

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.05.005

武鹏飞,刘云强,李冬梅,等. 环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响[J].中国农业气象,2021,42(5):402-411

环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响*

武鹏飞¹, 刘云强², 李冬梅³, 陈志军³, 马长明^{1**}

(1.河北农业大学林学院,保定 071000; 2.辽宁农业职业技术学院,营口 115009; 3.河北省唐山市滦南县国营林场,唐山 063502)

摘要: 以唐山市滦南县林场 107 速生杨 (*Populus×euramericana* cv.‘74/76’) 为研究对象,使用滴灌法将土壤体积含水量分别设置为 15%~20%、10%~15%和 5%~10%,利用热扩散式探针法(TDP)测定杨树边材液流速率,同时监测太阳辐射、气温、大气湿度、大气压、风速等气象因子,探寻不同环境条件下 107 杨树树干日间和夜间的液流变化规律,分析不同环境下林木对水分的利用,为速生丰产林合理的水分灌溉策略提供指导。结果表明,晴天树干液流较阴雨天启动时间早、峰值高、持续时间长、夜间波动大;土壤缺水条件下,树干液流启动时间晚、峰值低、持续时间短,夜间液流变化平缓且增高;树干液流与气象因子存在“时滞效应”,树干液流滞后于太阳辐射 40min,而提前于气温、相对湿度、VPD(水汽压亏缺)60min;树干液流与 VPD 呈现“迟滞回环”关系,时滞错位后气象因子对树干液流均具有显著驱动作用,日间树干液流与气温相关性最大,驱动力较强,而夜间与 VPD 相关性最大,驱动力较强;经过时滞错位后树干液流与气象因子拟合效果优于时滞错位前。可见,环境因子对树干液流具有明显的驱动作用,树干液流可以较好地反映沙地土壤的水分情况和林木的水分消耗特征。

关键词: 树干液流; 热扩散探针; 冀东沙地; 107 速生杨; 环境因子

Driving Influence of Environmental Factors on the Sap Flow of the Artificial Poplar Forest on Sandy Land

WU Peng-fei¹, LIU Yun-qiang², LI Dong-mei³, CHEN Zhi-jun³, MA Chang-ming¹

(1.College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;2.Liaoning Agricultural Technical College, Yingkou 115009; 3.State-owned Forest Farm of Luannan County, Tangshan City, Hebei Province,Tangshan 063502)

Abstract: Stem sap flow is an important basis to characterize the transpiration of trees. Studying the dynamic characteristics of sap flow and the driving effects of environmental factors on it is of great significance to explore the physiological characteristics and water dynamic changes of trees. *Populus×euramericana* cv.‘74/76’ is one of the main fast-growing tree species widely cultivated and also a water-fertilizer-sensitive tree species. The amount of water directly affects its growth. *Populus×euramericana* cv.‘74/76’ in Luannan county forest farm in Tangshan city was taken as research object, the drip irrigation method was used to set the soil volumetric water content at 15%–20%, 10%–15% and 5%–10% respectively by controlling the irrigation time, the soil volumetric water content was respectively set as 15%–20%, 10%–15% and 5%–10% by drip irrigation, the sapwood flow rate of *Populus×euramericana* cv.‘74/76’ was measured by the thermal dissipation probe(TDP), and the solar radiation, air temperature, atmospheric humidity, atmospheric pressure, wind speed and other meteorological factors were simultaneously monitored by using the HOBO automatic weather monitoring station to explore the change rules of

* 收稿日期: 2020-10-19

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0600401)

** 通讯作者: 马长明, 副教授, 从事森林培育研究, E-mail: machangming@126.com

第一作者联系方式: 武鹏飞, E-mail: 2542790171@qq.com

sap flow during day and night under different environmental conditions, establish a regression model between meteorological factors and the sap flow, analyze the water utilization of trees in different environments in order to provide guidance for the formulation of reasonable water irrigation strategies for fast-growing and high-yield plantation. Tharted earlier, peaked higher, lasted longer, and fluctuated more at night than cloudy and rainy de results showed that the sap flow was driven by different weather conditions, it on sunny days stays; The sap flow was also driven by soil moisture, under the condition of soil water shortage, the start time was late, the peak was low, the duration was short, and it changed steadily and increasingly at night. After time lag analysis, it is found that there is a "time lag effect" between the sap flow and meteorological factors, the sap flow lagged behind the solar radiation for 40 min, and was ahead of temperature, relative humidity and VPD (vapor pressure deficit) for 60min. There was a "hysteresis loop" relationship between sap flow and VPD, meteorological factors all had a significantly driving effect on the sap flow after the time lag dislocation, it had the greatest correlation with air temperature and stronger driving force during the day, while had the greatest correlation with VPD and stronger driving force at night. After time lag dislocation, the imitative effect of sap flow and meteorological factors was better than before. It can be seen that the environmental factors had an obvious driving effect on the sap flow, especially weather types, meteorological factors, and soil moisture, the regression model established between the weather factors and the sap flow after the time lag can better explain the relationship between the two mathematical relationship, meanwhile, sap flow can better reflect the water condition of sandy soil and the water consumption characteristics of trees, which provided a strong basis for the precise irrigation strategy of poplar fast-growing and high-yielding forests.

