

王正安,余治家,余萍,等.六盘山半干旱区降雪对华北落叶松树干液流的影响[J].江苏农业科学,2020,48(6):131-137.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.06.027

六盘山半干旱区降雪对华北落叶松树干液流的影响

王正安¹,余治家¹,余萍¹,马杰¹,贾宝光¹,李颖¹,韩新生²

(1.宁夏农林科学院固原分院,宁夏固原 756000; 2.宁夏农林科学院荒漠化治理研究所,宁夏银川 750002)

摘要:为探究特殊天气(降雪)情况下树干液流的变化规律,在半干旱的宁夏六盘山叠叠沟小流域,于2011年在华北落叶松生长季中后期,监测提前到来的雨雪天气对树干液流的影响。在样地内采用热扩散探针监测4棵样树的液流速率,结果表明,晴天液流规律同降雪当日有明显差异,降雪带来的低温和低太阳辐射抑制了华北落叶松的蒸腾作用,降雪当日树干液流没有明显的高峰,在4棵样树中晴天液流日峰值(9月15日)是降雪当日日峰值40倍左右;晴天一天液流总量大致为降雪时日总量的20倍以上;降雪过程中与华北落叶松树干液流密度极显著相关($P < 0.01$)的环境因子有空气温度和太阳辐射,晴天时则为空气温度、太阳辐射、相对湿度、水汽压亏缺,但是降雪时太阳辐射与液流速率由晴天时的正相关转为负相关。

关键词:六盘山;叠叠沟小流域;半干旱区;降雪;华北落叶松;树干液流;环境因子;相关性

中图分类号: S718.51+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)06-0131-07

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,是陆地与大气进行水分交换的主要媒介,其中森林蒸发散(蒸腾+蒸发)是向大气输送水分的唯一途径并在森林水分循环中占有最大的比重^[1]。树木蒸腾是森林系统能量和水分消耗的重要途径^[2],由于单株树木蒸腾耗水量受其树干边材液流速率和液流

量的制约,因此通过对树干液流速率的测定就可以精确确定树木生长过程中的耗水量^[3]。测量树木边材液流的方法有多种,热扩散技术是在自然状态下测量乔木蒸腾耗水的主要方法^[4-5],这种技术的优点在于能以不破坏树木本身生理活动为前提持续、精确、稳定地监测树木蒸散过程。利用树木边材液流来估算单株树木和林分蒸腾量是一种新兴并快速发展的技术^[1]。

乔木蒸腾耗水是一个跟外部环境因子密切联系的生理活动,太阳辐射、温度、空气相对湿度、饱和水汽压差等都与树干液流速度有关联。熊伟等在宁南山区华北落叶松人工林,以土壤含水量和气象条件等7个因子探究了单株液流对外部环境因子

收稿日期:2019-01-23

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFC0504602);宁夏回族自治区重大专项(编号:QCYL-2018-12)。

作者简介:王正安(1989—),男,甘肃天水人,研究实习员,主要从事森林生态水文方向研究。E-mail:1731967640@qq.com。

通信作者:余治家,高级林业工程师,主要从事林木繁育及栽培技术研究。E-mail:lpsyzj@163.com。

[11]魏芸云,许新亚,王睿.基于POE法的兰州市城市公园使用状况评价[J].浙江农业科学,2018,59(2):254-258,265.

[12]黄汉泉,康杰,曾启杰,等.深圳笔架山公园管理及规划发展的问卷调查及分析[J].中山大学学报(自然科学版),2005,44(增刊1):74-81.

[13]卢飞红,尹海伟,孔繁花.城市绿道的使用特征与满意度研究——以南京环紫金山绿道为例[J].中国园林,2015,31(9):50-54.

[14]彭英,王敏.基于IPA分析法的老城区综合公园使用者主观评价研究——以宁国市宁阳公园为例[J].中国城市林业,2016,14(6):39-42.

[15]王楚君.广州市城市公共空间使用状况评价研究——以花城广场为例[D].广州:华南理工大学,2015.

[16]张文彤,董伟.SPSS统计分析高级教程[M].北京:高等教育

出版社,2004:215-220.

[17]高雁鹏,杨静.哈尔滨中东铁路公园使用满意度评价[J].中国城市林业,2018,16(5):21-25.

[18]易平,方世明.嵩山世界地质公园游客满意度评价研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(8):196-202.

[19]张帆,邱冰,万长江.基于主成分分析的城市开放空间满意度宏观因子研究——以南京主城区为分析对象[J].地域研究与开发,2015,34(6):52-57.

