

臭椿树干液流和直径微变化对土壤水分的响应

刘云洁¹, 张含含¹, 张伟², 马长明¹

(1.河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2.临漳县自然资源和规划局, 河北 邯郸 056000)

摘要: [目的] 研究不同水分条件下[土壤体积含水量分别为 10%~15% (W_1), 15%~20% (W_2), 20%~25% (W_3), 25%~30% (W_4)] 4 种水分处理]臭椿的树干液流和树干径向变化特征及其与气象因子的关系, 为深入了解臭椿水分利用策略和科学制定臭椿水分管理措施提供科学依据。[方法] 采用热扩散式探针法(TDP)对臭椿树干液流进行连续观测, 使用树干径向变化记录仪持续监测臭椿树干直径变化, 并同步监测相关环境因子的变化。[结果] 在 W_3 和 W_4 土壤水分处理下, 臭椿液流量基本相同, 且树干直径的增长量和变化幅度也相近; 在 W_1 — W_3 范围内, 臭椿液流量随土壤含水量的增加而增大, 但夜间液流占日总液流量的比例随土壤含水量的增加而减小, 分别为: W_1 (12.3%) > W_2 (11.9%) > W_3 (6.0%)。日尺度下臭椿树干直径的变化幅度随着土壤含水量的增加而减少, 但生长量随之增加; 随着土壤含水量的不断增加, 白天树干液流与气象因子的相关性呈增大趋势, 夜间呈降低趋势; 树干液流和树干直径的变化都滞后于太阳辐射, 提前于饱和水汽压差, 且二者与饱和水汽压差之间的时滞均随土壤含水量的增加而减小, 但二者与太阳辐射之间的时滞受土壤含水量变化的影响很小。日尺度下臭椿树干液流与树干直径的变化呈反向变化规律, 且液流的变化总是提前于树干直径的变化。随着土壤含水量的增加, 时滞缩短。[结论] 臭椿树干液流与树干直径变化对土壤水分变化的响应存在紧密联系。在 W_3 水平, 土壤含水量达到了臭椿可以充分利用的阈值, 因此 W_3 土壤水分处理为臭椿最适宜的灌溉标准。

关键词: 臭椿; 土壤水分; 液流; 树干直径

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0056-10

中图分类号: S721

文献参数: 刘云洁, 张含含, 张伟, 等. 臭椿树干液流和直径微变化对土壤水分的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 56-65. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.0524.001; Liu Yunjie, Zhang Hanhan, Zhang Wei, et al. Responses of stem sap flow and diameter of *Ailanthus altissima* to soil moisture [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 56-65.

Responses of Stem Sap Flow and Diameter of *Ailanthus Altissima* to Soil Moisture

Liu Yunjie¹, Zhang Hanhan¹, Zhang Wei², Ma Changming¹

(1.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;

2.Linzhang County Natural Resources and Planning Department, Handan, Hebei 056000, China)

Abstract: [Objective] In order to understand the water use strategy of *Ailanthus altissima* and to formulate efficient water management measures for *A. altissima*, we investigated the characteristics of sap flow and radial stem variation of *A. altissima* under four volumetric soil moisture content treatments [10%~15% (W_1), 15%~20% (W_2), 20%~25% (W_3), and 25%~30% (W_4)] and their relationships with meteorological factors. [Methods] Thermal diffusion probes (TDP) were used to continuously observe sap flow, and radial stem change recorders were used to monitor changes in stem diameter of *A. altissima*. Changes in related environmental factors were simultaneously monitored. [Results] Sap flow was almost the same, and growth rate and variation of stem diameter were similar for the W_3 and W_4 treatments. Sap flow increased with increasing soil moisture in the range of W_1 to W_3 , whereas the proportion of nighttime sap flow to total daily sap flow showed the opposite trend [W_1 (12.3%) > W_2 (11.9%) > W_3 (6.0%)]. Variations in the stem

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-02-27

资助项目: 国家重点研发计划项目“冬奥场馆花卉生长的关键环境参数研究”(2020YFF0305904)

第一作者: 刘云洁(1996—), 女(汉族), 陕西省永寿县, 硕士研究生, 研究方向为森林培育。Email: liuyunjie00011@163.com。

通讯作者: 马长明(1980—), 男(汉族), 河北省临漳县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事蒸腾耗水和森林培育研究。Email: machangming@126.com。

diameter of *A. altissima* at the daily scale decreased with increasing soil moisture, but the growth rate increased accordingly. The correlation between sap flow and meteorological factors increased with increasing soil moisture content during the daytime, but decreased at night. Changes in both sap flow and stem diameter lagged behind solar radiation and ahead of vapor pressure deficit (VPD), and the time lag between these two indicators and VPD decreased with increasing soil moisture, while the time lag between both and solar radiation was little affected. Changes in sap flow and stem diameter of *A. altissima* at the daily scale showed an inverse change pattern, and the changes in sap flow always preceded the changes in stem diameter, and the time lag shortened as soil moisture increased. [Conclusion] Changes in sap flow and stem diameter of *A. altissima* to soil moisture changes were closely related. The soil moisture threshold value at which *A. altissima* could fully utilize soil moisture was the W_3 level. Therefore, the W_3 soil moisture treatment is the most suitable irrigation threshold for *A. altissima*.

Keywords: *Ailanthus altissima*; soil moisture content; sap flow; stem diameter

树木的蒸腾作用在林木水平衡中起着重要作用^[1],树干液流是树木蒸腾作用的直接指标,能够反映单株树木的生理特征和树木水分利用对环境因子的响应^[2],在维持土壤与大气之间的水力传输以及向木质部薄壁细胞提供氧气和促进养分吸收方面至关重要^[3]。热扩散式探针法(TDP)由于构造简单、安装方便、成本相对低廉,被广泛用于树干液流的测定^[4]。研究表明植物树干液流主要受太阳辐射、饱和水汽压差、风速、土壤水分的影响,而液流与环境因子之间存在一定的时滞效应,考虑时滞效应可以提高树干液流与环境因子之间相关性的准确度^[5-8]。植物茎干是土壤水分进入叶片进行蒸腾作用的途径^[9],树木在进行蒸腾时树干中水分张力的变化会引起树干直径的微变化^[10],树干的收缩表明木质部中储存的水分的消耗,其日变化的过程表明了影响树木水分关系的所有外部和内部条件的总和。因此,树干直径的波动为树木水分状况提供了一种测量方法^[11]。在干旱和半干旱地区,土壤水分条件是树木生存和林分发展的主要限制因素^[12]。Kanalas等^[13]认为土壤水分是影响蒸腾强度的根本因素,如果土壤含水量最低,无论气象因子如何驱动,液流最小。土壤水分的有效性也是影响树干直径日变化的因素,树干中储存的水分不仅在干旱时期发挥重要作用,而且在树木内部发生水分运输时也起着重要作用^[14]。日尺度下树干液流与树干直径的变化能共同反映植物水分利用对环境条件变化的响应^[15]。因此,研究植物在不同土壤水分条件下树干液流和树干直径变化对揭示植物水分利用有重要意义。

