipitation showed great difference due to the different precipitation, and there was a certain precipitation threshold that made the sap flow rise after precipitation. Precipitation can increase the sap flow level of *C. camphora* by changing meteorological factors and improving soil moisture.

Keywords: stem sap flow; thermal dissipation probe; precipitation; soil moisture content; variable transpiration

植物蒸腾耗水是“土壤—植物—大气”连续体 (SPAC) 中的关键环节^[1]。植物从土壤中吸收的水分 90% 以上通过蒸腾作用散失到大气之中^[2]。树干液流作为衡量植物蒸腾耗水的一个重要生理指标, 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^[3]。因此准确估算蒸腾耗水量是非常重要的, 热扩散式探针技术 (Thermal Diffusion Probe, TDP)^[4]是目前直接测量植物树干液流最常用的方法之一, 它可以在不破坏植物生长的前提下长期连续观测植物树干液流, 具有操作简单、高精度等优点, 因此被广泛应用于森林水文学和树木生理生态学等研究领域^[5-6]。

植物树干液流主要受植物的生物学结构、土壤水分状况以及气象因子等因素的影响^[7]。朱雅娟等^[8]运用 TDP 探针技术对沙地柏 (*Sabina vulgaris*) 的树干液流进行长期连续观测, 发现液流的波形、启动时间、峰值等随天气的变化而变化, 并且不同天气条件下液流与环境因子的关系也存在较大差异。潘迪等^[9]发现晋西黄土区典型森林植物树干液流与降水量、土壤含水量呈显著线性关系。卢森堡等^[10]和 Zhao 等^[11]发现植物树干液流对不同量级降水事件的响应存在差异。小降水事件对植物液流几乎没有影响, 只有当降水量达到降水阈值时液流才会随降水发生变化。植物在短时间尺度上易受太阳辐射和饱和水汽压差的影响, 利用含有表征意义参数的模型对树干液流进行拟合, 可以分析植物对环境变化的适应性^[12]。吴旭^[13]和张慧玲^[14]等通过用蒸腾变量 (表征太阳辐射和饱和水汽压差的协同变化) 对植物不同环境下的树干液流与蒸腾变量进行指数饱和曲线拟合, 拟合参数的差异表明植物的蒸腾耗水过程受到降水、干旱以及土壤水分状况等因素的影响, 植物通过改变叶片的气孔机制适应环境的变化。

樟树 (*Cinnamomum camphora*) 主要分布在我国长江流域以南地区, 是亚热带常绿阔叶林的重要树种, 也是城市绿化中的常用树种, 具有相当高的经济

价值。樟树对环境变化的响应比较敏感, 如在水分不充足的干旱条件下蒸腾作用会受到抑制, 出现大量落叶甚至死亡的现象^[15]。我国东部季风气候区全年降水分布不均, 季节性干旱时有发生, 有研究表明, 长沙地区的季节性干旱发生的概率在 85% 以上, 并且从 20 世纪 60 年代以来危害程度持续增加^[16]。多变的环境条件会影响植物蒸腾, 为适应多变的环境条件, 植物能够通过改变自身生理结构和水分利用策略以维持自身生长^[17]。通过对樟树在不同环境中的耗水特性进行研究, 有助于了解亚热带树种在降水前后的水分利用规律, 以及樟树对土壤水分变化的适应性, 有利于森林生态的建设。作为亚热带地区常见树种, 樟树分布广泛, 对于涵养水源、维持区域水平衡防止水土流失具有重要意义。为此, 本研究利用热扩散式探针技术于 2019 年 6 月—2020 年 5 月对湖南省长沙市望城区的樟树树干液流进行长期连续观测, 结合同期的环境因子, 分析樟树树干液流在不同天气下的日变化特征、对不同降水量的响应并探讨樟树对土壤水分变化的适应性。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙市望城区八曲河村 (28°22′09″N, 112°45′43″E), 平均海拔 50 m 左右, 该地属于典型的亚热带季风气候, 四季分明, 雨热同期。多年平均温度为 17.4℃, 平均年积温 5 457.0℃。多年平均蒸发量为 902 mm, 多年平均降水量为 1 447 mm, 降水主要集中在 3—6 月, 约占全年降水的 51.3%。8—9 月受副热带高压控制, 易出现季节性干旱。样地的土壤类型以红壤为主, 质地为粉砂质黏壤土。样地属于亚热带常绿阔叶林, 其中 90% 以上树种为樟树 (*Cinnamomum camphora*), 根系分布集中在 1 m 以内, 大部分根系 (85%) 分布在浅层 0—40 cm 内, 水平根系很发达, 樟树平均树龄为 15 a, 平均树高为 11 m, 其他树种有马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、桑

树(*Morus allba*)等。

1.2 樟树树干液流的获取

在试验场地选取 8 棵长势良好的樟树作为观测样树,各样树的基本特征见表 1。于 2019 年 6 月—2020 年 5 月采用美国 Dynamax 公司的热扩散式探针(TDP)测定系统对样树的树干液流进行观测。在每棵样树离地面高约 1.3 m 处刮去表皮后使用配套钻头沿水平方向钻两个间隔约 40 mm 的孔,钻孔深度与针长一致。将两根热扩散探针插入钻孔内,加热探针在上方,温差探针在下方,并且保持探针的根部有部分留在树干外面,防止树皮生长对探针造成破坏;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,最后用铝箔纸将探针及周围的树干包裹好,防止雨水进入和太阳光直射。用数据采集仪(Delta-T data logger,Delta-T UK)自动记录两探针间的温差,并设定数据记录固定间隔为 30 min。温差变化反映树木的液流速率,二者关系的经验公式^[4]如下:

$$F_v=118.99\times\left(\frac{\Delta T_{\max}-\Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231}\times A_s\times 3600$$