[20]周玮,黄震方,殷红卫,等.城市公园免费开放对游客感知价值维度的影响及效应分析——以南京中山陵为例[J].地理研究,2012,31(5):873-884.

[21]匡银娟,苏军.基于因子分析的城市园林游憩活动谱的建构——以绵阳市为例[J].湖南工业大学学报,2010,24(3):105-108.

的响应,通过偏相关分析得出太阳辐射、空气温度与液流速率显著正相关,空气相对湿度与液流速率显著负相关,液流速率与土壤含水率相关性最差,并得出太阳辐射是树干液流表现出明显的昼夜规律变化的主要原因,空气温度为树木蒸腾提供了主要的热量来源,相对湿度的变化为树木蒸腾提供了必要的水势梯度^[6]。这与阮宏华等对次生栎林蒸腾强度和各环境因子相关性^[7]有一定的差别,阮宏华等的研究表明蒸腾强度与太阳净辐射关系最密切,其次是温度和相对湿度(负相关),土壤热流量和风速的影响最小,同时该研究也证明研究区内不同树种的蒸腾强度与环境因子具有同样的相关关系。还有学者针对整个年际内不同季节的液流进行研究,如丁仿军等利用包裹式茎流计对毛竹树干液流进行连续观测,结果表明,在一年中不同的季节,树干液流与环境因子相关性会有差异,各环境因子对液流影响的作用大小是不同的,非生长季内气温与液流速率相关性最显著,生长季内太阳辐射与液流速率相关性最显著^[8]。

本研究监测的极端异常天气发生于华北落叶松生长中后期,华北落叶松处于叶片丰盈期时经历了 60 年内最早的暴雪,雨雪天气带来的低温、干冷等环境因子对华北落叶松树干液流会造成一定的影响。虽然报道的关于降雪对液流影响的文章很少,但是也有一些关于极端的天气状况下液流变化的研究。郑怀周等在台风天气期间对马尾松树干液流进行监测,发现极端天气对液流的影响也是十分显著的,表明马尾松树干液流对台风天气响应明显,台风带来的高强度降水和大风抑制了马尾松的蒸腾作用,台风降雨并未提高植物可利用的水分,相对湿度在台风天气时比在晴天时与液流速率相关性下降;气温、太阳辐射、饱和水汽压差在 2 种天气条件下均与液流呈显著相关,但是相关系数稍有变化;土壤温度在 2 种气象条件下均与液流无显著相关性^[9]。除台风影响外,大风沙尘天气对树干液流的影响也是显著的,沙尘天气下液流速率及峰值相对晴天、阴天时都小^[10-11]。虽然大风降温、台风、沙尘等天气对树干液流都有不同程度的影响,但是关于降雪对树干液流影响的报道还未有过,因此很有必要研究异常降雪对树木生长的胁迫影响,这可以为研究全球气候变化背景下植被(特别是干旱半干旱等敏感地区的植被)生长应对极端气候的响应规律及其机制提供参考,有助于类似地区的植被建

设和管理。

1 材料与方法

1.1 研究地点和样地概况

六盘山地处我国半湿润向半干旱的过渡地带,是西北地区气候的重要分水岭,隶属宁夏回族自治区南部的固原市境内,其海拔为 1 700 ~ 2 942 m,凸出于周边黄土高原。山地气候使降水相对较多,年均降水量 600 ~ 800 mm,年径流量 2.1 亿 m³,是黄土高原上的“水塔”。六盘山相对湿润的气候,使其生长着丰富多样的森林植被资源,素有黄土高原“绿岛”之称,森林覆盖率达 37.6%,这里的森林植被担负着重要的水源地保护功能,对周边地区水资源供给具有独特意义,因而 1980 年国务院批准成立了宁夏六盘山水源涵养林保护区,以发挥当地森林植被调节水文、控制侵蚀、减免洪水、固碳释氧、保护生物多样性等多种生态服务功能。

叠叠沟小流域(106°4′55″~106°9′15″E, 35°54′12″~35°58′33″N)地处宁夏固原六盘山北部山区边缘,属于六盘山外围土石山区与周围黄土区的交界地带,是典型的半干旱区和森林草原过渡带,其气候类型为大陆性季风气候,年均气温 6 ~ 7 ℃,全年无霜期约 130 d;年均降水量 449 mm 左右,雨季集中在 7—9 月份;年潜在蒸发量(1 050 ± 180.5) mm,是年均降水量的 2.3 倍。小流域的主要土地利用类型为天然草地和华北落叶松人工林,其中草地占小流域面积的 58.7%,对小流域的水土保持、生态耗水以及产水功能有着重大影响,优势草种为铁杆蒿(*Artemisa vestita*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、本氏针茅(*Stipa buncana*)等。