臭椿(*Ailanthus altissima*),苦木臭椿属落叶乔木,以黄河流域分布为中心,在我国华北、西北地区栽培最多,是用材、绿化观赏、造林、抗污染、抗逆等方面的优良树种^[16-17]。之前的研究关于臭椿树干液流方面的研究内容较少,都集中在造林和绿化时多种树种

之间的耗水量估算和比较^[18-20],得出臭椿属于中度蒸腾和适度水分敏感型树种^[21]。本研究对臭椿试验地土壤进行了4个水分梯度的处理,采用热扩散式探针法和树干径向变化记录仪对臭椿树干液流密度和树干直径变化进行连续监测,分析不同土壤水分条件下臭椿树干液流和树干直径的变化特征以及与环境因子的关系,以揭示其耗水规律和水分利用策略,为该地区臭椿的科学灌溉以及提高水分利用效率提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地位于河北省保定市河北农业大学西校区内(38°48'23"N,115°24'58"E),海拔20 m。该地区位于河北省中部,属于暖温带大陆性季风气候区,年平均气温为12℃;年平均日照时数为2 511 h;年平均降水量约575.9 mm,降水主要集中在6—8月,7月降水量最大;年平均风速为1.8 m/s,年平均蒸发量约为1 430 mm。臭椿作为小面积防护林,该试验地林下有狗尾草(*Setaria viridis*)、沿阶草(*Ophiopogon japonicus*)、冬葵(*Malva crispa*)、夏至草(*Lagopsis supina*)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser.)、苦荬菜(*Ixeris polycephala*)等草本植物。

1.2 试验设计

2021年6月初,在河北农业大学西校区内选择12株形态相似、树干通直、树冠圆满且长势良好的臭椿作为观测样树(表1)。将12株样树,分成4组,每组3株,使用滴灌方式进行灌水处理。使用探头为30 cm的Spectrum TDR300土壤水分测量仪测定样地的土壤体积含水量,将试验地处理为4个不同土壤水分,土壤体积含水量分别为10%~15%(W_1),15%~20%(W_2),20%~25%(W_3),25%~30%(W_4),其中 W_1 为对照组,为该试验地实测土壤体积含水量。试验开展时间为2021年6—8月。

表 1 臭椿的基本特征

树号	树高/ m	胸径/ cm	边材面积/ cm ²	冠幅/m	
				东西	南北
1	13.5	14.2	103.218	4.6	5.0
2	13	14.3	103.726	4.8	5.0
3	13	14.5	104.892	5.0	5.4
4	14	14.8	106.331	5.2	4.6
5	13.5	14.3	103.724	4.8	5.0
6	13	14.4	104.416	5.4	4.4
7	13	14.5	105.107	5.0	5.0
8	13.5	14.6	105.107	5.0	5.4
9	14	14.9	107.871	4.8	5.2
10	13	14.5	105.107	5.0	5.0
11	13.5	14.3	103.724	5.0	5.2
12	14	14.7	106.489	5.4	5.0

1.3 试验方法

1.3.1 树干液流的测定 使用 TDP 对样树树干液流进行测定,在树干 1.3 m 高、北方向安装长度为 3 cm 的 TDP 探针。在安装探针的位置用刀片刮去树皮,然后用对应规格的钻头打孔,两孔在同一垂直方向上,插入探针。探针插好后,外面包裹绝缘、防辐射材料,以减少太阳辐射,最后再用胶带密封,防止雨水进入。数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, USA)与探针相连,每 30 s 读取一次数据,数据记录为 30 min 的平均值,TDP 得出的数据是上下探针之间的温差,由 Granier^[22] 原始公式得出液流密度 F_d [$g/(cm^2 \cdot s)$]:

$$F_d = 0.0119 \left(\frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中: ΔT_M 为无液流时两探针之间的最大温差值($^{\circ}C$); ΔT 为两探针之间的瞬时温差值($^{\circ}C$)。根据树干液流密度计算液流量 F_s (kg) 计算公式为:

$$F_s = F_d \times A_s \times 1800 \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: A_s 为边材面积(cm^2)。

1.3.2 树干边材面积的测定 采用生长锥取样确定树干的边材面积,为不影响试验的结果,在试验地附近选择 12 株与样树胸径相似的臭椿,采用生长锥钻取树干木芯。通过测量边材与胸径的长度,建立树干边材面积与胸径之间的关系方程:

$$A_s = 6.1815DBH + 15.344, \quad R^2 = 0.9615 \quad (3)$$

式中:DBH 为树干胸径(cm); R^2 为相关系数。

1.3.3 气象因子的测定 在试验地附近安装 RR-9170 自动气象监测站,自动监测记录温度 TA($^{\circ}C$)、空气相对湿度 RH(%)、风速 WS(m/s) 等数据。设置每 10 min 对数据平均后进行存储。饱和水汽压差 VPD(kPa) 的计算方法为:

$$VPD = 0.611 \times e^{\frac{17.502TA}{TA+240.97}} \times (1 - RH) \quad (4)$$

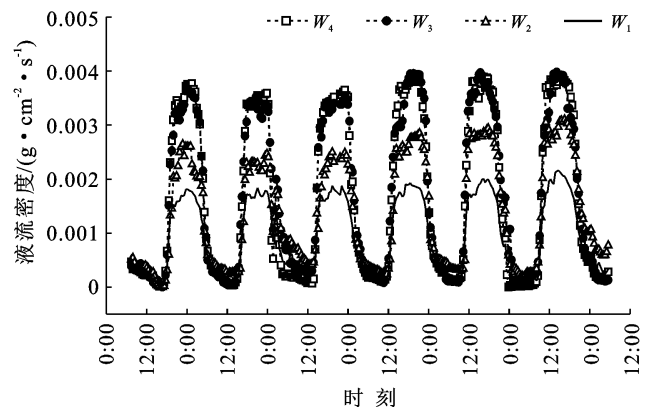
1.3.4 树干直径变化的测定 在安装探针位置上方 10 cm 左右位置安装 DBL60 树干径向变化记录仪,持续监测树干直径的变化。DBL60 可以测量树干微小的径向变化,设置数据记录时间为每 30 min 自动记录 1 次。

1.3.5 数据处理 树干直径日变化量为日最大值与最小值的差值,连续几日的变化量为各日最大值的差值;运用 Excel 2016 分析树干液流、树干胸径以及气象因子数据,使用 SPSS 24.0 对各指标之间相关性进行分析;用 Origin 2018 作图分析。为了避免降雨对土壤水分的影响,试验数据均选择晴天数据。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分条件下臭椿树干液流变化特征

