

神农架 2 树种树干液流特征及与环境因子关系

崔鸿侠¹,唐万鹏¹,胡文杰¹,周文昌¹,潘磊^{1*},杨敬元²

(1. 湖北省林业科学研究院,湖北 武汉 430075;2. 神农架国家公园管理局,湖北 神农架 442421)

摘 要:采用热扩散探针法和自动气象站,于 2018 年 6—8 月对神农架华山松和日本落叶松树干液流和环境因子进行连续观测,分析生长旺季树干液流密度变化规律及其与环境因子的关系。结果表明,日本落叶松生长旺季的月树干液流密度($1\,824.80\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}$)显著高于华山松($1\,026.15\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}$)。2 个树种晴天树干液流密度均高于雨天,晴天树干液流日变化规律均为单峰曲线,而雨天树干液流日变化规律不明显。2 个树种树干液流主要影响因子不同,在小时尺度下,华山松液流密度的主要影响因子依次是光合有效辐射>风速>土壤温度>土壤含水率>空气温度>空气相对湿度>降水量>蒸汽压亏缺,而日本落叶松主要影响因子依次是光合有效辐射>风速>空气相对湿度>土壤温度>蒸汽压亏缺;在日尺度下,华山松液流密度主要影响因子依次是土壤含水率>蒸汽压亏缺>光合有效辐射>降水量>空气相对湿度>风速,而日本落叶松主要影响因子依次是光合有效辐射>蒸汽压亏缺>土壤含水率>空气温度。

关键词:华山松;日本落叶松;树干液流密度;环境因子;时间尺度

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)01-0037-08

Characteristics of the Sap Flow and Correlation Analysis with Environmental Factors of Two Tree Species in Shennongjia

CUI Hong-xia¹,TANG Wan-peng¹,HU Wen-jie¹,ZHOU Wen-chang¹,PAN Lei^{1*},YANG Jing-yuan²

(1. Hubei Academy of Forestry,Wuhan 430075,Hubei,China;

2. Administrative Bureau of Shennongjia National Park,Shennongjia 442421,Hubei,China)

Abstract:By means of thermal dissipation probe (TDP) and automatic weather station,environmental factors and stem sap flow density of *Pinus armandii* and *Larix kaempferi* were continuously observed in Shennongjia from June to Autumn in 2018,and the relations between sap flow and environmental factors were analyzed at different time scales. The results showed that the sap flow density of *L. kaempferi* in growing season was significantly higher ($1\,824.80\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$) than that of *P. armandii* ($1\,026.15\text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$). The sap flow density of two tree species in sunny day was higher than those in rainy day. The daily change of sap flow in sunny day was a single peak curve,while the change law was not obvious in rainy day. At the hour scale,the main environmental factors influencing sap flow density of *P. armandii* followed the order of photosynthetic active radiation(PAR)>wind speed(WS)>soil temperature(T_s)>soil water content(SWC)>air temperature(T_A)>relative humidity(RH)>rainfall(R)>vapor pressure deficit (VPD),and the order to *L. kaempferi* was PAR>WS>RH> T_s >VPD. At the day scale,the main environmental factors influencing sap flow density of *P. armandii* followed the order of SWC>VPD>PAR>R>RH>WS,and the order to *L. kaempferi* was PAR>VPD>SWC> T_A .

收稿日期:2019-04-03 修回日期:2019-08-05

基金项目:湖北省技术创新重大专项(2019AC161);科技协同创新与攻关课题(2019SNJ001);国家林业局生态站监测运行补助项目(2018-LYPT-DW-062)。

作者简介:崔鸿侠,男,博士,副研究员,研究方向:森林生态。E-mail:chxlky@163.com

*通信作者:潘磊,男,博士,研究员,研究方向:森林生态。E-mail:panlei2008@126.com

Key words: *Pinus armandii*; *Larix kaempferi*; sap flow density; environmental factor; time scale

