

半干旱黄土丘陵区河北杨和油松生长季树干液流特征

刘 崑¹, 魏天兴^{1,2,3}, 朱清科^{2,3}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 北京林业大学 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 为探究半干旱黄土区河北杨 *Populus hopeiensis* 和油松 *Pinus tabulaeformis* 树干液流密度变化特征, 利用 Granier 热扩散探针监测陕西省延安市吴起县河北杨和油松人工林生长季(6-10月)树干液流密度的变化过程, 并同步测定气象因子、林下土壤含水量和树木茎周长变化。结果表明: ①2种树种树干液流密度日变化表现为“昼高夜低”单峰或双峰型曲线, 油松比河北杨晚1h左右到夜间水平。河北杨各月日均液流量大小为7月(3.69 kg·d⁻¹)>6月(2.90 kg·d⁻¹)>8月(2.63 kg·d⁻¹)>9月(1.47 kg·d⁻¹)>10月(1.16 kg·d⁻¹), 油松为7月(5.74 kg·d⁻¹)>6月(3.30 kg·d⁻¹)>8月(3.29 kg·d⁻¹)>10月(2.06 kg·d⁻¹)>9月(1.76 kg·d⁻¹)。2种树种晴天树干液流密度变化幅度较大, 而雨天变化幅度较平缓。②观测期间, 2种树种均存在夜间液流活动, 主要发生在0:00-6:00, 在1:00点开始逐渐上升。河北杨和油松夜间液流量占全天总液流量最大比例分别为23.8%和16.6%, 观测期间平均比例分别为12.1%和10.0%。③相关分析表明: 河北杨液流密度与太阳辐射和气温呈极显著正相关($P<0.01$), 与风速显著正相关($P<0.05$), 与相对湿度极显著负相关($P<0.01$), 油松液流密度与太阳辐射、风速、气温和土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$), 与相对湿度和气压显著负相关。2种树种液流密度日变化与茎周长日变化呈显著负相关关系, 液流活动能够指示树干茎周长白天收缩和夜间膨胀的日变化。图6表3参35

关键词: 植物学; 河北杨; 油松; 树干液流密度; 茎周长

中图分类号: S718.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)06-1045-09

Growing season sap flow of *Populus hopeiensis* and *Pinus tabulaeformis* in the semi-arid Loess Plateau, China

LIU Wei¹, WEI Tianxing^{1,2,3}, ZHU Qingke^{2,3}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To provide a scientific basis for water resources carrying capacity and tree species selection, Granier's thermal dissipation probe method was used to measure sap flow density of *Populus hopeiensis* and *Pinus tabulaeformis* during the growing season in Wuqi County, Yan'an City, Shaanxi Province. Climatic factors, soil moisture, and stem perimeter were simultaneously measured. The dynamic characteristics of sap flow and its response to environmental factors were analyzed. Results showed that (1) The daily variation of sap flow density for *Populus hopeiensis* and *Pinus tabulaeformis* demonstrated a typical wide single-peak or double-peak curve with high values in the daytime and low values in the nighttime. The appearance of valleys was about one hour earlier in *Populus hopeiensis* than in *Pinus tabulaeformis*. The mean daily sap flow for both

收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC050170502); 国家生态系统观测研究网络运行服务项目(2015-2016)

作者简介: 刘崑, 从事生态环境地理学研究。E-mail: 634743658@qq.com。通信作者: 魏天兴, 教授, 博士生导师, 从事林业生态工程与流域自然地理过程研究。E-mail: weitx@bjfu.edu.cn

species varied from June to October (in $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$): for *Populus hopeiensis* with July (3.69) > June (2.90) > August (2.63) > September (1.47) > October (1.16) and for *Pinus tabulaeformis* with July (5.74) > June (3.30) > August (3.29) > October (2.06) > September (1.76). On sunny days, daily variation in sap flow density was exhibited on rainy days. (2) During the study period, nocturnal sap flow was observed with both species experiencing a progressive increase from 1:00 to dawn on most sampled nights. Nocturnal sap flow was related to individual water losses in these two species being up to 16.6%–23.8% of the daily sap flow. During the whole monitoring season, the total nocturnal sap flow for *Populus hopeiensis* was 12.1% of the total transpiration and *Pinus tabulaeformis* was 10.0%. (3) For *Populus hopeiensis*, sap flow density was positively related with solar radiation, air temperature, and wind speed, but negatively related with relative humidity. For *Pinus tabulaeformis*, sap flow density was positively related with solar radiation, air temperature, wind speed, and soil moisture but negatively related with relative humidity and air pressure. Sap flow density for the monitored trees was also negatively related with perimeter variation. Also, diurnal stem shrinkage and swelling for both species were indicated by sap flow density. [Ch, 6 fig. 3 tab. 35 ref.]