试验选取 30 m × 30 m 阴坡坡面的华北落叶松落样地,在样地内选取树高、胸径接近样地平均水平的样本作为标准木进行测量,本次试验选取其中 4 棵标准木(标为 8、46、49、50 号)安装液流探针,4 棵样树基本特征见表 1。

表 1 样地内 4 株样树的基本特征

树号	树高 (m)	胸径 (cm)	冠幅直径 (m)	冠长 (m)
8 号	12.9	15.2	4.0	9.9
46 号	12.8	16.5	5.0	9.4
49 号	12.6	14.6	3.9	10.3
50 号	12.4	11.5	2.9	9.5

1.2 试验期间天气状况

2011 年 9 月 18 日降雪为六盘山地区 60 年来来临最早的暴雪,在此次降雪前还伴有湿雨天气,属于雨转雪后的湿雪天气类型。因为冷气团所致,从 9 月 13 日开始气温就有下降的趋势,降雪日为该段时间气温最低的阶段,随着降雪结束,冷气团影响减小,气温又逐渐回升至正常水平,该段时间的气温变化趋势见图 1。在发生降雪前的 4 d 内,气温急剧降低,由正常状态下的 23 ℃ 一直降到 0 ℃ 左

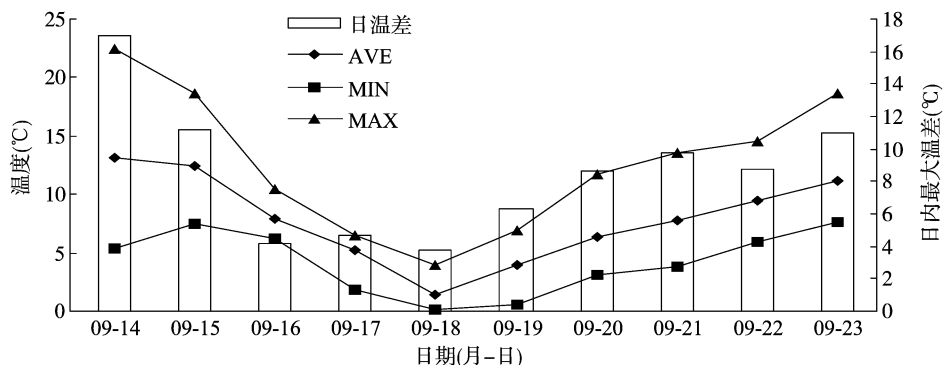


图1 降雪前后各指标温度变化趋势

1.3 试验方法

1.3.1 试验原理与树干液流测定 选用 SF-L 热扩散探针(德国 Ecomatik 公司生产)测定树干液流,该探测器带有 4 根探针和 1 个恒流电源组成,并用数据采集器 DL2e(英国 Delta Device 公司生产)采集数据,采集频率为 5 min。探针感温线圈长度 2 cm,探针总长度为 5 cm。在树干胸径处选取上下 2 个点不同位置分别安装 2 个探针(S_0 、 S_1),其中 S_0 探针用恒定电流加热,使 2 个探针之间形成温差。当树体内水流上升时,热量随之被带走,2 个探针之间温差变小。探针之间温差和树干流速之间具有固定函数关系,可以把液流探针温度的变化转换为树干液流速度的变化。 S_2 、 S_3 探针为校正探针,安装在树干的横向位置,测量树干横向温度梯度,用以修正 S_0 和 S_1 之间非树干液流带来的温差^[12]。液流速率 [J_s , mL/(cm²·min)] 的计算公式为

$$J_s = 0.741 \times \left(\frac{d_{t_{\max}}}{d_{t_{\text{act}}}} - 1 \right)^{1.231}; \quad (1)$$

$$d_i = T_{1-0} - (T_{1-2} + T_{1-3})/2. \quad (2)$$

式中: $d_{t_{\max}}$ 、 $d_{t_{\text{act}}}$ 均由式(2)计算得到, $d_{t_{\max}}$ 是指在无液流情况下的最大温度差 d_i (°C) 的值, $d_{t_{\text{act}}}$ 为当时条件下的实际 d_i 值; T_{1-0} 、 T_{1-2} 、 T_{1-3} 分别为探头 S_0 与 S_1 间、 S_2 与 S_1 间、 S_3 与 S_1 间的温差(°C)。