Key words: Sap flow; Thermal dissipation probe; Sandy land in eastern Hebei; *Populus×euramericana* cv. '74/76'; Environmental factors

树干液流是土壤液态水进入根系, 由茎输导组织运送至冠层的过程中在树体内部产生的液体流动。研究表明, 树干液流中蒸腾作用占到了 90% 以上, 因此, 研究树干液流的动态特征以及环境因子对其的驱动作用, 对探究植物自身体内生理特性和水分动态变化具有重要意义^[1]。目前热扩散探针法 (TDP) 因操作简单、结果精准等因素被广泛应用于林木耗水研究中^[2], 国内外学者利用该方法针对不同树种树干液流进行了研究, 研究焦点主要集中于树干液流的时间变化规律、空间变化规律以及影响因素等, 如韩永贵等^[3]指出树干液流呈明显季节性变化规律, 党宏忠等^[4]研究指出沙地樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongholica*) 树干液流具有显著的方位差异, Bhusal 等^[5]研究指出土壤水分条件对植物树干液流起到一定限制作用。环境因子以及土壤条件是影响树干液流的主要因素, 然而, 目前针对沙地土壤条件下环境因子以及土壤水分对树干液流的驱动影响等研究相对薄弱。

107 杨 (*Populus×euramericana* cv. '74/76') 具有生长快、干形好、用途广泛等特点, 是栽培广泛的主要速生树种之一, 对改善生态环境、促进经济建

设、防风固沙具有重要作用^[6], 同时, 107 杨是水肥敏感型树种, 水分的多寡直接影响其生长^[7]。冀东沙地是辽河黄泛平原立地亚区的主要立地类型之一, 土壤土具有通透性好但保水能力差的特点, 更加凸显了土壤水分的重要性。因此, 本研究选择冀东沙壤土立地类型, 以 107 杨为研究对象, 采用热扩散探针法, 研究环境因子对树干液流的驱动影响, 以及 107 杨潜在耗水规律, 为沙地人工速生丰产林制定合理的水分灌溉策略提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在河北省唐山市滦南县 (N38° 48' 23", E115° 24' 58", 海拔 20m) 进行, 位于河北省东北部, 地处燕山南麓滦河西岸, 属于冀东沙地地区, 滦南县位于东部季风区, 属于暖温带半湿润季风气候。冬季受西伯利亚和蒙古冷空气的影响, 盛行偏北风; 夏季受海洋气团和太平洋高压的影响, 盛行偏南风。具有春季干燥多风、夏季闷热多雨、秋季昼暖夜寒、冬季寒冷少雪的特点。全年平均气温 10.60℃, 年平均日照 2853h, 年平均降水量 658mm, 无霜期 186d。

1.2 土壤情况

利用 Berrersize2000 激光粒度分析仪对研究区土壤进行分析, 结果见表 1, 根据国际制土壤分级标准, 确定土壤类型为壤质砂土, 土壤基本特征见表 2, 该类型土壤基本呈无结构状态, 土壤大孔隙较多, 透气性和下渗性较好, 但吸附作用较弱, 保水与保肥能力较差。

表 1 研究区土壤粒径分布

Table 1 Soil particle size distribution in the study area		
粒径 Particle size(μm)	占比 Percentage(%)	累积 Accumulation(%)
0.02–2.00	1.79	1.79
2.00–20.00	7.59	9.39
20.00–1000.00	90.61	100.00

表 2 研究区土壤基本特性

Table 2 Basic soil properties in the study area				
体积平均径 Volume average diameter (μm)	面积平均径 Area average diameter (μm)	长度平均径 Length average diameter (μm)	比表面积 Specific surface area ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	峰值粒径 Peak particle size (μm)
134.267	25.061	1.558	88.670	174.138

1.3 样树情况

在唐山市滦南县国有林场所辖的“107 速生杨”人工林中, 选取生长状况良好、林龄为 4a 的试验树 9 棵, 分别编号, 测量其胸径、树高、冠幅, 结果见表 3。

表 3 试验树的胸径、树高和冠幅

Table 3 Diameter at breast height, height and crown width of test trees			
编号 Number	胸径 Diameter at breast height(cm)	树高 Height(m)	冠幅 Crown width(m^2)
1	14.3	9.3	17.12
2	12.9	8.7	12.35
3	12.0	8.3	8.54
4	11.7	7.5	11.20
5	11.9	7.7	10.80
6	12.2	8.2	12.95
7	10.9	7.5	7.54
8	11.2	7.9	10.15
9	12.5	8.3	8.92

1.4 树干液流测定

采用热扩散原理测算树干液流速率, 利用热扩散式茎流计进行测定, 传感器采用 AV-3665R (北京产)。探针规格为 20mm, 数据采集器型号为 RR-1016。通过上下两根探针的温度差来计算液流速率, 温差越大, 液流速率越小, 反之温差越小, 液流速率越大。

树干液流测定时间为 2020 年 4 月初–10 月底。在林木的南方向, 距树基部 1.3m 处安装探针, 在探针安装处刮去粗糙的树皮, 然后采用特定规格的钻头, 依据仪器自带钻模沿树干纵向垂直钻取直径为 2mm 的孔洞。将探针插入树木边材, 探针插好后, 用 1/4 泡沫球将探针固定, 外面包裹绝缘、防辐射材料, 最后用胶带密封, 防止雨水进入。将探针反馈线与数据采集器连接, 用以自动采集和记录液流数据, 采样频率设定为 60s, 数据记录间隔期为 600s。基于 Granier 原理计算液流速率的原始公式 (Granier, 1985) 为

$$V=0.0119 \cdot K^{1.231} \quad (1)$$

$$K=(\Delta T_{\max}-\Delta T) \cdot \Delta T^{-1} \quad (2)$$

式中, V 为树干液流速率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); ΔT_{\max} 为无液流时上下两根探针间的最大温差 ($^{\circ}\text{C}$); ΔT 为某一时刻两根探针间的温差 ($^{\circ}\text{C}$)。