Key words: botany; *Populus hopeiensis*; *Pinus tabulaeformis*; sap flow density; stem perimeter

土壤水分是黄土丘陵沟壑区植被恢复的主要限制因子,水分亏缺会导致植物生长衰退甚至死亡等变化^[1-5]。尽管通常认为该区植物是耐旱的,但是黄土丘陵沟壑区自然条件严酷,生态系统脆弱,加上极端干旱事件和全区域干旱天气的增加,必然会引起一系列严重的生态环境问题^[5-6]。因此,基于当前水资源利用的矛盾^[7],需要全面了解主要造林树种的耗水特性。河北杨 *Populus hopeiensis* 是陕北黄土丘陵区的乡土树种,是杨属 *Populus* 中相对耐旱、耐瘠薄,能“上山”的树种之一,在当地绿化造林及维持生态系统的稳定性中发挥着重要的作用^[8-9]。油松 *Pinus tabulaeformis* 是黄土丘陵区的常见造林树种,被广泛应用于“三北”(东北、华北、西北)防护林、退耕还林工程等造林过程中。但陕北地区水资源供需不平衡,存在大量生长缓慢的油松^[7,10]。所以,有必要对河北杨和油松在黄土丘陵区的环境适应性及蒸腾耗水特性展开研究。国内外相关研究表明,通过测定树干液流可以较准确地估算植物蒸腾耗水量,而热技术法是测量乔木个体蒸腾耗水规律的主要方法,其中 Granier 热扩散探针法以其简单高效的特点得到广泛的应用^[3,7,9,11]。周海光等^[9]利用热扩散法研究了黄土丘陵沟壑区河北杨,小叶杨 *Populus simonii* 和山杏 *Armeniaca sibirica* 的树干液流变化规律,万艳芳等^[12]利用热扩散法研究青海云杉 *Picea crassifolia* 树干液流密度变化特征及其影响因素。上述研究发现:植物为满足自身水分平衡,因根压作用会在夜间产生液流活动,张涵丹等^[7]和温杰等^[13]的研究也表明:油松普遍存在夜间液流活动。夜间液流广泛存在植物生命活动中,具有促进早晨碳固定、营养供给、补充水分亏缺等重要的生理及生态意义,可能是揭示树木抗旱机制的一种重要现象^[14]。相关研究表明:树干液流除了能直观监测植物的蒸腾耗水过程,还能揭示树木生长变化^[1,3]。观测发现:树干液流活动和生长变化的耦合关系是植物在水分亏缺条件下的综合反应^[3,15]。如对挪威云杉 *Picea abies*^[16-17],胡杨 *Populus euphratica*^[18],华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*^[19]的研究表明:树木蒸腾作用强度的日变化引起树干组织水分的减少和增加,会导致树干收缩和膨胀的变化。鉴于此,本研究选取陕北半干旱区典型树种河北杨和油松为研究对象,采用热扩散式探针法,研究河北杨和油松树干液流动态变化特征及其对环境因子的响应关系,并分析树干液流密度与树干茎周长的关系,旨在揭示液流活动对外界环境因子的响应规律,增加对黄土丘陵区人工林水分利用策略的理解,为该地区水资源承载力研究和树种选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究地位于陕西省延安市吴起县退耕还林森林公园大吉沟北京林业大学试验基地(36°54'20"N, 108°10'28"E)。吴起县属于黄土高原丘陵沟壑区,海拔为 1 233~1 809 m,气候为暖温带大陆性干旱季风气候,日照充足,昼夜温差大。年平均降水量和气温(1957–2013年)分别为 464.6 mm 和 7.8 °C,降水主要集中在 7–9 月,无霜期为 120~155 d,年均蒸发量为 891.23 mm。土壤类型主要为黄绵土。现有林

分以人工灌乔木林为主, 主要乔木树种有河北杨, 油松, 刺槐 *Robinia pseudoacacia* 和小叶杨等, 灌木主要有沙棘 *Hippophae rhamnoides* 和柠条 *Caragana korshinskii* 等。

试验地为 2008 年营造的人工油松、河北杨混交林, 初植密度为 1 400 株·hm⁻²。河北杨是当地乡土树种, 油松是主要造林树种, 林下植被主要有胡枝子 *Lespedeza davurica*, 冰草 *Agropyron cristatum*, 草木犀 *Melilotus officinalis* 等。试验在林内 1 块大小为 20 m × 20 m, 坡向西偏南 10°, 坡度约为 10°, 树种立地条件较一致的样地内进行。

1.2 树干液流及茎周长测定

利用热扩散探针(TDP-10, TDP-30, Dynamax, 美国)于 2016 年 6–10 月对河北杨和油松人工林进行树干液流的观测。该探针传感器是基于 Granier 热扩散理论^[20-21]。选择生长良好的河北杨 2 株、油松 3 株作为观测样木(表 1), 将 5 个探针分别安装在样树离地面 1.3 m 处。使用 DT80 数据采集器(Dataaker, 澳大利亚)设置采样程序记录并存储数据, 数据采样间隔为 30 min。使用 Granier 公式计算树干液流密度。 $F_d=0.000\ 119\times[(\Delta T_{\max}-\Delta T)/\Delta T]^{1.231}\times 3\ 600$ 。其中: F_d 是树干液流密度(m³·m⁻²·h⁻¹), ΔT_{\max} 为 24 h 内无液流时上下探针之间的最大温差值, ΔT 为瞬时温差值。依据树干液流密度推算单株单位时间液流量 Q (kg·h⁻¹)的计算公式为: $Q=F_d\times A_s\times 10^3$ 。其中: A_s 为边材面积(m²), 根据时间尺度可以换算为日总液流量(kg·d⁻¹)。将 1 d 中太阳辐射为 0 时段内的树干液流定义为夜间液流。