(1)

$$Q=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{48}F_v$$

(2)

式中: F_v (kg/h)为液流速率; ΔT 为上下探针之间的瞬时温度差(°C); ΔT_{\max} 为液流为零时上下探针间的瞬时温度差(°C); A_s 为樟树胸高处的边材面积(m²),3 600 为单位转换值; Q 表示日液流量(kg/d)。本研究中的液流速率和日液流量取 8 棵樟树液流速率的平均值。

表 1 样树的基本特征

编号	树高/m	胸径/cm	边材厚度/cm	边材面积/cm ²
ZS ₁	11	10.25	5.56	260.94
ZS ₂	12	10.79	5.95	292.10
ZS ₃	11	12.10	7.00	377.91
ZS ₄	11	10.98	6.09	303.69
ZS ₅	11	10.82	4.85	294.01
ZS ₆	11	9.55	4.45	224.17
ZS ₇	11	7.72	3.66	145.08
ZS ₈	9	9.39	4.39	216.35

1.3 气象因子和土壤含水量数据的获取

土壤体积含水量 SWC(%)采用布设在样地中心位置的云智能管式水分温度监测仪(RWET-100,中国)测定,仪器探头位于 0—100 cm 每隔 10 cm 处,监测精度分别为±2.5%和±0.5℃,监测时间自 2017 年 2 月起,数据采集时间间隔为 1 h,土壤含水量数据利用烘干称重法进行校正。Granier 等^[4]提出了计算林下土壤相对有效含水率(REW,Relative extractable water)的方法,以反映土壤含水量对植物的影

响,其计算公式如下:

$$REW=\left(\frac{SWC-SWC_{\min}}{SWC_{\max}-SWC_{\min}}\right)$$

(3)

式中:SWC 为实测土壤含水量;SWC_{max}为样地的田间持水量;SWC_{min}为研究时段内最小的土壤含水量。当 REW<0.4 时,通常认为植物受到土壤水分胁迫^[4,18]。

温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、相对湿度 RH(%)、太阳总辐射 R_s (W/m²)、降水量 $P(\text{mm})$ 数据采用安装在樟树林外 50 m 左右的开阔地上的微型自动气象站(WeatherHawk-232,USA)获取,数据采集频率均为 30 min 一次。林地附近的饱和水汽压差 VPD(kPa)可根据监测的温度和相对湿度可计算得到,具体参考 Dingman 等^[19]:

$$VPD=0.611\times\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\times(1-RH/100)$$

(4)

蒸腾变量 VT[kPa·(W/m²)^{1/2}]可以表征太阳辐射和饱和水汽压差的协同变化,其计算公式^[20-21]如下:

$$VT=VPD\times R_s^{1/2}$$

(5)

已有研究表明,可以使用下列指数饱和函数来分析液流速率与 VT 的关系^[22-23]:

$$F_v=a[1-\exp(-bVT)]$$

(6)

式中: a 为曲线偏移横坐标的程度,值越大表明樟树树干液流受环境因子的影响越大; b 为拟合曲线的斜率,值越大表明樟树导水能力越强。

1.4 数据处理与统计分析

本研究以 2019 年 6 月—2020 年 5 月连续观测的数据进行分析(排除因断电和设备故障等造成的缺失数据以及异常数据)。樟树根系主要分布在 0—40 cm,且 0—40 cm 的土壤含水量对降水的响应更加明显,所以本研究将土壤含水量分为浅层(0—40 cm)土壤含水量与深层(40—100 cm)土壤含水量(浅层和深层土壤含水量均为对应土层深度土壤含水量的算术平均值),分别用 SWC₀₋₄₀和 SWC₄₀₋₁₀₀表示。生长旺盛期液流变化更加明显,所以以 SWC₀₋₄₀的相对有效含水率(REW)为依据,将樟树生长旺盛期(6—9 月)进行划分,6—7 月(REW>0.4 时)为土壤水分相对充足时期(RSP),8—9 月(REW<0.4)为土壤水分相对亏缺时期(RDP)。对这两组液流数据进行分级处理,太阳辐射、相对湿度、饱和水汽压差、温度分别以 50 W/m²,5%,0.2 kPa 和 1℃为间隔进行分段,获得每段数据内液流的平均值和标准差。利用分段平均后的数据分析液流与气象因子的关系。

采用 SPSS 25 对晴雨天的液流与气象因子进行

Pearson 相关性分析,并对液流与气象因子进行多元线性回归分析,另外采用曲线参数估计法分析不同土壤水分条件液流与气象因子间的关系。液流与蒸腾变量的指数饱和曲线拟合以及文中的图均用 Origin 2018 完成。