1.3.2 华北落叶松水分利用计算 以华北落叶松

右。在降雪当日,日最大温度、日平均温度、日最低温度、日温差均达到这一时段最低。降雪当日最大温度为 3.9 ℃、平均温度为 1.4 ℃、最低温度为 0.1 ℃、日温差为 3.8 ℃。降雪过后气温缓慢回升,变化幅度略小于气温降低时的程度,日最大温度、日均温度、日最低温度、日温差均逐渐升高。经历过相对较快的温度回升过程后,整体气温又恢复到降雪前的正常水平。

每日的液流量表示其水分利用情况^[9]。

1.3.3 气象因子测定 安装 1 台 Weatherhawk-232 小型自动气象站于林外开阔处,用于监测太阳辐射强度(RAD, W/m²)、空气温度(T, °C)、空气相对湿度(RH, %)、风速(W_s , m/s)等指标,数据记录频率为 5 min/次,并利用 T 和 RH 计算空气饱和水汽压差(VPD, kPa),计算公式如下:

$$VPD = 0.611e^{\frac{71.502T}{T+240.97}}(1 - RH). \quad (3)$$

1.3.4 数据统计 采用 Excel 软件对相关数据进行作图与分析处理。

2 结果与分析

2.1 降雪前后环境因子和华北落叶松树干液流速度的变化特征

由图 2、图 3 可知,2011 年 9 月 15 日冷气团对样地区域影响较为轻微,温度的降低程度虽然很明显,但是气温绝对值还保持在一个较高的水平,白天气温随着太阳辐射的增强而增加,但是液流的启动阶段并未明显受到气温的影响,而是受到太阳辐射的限制。9 月 15 日 09:00 左右,随着太阳辐射的快速增强,液流速率也快速提升。在白天时段,由于云团影响,太阳辐射波动较为明显,但是由于气温的变化同太阳辐射变化有延迟,所以白天温度波动幅度较小。在较大的太阳辐射波动变化中树干