在各样树上紧邻热扩散探针处安装 D6 树木生长仪(UMS, 德国, 精度 5 μm, 工作温度-30~50 °C, 单通道 4 线桥式应变传感器)。该仪器安装简单, 无需破坏树皮或影响树木的生长, 可连续、高精度测量树木的茎周长变化。D6 树木生长仪由记录器和树木生长应变传感器组成, 树木茎周长的变化能直接传递到传感器, 瞬时记录树木生长变化对环境影响的反应等。传感器受温度影响小, 其与树皮之间有一个特富龙层, 可减少传感器和树皮的摩擦, 同时也能不受结冰、树脂或结疤的影响。数据记录在另一台 DT80 数据采集器中。

表 1 样树基本特征

测定样树	胸径/cm	树高/m	边材厚度/cm	边材面积/cm ²
河北杨 1	6.5	7.8	2.3	29.61
河北杨 2	7.1	8.5	3.0	36.74
油松 1	8.5	4.5	3.3	39.39
油松 2	8.6	4.6	3.3	40.49
油松 3	5.6	4.2	2.8	21.23

1.3 边材面积计算及环境因子

利用生长锥取样计算边材面积。为避免生长锥取样对树体造成破坏, 影响液流观测结果, 本研究在样树附近选择其他植株进行取样。河北杨由于数量较少, 故选择与样树径级较一致的各 3 株河北杨钻取木芯, 取平均值来代替样树的边材厚度。对油松取样发现, 其边材厚度与胸径(DBH)之间存在极显著的二次函数关系: $y=0.062x^2-0.707x+4.482(R^2=0.880\ 3, n=10)$, 其中 y 为边材厚度(cm); x 为油松胸径(cm)。在此基础上计算油松样树的边材面积。距离样地附近的 HOBO 自动气象观测站记录太阳辐射(W·m⁻²), 气温(°C), 降水量(mm), 风速(m·s⁻¹)和空气相对湿度(%)等。在各样树下使用 HOBO 土壤水分传感器(S-SMC-M005, 美国)长期测定土壤体积含水量, 观测深度为 30 cm, 数据采样间隔为 30 min。

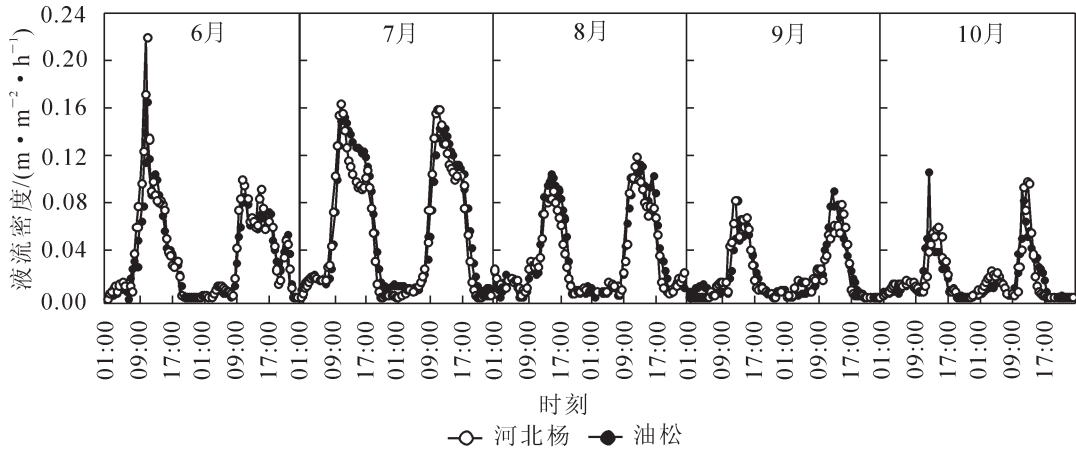
1.4 数据分析

使用 Excel 软件对树干液流等数据进行整理和计算, 所有统计分析均采用 SPSS 18.0 软件完成, 作图采用 Origin 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 树干液流密度动态变化

目标树种典型晴天的树干液流密度变化(图 1)显示: 河北杨液流密度日变化特征以单峰型为主, 在黎明前保持极低水平, 6:00–8:30 树干液流启动, 在 11:00–15:00 达到峰值。7 月观测数据显示, 液流密度在午间出现短暂下降, 导致呈现双峰现象。之后树干液流密度迅速减小, 在 17:00–21:30 达夜间低值水平。各月夜间均存在微弱的液流。图 2 显示: 生长季中期的 6, 7 和 8 月液流密度明显高于 9 和 10 月, 7 月白天液流密度明显高于其他月份, 且曲线幅度比其余月份宽。日均液流量大小: 3.69 kg·d⁻¹(7 月)>2.90 kg·d⁻¹(6 月)>2.63 kg·d⁻¹(8 月)>1.47 kg·d⁻¹(9 月)>1.16 kg·d⁻¹(10 月)。油松的液流密度在 8:30 迅速上升, 在 11:00–15:00 达到峰值, 结束时间在 18:00–22:00, 比河北杨晚 1 h 左右。7 月也出现