将液流速率转化成茎流量, 即

$$F_s=A_s \cdot V \quad (3)$$

式中, F_s 为液流通量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); A_s 为边材面积 (cm^2)。

1.5 边材面积测定

采用生长锥法进行测定。为避免对样树造成伤害从而影响到树干液流, 在样木附近选择不同胸径的 107 速生杨 15 棵, 测量胸径和树皮厚度, 利用生长锥在测定样木相同高度区域钻取树干木芯, 将钻得的木芯组织进行染色处理, 观察其边材和心材分布, 测量并记录统计边材厚度, 以此确定边材面积。利用树木胸径与边材面积的显著相关性建立方程, 计算得出每棵样树的边材面积, 即

$$A_s=14.523D-65.857 \quad (R^2=0.9919, P<0.01) \quad (4)$$

式中, D 为胸径 (cm); A_s 为边材面积 (cm^2); R^2 为方程的决定系数。

1.6 土壤水分控制

利用 Spectrum TDR300 土壤水分分析仪 (北京

产), 测得土壤最大体积含水量即土壤中水分占有的体积与土壤总体积的比值为 20.8%。

采用滴灌方式灌水, 即在树干根部按照树行方向铺设滴灌管, 每棵树根部两侧设有 2 个滴头。灌水期间 (8 月 11–24 日) 每日进行土壤含水量监测, 通过控制灌水时间, 将试验分为 3 个水分梯度, 分别为 15%~20% (用 H 表示)、10%~15% (用 M 表示) 和 5%~10% 土壤体积含水量 (用 L 表示)。

1.7 气象因子测定

在林场内安装 HOBO 自动气象监测站, 自动监测并记录气温 (T_a , $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度 (RH, %)、太阳辐射强度 (R_s , %)、大气压 (kPa) 以及风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 等数据。数据采样间隔为 10min。空气水汽压亏缺 (VPD) 计算式为

$$\text{VPD}=0.611\text{e}^{\left[\frac{17.502T_a}{T_a+240.97}\right]}(1-\text{RH}) \quad (5)$$

式中, VPD 为空气水汽压亏缺 (kPa); T_a 为气温 ($^{\circ}\text{C}$); RH 为空气相对湿度 (%)。

1.8 数据处理与统计

选择树干液流主要驱动因素 VPD (空气水汽压亏缺) 较高的 8 月^[8], 以全月 1–31 日数据进行分析。采用 Microsoft Excel 对试验数据进行整理与计算, 运用 SPSS 21.0 对液流速率和气象因子进行相关分析, Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 天气类型对树干液流的驱动影响

选取 3 个典型天气, 分别为晴天、阴天和雨天, 分析不同天气条件下 107 杨树干液流的日变化差异, 结果见图 1。由图 1a 可以看出, 在 3 种典型天气条

件下, 日间 (6:00–19:00) 107 杨树干液流速率变化趋势一致, 均为先上升后下降的“几”字型变化曲线, 但不同天气也存在一定的差异。晴天, 树干液流在 6:00 左右启动, 然后迅速上升, 10:00–16:30 液流速率一直保持在较高水平 (峰值为 $17.99\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), 随后开始迅速下降, 持续时间约为 6.5h; 阴天, 树干液流启动时间在 7:00 左右, 较晴天晚约 1h, 11:00–16:00 树干液流速率一直保持在较高水平 (峰值为 $9.85\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), 持续约 5h, 随后开始迅速下降, 液流速率峰值较晴天时降低; 雨天, 树干液流启动时间在 7:00 左右, 随后液流速率上升, 但是维持在较低水平 (峰值为 $5.76\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), 持续时间约为 5h。可见, 天气类型对 107 杨日间树干液流启动时间和液流速率峰值均有明显影响, 晴天液流启动时间比阴天和雨天早约 1h, 液流峰值和持续时间也大于阴天和雨天。由图 1b 可见, 3 种典型天气条件下, 夜间 (19:00–次日 6:00) 树干液流速率均较低, 夜间液流占全天液流比例多为 5%~20%。夜间液流速率整体变化趋势基本一致, 呈现先下降后上升的“U”字型变化曲线, 但从数值上看也存在一定的差异。晴天夜间树干液流速率下降幅度大于阴天和雨天, 雨天夜间液流速率变化幅度较为平缓; 晴天夜间树干液流速率的谷值 ($1.94\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$) 小于阴天 ($2.23\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$) 和雨天 ($2.24\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)。

可见, 天气类型对树干液流具有明显的驱动作用, 晴天启动早、峰值高、持续时间长, 夜间波动大, 驱动力较强, 而阴天和雨天启动稍晚、峰值低、持续时间短, 夜间波动平缓, 驱动力较弱。