森林生态系统在保持水土及涵养水源等方面发挥着重要作用,同时森林对降水可进行再分配。森林蒸发是向大气输送水分的主要途径,在森林水分循环中占有主导地位^[1]。林木在蒸腾过程中的水分丢失量常常取决于周围环境条件,不同树种的蒸腾对环境有不同的反应,因此准确揭示不同树种耗水规律及其影响因子,对于制定合理森林经营方案、正确评价森林水文效应、研究森林水文循环机理等具有重要的理论价值。近年来,通过热电转换原理测定树干液流来估算树木蒸腾量的方法,已得到众多学者的认可^[2-4]。根据热技术法不同的原理和适用范围可分为热扩散法、热脉冲法、热平衡法和热比率法等^[5-6],其中热扩散探针法(thermal dissipation probe, TDP) 由于能够在保持植物自然生长状态不变的条件下连续动态监测树干液流,且测定结果较准确,因此被广泛采用^[7-8]。

目前应用热扩散探针法对树干液流的研究较多,且研究对象多为单一树种,如:池波等^[9]、万艳芳等^[10]、殷秀辉等^[11]分别研究了兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)树干液流变化规律及其与环境因子的关系。大量研究结果表明不同树种树干液流特征存在较大差异^[9-11],同一树种在不同地区的树干液流特征也不相同^[12-13],并且在不同时间尺度上影响树干液流的环境因子也不尽相同^[14]。选择树木 1 a 中生长旺季(6—8 月),利用热扩散探针法对神农架地区 2 个针叶树种华山松(*P. armandii*)和日本落叶松(*L. kaempferi*)树干液流进行连续测定,并利用自动气象站同步观测大气降水量、空气温湿度、光合有效辐射、风速和土壤温湿度等环境因子,从小时尺度和日尺度 2 个时间尺度分别探讨环境因子对树干液流的影响,建立树干液流与环境因子之间的关系模型,为揭示神农架地区典型森林植被的耗水规律,充分发挥森林水源涵养等功能提供科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于湖北神农架森林生态系统国家定位观测研究站内,属于北亚热带季风性气候,年平均气温 12.0℃,空气相对湿度 75%,每年 4—9 月集中全年降水量 80%左右,冬季寒冷干燥,降水量偏少。土壤以黄棕壤为主,枯枝落叶层发育较厚,生长季较为湿润。该区域地带性植被类型为针阔混交林,树种组成主要为华山松、锐齿槲栎(*Quercus aliena*)、

亮叶桦(*Betula luminifera*)、红桦(*B. albosinensis*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等,此外还分布有 20 世纪 70 年代采伐后形成的华山松、日本落叶松和日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)等针叶人工纯林。

2 研究方法

2.1 样地设置与样树选择

选择相邻且集中成片的华山松与日本落叶松人工林,林龄约 45 a,各设置 1 个 30 m×30 m 的样地,样地海拔 1 570 m,坡向为东坡,坡位为中坡,土壤类型为黄棕壤。华山松样地林分郁闭度为 0.7,密度 1 250 株·hm⁻²;日本落叶松样地郁闭度为 0.8,密度 1 360 株·hm⁻²。在各样地内分别选择具有代表性、长势良好的华山松和日本落叶松各 3 棵作为测定树干液流的样树(表 1)。

表 1 样树基本参数
Table 1 Basic parameters of sample trees

树种	编号	胸径/cm	树高/m	冠幅/m×m
华山松	1	13.8	14.1	2.2×2.6
	2	19.3	16.7	2.8×3.5
	3	25.4	18.9	3.5×4.0
日本落叶松	1	14.6	15.2	2.5×3.0
	2	19.7	17.4	3.0×3.8
	3	26.2	20.3	3.6×4.5

2.2 树干液流密度的测定

于 2018 年 6 月 1 日至 8 月 31 日进行树干液流密度连续测定,应用热扩散探针法测定华山松和日本落叶松树干液流密度。所用植物茎流计为美国 Dynamax 公司生产的插针式 FLGS-TDP,探针型号为 TDP-30。在每棵观测木的胸高(1.3 m)处南北 2 个方向分别安装液流探针,为防止雨水接触探针,在针孔处先采用橡皮泥密封,再用铝箔纸将探针周围树干完全包裹。探针另一端采用数据采集器 CR1000 进行数据采集。每 10 s 采集 1 次数据,并存储每 1 h 的平均值。

