

臭椿夜间树干液流变化特征及环境驱动因素分析

刘云洁¹, 张含含², 常胜朝³, 周新启³, 马长明^{1*}

(1.河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2.涉县林业发展服务中心, 河北 邯郸 056000; 3.河间市自然资源和规划局, 河北 沧州 061000)

摘要:【目的】研究树木夜间液流可以更全面地了解其水分利用与环境的关系, 本试验针对臭椿夜间液流与环境因子的关系开展研究, 以深入揭示臭椿水分利用特征。【方法】采用热扩散式探针法(TDP)对河北保定地区臭椿(6—8月)树干液流密度、相关环境因子和树干径向的变化进行监测, 分析了臭椿夜间液流的变化特征及其影响因素。【结果】臭椿夜间液流量占日总液流的12.1%, 20:00—00:00(T1)时段液流密度大于00:00—05:00(T2)时段, T1时段液流量占总夜间液流的65%, T2时段占35%; 臭椿T2时段液流密度同饱和水气压差、风速极显著正相关($P<0.01$), T1时段液流密度同饱和水气压差、风速相关性较低; 晴天臭椿夜间液流密度大于雨天, 且雨天过后的晴天液流密度明显增大; 臭椿夜间液流量与冠幅极显著正相关($P<0.01$), 与胸径显著正相关($P<0.05$), 日尺度下树干径向微变化与液流密度变化具有较好的线性关系($R^2=0.672$), T1时段树干膨胀幅度大于T2时段。【结论】液流和树干径向微变化共同反映臭椿的水分利用状况, 臭椿夜间液流受环境因子和其生物学结构综合影响, T1时段主要进行补水, T2时段存在明显蒸腾, 且补水大于蒸腾。

关键词: 臭椿; 夜间液流; 蒸腾; 补水; 树干径向微变化

中图分类号: S721

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022107

OSID:



刘云洁, 张含含, 常胜朝, 等. 臭椿夜间树干液流变化特征及环境驱动因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 9-15.

LIU Yunjie, ZHANG Hanhan, CHANG Shengzhao, et al. Sap Flow at Night in the Stems of *Ailanthus Altissima* and Its Determinants[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 9-15.

0 引言

【研究意义】植物吸水是植物生理活动和土壤-植物-大气水分循环的关键过程, 树干液流可以反映植物体内的水分运移情况^[1-2]。植物的夜间液流是指植物的根、茎、枝和边材内的液体在夜间的流动^[3]。早期的研究认为所有植物的夜间液流都应该为0, 但随着研究的深入, 发现大多数植物夜间气孔不完全关闭。夜间液流占全天液流的比例一般为5%~20%, 如果忽略夜间液流, 就会导致对植物总耗水量的低估^[4-5]。夜间液流主要分为夜间蒸腾和夜间补水2部分, 夜间蒸腾可以将植物根系的营养物质运送至植物冠层, 有利于植物的生长^[6]; 树干补水可以补充植物白天蒸腾消耗的水分, 增强植物的生理适应性^[7]。研究发现, 树木进行蒸腾和补水时, 树干中水分张力的变化会使树干发生可逆的日变化(白天收缩和夜间膨胀), 树干的径向变化可以作为树木水分状态的重要指标^[8]。因此, 研究夜间液流和树干径向的变化特征, 对于深入了解臭椿夜间蒸腾耗水动态特征具有重要

意义。【研究进展】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^[9]。有研究发现, 影响植物夜间液流的主要环境因子为饱和水气压差和土壤含水率^[5], 一定程度的饱和水汽压差通过增加植物叶片边界层与叶片内腔的水势梯度, 促进夜间蒸腾的发生^[10]; 植物白天的大量蒸腾导致夜间树体与土壤之间产生了一定的水势梯度, 促进夜间补水的发生^[11]。刘崑等^[12]发现河北杨(*Populus hopeiensis*)夜间液流与饱和水气压差和风速显著相关, 其夜间液流主要用于蒸腾; 赵飞飞等^[13]发现毛白杨(*Populus tomentosa*)夜间液流对饱和水气压差响应强烈, 其夜间液流是由补水和蒸腾共同造成的; 王艳兵等^[14]则发现华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)夜间液流的主要影响因子为土壤含水率, 其夜间液流主要是用于树干补水; 徐世琴等^[15]认为树形因子也是影响液流的重要因素。

臭椿(*Ailanthus altissima*), 苦木臭椿属落叶乔木, 在我国华北、西北地区栽培最多, 其适应性强, 耐干旱、瘠薄和盐碱, 对二氧化硫、氯气、氟化氢等多种有害气体具有一定抗性, 是城区绿化、荒山造林的优良树种^[16-17]。【切入点】目前对臭椿液流方面的研究主要集中在其日变化, 通过与其他造林树种相比较, 得出臭椿属于中度蒸腾和适度水分敏感型树种^[18-19],

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 雄安新区上游太行山区典型退化林分修复技术研究(22326806D)

作者简介: 刘云洁(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事植物蒸腾耗水相关研究。E-mail: liuyunjie00011@163.com