从图 1 可以看出,臭椿树干液流分别在 W_1, W_2, W_3, W_4 条件下,表现出相同的变化规律,全天呈“几”字形单峰或者多峰曲线。以太阳辐射为“0”划分白天和夜间液流,白天液流时段为 5:00—20:00,夜间液流时段为 20:00—5:00,臭椿白天液流密度高,夜间液流密度低。不同土壤水分条件下臭椿液流密度大小不同,白天平均树干液流密度 [$g/(cm^2 \cdot s)$] 大小顺序为: $W_4 [0.00256 g/(cm^2 \cdot s)] > W_3 [0.00254 g/(cm^2 \cdot s)] > W_2 [0.00180 g/(cm^2 \cdot s)] > W_1 [0.00132 g/(cm^2 \cdot s)]$,夜间平均树干液流密度顺序为: $W_2 [0.000434 g/(cm^2 \cdot s)] > W_1 [0.000332 g/(cm^2 \cdot s)] > W_3 [0.000308 g/(cm^2 \cdot s)] > W_4 [0.000302 g/(cm^2 \cdot s)]$ 。



注: W_1, W_2, W_3, W_4 分别为 4 个不同土壤水分梯度处理,土壤体积含水量分别为 10%~15% (W_1), 15%~20% (W_2), 20%~25% (W_3), 25%~30% (W_4), 其中 W_1 为对照组,为该试验地实测土壤体积含水量。下同。

图 1 不同土壤水分条件下臭椿树干液流密度变化

图 2 为 6—8 月日平均液流量。不同土壤水分条件下,臭椿液流量大小也有一定的差异。日总液流量 (Q_h) 为: W_4 (15.403 kg/d) > W_3 (15.278 kg/d) > W_2 (11.623 kg/d) > W_1 (8.496 kg/d); 白天液流量 (Q_d) 为: W_4 (14.511 kg/d) > W_3 (14.363 kg/d) > W_2 (10.243 kg/d) > W_1 (7.456 kg/d); 夜间液流量 (Q_n) 为: W_2 (1.381 kg/d) > W_1 (1.041 kg/d) > W_3 (0.915 kg/d) > W_4 (0.893 kg/d); 夜间液流量占日总液流量的比例为: W_1 (12.3%) > W_2 (11.9%) > W_3 (6.0%) > W_4 (5.8%)。

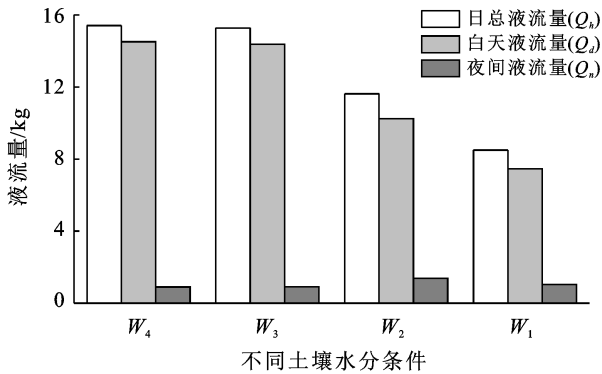


图 2 不同土壤水分条件下臭椿液流量变化

由图 2 可以发现,在 W_1, W_2, W_3, W_4 条件下, $W_1—W_3$ 处理下臭椿白天树干液流密度和液流量不断增大,而 W_3 和 W_4 处理下,树干液流密度和液流量的大小相近,说明在 W_3 条件下,臭椿树干液流密度和液流量已经达到了最大值,此时的土壤水分条件可作为该地区臭椿灌溉的标准。在夜间, W_3 和 W_4 处理下臭椿树干液流密度、 Q_n 和 Q_n/Q_h 值接近且小于 W_2 和 W_1 。 $W_1—W_3$ 处理下 Q_n/Q_h 不断增大,因此臭椿在一定范围内夜间液流密度和液流量随着土壤含

水量的增加而减少,且土壤含水量越小,夜间树干液流所占比例越大,这可能是臭椿树干液流适应土壤水分变化自我调节能力。

2.2 不同土壤水分条件下臭椿树干液流对气象因子的响应

对不同土壤水分条件下臭椿树干液流与气象因子的相关性分析(表 2),结果表明各土壤水分条件下臭椿的白天树干液流都与温度(TA)、风速(WS)、太阳辐射(RA)、饱和水气压差(VPD)呈极显著正相关关系;与空气相对湿度(RH)呈极显著负相关关系。其中 W_4 处理下树干液流密度受 RA 的影响最大, W_2 处理下树干液流密度对 TA 最为敏感, WS 对 W_3 处理下的树干液流密度影响最大, W_1 处理下树干液流密度对 TA, VPD, WS 敏感性最低。在夜间,臭椿液流密度与 TA, VPD, WS 呈极显著正相关,与 RH 呈极显著负相关, W_1 处理下的树干液流对 TA 最敏感, W_2 处理下的树干液流受 RH 影响最大, VPD 对 W_2 影响最大, W_3 对 WS 敏感性最大。总体来说,白天随着土壤含水量的不断增加,树干液流密度与气象因子的相关性总体呈增大趋势,夜间随着土壤含水量的不断增加,树干液流密度与气象因子的相关性总体呈降低趋势。将 VPD 和 RA 分别与不同土壤水分处理下晴天白天臭椿树干液流密度数据进行错位相关性分析,得到其与液流密度的时滞时间(图 3)。发现不同水分条件下臭椿的白天液流都滞后于 RA 达到 90 min, W_1, W_2, W_3, W_4 条件下,臭椿白天液流分别提前于 VPD 120, 90, 90, 120 min。时滞错位后, W_1, W_2, W_3, W_4 处理下的树干液流密度与 VPD 的相关系数分别为 $R^2=0.923, R^2=0.920, R^2=0.943, R^2=0.941$ ($p<0.01$),与 RA 的相关系数分别为 $R^2=0.824, R^2=0.842, R^2=0.859, R^2=0.862$ ($p<0.01$)。

表 2 臭椿树干液流密度与气象因子的相关性

时段起止时间	水分条件	RA	TA	RH	VPD	WS
5:00—20:00	W_1	0.762**	0.799**	-0.803**	0.773**	0.798**
	W_2	0.732**	0.845**	-0.855**	0.836**	0.803**
	W_3	0.759**	0.824**	-0.821**	0.807**	0.844**
	W_4	0.775**	0.804**	-0.796**	0.774**	0.828**
20:00—5:00	W_1		0.708**	-0.930**	0.934**	0.378**
	W_2		0.695**	-0.935**	0.936**	0.389**
	W_3		0.664**	-0.907**	0.907**	0.424**
	W_4		0.703**	-0.909**	0.923**	0.397**