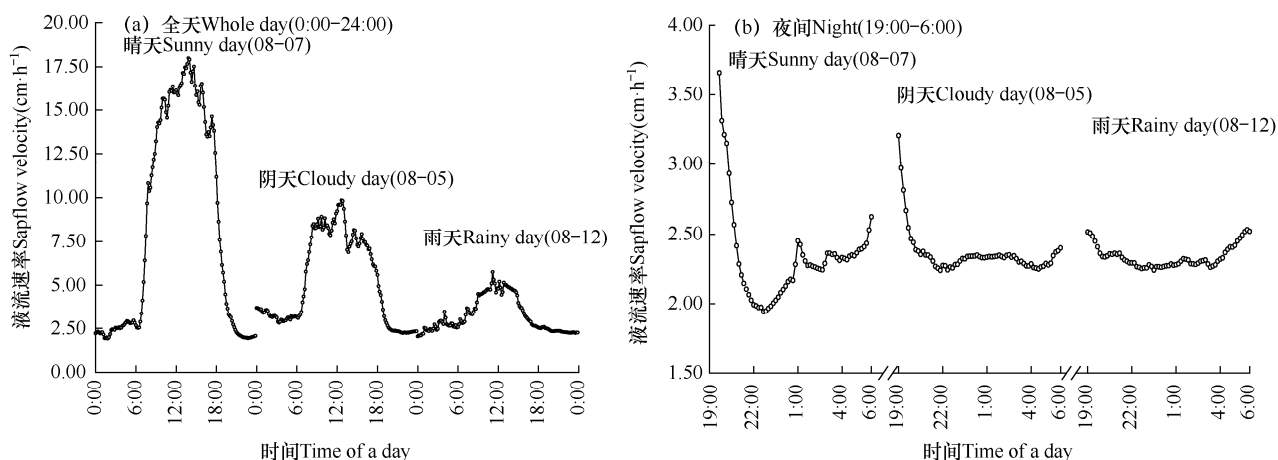


图1 典型天气类型树干液流日变化过程

Fig. 1 Diurnal variation of trunk sap flow on the typical weather days

2.2 土壤水分对树干液流的驱动影响

土壤水分对树干液流的影响较大,林木的液流启动时间、液流量以及峰值等时刻都受土壤水分的影响。为规避天气类型的影响,选择3d晴天且不同灌水处理下的液流数据进行分析,结果见图2。由图2a可以看出,不同土壤水分条件下,日间(6:00–19:00)树干液流速率存在一定差异。H(15%~20%土壤体积含水量)条件下,树干液流启动时间在6:30左右,M(10%~15%土壤体积含水量)条件下,树干液流启动时间在6:40左右,较H延迟10min启动,而L(5%~10%土壤体积含水量)条件下,树干液流启动最晚,在近7:00时。从树干液流峰值来看,L条件下树干液流速率峰值($8.00\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)低于H($15.49\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)和M($11.84\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$),但其到达峰值的时间较前两者要提前,呈现出树干液流启动晚,到达峰值时间早,且峰值偏低特征。可见,土壤

水分对日间树干液流启动时间、液流量和液流速率峰值均有影响,15%~20%土壤体积含水量条件下树干液流启动时间比10%~15%土壤体积含水量和5%~10%土壤体积含水量条件下均有所提前,树干液流速率峰值也均比后两者大。由图2b可见,夜间(19:00–6:00)液流速率在不同土壤水分条件下也存在一定差异。H和M条件下夜间液流速率变化起伏程度要大于L条件;L条件下夜间液流速率的谷值($0.63\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)大于M($0.33\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)和H($0.12\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)条件,与日间液流速率峰值变化相反。

由此可见,土壤水分对树干液流具有明显的驱动作用,低水分条件下,树干液流启动时间晚(7:00左右)、峰值低($8.00\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)、夜间波动小,驱动力较弱,而土壤水分充足时,树干液流启动早(6:30左右)、峰值高($15.49\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$),夜间波动大,驱动力较强。

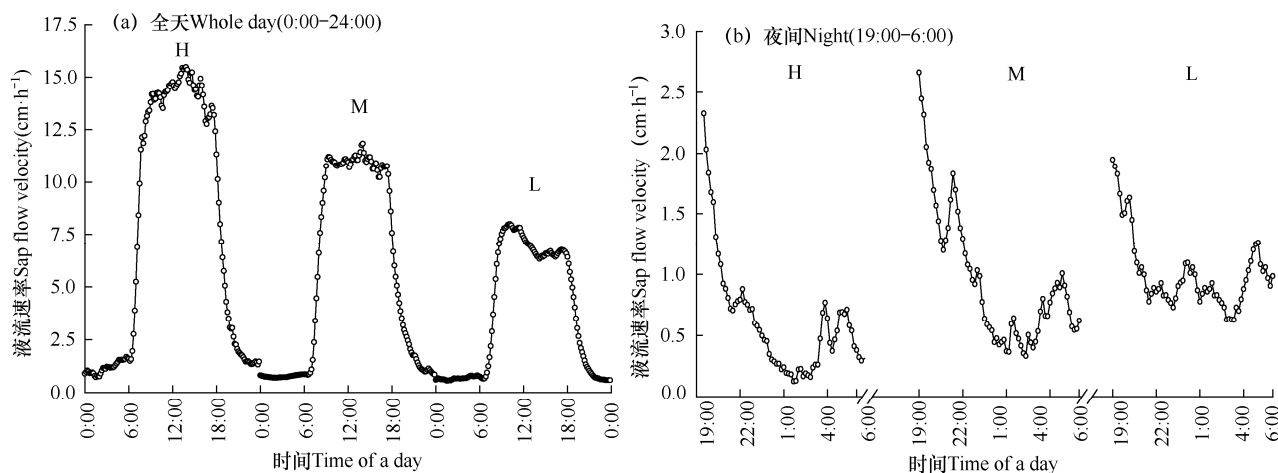


图2 不同土壤水分树干液流日变化过程

Fig. 2 Diurnal changes of trunk sap flow with different soil moisture

注: H、M和L分别为15%~20%、10%~15%和5%~10%土壤体积含水量处理。

Note: H, M and L were 15%–20%, 10%–15%, 5%–10% soil volume water content, respectively.