通信作者: 马长明(1980-), 男, 副教授, 主要从事蒸腾耗水和森林培育相关研究。E-mail: machangming@126.com

但臭椿在夜间的水分利用特征还不够清楚。开展植物夜间蒸腾耗水的研究对深入了解植物水分关系和生态系统水文过程十分重要。【拟解决的关键问题】因此,本研究利用热扩散式液流计和树干径向变化记录仪对臭椿的树干液流密度和树干径向微变化进行连续监测,分析臭椿夜间液流的变化特征以及与环境因子和其形态结构变化的关系,以揭示其夜间耗水规律和水分利用特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2021 年 6—8 月进行,试验地位于河北省保定市河北农业大学西校区校园内 (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, 主要气候特点为春季干燥多风、夏季炎热多雨、秋季昼暖夜寒、冬季寒冷干燥。年平均气温为 12 °C; 年平均日照时间为 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; 年平均蒸发量约为 1 430 mm; 年平均风速为 1.8 m/s。该试验地面积为 50 m×20 m, 地势平坦, 臭椿为纯林, 以防护为主。林下有委陵菜 (*Potentilla chinensis* Ser.)、沿阶草 (*Ophiopogon japonicus* Levl.)、狗尾草 (*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、苦苣菜 (*Ixeris polycephala* Cass.) 等草本植物。

1.2 材料选择与处理

2021 年 5 月 31 日, 在该试验地选择 9 株树干通直、树冠圆满、无病虫害、长势良好, 具有代表性的臭椿作为试验样树 (表 1)。

表 1 臭椿的基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample trees

树号	树高/m	胸径/cm	边材面积/cm ²	边材厚度/cm	冠幅/m	
					东西	南北
1	14.0	14.1	104.891	3.0	5.6	5.4
2	15.0	14.8	111.156	3.0	5.7	5.7
3	15.5	21.4	205.638	3.7	7.0	6.8
4	14.0	20.2	191.697	3.6	6.0	6.6
5	13.5	23.0	224.227	3.7	8.0	7.4
6	14.0	17.3	145.068	3.3	5.5	6.7
7	13.0	14.1	104.891	3.0	5.0	5.8
8	14.0	14.1	104.891	3.0	6.0	6.0
9	14.5	22.7	220.742	3.7	6.5	7.5

1.3 试验方法

1.3.1 样树基础参数的测定

使用胸径尺测量样树胸径、布鲁莱斯测高器测量样树高度, 使用皮尺分别测量东西和南北方向冠幅宽度, 东西和南北方向记录数值的平均值为样树冠幅宽度。为避免对样树造成伤害, 在试验地附近选择 9 株

与样树大小相似的臭椿, 采用生长锥在树干 1.3 m 高处钻取木芯, 将所钻取木芯进行染色处理, 观察边材和心材的分布并测量边材厚度, 确定边材面积。通过测得的胸径与边材面积建立二者之间的关系方程:

$$A_s = 13.97DBH - 94.413 \quad R^2 = 0.998, \quad (1)$$

式中: A_s 为边材面积 (cm²); DBH 为胸径 (cm); R^2 为相关系数。

1.3.2 树干液流的测定

根据热扩散原理, 利用 TDP 对样树树干液流速率进行测定。在树木的北向、树干 1.3 m 高处安装长度为 3 cm 的探针。首先用刀片刮去安装探针部位的粗糙树皮, 然后用对应规格的钻头打孔, 二孔在同一垂直方向上, 插入探针。最后在安装探针处包裹绝缘防辐射膜, 以防止太阳辐射的影响, 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 1 次数据, 记录数据的时间间隔为 30 min, 由 Granier^[20]原始公式得出液流密度 (F_d , g/(cm² s)):

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

式中: ΔT_M 为无液流时上下 2 个探针之间的最大温差值; ΔT 为 2 个探针之间的瞬时温差值。根据树干液流密度与边材面积计算液流量 (F_s , kg):

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

式中: F_d 为液流密度 (g/(cm² s)); A_s 为边材面积 (cm²); 1800 是将瞬时液流密度扩展到每 30 min 液流量的时间换算系数; 10^{-3} 是将 g 转换为 kg 的质量换算系数。

1.3.3 树干径向微变化的测定

使用型号为 DBL60 树干径向变化记录仪 (Dendrometer) 监测树干的径向变化。安装位置为 TDP 探针上方 10 cm 左右处, 设置记录数据时间间隔为 30 min。

1.3.4 气象因子的测定

在试验地附近安装自动气象监测站 (RR-9170), 自动监测并记录温度 (T , °C)、空气相对湿度 (RH , %)、风速 (WS , m/s) 等数据。空气温湿度传感器 (AV-10TH) 安装在 1.8 m 高度, 风速传感器 (AV-30WS) 安装在 2.0 m 高度。设置记录数据时间间隔为 10 min。饱和水汽压差 (VPD , kPa) 的计算方法为:

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

1.3.5 数据处理

将该地区太阳辐射为 0 时的液流定为夜间液流, 则夜间液流时间段为晚上 20:00 至翌日凌晨 05:00, 即 20:00—05:00; 以 00:00 为界限, 将夜间液流划分为 20:00—00:00 (T1) 和 00:00—05:00 (T2) 2 个时间段。

使用 Excel 2016 处理数据，并绘制图表；使用 SPSS 24.0 对夜间液流与影响因子之间的关系做相关分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 臭椿夜间树干液流变化特征

图 1 为 7 月 23—25 日连续晴天数据，可以看出臭椿树干液流表现出明显的日变化规律，且白天液流密度明显高于夜间液流密度。臭椿白天液流一般 05:00 左右启动，液流密度最大时间段为 12:00—15:00，15:00 以后液流密度逐渐降低。夜间液流密度整体呈下降趋势，T1 时段液流密度下降幅度较大，T2 时段较为缓慢。

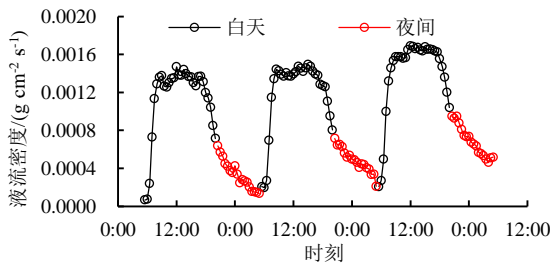


图 1 臭椿液流密度的变化

Fig.1 The variations of sap flow density of *Ailanthus altissima*

9 株样树 6—8 月日平均液流量为 14.489 kg/d，白天液流量为 12.739 kg/d，夜间液流量为 1.175 kg/d，T1 时段液流量为 1.132 kg/d，T2 时段液流量为 0.614 kg/d，其中夜间液流量占日总液流量的 12.1%，T1 时段液流量占夜间液流量的 65%，T2 时段占 35%。

2.2 臭椿夜间液流影响因素分析

2.2.1 臭椿夜间液流与气象因子的关系

表 2 为整个试验期间各株臭椿夜间液流密度的平均值与气象因子的相关性分析。结果表明，臭椿夜间液流变化与 T 、 VPD 极显著正相关，与 RH 极显著负相关，T1 时段液流密度与 WS 无显著相关性，而 T2 时段液流密度与 WS 极显著相关，整体 T2 时段液流密度与气象因子的相关性更强。

表 2 臭椿夜间液流密度与气象因子之间的相关性系数

Table 2 Correlation coefficients between night time sap flow density and meteorological factor of *Ailanthus altissima*

时段	T	RH	VPD	WS
T1	0.564**	-0.824**	0.323**	0.184
T2	0.695**	-0.866**	0.866**	0.517**

注 *表示 0.05 水平上显著相关，**表示 0.01 水平上显著相关。

采用逐步回归分析法，建立 T1、T2 时段液流密度分别与 T 、 RH 、 VPD 、 WS 的回归模型，进入模型的因子则为影响臭椿液流密度的主要影响因子。臭椿 T1、T2 时段液流密度分别与气象因子的回归方程如下：

$$Fd_{(T1)} = -1.083RH - 0.318T \quad R^2 = 0.712, \quad (5)$$

$$Fd_{(T2)} = 0.854VPD + 0.097WS \quad R^2 = 0.755. \quad (6)$$

由式 (5)、式 (6) 可知，臭椿 T1 时段液流密度的主要影响因子为 RH 和 T ，T2 时段液流密度的主要影响因子为 VPD 和 WS ，而 VPD 为 RH 和 T 的共同体现，可知臭椿 T2 时段液流密度更易受多个气象因子的影响。决定系数 R^2 值均达到显著水平。

2.2.2 降雨对臭椿夜间液流的影响

图 2 为 7 月 25 日（晴天）、26 日（雨天）、27 日（晴天）、28 日（雨天）、29 日（雨天）、30 日（晴天）、31 日（晴天）连续 7 d 臭椿树干夜间液流密度的变化特征，可以看出，晴天臭椿夜间液流密度高，雨天液流密度低，雨天过后的晴天夜间液流密度会明显的增大。

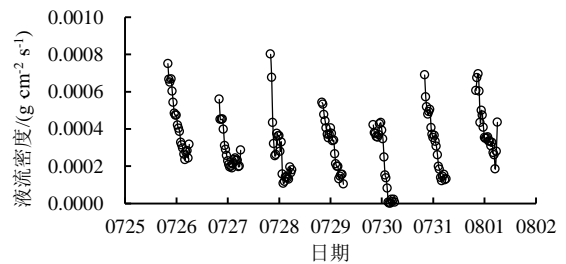


图 2 不同天气下臭椿夜间液流的变化

Fig.2 Variations of night time sap flow of

Ailanthus altissima in different weather

2.2.3 树木形态结构对臭椿夜间液流的响应

臭椿夜间液流量与树高、胸径、冠幅的相关性分析（表 3）结果表明，臭椿夜间液流量与胸径和冠幅显著正相关，与树高无明显相关性。通过回归分析（图 3），得到如下拟合关系式：