注: * 表示 0.05 水平上显著相关, ** 表示 0.01 水平上显著相关。RA, TA, RH, VPD, WS 分别为太阳辐射、温度、空气相对湿度、饱和水气压差和风速。下同。

2.3 不同土壤水分条件下臭椿树干直径的微变化

选择连续 3 d 晴天臭椿树干直径的变化数据,不同水分条件下树干直径的变化分别以各 3 d 最小值为基准计算。从图 4 可以看出,不同土壤水分处理下,

臭椿树干直径在日尺度上的变化都呈倒“几”字形曲线,树干收缩阶段为 5:00—16:30,且 16:30 左右达到日最大收缩值;树干膨胀阶段为 16:30—5:00,且 5:00 左右达到日最大膨胀值。可以发现,对土壤水分进行

处理后,其树干直径的变化有细微的差异。 W_1, W_2, W_3, W_4 处理下树干直径分别增长了 0.010 06, 0.012 59, 0.016 47 和 0.017 61 mm。图 4 还可以反映出在 W_1 和 W_2 处理下,臭椿树干直径昼夜伸缩幅度大,而 W_3 和 W_4 处理下,伸缩幅度小,且 W_3 和 W_4 处理下

臭椿树干直径变化趋势和生长量相近。由此可以说明, W_3 处理下,臭椿树干直径的伸缩量已经达到了其最大值,和土壤水分对树干液流的影响结果一致。因此在 W_1-W_3 处理的范围内,随着土壤含水量的不断增加,臭椿树干直径增长量越大,昼夜伸缩幅度越小。