2 结果与分析

2.1 樟树树干液流与环境因子的动态变化特征

图1展现了在2019年6月—2020年5月期间樟树树干液流及其环境因子的逐日变化。太阳辐射的变化范围为 $3.7 \sim 331.9 \text{ W/m}^2$,日均太阳辐射为 143.9 W/m^2 ,最大值出现在7月,最小值出现在1月,春夏高,秋冬低;温度的变化范围为 $2.5 \sim 33.3^\circ\text{C}$,日均温度为 18.5°C ,其变化趋势与太阳辐射一致;相对湿度的变化范围为 $36.4\% \sim 99.9\%$,平均值为 73.3% ,8—10月(平均值为 55.2%)明显低于其他月。饱和水汽压差的变化范围为 $0.1 \sim 3.2 \text{ kPa}$,平均值为 0.8 kPa ,8—10月(平均值为 1.7 kPa)明显高于其他月。日降水量在 $0.1 \sim 101.0 \text{ mm}$ 范围内变化,监测期间降水天数共计133 d,累积降水量为 $1\,390.5 \text{ mm}$,低于多年平均降水量。全年降水分布不均,8—9月降水最少,两个月的累积降水量为 16.3 mm ,仅占全年降水量的 1.2% 。土壤水分相对

亏缺时期(RDP)降水较少,累积降水量为 179.1 mm 。土壤水分相对充足时期(RSP)降水较多,累积降水量为 $1\,211.6 \text{ mm}$ 。 SWC_{0-40} 和 SWC_{40-100} 的变化范围分别为 $23.0\% \sim 36.2\%$ 和 $29.7\% \sim 37.4\%$,总体上 SWC_{40-100} 高于 SWC_{0-40} ,仅在1月10日至20日浅层高于深层。RDP时期降水较少,土壤含水量较低, SWC_{0-40} 和 SWC_{40-100} 的平均值分别为 25.2% 和 30.5% ;RSP时期降水较多, SWC_{0-40} 和 SWC_{40-100} 的平均值分别为 32.7% 和 35.3% 。

樟树树干液流的日液流量在 $0.03 \sim 47.67 \text{ kg/d}$ 范围内变化,平均值为 18.81 kg/d ,最大值出现在7月,最小值出现在1月。低值一般出现在降水日。樟树树干液流具有明显的季节变化特征,表现为春夏高,秋冬低。春夏季正值樟树的生长旺季,其累积液流量为 $3\,672.33 \text{ kg}$,占总液流量的 75.0% ,液流水平明显高于秋冬季。无论是非降水日还是降水日,RSP时期的平均液流均大于RDP时期的平液流,其中非降水日RSP与RDP时期的平均液流分别为 20.09 kg/d 和 16.89 kg/d ,RDP时期比RSP时期减少 15.9% ;降水日RSP与RDP时期的平均液流分别为 13.6 kg/d 和 11.2 kg/d ,RDP时期比RSP时期减少 17.3% ,土壤含水量对樟树树干液流影响较大。

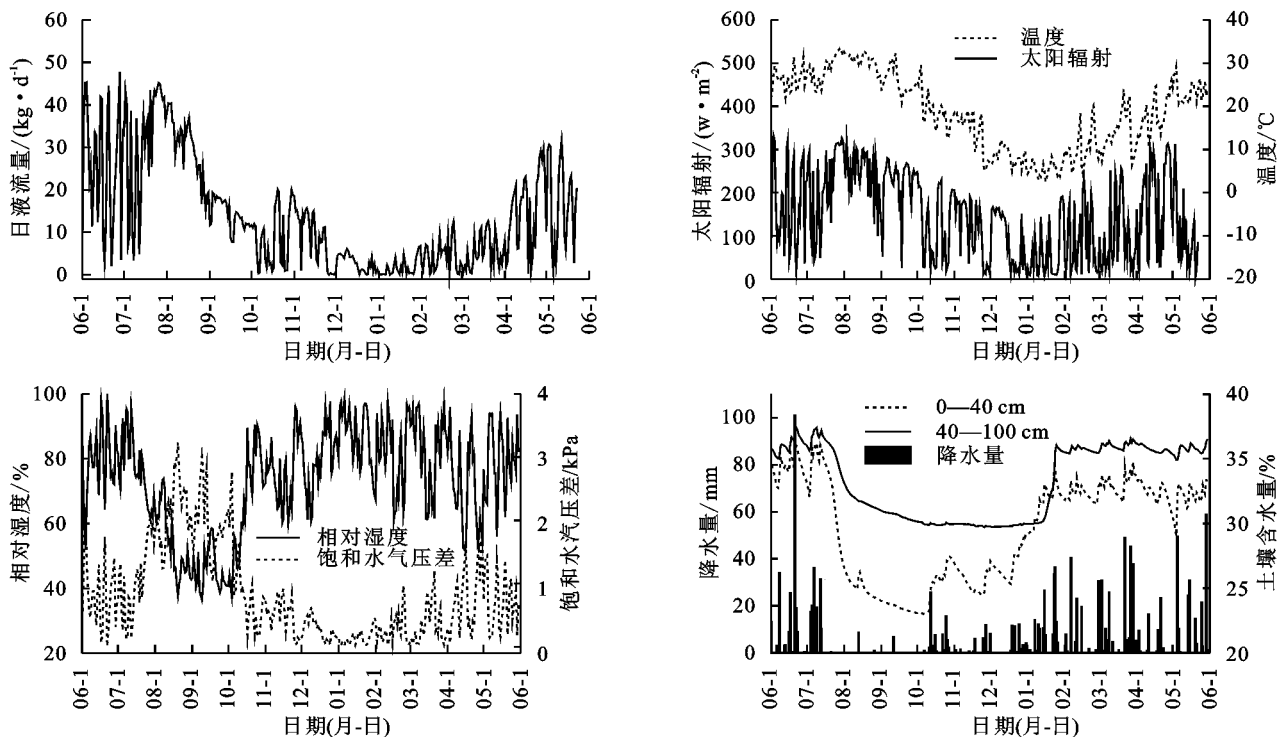


图1 樟树树干液流及其环境因子的季节变化特征

2.2 不同天气条件下樟树树干液流与气象因子的日变化

樟树树干液流的变化与环境因子的变化密切相关,不同的天气条件具有不同的环境条件,进而不同程度地影响液流变化。研究期间雨天和晴天日液流量的变化

范围分别为 $0.03 \sim 33.81 \text{ kg/d}$ 和 $5.77 \sim 47.67 \text{ kg/d}$ 。为避免樟树自身物候期以及其他无关变量对液流的干扰,在樟树生长旺期的6—7月选取7月23日—7月27日5个连续典型晴天(前后一天没有降水且白天的平均太阳辐射大于 200 W/m^2 ,下同)和5个典