$$Qn = 0.0224DBH^3 - 1.1785DBH^2 + 20.488DBH - 116.49 \quad R^2 = 0.816, \quad (7)$$

$$Qn = 0.095W^3 - 0.826W^2 + 10.218 \quad R^2 = 0.967, \quad (8)$$

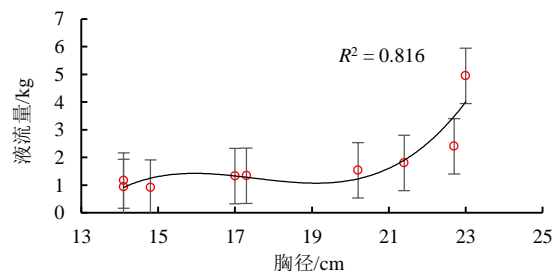
式中： Qn 为夜间液流量； DBH 为树干胸径； W 为冠幅； R^2 为相关系数。

表 3 臭椿夜间液流与树木形态之间的相关性

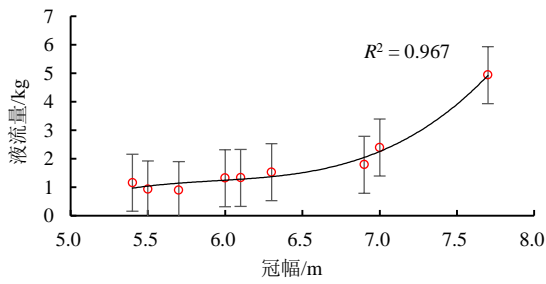
Table 3 Correlation coefficients between night time sap flow and tree morphology of *Ailanthus altissima*

树木形态因子	树高	胸径	冠幅
相关系数	-0.205	0.752*	0.883**

注 *表示 0.05 水平上显著相关，**表示 0.01 水平上显著相关。



(a) 液流量与胸径的关系



(b) 液流量与冠幅的关系

图3 臭椿夜间液流与树木形态的关系

Fig.3 Relationship between night time sap flow and tree morphology of *Ailanthus altissima*

图4为试验期间臭椿树干液流密度和树干的径向变化动态,可以看出,试验期间臭椿树干不断增大,但日尺度下树干径向微变化呈明显的昼夜变化规律,且与树干液流密度的变化呈规律性的反向变化特征(图5)。可以看出,05:00—10:00,树干收缩幅度最大,液流密度不断增加;10:00—16:30,树干收缩幅度开始减缓,液流密度达到最高,变化缓慢;16:30左右树干达到日最小值,此后液流密度开始呈下降趋势,树干开始膨胀,最大膨胀幅度出现在17:00—00:00,此阶段液流密度下降迅速;00:00前后,树干膨胀幅度开始下降,直到05:00左右,树干达到日最大值,此时的液流密度处于最小值。

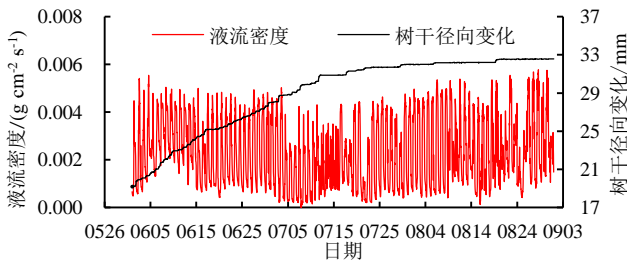


图4 臭椿树干径向变化与液流密度

Fig.4 Variation of stem and sap flow of *Ailanthus altissima*

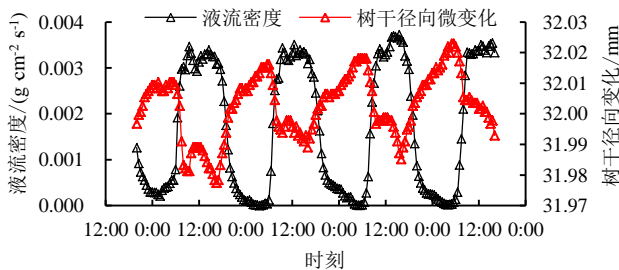


图5 臭椿树干径向微变化与液流的关系

Fig.5 Relationship between radial micro-variation in the stem and sap flow of *Ailanthus altissima*

图6为臭椿夜间树干径向微变化,从图6可以看出,夜间T1时段臭椿树干一直膨胀,T2时段既有膨胀又有收缩,但变化幅度较小。T1、T2时段树干变化与气象因子的相关性分析(表4)显示,T1时段臭椿树干变化与气象因子之间无显著相关性,而T2时

段臭椿树干变化与 T 、 VPD 极显著负相关 ($P < 0.01$),与 RH 显著正相关 ($P < 0.05$),这与夜间液流和气象因子之间的相关性相似。图7为臭椿液流量与树干径向变化的相关分析,显示二者之间存在较好的线性关系。

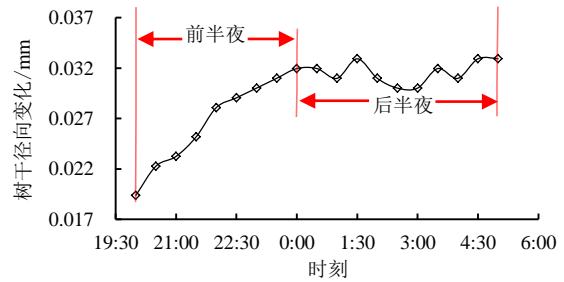


图6 臭椿夜间树干径向微变化

Fig.6 Radial micro-variation in the stem at night of *Ailanthus altissima*.