各月观测日期: 6月12和13日; 7月29和30日; 8月21和22日; 9月15和16日; 10月2和3日

图1 河北杨与油松典型晴天的液流密度变化

Figure 1 Daily course of sap flow density of each species

双峰现象, 各月存在微弱的夜间液流活动。日均液流量大小分别为 $5.74 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ (7月) $> 3.30 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ (6月) $> 3.29 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ (8月) $> 2.06 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ (10月) $> 1.76 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ (9月)。

在晴天(7月30日)和雨天(8月1日)的天气下, 2种树种的液流变化曲线相似(图3)。河北杨在晴天和雨天条件下液流密度峰值分别为 $(0.126 0 \pm 0.046 0)$ 和 $(0.112 8 \pm 0.052 0) \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 油松液流密度峰值分别为 $(0.120 3 \pm 0.044 0)$ 和 $(0.099 8 \pm 0.016 0) \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。晴天白天液流密度明显高于清晨和夜晚, 变化幅度大; 雨天变化曲线平缓, 雨天液流密度峰值出现明显下降。河北杨雨天比晴天下降 41.67%, 油松下降 10.48%。但雨天夜间液流密度较高, 可能与白天太阳辐射减少且降雨补充了林下土壤水分有关。

2.2 夜间液流

观测期间发现2种树种的夜间液流明显, 只有在极少数的情况下液流密度为0。6-8月河北杨液流密度低且平稳, 凌晨1:00开始逐渐上升, 且夜间液流主要发生在后半夜(0:00-6:00), 9-10月河北杨夜间液流活动较强。河北杨6-10月夜间液流量占全天总液流量的比例分别为: 9.7%, 4.8%, 14.2%, 8.0%和23.8%。观测日平均比例为12.1%。在季节之间没有显著差异。6-8月油松夜间都保持较低液流密度, 9和10月波动较大, 夜间液流活动明显增强, 可能与土壤水分增加有关。6-10月夜间液流量占全天总液流量的比例分别为: 9.5%, 7.2%, 11.4%, 5.5%和16.6%。观测日平均比例为10.0%(图4)。

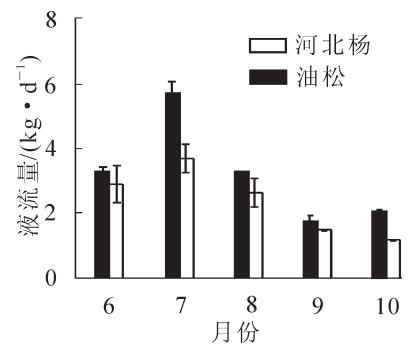


图2 河北杨与油松树干液流量变化(平均值±标准误)

Figure 2 Seasonal means of daily sap flow

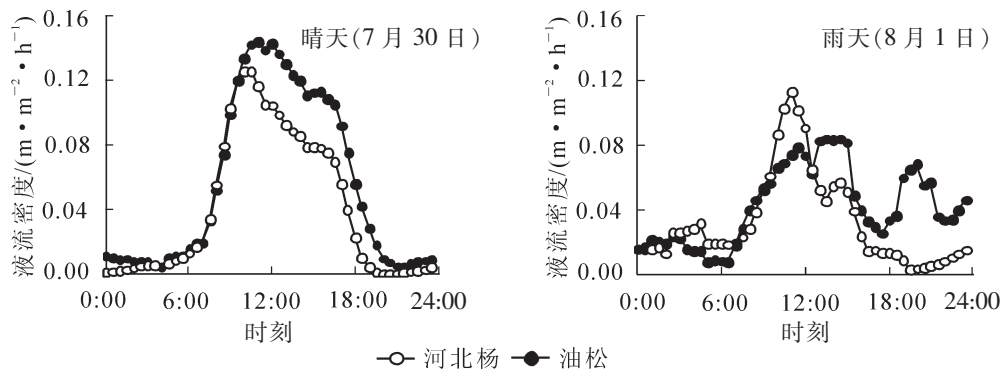


图3 河北杨与油松晴天、雨天树干液流密度变化

Figure 3 Daily course of sap flow density in a sunny day (30 July) and a rainy day(1 August) of monitored trees

2.3 液流密度与环境因子的关系

环境因子与河北杨和油松树干液流密度之间的相关分析(表 2) 表明：河北杨液流密度与太阳辐射和气温极显著正相关($P<0.01$)，与风速显著正相关($P<0.05$)，而与相对湿度极显著负相关($P<0.01$)，与其他环境因子的相关关系不显著($P>0.05$)。对于油松，液流密度与太阳辐射、风度、气温和土壤含水量显著正相关($P<0.01$)，而与相对湿度和气压显著负相关($P<0.01$)。图 5 比较了 8 月典型晴天的液流密度均值在气象因子较一致的情况下对土壤含水量下的响应，表现为土壤含水量从 10.7%下降到 4.9%导致河北杨液流密度均值减少 27.0%，油松减少 33.0%。