根据 A. Granier^[15]建立的经验公式将温差电势转化为树干液流速率:

$$J_s=0.714\times[(\Delta T_m-\Delta T)/\Delta T]^{1.231}\quad (1)$$

式中, ΔT_m 为上、下探针之间的最大昼夜温差; ΔT 为瞬时温差; J_s 为树干液流密度(mL·cm⁻²·min⁻¹),表示单位边材面积单位时间内的树干液流量。

2.3 环境因子的测定

在样地附近空地设置智能自动气象站(Dy-

namet),观测大气降水量、空气温度、空气相对湿度、光合有效辐射($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、风速等气象因子;在 2 个样地内各设置 1 套土壤水分监测系统(EM50),观测林地 10 cm 深度土壤含水率和土壤温度,记录每 1 h 的平均值。

蒸汽压亏缺(VPD,kPa)选取空气温度和空气相对湿度的数据,计算公式^[16]如下:

$$E=0.611e^{17.27t/(t+237.3)} \tag{2}$$

$$VPD=E-E \cdot RH/100 \tag{3}$$

式中, E 为饱和水汽压; VPD 为蒸汽压亏缺; t 为空气温度; RH 为空气相对湿度。

2.4 数据处理及计算

为比较 2 个树种树干液流特征差异,分析不同时间尺度条件下树干液流密度与环境因子的关系,先将树干液流南北方向测定值平均,再取 3 棵观测木的平均值,最后通过时间积分方法,将原单位 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 转换为 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ 。采用 Excel 2007 和 SAS 9.4 软件进行数据处理和统计分析。

3 结果与分析

3.1 树干液流密度特征

华山松 6、7、8 月树干液流密度分别为 970.78、1 319.31、788.37 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2}$,月平均为 1 026.15 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2}$;日本落叶松 6、7、8 月树干液流密度分别为 1 742.41、2 037.03、1 694.97 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2}$,月平均为 1 824.80 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。2 个树种在观测期内树干液流密度均表现为 7 月>6 月>8 月。与华山松相比,日本落叶松树干液流密度增加 77.83%。通过比较每棵观测木南北方向树干液流密度差异,可知北侧树干液流密度略>南侧,其中华山松北侧比南侧高 6.20%,日本落叶松北侧比南侧高 7.80%,进一步观测发现南北方向树干液流密度的差异主要集中在白天。

3.1.1 不同天气状况树干液流变化规律 在观测期每月选择晴天和雨天各 1 个,晴天分别为 6 月 10 日、7 月 23 日、8 月 26 日;雨天分别为 6 月 18 日、7 月 28 日、8 月 17 日。根据晴天与雨天各 3 d 的观测数据,可得出晴天华山松和日本落叶松平均液流密度分别为 0.041 7 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 0.060 3 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,雨天华山松和日本落叶松平均液流密度分别为 0.003 6 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 0.014 4 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,说明 2 个树种在雨天液流密度均显著<晴天。对不同天气条件下华山松和日本落叶松树干液流密度日变化规律进行分析(图 1、图 2)如下:

晴天(图 1)华山松和日本落叶松生长旺季各月份树干液流密度均表现为“昼高夜低”的单峰曲线,且同一树种树干液流在不同月份开始启动、到达峰值、保持较大密度的时间基本相同。不同树种树干液流日变化规律并不一致,华山松树干液流启动时间在 10:00、12:00 达到峰值,11:00—16:00 液流密度一直维持在较高水平;日本落叶松树干液流启动时间在 8:00、11:00 点达到峰值,9:00—16:00 液流密度一直维持在较高水平。与华山松相比,日本落叶松树干液流启动时间和达到峰值时间早,且维持较高水平的时间长。

雨天(图 2)华山松和日本落叶松树干液流密度在雨天的日变化规律比较一致。由于降雨时段不同,树干液流在不同的雨天日变化规律存在显著差异。7 月 28 日降雨主要发生在 4:00 之前和 14:00 之后,树干液流表现为尖峰曲线,在 11:00—13:00 出现 1 个短暂高峰,而在降雨期间树干液流密度均较小。6 月 18 日和 8 月 17 日全天降雨,树干液流密度全天变化不明显,一直处于无规律的小幅波动。与同期晴天相比,雨天树干液流密度明显降低。