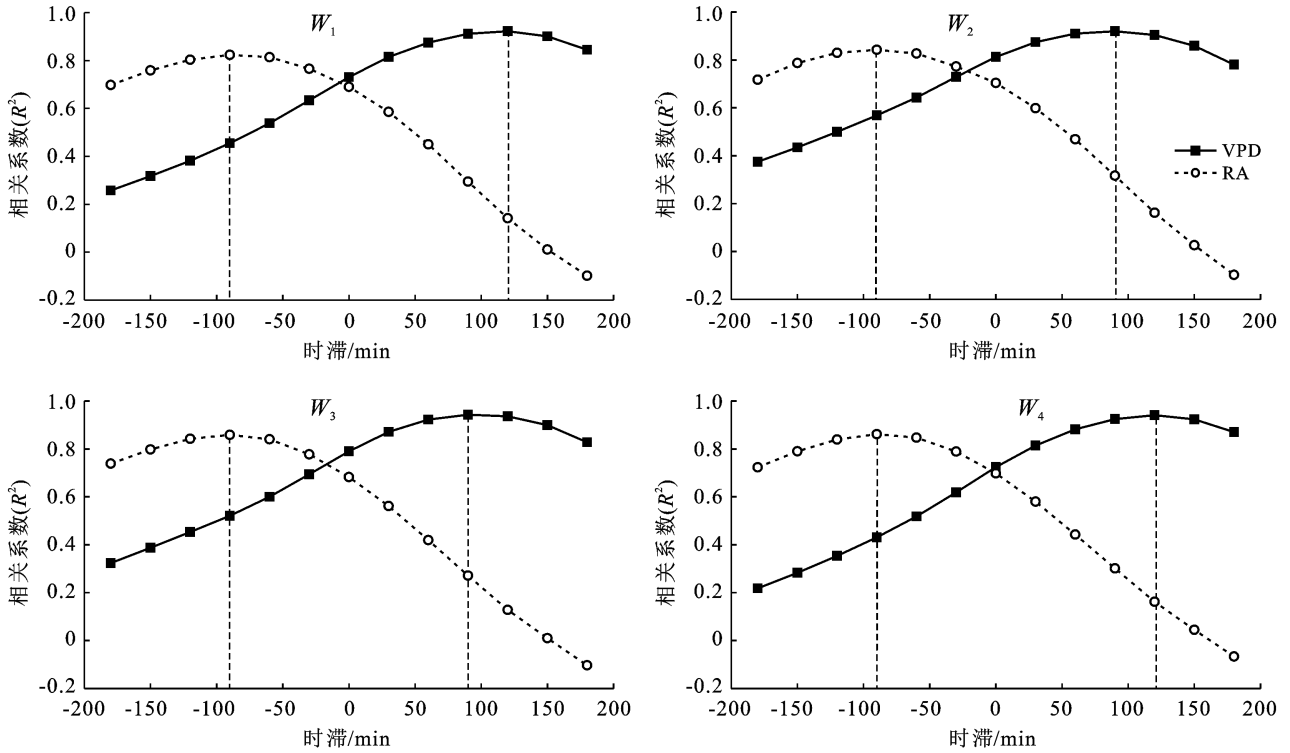


图 3 不同土壤水分条件(W_1-W_4)下臭椿白天树干液流密度与饱和水汽压差(VPD)和太阳辐射(RA)之间相关系数

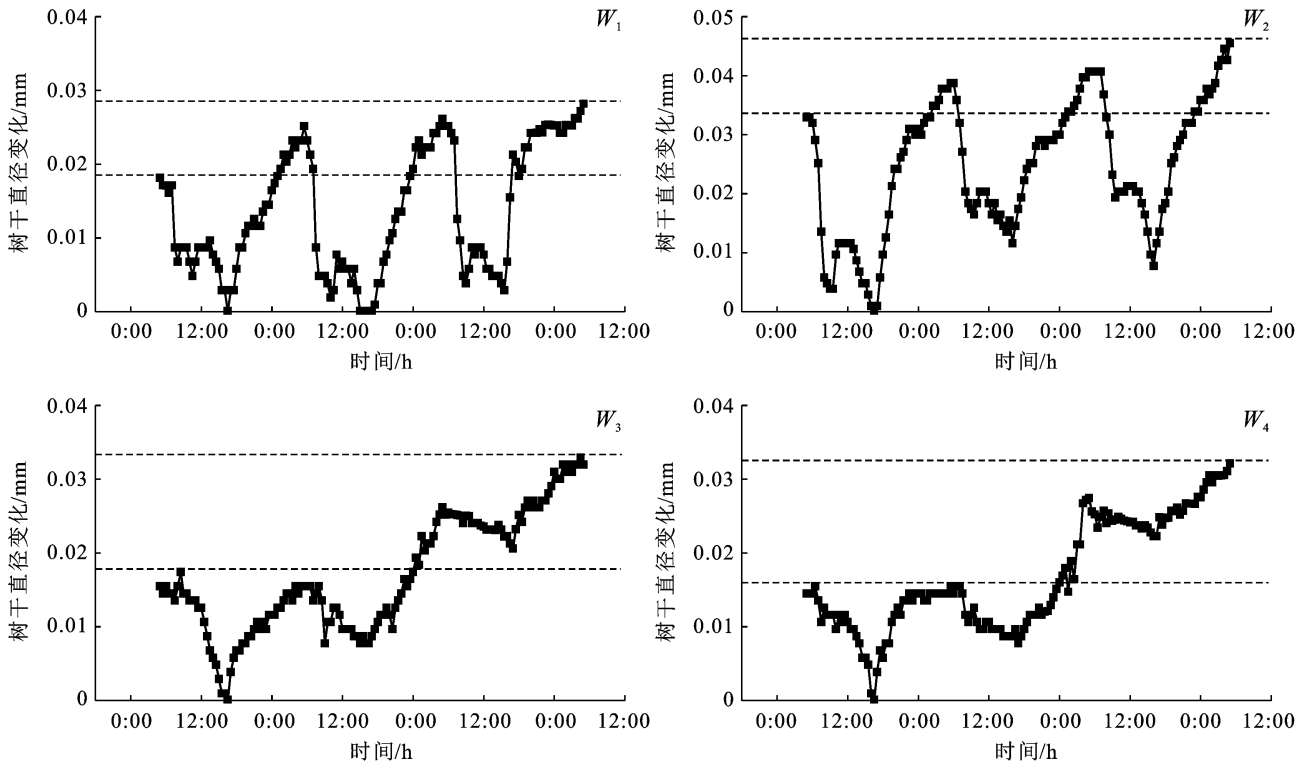


图 4 不同土壤水分条件(W_1-W_4)下臭椿树干直径的变化

2.4 不同土壤水分条件下臭椿树干直径变化对气象因子的响应

将不同水分处理下臭椿树干直径的变化与气象因子做相关性分析(表 3)。结果表明,白天臭椿树干直径的变化与 RA, TA, VPD, WS 极显著负相关,与 RH 极显著正相关。除了 RA,其他气象因子对 W_3 和 W_4 的影响最大。夜间臭椿树干直径的变化与 TA

和 VPD 极显著负相关,与 RH 极显著正相关, W_1 和 W_3 与 WS 无显著相关性, W_2 和 W_4 与 WS 显著负相关,整体上 W_1 与 W_2 处理下的树干直径变化对气象因子的敏感性更高。由此可以得出,随着土壤含水量不断增加,臭椿白天树干直径变化与气象因子的相关性呈增大趋势,夜间树干直径变化与气象因子的相关性呈降低趋势。

表 3 不同水分条件下臭椿树干直径变化与气象因子的相关性

时段	水分条件	RA	T	RH	VPD	WS
5:00—20:00	W_1	-0.537**	-0.770**	0.752**	-0.746**	-0.652**
	W_2	-0.593**	-0.669**	0.655**	-0.640**	-0.598**
	W_3	-0.470**	-0.865**	0.838**	-0.891**	-0.792**
	W_4	-0.481**	-0.847**	0.823**	-0.865**	-0.755**
20:00—5:00	W_1		-0.959**	0.922**	-0.918**	-0.344
	W_2		-0.980**	0.978**	-0.974**	-0.475*
	W_3		-0.946**	0.903**	-0.824**	-0.411
	W_4		-0.789**	0.798**	-0.854**	-0.566*

将 RA, VPD 与臭椿树干直径变化进行错位相关性分析,得到其与树干直径变化的时滞时间(图 5)。结果表明, W_1, W_2, W_3, W_4 处理下,白天臭椿树干直径变化都滞后于 RA 分别为 90, 30, 90 和 120 min。除了 W_3 处理与 VPD 之间不存在时滞外, W_1, W_2, W_4 处理分别

提前于 VPD 60, 60 和 30 min。时滞错位后, W_1, W_2, W_4 处理下的白天树干直径变化与 VPD 的相关系数分别为 $R^2 = -0.865, R^2 = -0.900, R^2 = -0.937$ ($p < 0.01$),与 RA 的相关系数分别为 $R^2 = -0.654, R^2 = -0.765, R^2 = -0.802, R^2 = -0.813$ ($p < 0.01$)。