型雨天(6:00—19:00有降水)对不同天气条件下樟树与气象因子的关系进行研究(图2)。

图2A显示,晴天樟树树干液流日变化表现为白天高夜间低,呈倒“U”型单峰曲线。液流在6:00左右启动,随着太阳辐射的增强,温度逐渐升高,相对湿度降低,树干液流迅速上升,于13:00左右达到最大值。之后,液流随太阳辐射的降低而降低,于19:00左右趋于稳定并逐渐接近零。太阳辐射的日变化与液流具有一致的单峰曲线,于12:00左右到达峰值,提前于液流峰值时间1h左右。饱和水汽压差的日变化同样呈单峰曲线,随太阳辐射上升而上升,于16:00左右达到峰值,滞后于液流峰值时间3~4h。温度与相对湿度日变化也呈明显的单峰曲线,在16:00左右达到极值,温度与饱和水汽压差的变化具有同步性,相对湿度则与饱和水汽压差呈反相位变化。图2B显示,在雨天,液流在小范围内上下波动,呈单峰、多峰变化或一直处于较低值状态,这种变化与降水的时间分布有关。7月8日与7月12日降水历时较长,液流一直处于较低值状态,没有明显的峰值变化;6月1日与7月5日,降水发生在液流启动前,降水期间液流处于低值,降水后液流上升,整体呈现多峰变化;6月16日降水发生在液流启动后,液流正常启动并呈单峰曲线,随后出现降水,降水期间液流下降至低值。雨天太阳辐射小,5个典型雨天的平均太阳辐射为 59.9 W/m^2 ;饱和水汽压差、温度和相对湿度不再呈单峰曲线变化,饱和水汽压差与温度处于低值,相对湿度一直处于高值,平均值分别为 0.2 kPa , 23.8°C 和 92.9% 。

经过归一化后可以将各变量数量级的影响从分析中除去,表2统计了研究期间晴天(太阳辐射大于 200 W/m^2)和雨天($P>1 \text{ mm}$)经过归一化后樟树树干液流与气象因子的关系。在晴天和雨天,樟树树干液流与太阳辐射、温度和饱和水汽压差显著正相关($p<0.01$),晴天时太阳辐射是液流的最主要驱动因子。液流在晴天和雨天与气象因子的回归模型经F检验均达到极显著水平($p<0.01$),与气象因子的回归方程拟合良好。晴天($R^2=0.76$)回归模型的拟合优于雨天($R^2=0.67$),说明晴天樟树受气象因子的影响比雨天天。

2.3 不同降水量对樟树树干液流的影响

将研究期间的降水按24h制降水量等级进行划分,并统计不同量级的降水天数与降水量(图3)。0~5mm降水发生比较频繁,占总降水天数的53.4%,其他各量级的降水频率不超过总降水天数的20%。25~50mm降水事件对总降水量的贡献最大,占总降水量的42.3%,20~25mm降水事件对总降水量的贡献

次之(29.3%),其他量级的降水量占总降水量的百分比不超过15%。结合图1可以发现,0~5mm降水事件仅能影响浅层土壤含水量(SWC_{0-40}),大雨20mm降水后 SWC_{0-40} 和深层土壤含水量(SWC_{40-100})均先升高后恢复正常水平, SWC_{40-100} 保持高值时间较长, SWC_{0-40} 下降较快。

为选取足够多的降水事件并避免降水之间的相互影响,将连续多天降水算作一次降水,并将同一量级降水前后对应时刻的液流进行平均(降水前指降水前的典型晴天,降水后指降水后液流达到最大值的当天)。不同降水事件前后樟树树干液流的日变化见图4。小于5mm降水前后液流没有显著差异,大于5mm降水后液流较降水前显著提高。5~10mm,10~25mm,25~50mm和大于50mm降水后液流较降水前分别提高了13.2%,47.3%,20.6%和5.5%。

2.4 不同土壤水分条件下樟树树干液流对环境因子的响应

通过对樟树在土壤水分相对充足时期(RSP)与土壤水分相对亏缺时期(RDP)的树干液流进行T检验发现,在RSP与RDP时期液流的差异性显著($p<0.01$)。图5给出了不同土壤水分条件下的樟树树干液流与各气象因子的关系,可以看出二次函数均能很好地解释RSP和RDP时期液流与各气象因子间的关系,决定系数 R^2 达到0.80以上($p<0.01$)。在气象因子相同的情况下,RDP时期的液流低于RSP时期,从曲线变化幅度可以发现,RSP时期液流对气象因子的敏感性比RDP时期更大。