表4 臭椿树干径向微变化与气象因子的相关性

Table 4 Correlation coefficients between radial micro-variation in the stem and meteorological factors of *Ailanthus altissima*.

时段	T	RH	VPD	WS
T1	-0.543	0.253	-0.329	0.148
T2	-0.975**	0.778*	-0.893**	0.118

注 *表示 0.05 水平上显著相关, **表示 0.01 水平上显著相关。

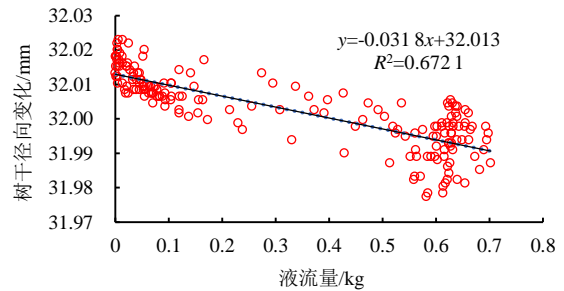


图7 臭椿液流量与树干径向变化的相关关系

Fig.7 Correlation of sap flow and radial variation in the stem of *Ailanthus altissima*

3 讨论

3.1 臭椿夜间不同时间段的液流变化

臭椿 T1 时段夜间液流密度较 T2 时段明显活跃, T1 时段液流密度下降急剧, T2 时段趋于平缓。有研究结果显示,白榆 (*Ulmus pumila*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、梭梭 (*Haloxyylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge) 的夜间液流密度也表现出相同的变化特征^[21-22], 其夜间液流主要是补充树体由于白天蒸腾造成的水分亏缺,而河北杨夜间液流活动主要发生在 T2 时段,湿季夜间液流密度在 T1 时段平稳且接近 0,在 T2 时段维持较高液流密度^[12],这可能是不同树种夜间水分利用特性的不同。

夜间液流量的大小通常用占白天或全天液流的比例来表示^[5],研究发现夜间液流量对日总液流量有显著的贡献,如神农架华山松 (*Pinus amandii*) 全年夜

间树干液流量占整日液流量的 10.37%^[23]，橡树 (*Quercus robur* L.) 夜间液流量的最大值超过了日总液流量的 20%^[24]，本试验结果显示，臭椿夜间液流量占到了日总液流量的 12.1%。随着全球气温的不断上升，植物在适应气候的变化过程中，夜间液流量的比例可能会随着温度的升高和水分亏缺的加剧而增加^[25]，极端干旱条件下的胡杨 (*Populus euphratica*) 夜间液流量占白天液流量的比例高达 53%^[26]。可见，在评估植物蒸腾耗水时，夜间液流是不可忽视的。

3.2 夜间液流变化的驱动因子

目前已有研究结果显示，植物的液流受环境因子和其生理学结构的共同影响^[27]，环境因子中主要气象因子为 *VPD* 和 *WS*^[28]。*VPD* 和 *WS* 通过影响植物夜间气孔的闭合，从而控制植物夜间蒸腾的发生与大小^[29]，如 *VPD* 可以解释胡杨夜间液流密度 55% 的变化^[26]，*WS* 可以解释巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 夜间液流密度 37% 的变化^[30]。本试验中臭椿 T1 时段液流密度与 *VPD* 的相关性较 T2 时段低，且与 *WS* 不相关，T2 时段液流密度与 *VPD*、*WS* 都表现出显著相关性，说明臭椿夜间液流用于 T2 时段的蒸腾大于 T1 时段。研究发现夜间液流与土壤含水率之间存在线性关系^[31]，土壤含水率的升高会增加植物夜间补水量^[32]，或促进植物夜间气孔的开放^[33]，当土壤含水率最低时，无论气象因子如何驱动，夜间液流最小^[34]。由于条件限制，本试验对于土壤含水率没有进行连续监测，但分析了降雨期间臭椿夜间液流的变化，降雨影响了土壤含水率^[35]，进而影响液流的大小。晴天臭椿夜间液流密度大于雨天，由于晴天白天强烈的蒸腾，到了夜间需要大量补充树干内缺失的水分，而雨天白天树木蒸腾量小，则夜间需要补充的水分相对较少。降雨之后的晴天臭椿夜间液流密度明显增大，可能由于白天的大量蒸腾，而夜间土壤水分比较充足，此时的夜间液流主要是用来补水^[36]，液流密度增大。树形因子也是影响树木夜间液流大小的重要因子，青海云杉 (*Picea crassifolia*) 夜间液流量与胸径、树高、边材面积均呈显著线性相关关系^[37]，臭椿夜间液流量与胸径、冠幅表现出显著相关性，但与树高无明显相关性，这与对马占相思 (*Acacia mangium*) 的研究结果相同^[38]，说明了树形因子通过影响日蒸腾量大小与树干的边材面积，进而影响夜间液流量的大小^[39]，表现出胸径、冠幅越大，液流量越大。已有的对河北杨、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 的研究结果表明，日尺度下树干液流密度与树干径向变化呈反向变化规律^[40-41]，与本试验对臭椿的研究结果一致。一般认为，日尺度下树干的膨胀与收缩是由植物内部不同的水势梯度引