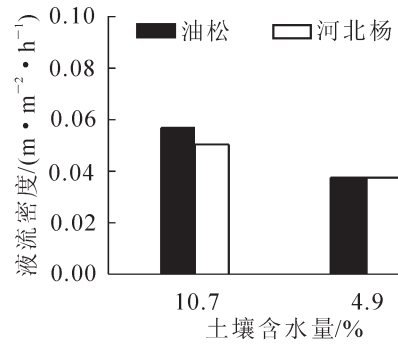
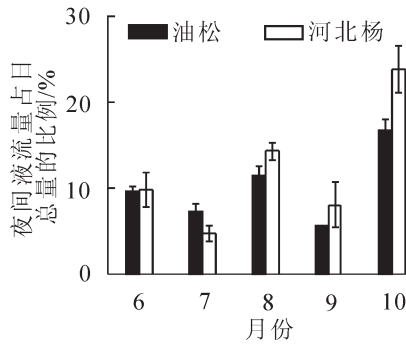


图 4 河北杨与油松夜间液流量占日总液流量的比例

图 5 河北杨与油松在晴天不同土壤含水量的树干液流密度

Figure 4 Ratio of nocturnal sap flow to total daily sap flow in different month

Figure 5 Sap flow density of monitored trees during the different soil moisture

表 2 油松和河北杨液流密度与环境因子的相关性

Table 2 Pearson correlation coefficient of the monitored trees sap flow density to environmental factors

树种	太阳辐射	风速	气温	相对湿度	气压	土壤含水量
河北杨	0.507**	0.185*	0.295**	-0.195**	-0.097	-0.032
油松	0.643**	0.487**	0.605**	-0.524**	-0.280**	0.481**

说明：* 和 ** 分别表示该值在 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 水平上差异显著

由于树体自身存在着巨大的储水性，树体内部的水分消耗能通过树干茎周长变化反映出来。为了分析 2 种树种茎周长日变化与液流活动的关系，绘制液流密度与茎周长的日变化过程图(图 6)。结果表明：日出前，2 种树种存在较弱的夜间液流活动，茎周长表现出微弱的下降。日出之后即太阳辐射开始增强，植物耗水量加大，2 种树种液流密度迅速升高，而茎周长却迅速减小。观测发现茎周长变化总的趋势表现为先降低再升高后降低，与液流密度变化规律相反。其次，从表 3 发现：2 种树种的树干收缩期正好处在液流活动期间内，在整个研究期间均存在这一现象。相关分析表明：2 种树种的液流密度与

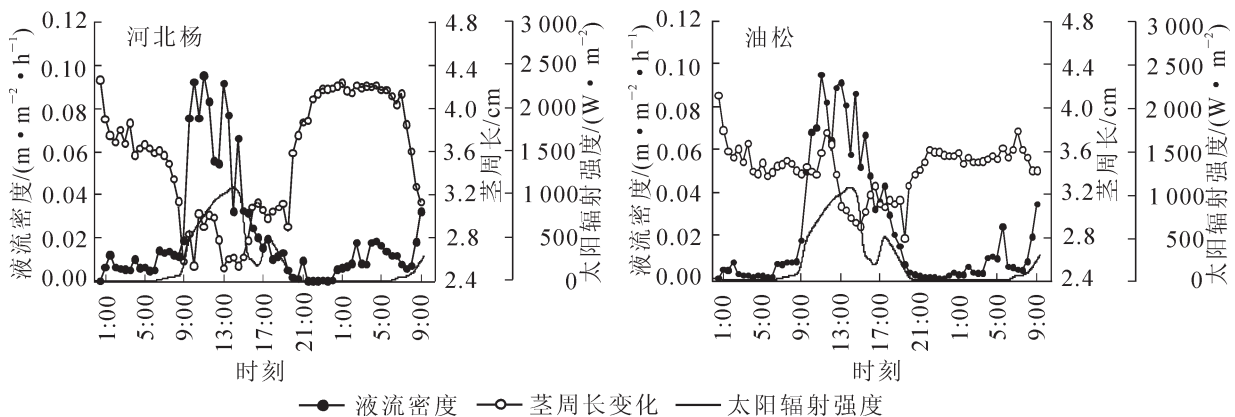


图 6 河北杨与油松液流密度与茎周长日变化及太阳辐射的日变化

Figure 6 Diurnal variation of daily sap flow density and daily perimeter variation, solar radiation for *Populus hopeiensis* and *Pinus tabulaeformis*

茎周长日变化呈显著负相关关系(河北杨: $R^2=-0.50$, $P<0.01$; 油松: $R^2=-0.36$, $P<0.01$), 说明树木茎周长的日变化与树干液流活动紧密相关。

表3 河北杨与油松液流密度与茎周长日变化特征

Table 3 Diurnal variation of daily sap flow density and daily perimeter variation for *Populus hopeiensis* and *Pinus tabulaeformis*