为了更加直观和深入地揭示樟树树干液流对环境变化的适应性,利用指数饱和曲线模型(公式6)对不同土壤水分条件下的樟树树干液流与蒸腾变量(VT)进行拟合得到图6。在RSP和RDP时期,液流与VT的曲线变化均符合指数饱和曲线的关系(R^2 分别为0.73,0.67)。液流随着VT的增加逐渐上升,在RDP时期和在RSP时期VT分别增加到约80 $\text{kPa} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{1/2}$ 和约60 $\text{kPa} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{1/2}$ 时,液流趋于稳定。这说明在不同土壤水分条件下樟树均根据外界环境对叶片气孔的开放程度进行了调节。RSP时期较RDP时期拟合曲线明显上移,拟合参数 a 值由3.13上升到4.08,表明RSP时期樟树对环境因子变化响应的敏感性较RDP时期高,这也与图5中的结果相同。拟合参数 b 值由RSP时期的0.02上升到RDP时期的0.07,RDP时期液流上升缓慢,RSP时期拟合曲线斜率更大,液流更快地达到饱和值,RSP时期樟树的导水能力较RDP时期增强。

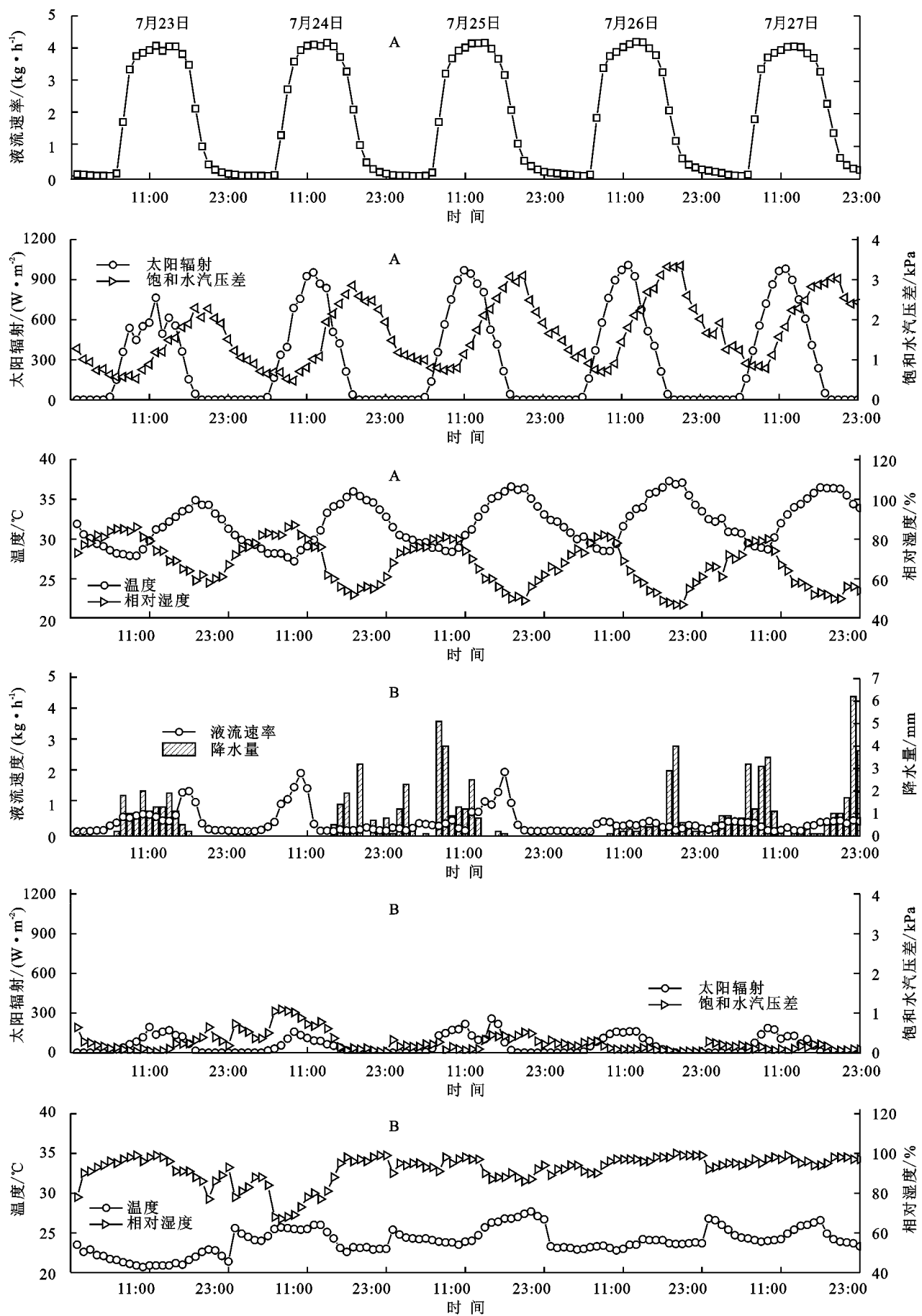


图 2 晴天(A)、雨天(B)樟树树干液流与环境因子的日内变化

表 2 晴天、雨天樟树树干液流与气象因子的关系

天气	项目	太阳辐射 R_s	饱和水汽压差 VPD	温度 T	相对湿度 RH	样本数
雨天	相关性	0.55**	0.67**	0.71**	-0.37**	100
	回归模型	$Q=0.20R_s+2.32RH+0.06T+1.13VPD$ ($R^2=0.67, p<0.01$)				
晴天	相关性	0.81**	0.60**	0.72**	-0.40**	113
	回归模型	$Q=0.52R_s+0.58RH+0.26T+0.46VPD$ ($R^2=0.76, p<0.01$)				