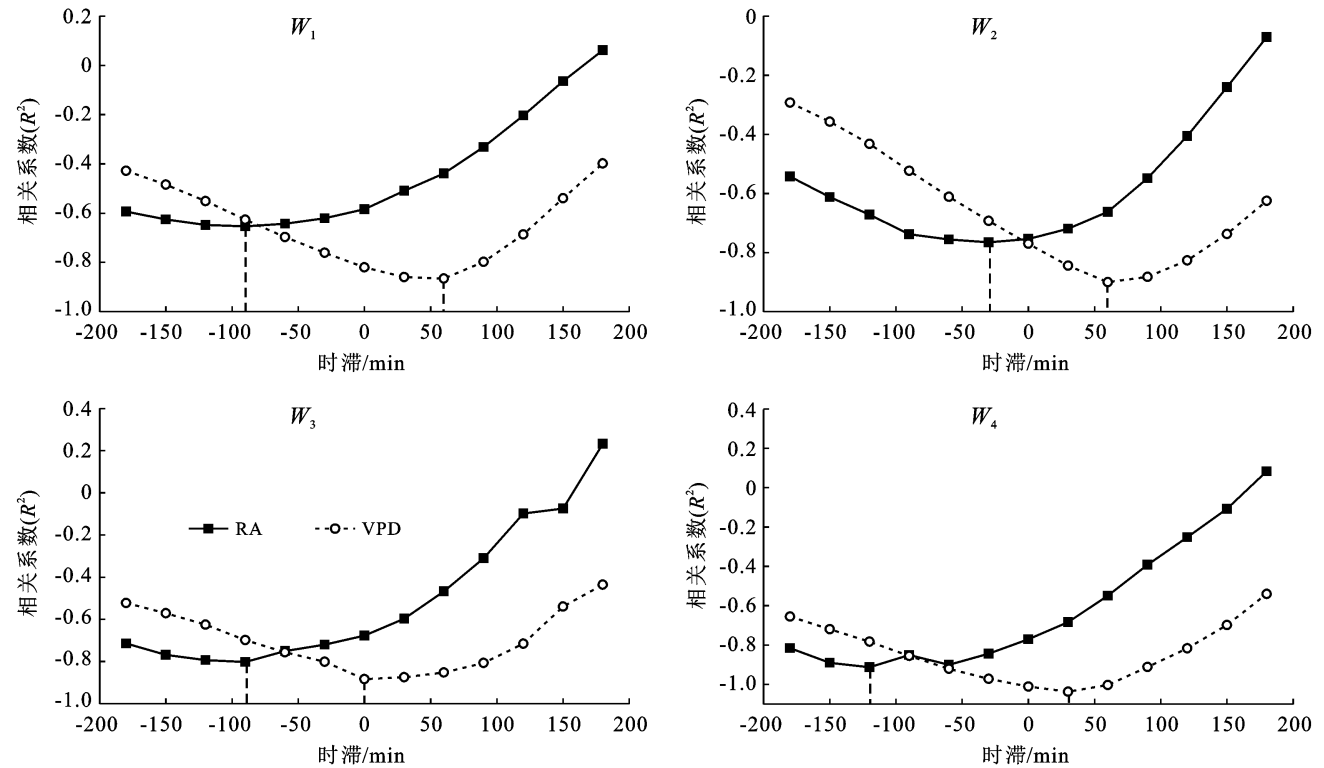


图 5 不同土壤水分条件(W_1 — W_4)下臭椿白天树干直径变化与饱和水汽压差(VPD)和太阳辐射(RA)之间的相关系数

2.5 不同土壤水分条件下臭椿树干液流与树干直径变化的关系

从图 6 可以看出,不同土壤水分条件下,臭椿树

干液流与树干直径的变化都呈反向变化规律。白天树干液流密度最大时间段,树干直径处于收缩阶段;夜间树干液流密度不断减少时,树干直径处于膨胀阶

段。将不同土壤水分条件下的臭椿树干液流与树干直径变化之间做错位相关性分析,发现两者之间存在时滞效应。 W_1, W_2, W_3, W_4 处理下树干直径的变化都滞后于树干液流的变化,分别滞后了 90, 60, 30 和

30 min。 W_3 和 W_4 处理下,时滞时间相同,进一步说明 W_3 处理为臭椿最有效的水分处理。由此可以发现,在一定范围内,随着土壤含水量不断增加,臭椿树干液流与树干直径之间的时滞时间不断缩短。