2.3 气象因子对树干液流的驱动影响

2.3.1 时滞分析

研究表明,树干液流随着气象因子的变化而变化,但是两者存在一个时间差,这种现象就是时滞效应。为规避天气类型和土壤水分的影响,选择晴天且供水充足条件下4d(8月7、14、21和22日)的107杨树树干液流数据,按照观测时间顺序,将107杨树树干液流速率与气温、相对湿度、VPD和太阳辐射4项气象因子数据对应排列,按照10min的步长开始错位移,进行相关性分析,直到相关系数的

绝对值达到最大值并出现拐点,结果见图3。

相关系数绝对值达到最大的时间,即树干液流与气象因子之间的实际时滞时间。从图3可以看出,树干液流速率与40min前太阳辐射的相关性最高,而与60min后气温、相对湿度、VPD的相关性最高。

2.3.2 气象因子驱动

选取气象因子中主要的驱动因子,即太阳辐射和水汽压亏缺(VPD),经时滞位移后与树干液流进行对应分析,结果见图4。由图4a树干液流速率与VPD响应曲线中可以看出,一旦液流速率达到最大

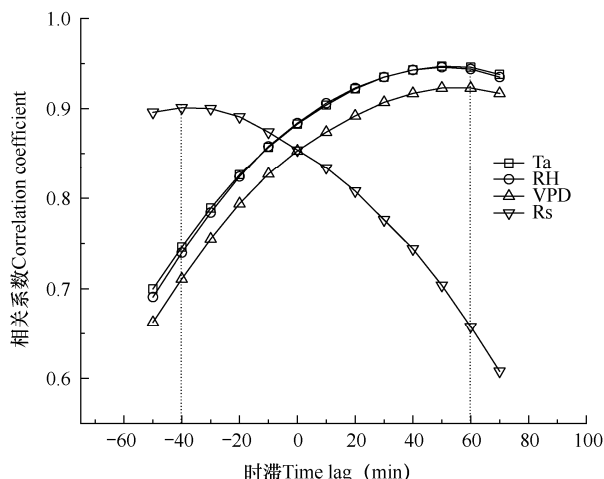


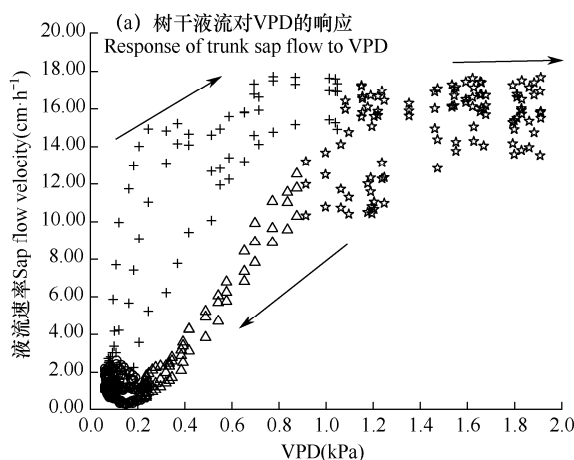
图3 107 杨树干液流与气象因子的时滞相关系数

Fig. 3 Time lag correlation coefficient of 107 poplar trunk sap flow and meteorological factors

注：气温(Ta)、空气相对湿度(RH)、水汽压亏缺(VPD)、太阳辐射强度(Rs)，虚线表示相关系数达到最大值时所对应的时滞时间。下同。

Note: Ta is the air temperature, RH is the air relative humidity, Rs is the solar radiation intensity, VPD is the saturated vapor pressure difference. The dashed line indicate the time when correlation coefficient reached the maximum value. The same as below.

值，其变化趋势将趋于稳定，随着驱动因子进一步增强，树干液流也不会再增加；而随着驱动因子的强度逐步减弱，树干液流并非按比例立即减小而是逐渐衰减，并沿着不同的路径后退，这种关系即为“迟滞回环”(hysteresis loops)关系，即上升曲线和下降曲线不重合。图4b显示，树干液流对VPD的响应回环过程呈顺时针方向，而与太阳辐射的响应过程并没有表现出这种关系。



将树干液流速率与气象因子进行时滞错位，日间(6:00-19:00)和夜间(19:00-6:00)分别进行相关性分析，结果如表4。由表可以看出，在日间，树干液流与各个气象因子之间均表现为极显著相关性，尤其与空气温度和相对湿度相关性较高，相关系数绝对值达到0.940以上，其中与相对湿度呈负相关关系，而与太阳辐射和VPD之间的相关系数分别为0.901和0.923。在夜间，树干液流与气温、相对湿度、太阳辐射以及VPD均表现为极显著相关性，其中与相对湿度呈负相关关系，但是与气温、相对湿度、太阳辐射之间的相关系数绝对值均比日间减小，而与VPD的相关系数比日间增大。可见，气象因子对树干液流具有明显的驱动作用，日间气温、相对湿度和太阳辐射对树干液流的影响比夜间大，而夜间VPD对树干液流的影响比日间大；相对湿度与树干液流之间呈负相关关系。