注:表中 Q 表示日液流量,相关性为 Pearson 相关系数,** 表示在 0.01 水平上显著(双尾),回归模型为多元线性回归模型。

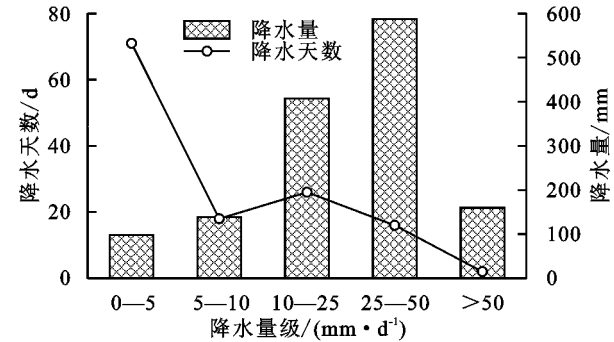


图 3 不同量级降水事件的降水天数和降水量

3 讨论

3.1 不同天气条件下树干液流的变化

晴天时液流水平较高,具有明显的昼高夜低变化规律,液流呈显著的倒“U”型单峰曲线变化,雨天时液流水平较低,随当天降水的时间分布呈单峰、多峰变化或一直处于较低值状态,晴天和雨天液流均与太阳辐射、温度、饱和水汽压差显著正相关,与相对湿度显著负相关。气象因子对植物树干液流的影响与气孔活动有关^[24],气象因子影响液流是通过影响植物气孔的开度,影响植物蒸腾,进而改变液流速率。气象因子过低或过高都会抑制植物气孔的打开,降低蒸腾,从而减小液流量^[25]。太阳辐射主要反映液流的光量驱动力^[26],当太阳辐射增大时,叶片气孔导度逐渐开放,随着温度和饱和水汽压差增加,叶片气孔导度继续增大,叶片表面的水汽交换加快,植物蒸腾拉力增大,从而使液流逐渐升高^[27]。而雨天太阳辐射和温度都处于较低值,相对湿度很高,植物叶片内外的汽压差很小,樟树的蒸腾作用比较小液流水平低,所以液流水平低于晴天。另外雨天时由于降水补充了土壤水分,樟树的根系与土壤之间形成水势差,所以樟树还可能是在根压的作用下产生液流^[28]。至于晴天时液流与饱和水汽压差没有相关性,可能是因为所选的晴天多处于土壤水分相对亏缺时期,此时,樟树为保证自身的活性,气孔自动调节为关闭或不完全开放状态,叶片内外汽压差对于樟树的蒸腾作用液流几乎无影响,罗紫东等^[25]也发现在土壤水分亏缺时,樟树通过调节气孔来应对水分胁迫。

3.2 树干液流对降水的响应

樟树对降水的响应因降水强度和降水频率的变化而变化。降水量小于 5 mm 时,降水前后樟树树干液流没有显著差异;降水量大于 5 mm 时,降水后液流较降水前显著提高。结合图 1 发现,降水量小于 5 mm 时,只有浅层土壤含水量(SWC₀₋₄₀)发生变化,降水仅能湿润土壤表层以及植物叶片,大部分降水被蒸发消耗于大气,无法给樟树供水。降水量大于 5 mm 时,SWC₀₋₄₀比深层土壤含水量(SWC₄₀₋₁₀₀)增加明显,降水量大于 20 mm 时,不同深度的土壤含水量均显著增加(图 1)。当土壤含水量提高时,樟树生长的水分环境得到改善,樟树树干液流提高。降水之后液流增加的百分率与降水量之间没有明显的规律性,例如,降水量>50 mm 时液流的增幅(5.5%)小于降水量为 10~25 mm 时液流的增幅(47.3%),卢森堡^[10]和杨强^[29]等也有相似的发现。不同量级降水后液流的增幅与降水量以及前期土壤含水量没有显著,增幅可能与潜在蒸散有关,但潜在蒸散与液流有怎样的关系有待进一步研究。

降水还可以通过调控土壤含水量间接影响植物树干液流,在相同的气象因子条件下,液流在土壤水分相对充足时期(RSP)高于土壤水分相对亏缺时期(RDP),并且 RSP 时期液流对环境因子的响应更加敏感(图 5)。液流速率与蒸腾变量(VT)的拟合曲线显示,随着 VT 的增加,液流通常会达到饱和水平,并且液流在 RSP 时期比 RDP 时期更快地达到饱和状态。这是因为 RSP 时期土壤含水量比 RDP 时期充足,导水率有所提高,根系吸水阻力变小,光合作用和蒸腾作用增强,樟树通过自身调节使液流尽快达到饱和值,充分说明了土壤水分的改善能够促进液流更快地达到饱和值。吕金林^[30]和王媛^[31]等与本研究有相似的结果,发现降水后土壤水分改善,拟合参数 a , b 值增加,液流增长速率增加。但降水导致的土壤水分改变引起液流速率与 VT 的拟合参数的变化与生境的影响也有关系,如张慧玲等^[14]对出露基岩生境的圆叶乌桕(*Triadica rotundifolia*)和菜豆树(*Radermachera sinica*)的液流速率与 VT 进行拟合时,降水前后拟合参数 a , b 值没有显著差异。