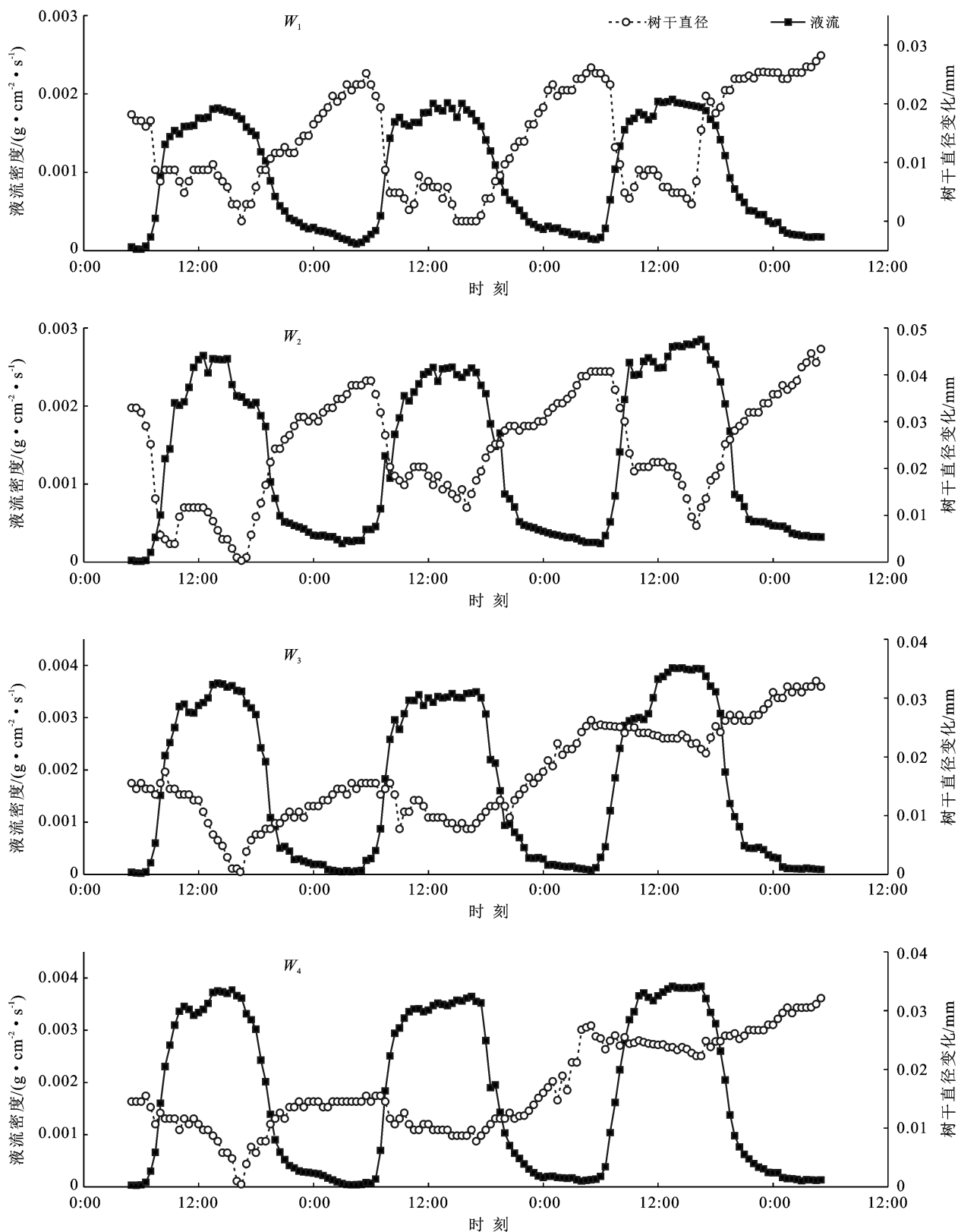


图 6 不同土壤水分条件(W_1 — W_4)下臭椿树干液流密度与树干直径变化的关系

3 讨论

3.1 不同土壤水分条件下臭椿树干液流的变化和其对环境因子的响应

土壤水分从根本上影响着林木的蒸腾强度^[13],对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、多花怪柳(*Tamarix hohenackeri*)、柠条(*Caragana korshinsk*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)等的研究发现,在一定范围内,随着土壤含水量不断增加,树干液流不断增大^[23-24],与本试验臭椿树干液流在不同土壤水条件下的变化结果相同,说明一定的灌溉可以增加植物的蒸腾量。赵文芹等^[8]对毛白杨(*Populus tomentosa*)的研究发现,充分灌水条件下毛白杨的液流量低于控水灌溉, Yan 等^[25]发现不同土壤水分条件下白桦(*Betula platyphylla*)的液流无明显变化,这可能是不同环境以及植物对水分利用策略的差异所造成。当土壤水分充足时,夜间树干液流通量并不高^[26]。本研究中,臭椿夜间树干液流表现为土壤水分越充足,其所占日总液流的比例越小,可能由于白天土壤水分充足,水体水分状态好,夜间不需要大量补水。臭椿白天树干液流在不同土壤水分条件下都与温度、风速、太阳辐射、饱和水气压差呈极显著正相关关系,与空气相对湿度呈极显著负相关关系,与桑玉强等^[27]对核桃(*Juglans regia*)的研究结果相同。在夜间,树干液流与温度、饱和水气压差、风速极显著正相关,与空气湿度极显著负相关。土壤含水量越大,臭椿树干液流在白天与环境因子相关性越强,这与对毛白杨的研究结果相同,说明树干液流对气象因子的敏感程度受土壤水分的影响^[8],而随着土壤含水量的不断增大,臭椿夜间树干液流与环境因子相关性逐渐降低,可能是土壤水分较少的时候,臭椿夜间树干液流主要是由蒸腾拉力产生,而土壤水分充足时,夜间树干液流大部分用来补水。研究表明,树干液流与蒸腾驱动因子之间存在时滞现象,可能与树干中储存水分以及土壤的有效水分有关^[5]。胡杨(*Populus euphratica*)白天树干液流密度与饱和水气压差呈顺时针滞后关系^[6],不同水分条件下的毛白杨液流通量都提前于饱和水气压差,滞后于太阳辐射^[8],与本研究不同土壤水分条件下臭椿与气象因子的时滞规律相同。土壤水分的增加可能会缩短树干液流与气象因子之间的时滞时间^[28],对油松(*Pinus tabulaeformis*)的研究发现,干旱条件下其树干液流与太阳辐射和饱和水气压差存在更长的时滞^[25]。土壤水分的变化对臭椿树干液流与太阳辐射的时滞时间没有明显的影响,但

随土壤水分的不断增加,臭椿树干液流与饱和水气压差的时滞时间有缩短变化。

3.2 不同土壤水分条件下臭椿树干直径的变化和其对环境因子的响应

植物茎干是土壤水分进入叶片进行蒸腾作用的途径^[9],研究发现树木在适应水分变化的情况下,树干会明显收缩和膨胀^[29]。本试验臭椿在 W_1 和 W_2 条件下树干直径变化幅度大于 W_3 和 W_4 。土壤缺乏水分可能会对树木的生长不利,更多的水分有利于生物量的增长^[30],对冬青栎(*Quercus ilex*)、草莓树(*Arbutus unedo*)和大叶冬青(*Ilex chinensis*)的研究发现,干旱处理降低了树干直径的生长^[15]。臭椿随着土壤水分含量的增多,树干直径的增长量不断增多,可能是土壤中充足的水分有利于水分和养分快速向上运输,从而加快植物的生长。对辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)的研究发现,其树干直径在日尺度上的变化与太阳辐射、饱和水气压差显著相关^[31]。臭椿在不同土壤水分条件下,白天树干直径变化与太阳辐射、温度、饱和水气压差和风速呈极显著负相关,与空气相对湿度极显著正相关,夜间与温度和饱和水气压差呈极显著负相关,与空气相对湿度呈极显著正相关,表现为随着土壤含水量的不断增加,白天树干直径的变化与气象因子的相关性呈增大趋势,夜间相关性呈减少趋势,说明土壤水分也影响树干直径对气象因子的敏感程度。Simonnea等^[29]认为树干直径几乎与太阳辐射同时变化,树干直径的变化与水势有关,而与含水量无关。臭椿白天树干直径变化与气象因子存在时滞,滞后于太阳辐射,提前于饱和水汽压差,而土壤水分的变化对太阳辐射和树干直径的时滞没有规律性影响,对饱和水气压差与树干直径的时滞有一定影响,表现为土壤含水量越大时滞时间越短,其结果与不同土壤水分处理下气象因子对臭椿树干液流影响相似,说明树干直径的变化与树干液流之间紧密联系。

3.3 不同土壤水分处理下臭椿树干液流与树干直径变化的关系

蒸腾作用导致边材组织中储存水的消耗,在日尺度下树干直径会发生一定的收缩和膨胀。树干中的水分储备有助于蒸腾作用,并通过缓冲水分消耗的极端,在优化水分运输中发挥重要作用^[14]。对河北杨(*Populus hopeiensis*)、油松、辽东栎和刺槐^[28,31]的研究发现,日尺度下树干液流与树干直径变化呈反向变化规律,与本试验臭椿在不同土壤水分条件下树干液流与树干直径的变化规律一致,说明树干液流与树干直径的双向变化可以共同反映植物应对环境条件变

化的策略。研究表明,蒸腾需要的水分更容易从靠近失水源的树干储存水中抽出,而不是直接从土壤中抽出,水分从土壤中抽送到树冠需要一定的阻力和时间^[14]。臭椿树干液流与树干直径的规律性变化存在一定的时滞,在土壤水分充足的时候,土壤中水分能快速补充到树体中,从而进行蒸腾,而土壤水分缺乏时,树干补水需要的时间可能较长,臭椿随着土壤含水量的不断增加,臭椿树干液流与树干直径之间时滞时间缩短。蒸腾作用、树干水分储存动态和基于树木生长的水分利用效率的协调响应,使树木能够应对季节性和年际的干旱环境^[32]。因此,对树干液流和树干直径在不同土壤水分条件下的变化进行同步监测,可以更深入了解树木的水分利用策略。

4 结论

(1) 土壤含水量在 W_1 — W_3 (10%~25%) 范围内,臭椿日总液流量随着土壤含水量的增加而增大,夜间树干液流占日总液流量的比例随土壤含水量的增加而减小, W_3 (20%~25%) 处理为臭椿最适宜的灌溉标准。

(2) 日尺度水平下,臭椿树干液流表现为“几”字形变化规律,树干直径的膨胀收缩变化呈现倒“几”字形。土壤含水量、树干液流、树干直径的变化存在明显的协同响应特征。不同水分条件下臭椿树干直径的变化对气象因子的响应以及与其之间的时滞和树干液流与其之间的关系较为一致。

[参 考 文 献]