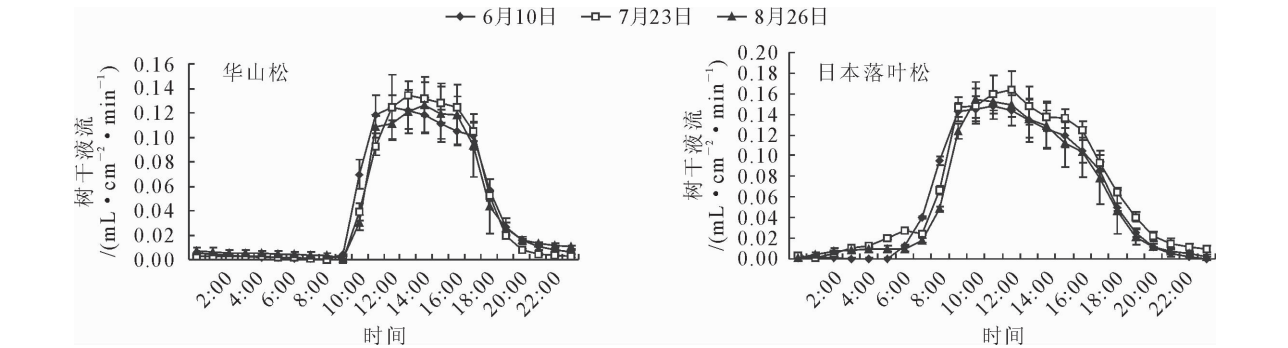


图 1 不同树种晴天树干液流日变化

Fig. 1 Diurnal variations of the sap flow density of different tree species in sunny days

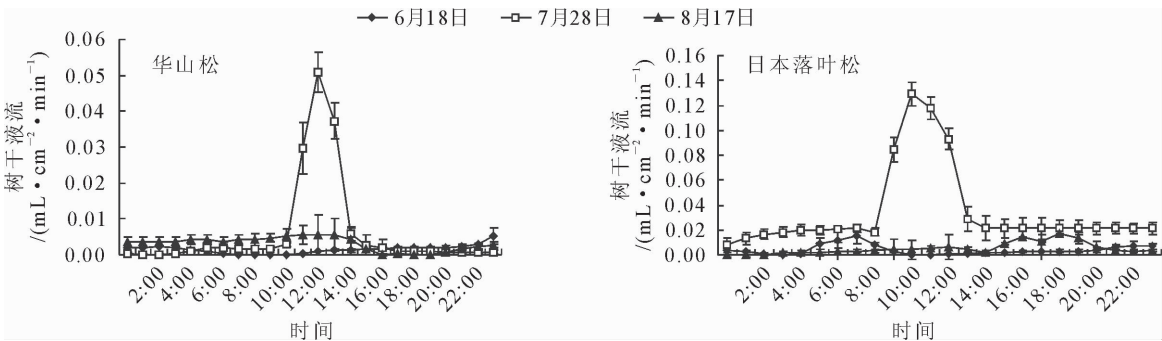


图2 不同树种雨天树干液流日变化

Fig.2 Diurnal variations of sap flow density of different tree species in rainy days

3.1.2 树干液流昼夜变化规律 选取当日 20:00 至次日 7:00 作为夜间树干液流时段。华山松和日本落叶松生长旺季夜间树干液流密度分别占整日液流密度的 5.45%和 8.98%，说明不同树种树干液流密度均以白天为主，夜间树干液流密度显著降低。在不同天气条件下树干液流的昼夜变化规律也不一致，同样以上述选择的 3 个晴天和 3 个雨天树干液流密度数据为例，在晴天华山松和日本落叶松夜间树干液流分别占整日液流的 6.40%和 13.26%，而在雨天所占比例分别为 40.77%和 42.36%。雨天夜间液流对整日液流总量的贡献率高，主要是由于雨天夜间液流密度与日间的差距较晴天夜间和日间的差距要小得多。