起的，不可逆的径向生长是整个生长季的长时间序列变化^[42-43]。也有研究发现红花槭 (*Acer rubrum* L.)、欧洲柃木 (*Alnus glutinosa* Miller)、黄桦 (*Betula lenta* L.)、紫叶欧洲山毛榉 (*Fagus sylvatica* L.)、北美红栎 (*Quercus rubra* L.) 和欧洲椴 (*Tilia vulgaris* L.) 的树干液流密度和树干径向变化在日尺度上呈线性相关 ($R^2=0.61\sim 0.87$)^[44]，与本试验中对臭椿的研究结果相同 ($R^2=0.672$)，说明日尺度上树干液流与树干径向变化之间存在紧密联系。湛景武等^[45]发现桃树 (*Prunus persica*) 树干径向微变化主要受气象因子和土壤水分的影响，而本试验中臭椿 T1 时段夜间树干径向微变化与气象因子没有显著相关性，T2 时段与 *VPD* 显著相关。将日尺度下臭椿树干液流与树干径向变化结合发现，T1 时段树干膨胀幅度大、液流密度大、液流量占夜间液流的 65%，且液流与气象因子相关性较差，说明 T1 时段的液流主要用来补水；T2 时段树干膨胀幅度减缓、液流密度降低，液流量占夜间液流的 35%，且液流与气象因子相关性显著，说明 T2 时段的液流部分明显用于蒸腾，而树干膨胀缓慢，说明了后半夜也存在补水，只是补水量小于前半夜，但大于蒸腾。对于夜间树干补水和蒸腾的定量分析，仅监测树干液流和树干径向微变化还不足以说明问题，今后可以同步监测夜间叶片气孔导度、蒸腾速率以及土壤水分条件，进一步探究臭椿夜间的蒸腾机制。

4 结论

1) 臭椿夜间液流占日总液流的 12.1%，T1 时段液流密度大，占夜间液流的 65%；T2 时段液流密度小，占夜间液流的 35%。T1 时段主要进行补水，T2 时段存在明显的蒸腾现象，但补水大于蒸腾。

2) 臭椿 T2 时段夜间液流与气象因子的相关性高于 T1 时段，主要与 *VPD* 和 *WS* 显著相关。晴天夜间液流密度高于雨天，雨天过后的晴天夜间液流密度明显增强。

3) 冠幅和胸径可以解释臭椿夜间液流的大小，且日尺度下树干的径向变化对夜间液流的变化也有一定的响应，二者可共同反映臭椿树体的水分状况。

参考文献:

- [1] WILSON K B, HANSON P J, MULHOLLAND P J, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(2): 153-168.
- [2] PETERS R L, FONTI P, FRANK D C, et al. Quantification of uncertainties in conifer sap flow measured with the thermal dissipation method[J]. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1 283-1 299.
- [3] FORSTER M A. How significant is nocturnal sap flow?[J]. *Tree Physiology*, 2014, 34(7): 757-765.