采用逐步回归法建立树干液流速率与上述环境因子的多元线性模型，以5%和10%的可靠性作为因变量入选和剔除临界值，最终的回归模型参数见表5。由表可以看出，时滞错位前和时滞错位后的回归方程有一定的差异，拟合效果也不一样，经过时滞错位后的拟合方程相关系数大，拟合效果好。因此，在分析气象因子对树干液流的驱动影响时，应将各驱动因子进行时滞错位后再进行树干液流回归模型的构建，可以有效减小误差。

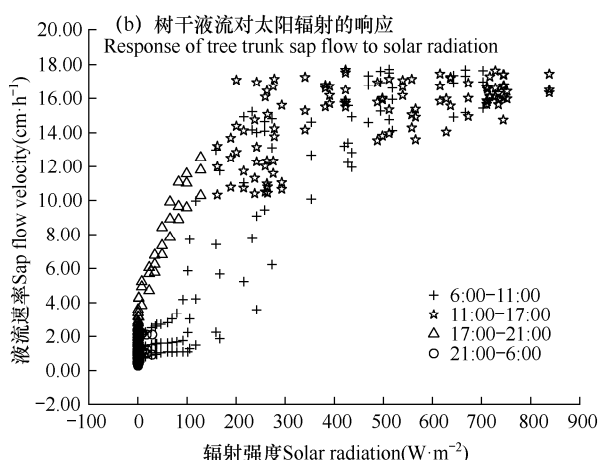


图4 水汽压亏缺(VPD)和太阳辐射对树干液流的驱动日变化

Fig. 4 The driving diurnal variation of the saturated water vapor pressure difference (VPD) and solar radiation on the trunk sap flow

表 4 时滞错位后树干液流与气象因子的相关性

Table 4 Correlation between trunk sap flow and meteorological factors after time lag

	Ta	RH	Rs	VPD
6:00–19:00	0.946**	−0.944**	0.901**	0.923**
19:00–6:00	0.891**	−0.921**	0.870**	0.949**

注: **表示 $P < 0.01$ 。

Note: ** is $P < 0.01$.

表 5 树干液流与气象因子的多元回归模型估计

Table 5 Multivariate regression model estimation of trunk sap flow and meteorological factors

	回归方程 Regression equation	R^2	P
时滞错位前 Before time lag	$SF = 18.911 + 0.862Ta - 0.5RH + 0.012Rs - 0.237VPD$	0.955	< 0.01
时滞错位后 After time lag	$SF = 85.942 + 0.473Ta - 0.876RH + 0.001Rs - 12.218VPD$	0.961	< 0.01

注: SF 为树干液流, R^2 为方程的决定系数, P 为显著性检验。

Note: SF is the tree trunk sap flow, R^2 is the coefficient, and P is the significance test level.

3 讨论与结论

3.1 讨论

大量研究表明, 环境因子对树木的生长发育存在重要的影响, 尤其对树干液流的驱动影响巨大^[9]。对冀东沙地不同天气类型条件下 107 杨人工林树干液流变化规律的研究表明, 晴天树干液流速率较阴雨天启动时间早、峰值高、持续时间长、夜间波动大, 这与贾天宇等^[10–11]研究指出在整个生长季内树干液流速率晴天明显大于阴雨天, 赵春彦等^[12]研究指出胡杨 (*Populus euphratica*) 阴雨天树干液流启动时间较晴天推迟, 树干液流停止时间提前, 液流历时缩短, 且峰值显著缩小等研究结果一致。出现这种结果的主要原因是晴天太阳辐射强, 温度高, 空气湿度低, 导致植物蒸腾量增大, 从而使树干液流增大, 而阴雨天太阳辐射弱, 温度低, 空气湿度高, 植物蒸腾减弱, 液流也随之减小。有学者指出, 树干液流在中午左右会出现“午休”现象, 即中午左右树体为了保存水分而降低蒸腾, 使树干液流减小^[13]。然而本研究并未发现此现象, 这可能与 107 杨为了适应沙地土壤环境做出的自我水分调控策略有关。

夜间液流对树木弥补水分亏缺和维持自身水分平衡有重要意义^[14]。从研究结果中可以看出, 树干夜间液流非常微弱, 但并不为 0, 这与刘潇潇等^[15]研究结果一致。对于夜间液流的存在, 有的学者认为是树木夜间补水所致, 也有学者认为是树木夜间蒸腾所致, 而鄢春华等^[16]研究认为夜间树木茎干补

水和夜间蒸腾同时发生。针对夜间液流的组成和精确测量等, 仍然有较大的研究意义。

土壤水分主要从潜在水平影响树干液流从而影响林木的生长。本研究通过设置不同水分梯度, 研究土壤水分对树干液流的驱动影响, 结果表明土壤在缺水条件下, 树干液流启动时间晚, 减弱时间早, 峰值降低, 而夜间树干液流速率谷值却增高, 并且变化幅度较为平缓, 这与王媛等^[17]研究表明不同土壤含水量下白桦气孔蒸腾作用对土壤含水量变化具有较高的敏感性, 吴鹏等^[18]研究表明土壤含水量的变化是导致雨天夜间液流大于晴天和阴天的主要因素等结果一致。然而刘春鹏等^[19]研究认为土壤含水量是影响雨天的主要环境因子, 对晴天和阴天的树干液流影响不大, 这与张晓艳等^[20]研究指出土壤含水量主要影响晴天树干液流, 而与阴雨天相关性不显著的结论相反。出现这种现象的原因可能是不同树种对不同土壤和水分条件产生了自我水分利用机制。