树种	月份	树干收缩时间	树干膨胀时间(至第2天)	液流启止时间	液流降低时间	液流增长时间(第2天)
河北杨	6	6:30-14:30	14:30-7:00	6:00-20:00	14:30-20:00	7:30-10:30
	7	10:30-17:00	17:00-10:00	8:30-20:00	10:00-20:00	8:00-10:00
	8	8:30-17:00	17:00-5:30	7:00-18:30	15:00-18:30	9:00-12:30
	9	7:30-15:30	15:30-8:30	7:30-17:00	14:30-17:00	8:30-15:30
	10	8:30-16:30	16:30-6:00	8:00-21:30	12:30-21:30	8:00-14:30
油松	6	9:30-19:30	19:30-7:00	8:30-20:00	15:30-20:00	7:30-10:30
	7	10:00-18:00	18:00-10:00	8:30-22:00	11:00-22:00	7:30-13:30
	8	9:30-17:00	17:00-5:30	7:00-19:30	15:00-19:30	7:30-13:30
	9	7:30-16:30	16:30-8:00	7:00-19:30	13:00-19:30	7:30-13:00
	10	11:00-16:00	16:00-10:30	9:00-18:00	14:00-18:00	9:30-13:00

3 讨论

本研究中河北杨和油松的树干液流密度昼夜变化相似, 主要呈单峰型曲线, 与其他树种一致^[12-15,22-29], 差异表现在启动时间、峰值和下降时间的不同。昼夜变化规律是因为树干液流的产生主要是由于蒸腾拉力的作用, 影响蒸腾作用强度的因子就会影响树干液流密度, 在土壤水分不受限的条件下, 液流密度就随着蒸腾强度的增加而升高^[22-26]。本研究结果也证实了这一点。6-8月液流密度均值与峰值均较高, 与太阳辐射和气温具有较强正相关性。其次, 王华田等^[24]认为: 树木日液流密度最大值可能仅与土壤水分状况及树木自身蒸腾耗水的生物学、生理学特性有关。而KANALAS等^[27]的研究发现: 土壤水分的减少及干旱胁迫的加剧会令无梗花栎 *Quercus petraea* 产生独特的气孔调节, 使最大液流密度从7-8月下降81%。在本研究中, 土壤水分的减少, 河北杨液流密度均值减少27%, 油松减少33%, 观测结果基本符合上述规律。另外, 本研究发现10月油松最大液流密度不是出现在胸径最大的样树上, 而是出现在胸径较小的样树上。赵平等^[29]认为对于相同种类的树木, 由于生长过程中所处的环境不同, 如: 不同的方位、林内风向与风速、接受太阳辐射的强弱等, 均会引起液流密度的差异, 也可能与树种自身水分利用效率有关^[29-30]。

液流密度的日变化主要还是受环境因子的影响, 例如土壤水分、太阳辐射、气温、风速和相对湿度等因素^[3,7,9,12-13,25-31]。徐世琴等^[32]认为: 液流与风速的相关性较大主要是由于风速增大能够增加植物冠层边界层导度, 从而加速叶片蒸腾。本研究也表明, 河北杨液流密度与太阳辐射和气温极显著正相关, 与风速显著正相关, 而与相对湿度显著负相关。油松液流密度与太阳辐射、风速、气温和土壤含水量显著正相关, 而与相对湿度和气压显著负相关。相关程度绝对值前3位的依次为太阳辐射>气温>相对湿度, 说明太阳辐射对液流活动的驱动作用最强。这与温杰等^[13]的研究较一致。有研究表明: 夜间液流在一定程度上反映了植物体内水分对由蒸腾作用的响应^[33-34]。本研究发现: 降雨过后, 河北杨和油松的夜间液流密度迅速增加。NAKAI等^[35]认为: 这是干旱区植物适应干旱的方式, 植物增加夜间液流活动补充水分来应对干旱环境, 且能反映出植物木质部的导水效率。其次, 本研究发现2种树种夜间液流量对日总液流量的比例为4.8%~23.8%, 王艳兵等^[34]认为, 夜间液流量所占日总液流量的比例是由土壤水分状况和树木生长状况共同决定的, 最大值出现在10月。本研究观测最大值也出现在10月, 造成这种现象的原因可能与7-9月雨季过后土壤水分得到较大补充有关。

本研究在对液流密度与茎周长变化的相关分析中, 发现2种树种茎周长变化与液流密度变化呈显著负相关关系, 与前人研究结果一致^[16-19]。ROMÀ等^[1]发现树干收缩变化与树干液流有关, 认为蒸腾作用消耗树干储水会导致树干径向尺寸减小, 日落后蒸腾作用减少, 树干开始储水会使树干膨胀, 这种双向变化反映植物对环境条件变化的响应。而造成这种现象的原因可能由植物体内水分利用策略决定的, 当

相关性大时, 树干水分调节能力强, 而当相关性小时, 水分调节能力弱^[14-15,19]。FORNER 等^[3]发现植物在缺水的情况下, 植物对蒸腾耗水过程和生长发育过程的响应是高度结合的, 关于两者的关系需要在后续的试验中进一步研究。