- [4] DALEY M J, PHILLIPS N G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest[J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(4): 411-419.
- [5] 方伟伟, 吕楠, 傅伯杰. 植物夜间液流的发生、生理意义及影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7 521-7 529.
FANG Weiwei, LYU Nan, FU Bojie. Research advances in nighttime sap flow density, its physiological implications, and influencing factors in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7 521-7 529.
- [6] DAWSON T E, BURGESS S S O, TU K P, et al. Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(4): 561-575.
- [7] WANG H, ZHAO P, HÖLSCHER D, et al. Nighttime sap flow of *Acacia mangium* and its implications for nighttime transpiration and stem water storage[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 5(3): 294-304.
- [8] 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.
- [9] PASQUALOTTO G, CARRARO V, MENARDI R, et al. Calibration of granier-type (TDP) sap flow probes by a high precision electronic potometer[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(10): 2 419.
- [10] CHEN S P, LIN G H, HUANG J H, et al. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2 450-2 461.
- [11] 司建华, 冯起, 鱼腾飞, 等. 植物夜间蒸腾及其生态水文效应研究进展[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 907-914.
SI Jianhua, FENG Qi, YU Tengfei, et al. Research advances in nighttime transpiration and its eco-hydrological implications[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 907-914.
- [12] 刘崴, 魏天兴, 朱清科. 水蚀风蚀交错区河北杨树干液流密度特征及其对环境因子的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(5): 73-81.
LIU Wei, WEI Tianxing, ZHU Qingke. Dynamics of sap flow density of *Populus hopeiensis* and its responses to environmental variables in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(5): 73-81.
- [13] 赵飞飞, 马煦, 邸楠, 等. 毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 864-874.
ZHAO Feifei, MA Xu, DI Nan, et al. Azimuthal variation in nighttime sap flow and its mainly influence factors of *Populus tomentosa*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(8): 864-874.
- [14] 王艳兵, 德永军, 熊伟, 等. 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1 375-1 385.
WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al. The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1 375-1 385.
- [15] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 典型荒漠植物沙拐枣茎干液流密度动态及其对环境因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 345-353.
XU Shiqin, JI Xibin, JIN Bowen. Dynamics of sap flow density in stems of typical desert shrub *Calligonum mongolicum* and its responses to environmental variables[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 345-353.
- [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, 23(12): 148-153.
SONG Qingan, TONG Fangping, YI Aiqin, et al. Studies on eco-physiological characteristics of photosynthetic of diurnal variation of *Ailanthus altissima* swingle[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(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.
ZHANG Manman, ZHENG Conghui, LIU Chunpeng, et al. Progress and prospect of the research on *Ailanthus altissima*[J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2021(2): 49-53.
- [18] 周平, 李吉跃, 招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(Z1): 50-55.
ZHOU Ping, LI Jiyue, ZHAO Lijun. Characteristics of seedlings water consumption by transpiration of main afforestation tree species in North China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(Z1): 50-55.
- [19] 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.
MA Luyi, WANG Huatian, LIN Ping. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(2): 1-7.
- [20] GRANIER A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres[J]. *Annales Des Sciences Forestières*, 1985, 42(2): 193-200.
- [21] 胡兴波, 韩磊, 张东, 等. 黄土半干旱区白榆和侧柏夜间液流动态分析[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(4): 51-56.
HU Xingbo, HAN Lei, ZHANG Dong, et al. Analysis on the dynamics of nighttime sap flow of *Ulmus pumila* and *Platycladus orientalis* in semi-arid area of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(4): 51-56.
- [22] 黄雅茹, 辛智鸣, 李永华, 等. 乌兰布和沙漠人工梭梭茎干液流季节变化及其与气象因子的关系[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6): 131-139.
HUANG Yaru, XIN Zhiming, LI Yonghua, et al. Seasonal variation of the stem sap flow of artificial *Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey.) Bunge and its relationship with meteorological factors in Ulan Buh Desert[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(6): 131-139.
- [23] 崔鸿侠, 唐万鹏, 潘磊, 等. 神农架华山松树干液流特征及其影响因素[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(9): 89-93, 130.
CUI Hongxia, TANG Wanpeng, PAN Lei, et al. Characteristics of sap flow and its influencing factors of *Pinus amandii* in Shennongjia[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(9): 89-93, 130.
- [24] THOMSEN S, REISDORFF C, GRÖNGRÖFT A, et al. "Responsiveness of mature oak trees (*Quercus robur* L.) to soil water dynamics and meteorological constraints in urban environments"[J]. *Urban Ecosystems*, 2020, 23(1): 173-186.
- [25] HAYAT M, IQBAL S, ZHA T S, et al. Biophysical control on nighttime sap flow in *Salix psammophila* in a semiarid shrubland ecosystem[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 300: 108 329.
- [26] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 胡杨的夜间蒸腾——来自树干液流、叶片气体交换及显微结构的证据[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(9): 8-16.
YU Tengfei, FENG Qi, SI Jianhua, et al. Nocturnal transpiration of *Populus euphratica* authenticated by measurements of stem sap flux, leaf gas exchange and stomatal microstructure[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(9): 8-16.
- [27] 王城城, 陈丽艳, 赵从举. 热带桉树人工林液流特征及其对环境因子的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(7): 69-75.
WANG Chengcheng, CHEN Liyan, ZHAO Congju. Sap flow in tropical eucalyptus plantation and its response to environmental changes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 69-75.
- [28] MA F S, KANG S Z, LI F S, et al. Effect of water deficit in different growth stages on stem sap flux of greenhouse grown pear-jujube tree[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(3): 190-196.
- [29] IRITZ Z, LINDROTH A. Night-time evaporation from a short-rotation willow stand[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/2/3/4): 235-245.
- [30] BENYON R G. Nighttime water use in an irrigated *Eucalyptus grandis* plantation[J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(13): 853-859.
- [31] 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(Suppl): 95-108.
- [32] 王城城, 叶文伟, 赵从举, 等. 热带桉树树干液流的时滞效应分析[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 25-32.
WANG Chengcheng, YE Wenwei, ZHAO Congju, et al. Sap flow in the