- [1] Chang Xuexiang, Zhao Wenzhi, Liu Hu, et al. Qinghai spruce(*Picea crassifolia*) forest transpiration and canopy conductance in the upper Heihe River Basin of arid Northwestern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,198(11):209-220.
- [2] McDowell N G, White S, Pockman W T. Transpiration and stomatal conductance across a steep climate gradient in the Southern Rocky Mountains [J]. Ecohydrology, 2008,1(3):193-204.
- [3] Hubbart J A, Kavanagh K L, Robert P, et al. Cold air drainage and modeled nocturnal leaf water potential in complex forested terrain [J]. Tree Physiology, 2007,27(4):631-639.
- [4] Pasqualotto G, Carraro V, Menardi R, et al. Calibration of Granier-Type (TDP) sap flow probes by a high precision electronic potometer [J]. Sensors, 2019,19(10):2419.
- [5] 杨洁,吕金林,何秋月,等.黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性[J].应用生态学报, 2019,30(8):2607-2613.
- [6] Zhao Chunyan, Si Jianhua, Feng Qi, et al. Comparative study of daytime and nighttime sap flow of *Populus euphratica* [J]. Plant Growth Regulation, 2017,82(2): 1-10.
- [7] Berbigier P, Bonnefond J M, Loustau D, et al. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal (I): Seasonal course of water flux through maritime pine [J]. Oecologia, 1996,107(1):33-42.
- [8] 赵文芹,席本野,刘金强,等.不同灌溉条件下杨树人工林蒸腾过程及环境响应[J].植物生态学报,2021,45(4): 370-382.
- [9] Tyree M T, Sperry J S. Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress?: Answers from a model [J]. Plant Physiology, 1988,88(3):574-580.
- [10] Martínez-Vilalta J, Korakaki E, Mencuccini D V. Below-ground hydraulic conductance is a function of environmental conditions and tree size in scots pine [J]. Functional Ecology, 2007,21(6):1072-1083.
- [11] Zweifel R, Häsler R. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: Temporal and spatial patterns of change in stem radius [J]. Tree Physiology, 2001,21(9):561-569.
- [12] Chen Lixin, Zhang Zhiqiang, Zeppel M, et al. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation [J]. International Journal of Biometeorology, 2014,58(7):1569-1581.
- [13] Kanalas P, Fenyvesi A, Kis J, et al. Seasonal and diurnal variability in sap flow intensity of mature sessile oak [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.] trees in relation to microclimatic conditions [J]. Acta Biologica Hungarica, 2010,61(S1):95-108.
- [14] Zweifel R, Item H, Häsler R. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations [J]. Tree Physiology, 2001,21(12/13):869-877.
- [15] Romà O, Josep P. Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought [J]. Plant Ecology, 2007,189(2):291-299.
- [16] 宋庆安,童方平,易霁琴,等.臭椿光合生理生态特性日变化研究[J].中国农学通报,2007(12):148-153.
- [17] 张蔓蔓,郑聪慧,刘春鹏,等.臭椿的研究进展与展望[J].河北林业科技,2021(2):49-53.
- [18] 周扬.北京市建成区绿地植物潜在年耗水量估算[D].北京:北京林业大学,2020.
- [19] 车文瑞.北京城区绿地主要乔灌草年耗水量的估算[D].北京:北京林业大学,2008.
- [20] 马履一,王华田,林平.北京地区几个造林树种耗水性比较研究[J].北京林业大学学报,2003,25(2):1-7.

- [21] 熊伟.六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究[D].北京:中国林业科学研究院,2003.
- [22] Granier A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres Annales [J]. Des Encesforestières, 1985,42(2):193-200.
- [23] 李洪杰,郭月峰,姚云峰,等.砒砂岩区沙棘液流及细根变化对土壤水分变化的响应[J].水土保持通报,2021,41(5):38-43.
- [24] 孙龙,彭祚登,王佳茜,等.不同土壤水分对4个灌木能源树种生长和蒸腾耗水的影响[J].中南林业科技大学学报,2015,35(10):54-61.
- [25] Yan Chunhua, Wang Bei, Zhang Yang, et al. Responses of sap flow of deciduous and conifer trees to soil drying in a subalpine forest [J]. Forests, 2018,9(1):32.
- [26] 张婕,蔡永茂,陈立欣,等.北京山区元宝枫夜间液流活动特征及影响因素[J].生态学报,2019,39(9):3210-3223.
- [27] 桑玉强,路晓静,王若伦,等.不同水分处理下核桃耗水规律及其与气象因子的关系[J].河南农业大学学报,2021,55(4):674-680.
- [28] 刘崴,魏天兴,朱清科.半干旱黄土丘陵区河北杨和油松生长季树干液流特征[J].浙江农林大学学报,2018,35(6):1045-1053.
- [29] Simonneau T, Habib R, Goutouly J P, et al. Diurnal Changes in stem diameter depend upon variations in water content: Direct evidence in peach trees [J]. Journal of Experimental Botany, 1993,44(3):615-621.
- [30] Romà O, Adrià B, Corina B, et al. Satellite data as indicators of tree biomass growth and forest dieback in a Mediterranean holm oak forest [J]. Annals of Forest Science, 2015,72(1):135-144.
- [31] 刘美君,吕金林,陈秋文,等.黄土丘陵区两典型造林树种生长季树干直径微变化动态及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(5):1673-1680.
- [32] Elisenda Sánchez-Costa, Rafael Poyatos, Santiago Sabaté. Contrasting growth and water use strategies in four co-occurring mediterranean tree species revealed by concurrent measurements of sap flow and stem diameter variations [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,207(7):24-37.

(上接第32页)

- [15] 母彩霞,张维江.青铜峡灌区冬季储水灌溉越冬期土壤水分变化[J].人民黄河,2014,36(4):86-88.
- [16] 孙开,王春霞,蓝明菊,等.秋耕对北疆季节性冻融期土壤热状况的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):63-71.
- [17] 姚宝林,李光永,王峰.冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水热盐的影响[J].农业工程学报,2016,32(7):114-120.
- [18] 彭振阳,黄介生,伍靖伟,等.秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J].农业工程学报,2012,28(6):77-81.
- [19] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等.蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J].土壤学报,2009,46(1):46-51.
- [20] 辛贵民,赵清竹,尹航,等.冻融交替对长白山不同林型土壤两种温室气体排放的影响[J].生态学报,2021,40(3):644-653.
- [21] 秦璐,吕光辉,何学敏,等.艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应[J].生态学报,2013,33(22):7259-7269.
- [22] 张慧东,尤文忠,魏文俊,等.暖温带—中温带过渡区4种典型森林土壤呼吸的温度敏感性[J].生态环境学报,2015,24(11):1757-1764.
- [23] 董茹月,彭琴,贺云龙,等.冻融期温带草地土壤呼吸和土壤异养呼吸的日变化特征及对水氮添加的响应[J].土壤通报,2021,52(5):1129-1139.
- [24] 魏佳宇,吴忠亮,陈鑫童,等.天津两种城市绿地土壤微生物与土壤呼吸特征[J].湖北农业科学,2019,58(22):49-53.
- [25] 邢军会,倪红伟,沙威.非生长季温室气体排放研究进展[J].国土与自然资源研究,2018,40(6):91-94.
- [26] 郭朝霞,马文瑛,赵传燕,等.积雪对祁连山亚高山草甸土壤呼吸速率的影响[J].生态学报,2019,39(9):3297-3308.
- [27] 张智起,张立旭,徐炜,等.气候变暖背景下土壤呼吸研究的几个重要问题[J].草业学报,2019,28(9):164-173.
- [28] 张耀鸿,楚岱蔚,谢晓金,等.夜间增温对麦田土壤呼吸速率的影响[J].2013,32(7):1389-1395.
- [29] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等.冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J].水科学进展,2002,13(3):298-302.