气象因子主要是瞬态特征影响树干液流。在拟合树干液流与气象因子模型中, 考虑两者之间的时滞效应对提高拟合精度至关重要。本研究指出树干与气象因子存在明显时滞效应, 即树干液流滞后于太阳辐射 40min, 而提前于气温、相对湿度、VPD60min, 这与李少宇等^[21]研究指出树干液流与太阳辐射、气温、相对湿度存在明显滞后效应结果一致。产生这一现象的原因是蒸腾散失水分主要从树冠开始, 树干基部水分需要等树冠存储的水分消耗

到一定程度产生梯度差才开始向上运输,两者之间产生的时间差导致了时滞效应。针对时滞效应不同学者在研究中存有不同观点,杨洁等^[22]研究指出树干液流与环境因子的时滞效应与树干大小有关,与树种无关,而姚增旺等^[23]研究指出树干液流与环境因子的时滞效应与树高及树冠的暴露程度无关。

时滞错位后,无论日间还是夜间,树干液流与气象因子之间均存在极显著相关性。日间树干液流与空气温度相关性最高,而夜间则与水汽压亏缺相关系数最高,这与张婕等^[14, 24-25]研究结果一致。气象因子对树干液流的驱动主要在于太阳辐射,太阳辐射增高,空气温度升高,大气湿度降低,饱和水汽压也随之降低,导致树木蒸腾增强,从而使树干液流增大。

树木的生长年限不同,树干液流的变化规律也有可能不同;树木不同径向上树干液流也存在一定的差异,这会导致对树木耗水以及与气象因子之间的关系研究上存在一定误差^[26],然而,近些年对这些方向的研究仍有欠缺。因此,对树木整个生长季进行研究,并分析不同生长年限、不同径向上的树干液流变化规律以及对环境因子的响应都具有重大的研究意义。

3.2 结论

环境因子对沙地土壤条件下树干液流存在重要的驱动影响。晴天天气下,树干液流速率较阴雨天启动早、峰值高、持续时间长、夜间波动大,驱动力较强;土壤低水分条件下,树干液流启动晚、峰值低、夜间波动小,驱动力较弱;树干液流与气象因子之间存在“时滞效应”,即树干液流速率与40min前太阳辐射的相关性最高,而与60min后气温、相对湿度、水汽压亏缺的相关性最高;将气象因子时滞错位后与树干液流进行回归模型拟合效果好,该模型更能说明气象因子与树干液流之间的数学关系,为杨树速生丰产林的精准灌溉策略提供有力依据。

参考文献 References

[1] 杨瑞,喻理飞,戴全厚.喀斯特区云南鼠刺树干液流及土壤水分动态[J].水土保持通报,2015,35(2):89-93.
Yang R, Yu L F, Dai Q H. Stem sap flow and soil moisture dynamics of *Sporophya chinensis* in Karst area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 89-93. (in

Chinese)

- [2] 任启文,毕君,李联地,等.冀北山地油松树干液流特征及其对环境因子的响应[J].水土保持学报,2017,31(5):183-188.
Ren Q W, Bi J, Li L D, et al. The characteristics of trunk sap flow of *Pinus tabulaeformis* in the mountainous area of northern Hebei and its response to environmental factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 183-188. (in Chinese)
- [3] 韩永贵,高阳,韩磊,等.基于模糊规则的人工神经网络模拟新疆杨蒸腾耗水[J].应用生态学报,2020,31(5):1525-1534.
Han Y G, Gao Y, Han L, et al. Artificial neural network based on fuzzy rules to simulate transpiration of Xinjiang poplar[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1525-1534. (in Chinese)
- [4] 党宏忠,冯金超,韩辉.沙地樟子松边材液流速率的方位差异特征[J].林业科学,2020,56(1):29-37.
Dang H Z, Feng J C, Han H. The azimuth difference characteristics of the sapwood sap flow rate of *Pinus sylvestris* on sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(1): 29-37. (in Chinese)
- [5] Bhusal N, Han S G, Yoon T M. Impact of drought stress on photosynthetic response, leaf water potential, and stem sap flow in two cultivars of bi-leader apple trees (*Malus × domestica* Borkh.) [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 535-543.
- [6] 秘洪雷,兰再平,孙尚伟,等.滴灌栽培杨树人工林细根空间分布特征[J].林业科学研究,2017,30(6):946-953.
Mi H L, Lan Z P, Sun S W, et al. Spatial distribution characteristics of fine roots in poplar plantations cultivated by drip irrigation[J]. Forest Research, 2017, 30(6): 946-953. (in Chinese)
- [7] Yong H, Zaiping L, Shangwei S, et al. Effects of drip irrigation on the growth and use efficiency of water and fertilizer of Young '107' poplar plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(11): 37-41.
- [8] 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.
- [9] 崔鸿侠,唐万鹏,胡文杰,等.神农架2树种树干液流特征及与环境因子关系[J].西北林学院学报,2020,35(1):37-44.