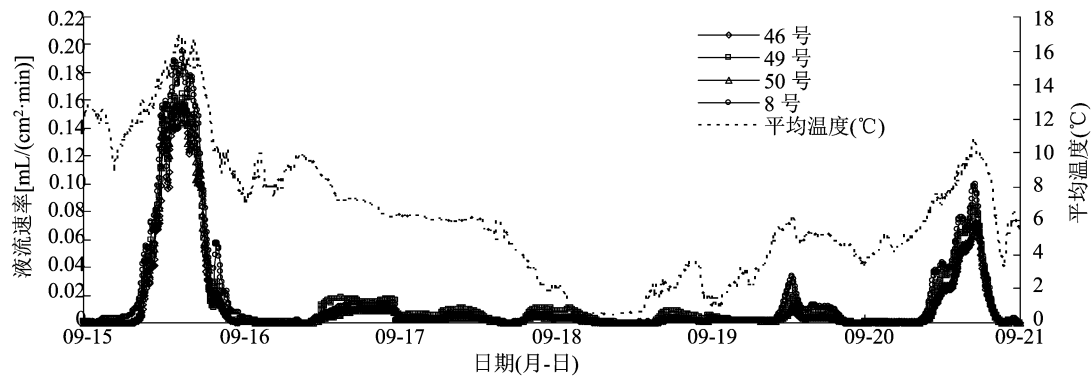


图2 降雪前后树干液流速率与对应时刻平均温度变化趋势

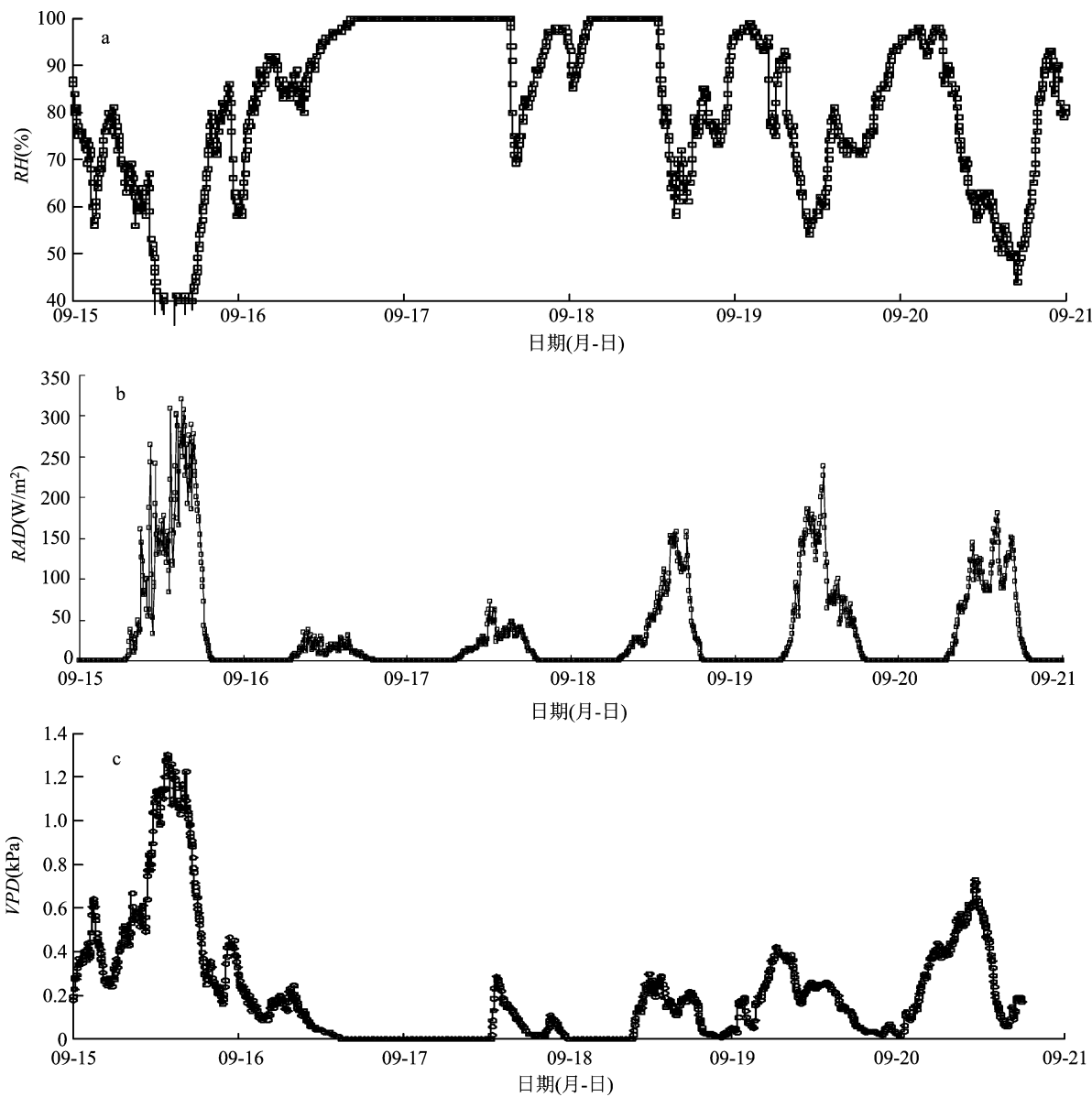


图3 降雪前后环境因子变化趋势

液流相对保持比较稳定,同气温变化较为一致。在 15:00 左右,太阳辐射、气温、液流速率相对统一地

都达到当天内的峰值。到 17:00 以后,随着太阳辐射强度的下降,气温和液流速率均下降,气温下降

的趋势较为缓慢,而太阳辐射和液流速率下降趋势保持一致并且比较急剧。随着冷气团中心的到达,从 9 月 16 日开始随着气温的骤然下降,液流速率的峰值也急剧降低,降雪当日及降雪前后 2 d 的液流速率峰值都比较小,且没有明显的峰值,液流活动比较微弱。降雪当日,太阳辐射变化趋势是一个峰值不大的单峰曲线,在当天夜间温度高于白天温度,夜间液流活动也比日间明显,这使得液流变化与太阳辐射变化呈明显负相关关系。此现象还表现为,在降雪当日 17:00 后,太阳辐射逐渐减小,但是树干液流速率却表现出逐渐上升的趋势,在 19:30 达到夜间液流速率的峰值。9 月 19 日树干液流速率出现明显的峰值,且与气温呈显著正相关($P<0.05$),峰值也比前几天明显增大,9 月 20 日液流基本恢复至降雪前正常状态。在整个降雪过程中,4 棵样树的液流速率虽有不同,但是在 6 d 内的变化趋势保持一致,说明降雪对华北落叶松的液流影响是普遍现象。降雪当日和降雪前一天的液流趋势相似,均为两边高中间低的“U”形曲线,降雪当日(即 9 月 18 日)树干液流速率峰值在 02:55 到达,甚至略高于当日 18:35 到达的第 2 个峰值。液流速率从 02:55 到达当日最大之后缓慢下降,至当天 07:30 左右液流速率已变得十分微弱。微弱的液流一直持续到 16:00,此后迅速升高至当日第 2 个峰值。