- stem of eucalyptus and changes in meteorological factors are not consistent[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 25-32.
- [33] KÖHLER M, SCHWENDENMANN L, HÖLSCHER D. Throughfall reduction in a cacao agroforest: Tree water use and soil water budgeting[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7/8): 1 079-1 089.
- [34] CAVENDER-BARES J, SACK L, SAVAGE J. Atmospheric and soil drought reduce nocturnal conductance in live oaks[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(4): 611-620.
- [35] 赵磊, 曹文华, 李鑫浩, 等. 黄泛平原风沙区不同土地利用方式土壤水分对降水的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(S1): 94-101.
ZHAO Lei, CAO Wenhua, LI Xinhao, et al. The response of soil moisture to precipitation of different land use types in the sandy area of the Yellow River flood plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(S1): 94-101.
- [36] 尹立河, 黄金廷, 王晓勇, 等. 陕西榆林地区旱柳和小叶杨夜间树干液流变化特征分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(8): 85-90.
YIN Lihe, HUANG Jinting, WANG Xiaoyong, et al. Characteristics of night time sap flow of *Salix matsudana* and *Populus simonii* in Yulin, Shaanxi[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(8): 85-90.
- [37] 魏潇, 常学向, 杨淇越, 等. 祁连山青海云杉(*Picea crassifolia*)夜间树干液流特征及影响因素[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 87-94.
WEI Xiao, CHANG Xuexiang, YANG Qiyue, et al. Characteristics of nocturnal sap flow of *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains and its influence factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 87-94.
- [38] 王华, 赵平, 蔡锡安, 等. 马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 777-786.
WANG Hua, ZHAO Ping, CAI Xian, et al. Partitioning of night sap flow of *Acacia mangium* and its implication for estimating whole-tree transpiration[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(5): 777-786.
- [39] 赵晓伟, 赵平, 朱丽薇, 等. 木荷树干夜间水分补充的季节动态及其与树形特征和叶片生物量的关系[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 239-247.
ZHAO Xiaowei, ZHAO Ping, ZHU Liwei, et al. Seasonal dynamics of night-time stem water recharge of *Schima superba* and its relation to tree architecture and leaf biomass[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(3): 239-247.
- [40] 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): 1 045-1 053.
LIU Wei, WEI Tianxing, ZHU Qingke. Growing season sap flow of *populus hopeiensis* and *pinus tabulaeformis* in the semi-arid loess plateau, China[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2018, 35(6): 1 045-1 053.
- [41] 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): 1 673-1 680.
LIU Meijun, LYU Jinlin, CHEN Qiuwen, et al. Dynamics and influencing factors of stem diameter micro-variations during the growing season in two typical forestation species in the loess hilly region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1 673-1 680.
- [42] WHITEHEAD D, JARVIS P G. Coniferous forests and plantations[M]. *Water Deficits and Plant Growth*, 1981, 12: 49-152.
- [43] 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.
- [44] SEVANTO S, NIKINMAA E, RIIKONEN A, et al. Linking xylem diameter variations with sap flow measurements[J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1/2): 77-90.
- [45] 湛景武, 汪有科, 张陆军, 等. 桃树茎直径微变化与土壤水势及气象因子的关系[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 489-494.
ZHAN Jingwu, WANG Youke, ZHANG Lujun, et al. Micro-variation in peach stem diameter and its relationship with soil water potential and meteorological factors[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 489-494.

Sap Flow at Night in the Stems of *Ailanthus Altissima* and Its Determinants

LIU Yunjie¹, ZHANG Hanhan², CHANG Shengzhao³, ZHOU Xinqi³, MA Changming^{1*}

(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. She County Forestry Development Service Center, Handan 056000, China; 3. Hejian City Natural Resources and Planning Department, Cangzhou 061000, China)

Abstract: 【Background and objective】 Water ascent in plants is driven by hydraulic gradient regulated by stomatal opening and closure as well as soil water content; it is generally assumed to be approximately zero at night. However, recent findings reveal that stomata could partly open and sap continues to flow at night, making stems function as capacitors regulating transpiration in daytime. The purpose of this paper is to investigate the diurnal change in sap flow and its determinants. 【Method】 We take *Ailanthus altissima* as the model plant and measure sap flow through its stems, as well as variation in stem diameter, using a diffusion probe (TDP) from June to August in an urban area. We also measure environmental factors which we anticipate to affect root water uptake by the tree. 【Result】 Sap flow does occur at night; it contributes 12.1% to the total daily sap flow, of which 65% is from 20:00 to 00:00 (T1) and 35% from 00:00 to 05:00 (T2). The night sap flow rate is positively correlated to the vapor pressure deficit and wind speed, but the correlation is more significant in T2 ($P<0.01$) than in T1, and greater in sunny days than in rainy days. It is also found that sap flow at night is positively correlated with canopy width ($P<0.01$) and stem diameter at the breast height ($P<0.05$), and that it increases linearly with daily variation in stem diameter ($R^2=0.672$). Stems expand more radially in T1 than in T2. 【Conclusion】 Night sap flow results in radial expansion of the stem of *A. altissima*, which is impacted jointly by environmental factors and plant traits.

Key words: *Ailanthus altissima*; night sap flow; night transpiration; night rehydration; radial micro-variation in the stem

责任编辑：赵宇龙