- Cui H X, Tang W P, Hu W J, et al. The characteristics of trunk sap flow of two tree species in Shennongjia and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 37-44. (in Chinese)
- [10] 贾天宇, 刘廷玺, 段利民, 等. 半干旱沙丘草甸过渡带人工杨树蒸腾耗水规律[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3255-3264.
- Jia T Y, Liu Y X, Duan L M, et al. Transpiration and water consumption of artificial poplars in the semi-arid dune-meadow transition zone[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3255-3264. (in Chinese)
- [11] 高峻, 孟平, 张劲松, 等. 华北石质山区杏树蒸腾规律和蒸降差分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 538-542.
- Gao J, Meng P, Zhang J S, et al. Analysis of transpiration law and evapotranspiration difference of apricot trees in rocky mountain area of North China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 538-542. (in Chinese)
- [12] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 718-724.
- Zhao C Y, Si J H, Feng Q, et al. *Populus euphratica* trunk sap flow characteristics and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 718-724. (in Chinese)
- [13] 凌锦霞, 史彦江, 罗达, 等. 平欧杂种榛树干茎流对环境因子的响应[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(5): 785-797.
- Ling J X, Shi Y J, Luo D, et al. Response of stem flow of Ping'ou hybrid hazel to environmental factors[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(5): 785-797. (in Chinese)
- [14] 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.
- Zhang J, Cai Y M, Chen L X, et al. Characteristics and influencing factors of night sap flow of *Acer truncatum* in Beijing mountainous area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3210-3223. (in Chinese)
- [15] 刘潇潇, 李国庆, 闫美杰, 等. 黄土高原主要树种树干液流研究进展[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 369-373.
- Liu X X, Li G Q, Yan M J, et al. Research progress on trunk sap flow of main tree species in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 369-373. (in Chinese)
- [16] 鄢春华, 王蓓, 邹振东, 等. 九寨沟针阔混交林的夜间液流及其分配特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(4): 732-738.
- Yan C H, Wang B, Zou Z D, et al. Study on the night sap flow and its distribution characteristics of Jiuzhaigou conifer and broadleaf mixed forest[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(4): 732-738. (in Chinese)
- [17] 王媛, 魏江生, 周梅, 等. 大兴安岭南段白桦树干液流对土壤水分的响应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 128-133.
- Wang Y, Wei J S, Zhou M, et al. Response of birch sap flow to soil moisture in the southern part of Daxinganling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 128-133. (in Chinese)
- [18] 吴鹏, 杨文斌, 崔迎春, 等. 喀斯特区天峨槭(*Acer wangchii*)树干液流特征及其与环境因子的相关分析[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7552-7567.
- Wu P, Yang W B, Cui Y C, et al. The characteristics of *Acer wangchii* trunk sap flow and its correlation with environmental factors in Karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7552-7567. (in Chinese)
- [19] 刘春鹏, 朱美秋, 薛帅, 等. 干旱条件下荆条树干液流对不同天气的响应[J]. 福建林业科技, 2014, 41(1): 34-39.
- Liu C P, Zhu M Q, Xue S, et al. Responses of vitex twig sap flow to different weathers under drought conditions[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2014, 41(1): 34-39. (in Chinese)
- [20] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭 [*Haloxylon ammodendron* C.A.Mey)Bunge]树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1525-1536.
- Zhang X Y, Zhu J M, Meng P, et al. The characteristics of *Haloxylon ammodendron* C.A.Mey Bunge trunk sap flow and its response to environmental factors in the Minqin oasis-desert transition zone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1525-1536. (in Chinese)
- [21] 李少宁, 鲁绍伟, 赵云阁, 等. 北京典型天气下的4种阔叶树种液流特征及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(2): 189-196.
- Li S Y, Lu S W, Zhao Y G, et al. Sap flow characteristics and influencing factors of four broad-leaved tree species under typical weather in Beijing[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(2): 189-196. (in Chinese)
- [22] 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.
- Yang J,Lv J L,He Q Y,et al.Correlation between time lag effects of trunk sap flow and transpiration characteristics of *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia* in the hilly Loess Plateau[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(8):2607-2613.(in Chinese)
- [23] 姚增旺,褚建民,吴利禄,等.民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征[J].应用生态学报,2018,29(7): 2339-2346.
- Yao Z W,Zhu J M,Wu L L,et al.The time lag characteristics of the stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* in the Minqin oasis-desert transition zone[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(7):2339-2346.(in Chinese)
- [24] 孔喆,陈胜楠,律江,等.欧美杨单株液流昼夜组成及其影响因素分析[J].林业科学,2020,56(3):8-20.
- Kong Z,Chen S N,Lv J,et al.Analysis of the circadian and influencing factors of the sap flow of individual poplar trees in Europe and America[J].Scientia Silvae Sinicae, 2020,56(3):8-20.(in Chinese)
- [25] 王志超,许宇星,竹万宽,等.雷州半岛尾叶桉人工林夜间耗水特征及驱动因素[J].浙江农林大学学报,2020, 37(4):646-653.
- Wang Z C,Xu Y X,Zhu W K,et al.Characteristics and driving factors of night water consumption of *Eucalyptus urophylla* plantation in Leizhou Peninsula[J].Journal of Zhejiang A&F University,2020,37(4):646-653.(in Chinese)
- [26] 刘超,李春友,张劲松,等.生长季大叶女贞树干液流的径向分布特征[J].中国农业气象,2011,32(2):196-202.
- Liu C,Li C Y,Zhang J S,et al.The radial distribution characteristics of the stem sap flow of *Ligustrum lucidum* in the growing season[J].Chinese Journal Agricultural Meteorology,2011,32(2):196-202.(in Chinese)