从图 3-a 可见,降雪当日空气相对湿度先是随着太阳辐射逐渐增强,到 13:00 之后,空气相对湿度逐渐降低。从图 3-b 可见,太阳辐射在降雪前湿雨天气虽也有昼夜交替规律,但是较晴天时峰值小得多,在降雪当日太阳辐射趋势与晴天变化差别不大且比降雪前 2 d 湿雨天气峰值大很多。太阳辐射从当天 07:00 开始到 19:25 又恢复至 0,由白昼转向

黑夜。太阳辐射到达峰值时间为 14:35 左右,在此之后太阳辐射强度在峰值附近波动,至 16:55 左右开始急速下降。在降雪当天液流速率与太阳辐射强度相关关系不如晴天时明显(晴天时太阳辐射强度与液流速率相关系数为 0.918,呈显著正相关)。但是在傍晚太阳辐射减小阶段时,树干液流速率表现出一个上升的阶段,并且最后峰值与当日凌晨时峰值相当。虽然不是太阳辐射的下降导致的树干液流增长,但是这种负相关的程度十分显然,在太阳辐射下降这段时间内,太阳辐射强度与树干液流呈极显著负相关,相关系数为 -0.460。从图 3-c 可见,在整个降雪前后过程中饱和水汽压差变化趋势与液流速率基本一致。

2.2 降雪过程华北落叶松树干液流对环境变化的响应特征

晴天液流与降雪期间变化差异明显,通过分析树干液流和环境因子的相关性可知,降雪时树干液流和外部环境因子的相关系数都有下降,空气温度、太阳辐射仍与液流密度极显著相关($P<0.01$),但其中太阳辐射由晴天的极显著正相关变为降雪时的极显著负相关。与同期降雨天(9 月 6 日)相比较,降雨当日各环境因子与树干液流的相关性同晴天无太大的差别,除各因子的相关系数绝对值均有下降外,相关系数的符号均无变化。这与熊伟等比较晴天和雨天 2 种典型天气下辽东栎树干液流变化规律^[12]保持一致,即除雨天液流峰值较小外,晴天和雨天日际变化趋势相似。但同是 9 月份的降水,降雨与降雪对树干液流的影响还是有很大差别的。在晴天和雨天,空气温度、太阳辐射、相对湿度、水汽压亏缺等因子与树干液流速率密切相关;在降雪时与树干液流速率密切相关的气象因子为空气温度、太阳辐射。

表 2 降雪与晴天、同期降雨液流速率与环境因子相关性比较

环境因子	降雪			晴天			同期降雨		
	相关系数	显著性 Sig. (2-tailed)	样本数	相关系数	显著性 Sig. (2-tailed)	样本数	相关系数	显著性 Sig. (2-tailed)	样本数
空气温度	0.465 **	0.000	288	0.960 **	0.000	288	0.709 **	0.000	288
太阳辐射	-0.460 **	0.000	288	0.918 **	0.000	288	0.712 **	0.000	288
相对湿度	-0.085	0.149	288	-0.956 **	0.000	288	-0.566 **	0.000	288
水汽压亏缺	0.108	0.066	288	0.977 **	0.000	288	0.578 **	0.000	288

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平显著相关。

2.3 降雪过程中不同样树对天气变化的响应规律

在整个天气变化过程中,4 棵样树经历了相同

的外部环境,但是不同的样树对天气变化也表现出不尽相同的变化规律。在依次整理各样树的日均

液流速率、日内液流峰值、日液流总量(表 3)后发现,各样树在日尺度下峰值、均值、总量变化趋势一致,说明在整个降温降雪过程中,各样树在日变化内趋势一致。

在整个降温降雪过程中,4 棵样树的液流日均值不断下降。在降雪之前及降雪当日(9 月 18 日及以前的几天)液流日均值变化率(图 5)一直处于负值,也就是说,9 月 15—18 日 4 棵样树的液流日均值日渐减小。直至降雪过后(9 月 19 日)随着温度升高、VPD 升高、蒸散潜力变大,4 棵样树液流日均值较前一天均大幅上升,降雪过后第 2 天液流日均值也持续保持上升状态。尽管在样树的选择上是选取代表样地平均生长状态的样本,即 4 棵样树胸径、树高等一些树形因子相近,但是各样树在经受降温雨雪的过程中液流变化也具有一定的差异性。