4 结论

对半干旱黄土丘陵区河北杨和油松生长季树干液流的研究发现, 2 种树种液流密度的日变化过程主要呈“昼高夜低”单峰或双峰型曲线, 树干液流密度主要受太阳辐射、气温和相对湿度影响。河北杨日间液流密度峰值较高, 夜间液流活动明显, 意味着河北杨具备高效的导水结构。油松在观测期间能保持较高的液流量, 与气象因子的相关性较高。2 种树种的液流活动能够指示树木茎周长白天收缩和夜间膨胀的日变化。

5 参考文献

- [1] ROMÀ O, JOSE P. Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought [J]. *Plant Ecol*, 2007, **189**(2): 291 – 299.
- [2] ALLEN C E, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, *et al.* A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **259**(4): 660 – 684.
- [3] FORNER A, ARANDA I, GRANIER A, *et al.* Differential impact of the most extreme drought event over the last half century on growth and sap flow in two coexisting Mediterranean trees [J]. *Plant Ecol*, 2014, **215**(7): 703 – 719.
- [4] 赵兴凯, 李增尧, 朱清科. 基于 SPI 和 SPEI 陕北黄土区土壤水分对气候特征的响应[J]. *农业机械学报*, 2016 (8): 155 – 163.
ZHAO Xing kai, LI Zeng yao, ZHU Qing ke. Response of soil moisture on climate characteristics based on SPI and SPEI in Loess Region of Northern Shaanxi [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2016, **47**(8): 155 – 163.
- [5] LENG Guoyong, TANG Qihong, RAYBURG S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China [J]. *Global Planet Change*, 2015, **126**(3): 23 – 34.
- [6] 陈文思, 朱清科, 刘蕾蕾, 等. 陕北半干旱黄土区沙棘人工林的死亡率及适宜地形因子[J]. *林业科学*, 2016, **52**(5): 9 – 16.
CHEN Wensi, ZHU Qingke, LIU Leilei, *et al.* Mortality and appropriate topographical conditions of seabuckthorn plantation in semi-arid region of Loess Plateau in North Shaanxi, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, **52**(5): 9 – 16.
- [7] 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 等. 典型黄土区油松树干液流变化特征分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 349 – 356.
ZHANG Handan, WEI Wei, CHEN Liding, *et al.* Analysis of sap flow characteristics of the Chinese pine in typical Loess Plateau Region of China [J]. *Environ Sci*, 2015, **36**(1): 349 – 356.
- [8] 朱亚红, 孙存举, 朱铭强, 等. 河北杨与沙棘的光合生理特性及叶绿素荧光参数比较[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, **35**(2): 26 – 31.
ZHU Yahong, SUN Chunju, ZHU Mingqiang, *et al.* Comparisons on photosynthetic physiological characteristics and chlorophyll fluorescence parameters between *Populus hopeiensis* and *Hippophae rhamnoides* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2015, **35**(2): 26 – 31.
- [9] 周海光, 刘广全, 焦醒, 等. 黄土高原水蚀风蚀复合区几种树木蒸腾耗水特性[J]. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4568 – 4574.
ZHOU Haiguang, LIU Guangquan, JIAO Xing, *et al.* Water consumption by transpiration of several trees species in the Loess Plateau with mixed water and wind erosion [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(9): 4568 – 4574.
- [10] 梁非凡, 朱清科, 王露露, 等. 陕北黄土区油松径向生长对气候因子的响应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, **43**(5): 33 – 41.
LIANG Feifan, ZHU Qingke, WANG Lulu, *et al.* Influence of climate factors on radial growth of *Pinus tabulaeformis* in loess area of Northern Shaanxi [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2015, **43**(5): 33 – 41.
- [11] LU Peng, URBAN L, ZHAO Ping. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice [J]. *Acta Bot Sin*, 2004, **46**(6): 631 – 646.
- [12] 万艳芳, 于澎涛, 刘贤德, 等. 祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异[J]. *生态学报*, 2017, **37**(9):