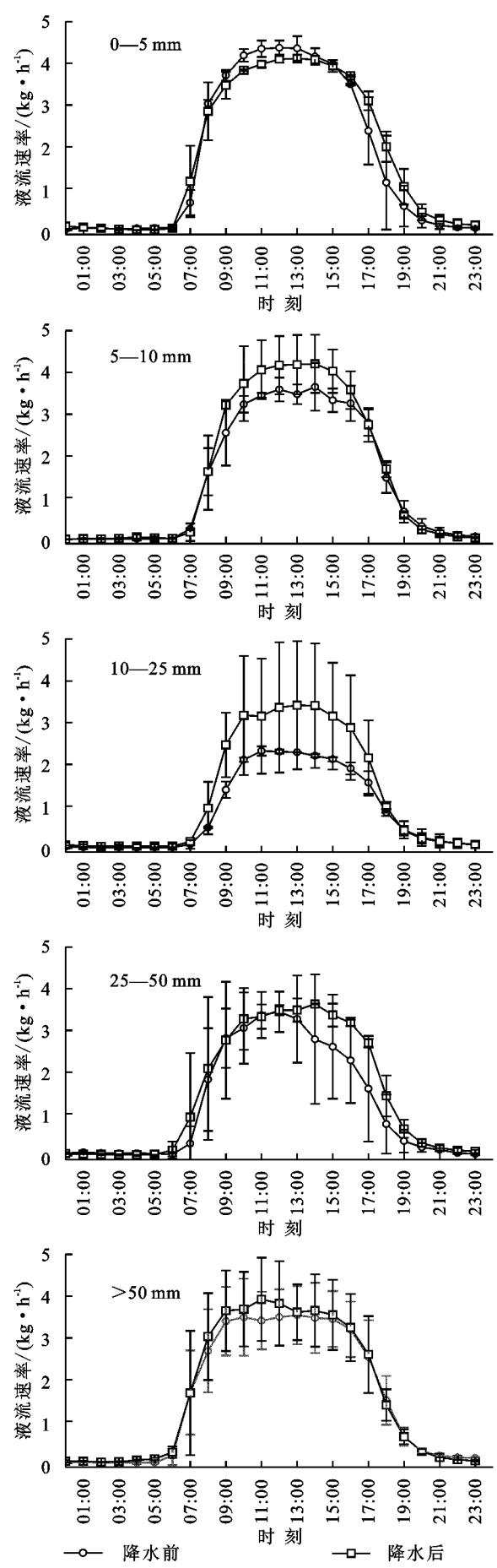
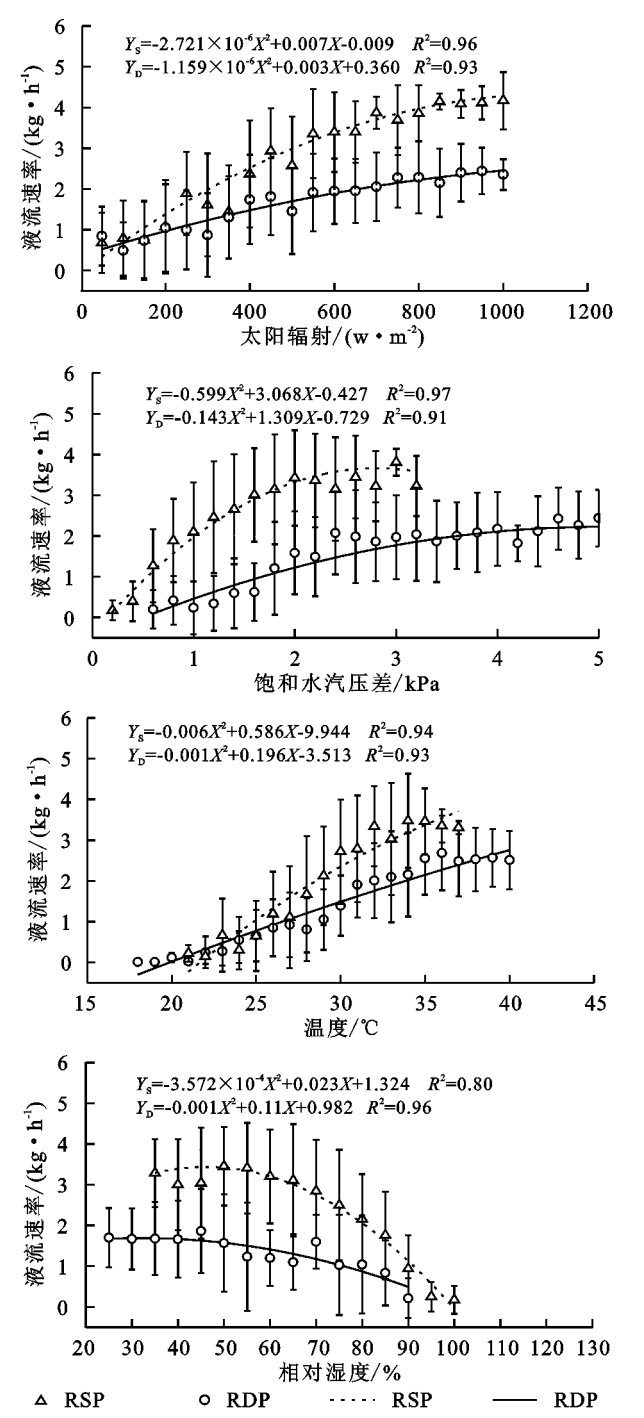