在整个降雪过程中,各样树液流日均值总体在保持一致的变化趋势内也稍有差异。在冷空气影响下,8 号样树液流速率绝对值变化最为明显(图 4),但是和其他样树液流日均值变化率是一致的(图 5)。9 月 17 日 8 号样树液流日均值较前一下天下降程度比其他 3 棵样树都大,而 8 号样树 9 月 18 日液流日均值环比变化与其他 3 棵树接近,随着 9 月 19 日外部环境利于蒸腾后,8 号样树液流均值增加程度远高于其他样树。表明 8 号样树在经受降雪过程中,液流速率对环境变化较为敏感,有较大的变化能力,液流速率减小快,增加快。

3 讨论与结论

降雨(9 月 6 日)时气候未受冷气团包围,日气温变化依然会有白天高、夜间低样式的单峰曲线,

表 3 降雪前后样树树干液流变化												mL/(cm ² ·min)	
日期 (月-日)	8 号样树			46 号样树			49 号样树			50 号样树			
	日峰值	日均值	日总量	日峰值	日均值	日总量	日峰值	日均值	日总量	日峰值	日均值	日总量	
9-15	0.195 4	0.061 0	17.562 4	0.157 3	0.043 9	12.639 6	0.164 5	0.048 9	14.072 9	0.156 5	0.046 5	13.393 6	
9-16	0.014 6	0.006 5	1.857 9	0.010 5	0.004 8	1.396 1	0.018 0	0.008 1	2.338 8	0.010 1	0.004 0	1.138 1	
9-17	0.006 0	0.002 0	0.568 3	0.0077	0.003 9	1.124 6	0.011 0	0.005 9	1.700 6	0.006 0	0.003 1	0.879 3	
9-18	0.004 7	0.001 7	0.491 4	0.003 7	0.001 3	0.365 8	0.010 9	0.004 2	1.209 4	0.004 7	0.001 8	0.520 8	
9-19	0.033 2	0.006 7	1.920 6	0.011 2	0.002 7	0.776 4	0.019 1	0.004 2	1.217 7	0.012 6	0.003 0	0.867 2	
9-20	0.099 8	0.022 2	6.398 4	0.068 3	0.014 5	4.168 7	0.083 7	0.019 2	5.534 5	0.072 5	0.016 2	4.667 2	

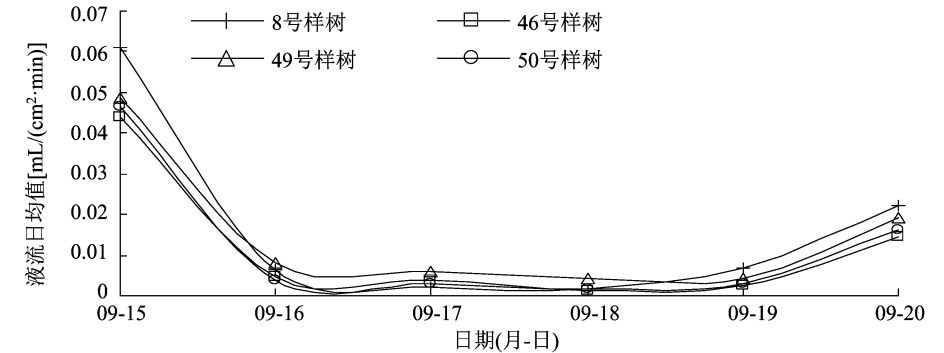


图4 液流日均值变化趋势

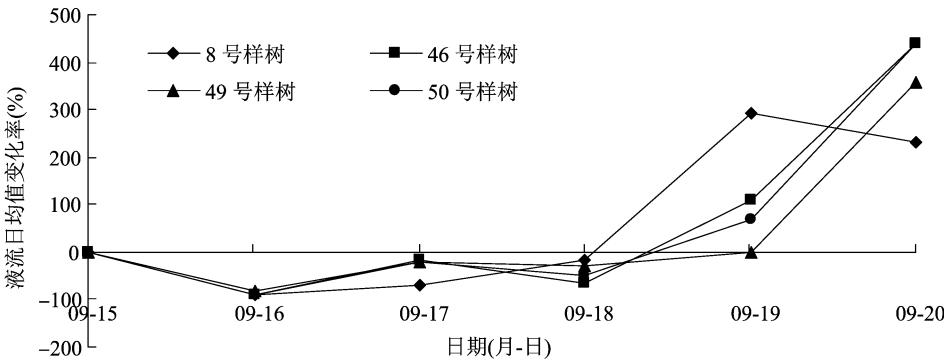


图5 液流日均值变化率

影响液流的环境因子也会与晴天时保持较好的一致性。而降雪(9月18日)期间,受冷气团影响,环境因子的变化较大地改变了树木的生存环境,日气温变化受冷气团影响,没有明显的单峰变化。在降雪过程中极低的气温可能是抑制液流速率的关键因素。