- 3106 – 3114.
- WAN Yanfang, YU Pengtao, LIU Xiande, *et al.* Variation in sap flow density among levels of tree dominance in *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(9): 3106 – 3114.
- [13] 温杰, 陈云明, 唐亚坤, 等. 黄土丘陵区油松、沙棘生长旺盛期树干液流密度特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(3): 763 – 771.
- WEN Jie, CHEN Yunming, TANG Yakun, *et al.* Characteristics and affecting factors of sap flow density of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* in growing season in the hilly region of the Loess Plateau, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(3): 763 – 771.
- [14] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 西北干旱区典型固沙植物夜间耗水及其影响因素[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(7): 1443 – 1450.
- XU Shiqin, JI Xibin, JIN Bowen. Nighttime water use and its influencing factors for typical sand binding plants in the arid region of Northwest China [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2015, **35**(7): 1443 – 1450.
- [15] SANCHEZ-COSTA E, POYATOS R, SABATE S. 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]. *Agric For Meteorol*, 2015, **207**: 24 – 37.
- [16] HERZOG K M, HASLER R, THUM R. Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration [J]. *Trees*, 1995, **10**(2): 94 – 101.
- [17] ZWEIFEL R, ITEM H, HASLER R. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations [J]. *Tree Physiol*, 2001, **21**(12/13): 869 – 877.
- [18] 田全彦, 肖生春, 彭小梅, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)与怪柳(*Tamarix ramosissima*)径向生长特征对比[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(6): 1512 – 1519.
- TIAN Quanyan, XIAO Shengchun, PENG Xiaomei, *et al.* Comparison of intra-annual stem radial growth characteristic between *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* [J]. *J Des Res*, 2015, **35**(6): 1512 – 1519.
- [19] 董满宇, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(23): 7430 – 7439.
- DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, *et al.* Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(23): 7430 – 7439.
- [20] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiol*, 1987, **3**(4): 309 – 320.
- [21] LU Ping, CHACKO E. Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees [J]. *Agronomie*, 1998, **18**(7): 461 – 471.
- [22] HOLSCHER D, KOCH O, KORN S, *et al.* Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought [J]. *Trees*, 2005, **19**(6): 628 – 637.
- [23] FORD C R, HUBBARD RM, KLOEPEL B D, *et al.* A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance [J]. *Agric For Meteorol*, 2007, **145**(3/4): 176 – 185.
- [24] 王华田, 马履一. 利用热扩散式液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(6): 661– 667.
- WANG Huatian, MA Lüyi. Measurement of whole tree's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP) [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2002, **26**(6): 661 – 667.
- [25] DU Sheng, WANG Yilong, KUME T, *et al.* Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. *Agric For Meteorol*, 2011, **151**(1): 1 – 10.
- [26] 孙慧珍, 孙龙, 王传宽, 等. 东北东部山区主要树种树干液流研究[J]. 林业科学, 2005, **41**(3): 36 – 42.
- SUN Huizhen, SUN Long, WANG Chuankuan, *et al.* Sap flow of the major tree species in the eastern mountainous region in Northeast China [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(3): 36 – 42.
- [27] 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 Biol Hung*, 2010, **61**(suppl 1): 95 – 108.
- [28] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用[J]. 热带亚热带植

- 物学报, 2005, **13**(6): 457 – 468.
- ZHAO Ping, RAO Xingquan, MA Ling, *et al.* Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2005, **13**(6): 457 – 468.
- [29] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异[J]. 生态学报, 2006, **26**(12): 4050 – 4058.
- ZHAO Ping, RAO Xingquan, MA Ling, *et al.* The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(12): 4050 – 4058.
- [30] TELENDER A C, SLESACK R A, D'AMATO A W, *et al.* Sap flow of black ash in wetland forests of northern Minnesota, USA: hydrologic implications of tree mortality due to emerald ash borer [J]. *Agric For Meteorol*, 2015, **206**(264): 4 – 11.
- [31] van de WAL B, GUYOT A, LOVELOCK C, *et al.* Influence of spatial variation in sap flux density on estimates of whole-tree water use in *Avicennia marina* [J]. *Trees*, 2015, **29**(1): 215 – 222.
- [32] 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]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(2): 345 – 353.
- [33] GOLDSTEIN G, ANDRADE J L, MEINZER F C, *et al.* Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees [J]. *Plant Cell Environ*, 1998, **21**(4): 397 – 406.
- [34] 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): 1375 – 1385.
- 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 Ecol Sin*, 2013, **33**(5): 1375 – 1385.
- [35] NAKAI T, ABE H, MURAMOTO T, *et al.* The relationship between sap flow rate and diurnal change of tangential strain on inner bark in *Cryptomeria japonica* saplings [J]. *J Wood Sci*, 2005, **51**(5): 441 – 447.

《浙江农林大学学报》获评“2018 年度中国高校百佳科技期刊”

由中国高校科技期刊研究会组织的“2018 年度中国高校杰出·百佳·优秀科技期刊”遴选活动结果揭晓,《浙江农林大学学报》被评为“2018 年度中国高校百佳科技期刊”。

此次评选活动旨在不断提升高校科技期刊的创新力、影响力、贡献力和编辑出版质量,客观、全面评价高校科技期刊质量及其在科研活动和学术交流中的作用,促进高校科技期刊健康发展。在编校差错率低于万分之三的前提下,就期刊学术质量和编辑出版质量开展综合审查,利用全文数据库、检索数据库和评价机构的有关评价成果,结合期刊的学术影响力、行业影响力进行遴选,共评选出中国高校杰出科技期刊 24 种、中国高校百佳科技期刊 120 种、中国高校优秀科技期刊 238 种、中国高校编辑出版质量优秀科技期刊 53 种。

在浙江省出版的高校科技期刊中,《浙江农林大学学报》《丝绸》《高校化学工程学报》《工程设计学报》《浙江大学学报(理学版)》《浙江大学学报(农业与生命科学版)》《浙江大学学报(医学版)》被评为百佳科技期刊。

《浙江农林大学学报》始终坚持办刊宗旨,创新办刊思路,彰显刊物特色,编校质量、学术美誉度和 社会影响力稳步提升,获得了学术界充分肯定。