图4 樟树树干液流对不同降水事件的响应



注:Y_s表示RSP时期的液流速率;Y_D表示RDP时期的液流速率;X为对应的气象因子

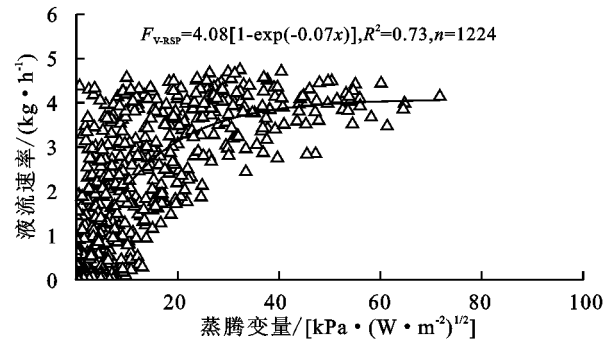
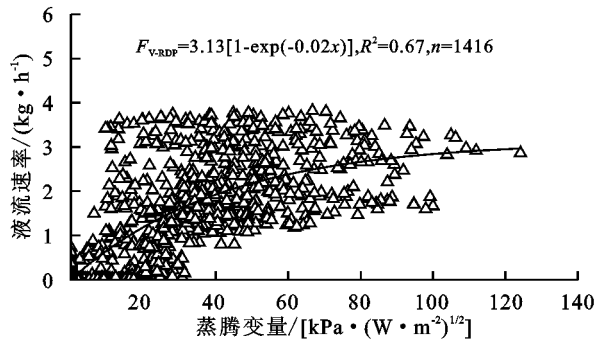
图5 不同土壤水分条件下樟树树干液流与气象因子的关系

4 结论

(1) 樟树树干液流随天气的变化而变化,观测期间日液流量的平均值晴天(26.44 kg/d)比雨天(4.81 kg/d)高。在晴天,樟树树干液流的日变化呈倒“U”型单峰曲线,与太阳辐射、温度和相对湿度显著正相关($p < 0.01$),与饱和水汽压差相关性不显著。在雨天,樟树树干液流的日变化呈单峰、双峰曲线,或一直处于低值状态,与太阳辐射、温度、饱和水汽

压差显著正相关($p < 0.01$),与相对湿度显著负相

关($p < 0.01$)。



注: F_{V-RDP} 表示 RDP 时期的液流速率, F_{V-RSP} 表示 RSP 时期的液流速率。

图6 不同土壤水分条件下樟树树干液流与蒸腾变量的关系

(2) 樟树树干液流对不同降水量响应不同。0~5 mm 降水后只有浅层土壤含水量发生变化,降水只湿润了叶片和土壤表层,降水前后液流没有显著差异。大于 20 mm 降水后,浅层和深层土壤含水量均显著增加,液流较降水前显著提高。降水后的液流增幅与降水量之间没有明显的规律性,5~10 mm,10~25 mm,25~50 mm 和大于 50 mm 降水后液流较降水前分别提高了 13.2%,47.3%,20.6% 和 5.5%。液流与气象因子的回归模型晴天($R^2 = 0.76$)优于雨天($R^2 = 0.67$),表明樟树在晴天受气象因子的影响比雨天大。

(3) 液流速率与气象因子的关系呈二次函数关系,与蒸腾变量的关系可以通过指数饱和函数拟合,降水后拟合参数的改变表示降水可以通过改善土壤水分状况增强液流。土壤水分相对亏缺时期(RDP)樟树树干液流较土壤水分相对充足时期(RSP)低。RSP 时期液流对气象因子的敏感性比 RDP 时期大,并且降水后樟树的导水能力增强,使液流水平提高。

参考文献:

- [1] 苟晓霞,叶茂,汪亮亮,等.塔里木河上游河岸胡杨径向生长对温度的敏感性[J].干旱区研究,2018,35(4):899-904.
- [2] 王文杰,孙伟,邱岭,等.不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系[J].林业科学,2012,48(1):77-85.
- [3] Bai Y, Li X, Liu S, 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.
- [4] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987,3(4):309-320.
- [5] Chen Y M, Cao Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature Pinus tabulaeformis plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2014,73:238-245.

- [6] 张振振,杨轲嘉,顾宇璐,等.模拟降雨格局变化对亚热带地区两树种液流特征的影响[J].植物生态学报,2019,43(11):988-998.
- [7] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996,78:19-29.
- [8] 朱雅娟,杜娟,吴彩霞,等.鄂尔多斯高原沙地柏液流通量及其影响因子[J].水土保持通报,2020,40(3):88-94.
- [9] 潘迪,毕华兴,次仁曲西,等.晋西黄土区典型森林植被耗水规律与环境因子关系研究[J].北京林业大学学报,2013,35(4):16-20.
- [10] 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.
- [11] Zhao W Z, Liu B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(9):1297-1306.
- [12] Campbell, Gaylon J M, An introduction to environmental biophysics[J]. Biologia Plantarum, 1998,21:104:1-286
- [13] 吴旭,陈云明,唐亚坤,等.黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J].植物生态学报,2015,39(12):1176-1187.
- [14] 张慧玲,丁亚丽,陈洪松,等.出露基岩生境典型植物树干液流对自然降水和连续干旱的响应特征[J].应用生态学报,2018,29(4):1117-1124.
- [15] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, et al. Responses of plant water use to a severe summer drought for two subtropical tree species in the central southern China[J]. Journal of Hydrology:Regional Studies, 2016,8:1-9.
- [16] 戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2019,26(4):123-131.
- [17] Kozlowski T T, Pallardy S G. Physiology of woody plants[M]. Amsterdam: Elsevier, 1996:107-108.
- [18] Melanie Z, Catriona M O, Macinnis N, et al. The response of sap flow to pulses of rain in a temperate Australian woodland[J]. Plant and Soil, 2008,305(1/2):121-130.