本研究认为在9月份,树木进入生长的中后期,最直接影响液流速率的环境因素应该是气温。在不同天气类型下,空气温度始终与液流速率保持极显著的正相关关系,之所以在降雪当日太阳辐射未能与树干液流速率保持正相关,是因为当日太阳辐射的增加并未明显改变空气温度,太阳辐射与空气温度相关系数为 -0.034 ($P=0.561$),为不显著的负相关,低温抑制叶片气孔的打开从而影响树冠的蒸腾速率。

相关分析表明,降雨和晴天影响液流速率的环境因子相关性基本一致,但与降雪过程中环境因子区别明显。降雪过程中与华北落叶松树干液流速率极显著相关的环境因子有空气温度、太阳辐射;晴天和同期降雨时则为空气温度、太阳辐射、相对湿度、水汽压亏缺。这与熊伟等用 HPVR 热脉冲速度记录仪测得宁南山区华北落叶松树木蒸腾与太阳辐射、空气温度显著正相关,与空气湿度显著负相关的结论^[13]一致。

值得一提的是,在降雪过程中,外部环境因子与液流变化关系比较复杂,降雪当天太阳辐射与液流速率由晴天时的极显著正相关转为极显著负相关,相关系数为 -0.460 ($P<0.01$)。造成这一现象的原因可能是由于气温太低,虽然太阳辐射较大且有变化,但是低温抑制叶片气孔的关闭。与此同时,太阳辐射与空气温度为不显著的负相关,即太阳辐射的增加未带动空气温度的增加,当日太阳辐射未能成为增加蒸腾速率的有效辐射。而空气温

度与湿度极显著负相关,相关系数为 -0.712 ,原因可能是降雪期间积雪的部分融化,水分蒸发时吸收空气中的热量,导致了空气湿度的增加和气温的降低。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112(2): 67-85.
- [3] 田璐洋,李春友,张劲松,等. 秋冬季节大叶女贞枝干液流的动态特征[J]. 中国农业气象,2011,32(2):203-207.
- [4] 徐飞,杨风亭,王辉民,等. 树干液流径向分布格局研究进展[J]. 植物生态学报,2012,36(9):1004-1014.
- [5] Gonzalez - Altozano P, Pavel E W, Oncins J A, et al. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(5): 503-515.
- [6] 熊伟,王彦辉,徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学,2003,29(2):1-7.
- [7] 阮宏华,郑阿宝,钟育谦,等. 次生栎林蒸腾强度与蒸腾量的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),1999,23(4):32-35.
- [8] 丁访军,王兵,赵广东. 毛竹树干液流变化及其与气象因子的关系[J]. 林业科学,2011,47(7):73-81.
- [9] 郑怀舟,朱锦懋,李守中,等. 福建长汀土壤严重侵蚀区马尾松树干液流对台风天气的响应[J]. 亚热带植物科学,2011,40(1):13-17.
- [10] 郭树江,徐先英,杨自辉,等. 干旱荒漠区沙冬青茎干液流变化特征及其与气象因子的关系[J]. 西北植物学报,2011,31(5):1003-1010.
- [11] 徐先英,孙保平,丁国栋,等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报,2008,28(3):895-905.
- [12] 刘彬彬. 六盘山叠叠沟小流域两种典型植被的主要蒸散特征研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015.
- [13] 熊伟,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山辽东栎、少脉槭天然次生林夏季蒸散研究[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1628-1632.
- [14] alterniflora[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4): 373-376.
- [15] Khoshgoftarmansh A H, Khodarahmi S, Haghighi M. Effect of silicon nutrition on lipid peroxidation and antioxidant response of cucumber plants exposed to salinity stress [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(5): 639-653.
- [16] 任贵军. 干旱胁迫对油松生理指标的影响[J]. 辽宁林业科技, 2018(5):1-2.
- [17] Xiao Q, Zheng H, Chen Y, et al. Effects of salinity on the growth and proline, soluble sugar and protein contents of *Spartina*
- [18] 贾漫丽,李娜,李季生,等. 盐胁迫对4个桑树品种生理生化特性的影响[J]. 西北林学院学报,2016,31(5):96-101.
- [19] 胡水清,杜红梅. NaCl 处理对马齿苋植株生长的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2018,36(5):67-72.
- [20] 韩志平,张海霞,刘冲,等. NaCl 胁迫对黄花菜生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2018,38(9):1700-1706.
- [21] 张凤银,陈禅友,高红霞. 不同菜豆品种对 NaCl 盐胁迫的响应[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2018,46(4):293-298.

(上接第 123 页)