3.2 树干液流与环境因子的关系

3.2.1 小时尺度下树干液流与环境因子的关系

为分析树干液流与环境因子的关系，选取降水量、空

气温度、空气相对湿度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺、风速、土壤含水率和土壤温度 8 个环境因子，选择任意连续 3 d(8 月 1—3 日)的树干液流密度与单个环境因子进行相关性分析(表 2)。从表中可知，华山松和日本落叶松树干液流密度与空气温度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺、风速和土壤温度呈正相关，而与降水量、空气相对湿度和土壤含水率呈负相关。华山松树干液流密度与空气温度、空气相对湿度、光合有效辐射及风速相关性达到极显著水平($P<0.01$)，与蒸汽压亏缺相关性达到显著水平($P<0.05$)，而与降水量、土壤含水率和土壤温度相关性不显著($P>0.05$)；日本落叶松树干液流密度与空气相对湿度、光合有效辐射及风速相关性达到极显著水平($P<0.01$)，与土壤含水率相关性达到显著水平($P<0.05$)，而与降水量、空气温度、蒸汽压亏缺及土壤温度相关性不显著($P>0.05$)。

表 2 小时尺度树干液流密度与环境因子的 Pearson 相关性

Table 2 Pearson correlation between sap flow and environmental factors at hour scales

指标	降水量	空气温度	空气相对湿度	光合有效辐射	蒸汽压亏缺	风速	土壤含水率	土壤温度
华山松	-0.068	0.318**	-0.374**	0.906**	0.293*	0.629**	-0.191	0.129
日本落叶松	-0.047	0.219	-0.402**	0.934**	0.178	0.677**	-0.264*	0.173

注：* * 表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)；* 表示在相关性达到显著水平($P<0.05$)，下同。 $n=72$ 。

大气辐射是调节叶片气孔变化、驱动树木蒸腾变化的重要因子。光合有效辐射和树干液流均有明显的昼夜变化，且具有极显著正相关关系(表 2)。以往研究表明，大部分树种的树干液流相对于太阳辐射均存在时滞效应，对华山松和日本落叶松的树干液流与光合有效辐射连续 3 d 日变化进行对比分析(图 3)，发现华山松树干液流相对于太阳辐射有 1~2 h 的时滞，而日本落叶松树干液流的时滞为 0.5~1 h。

为进一步说明环境因子对华山松和日本落叶松小时尺度液流密度的综合影响，以降水量(X_1)、空气温度(X_2)、空气相对湿度(X_3)、光合有效辐射(X_4)、蒸汽压亏缺(X_5)、风速(X_6)、土壤含水率

(X_7)、土壤温度(X_8)为自变量，与树干液流密度($Y, \text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)进行逐步回归分析，建立树干液流密度与环境因子的回归方程，确定影响华山松和日本落叶松小时尺度下树干液流密度的主要因子，以及各因子的影响程度大小。2 个树种的回归方程分别为：

$$Y_{\text{华山松}} = -0.088X_1 - 0.812X_2 - 0.287X_3 + 0.005X_4 + 4.330X_5 + 3.134X_6 + 35.716X_7 + 0.862X_8 - 22.383, F=76.12^{**}, R^2=0.906; \quad (4)$$

$$Y_{\text{日本落叶松}} = -0.345X_3 + 0.006X_4 - 0.358X_5 + 4.432X_6 + 0.554X_8 - 10.759, F=163.43^{**}, R^2=0.925. \quad (5)$$

经检验回归方程均达到极显著水平，说明此回归

方程可以较好地用于小时尺度下神农架华山松和日本落叶松树干液流密度的预测。由回归方程可知,8 个环境因子对华山松小时尺度下的树干液流均产生影响,而空气相对湿度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺、风速和土壤温度是影响日本落叶松小时尺度下树干液流的 5 个主要环境因子。进一步对方程各自变量

回归系数进行显著性检验(表 3),可知环境因子对华山松树干液流密度的影响大小依次为光合有效辐射>风速>土壤温度>土壤含水率>空气温度>空气相对湿度>降水量>蒸汽压亏缺;对日本落叶松树干液流密度的影响大小依次为光合有效辐射>风速>空气相对湿度>土壤温度>蒸汽压亏缺。

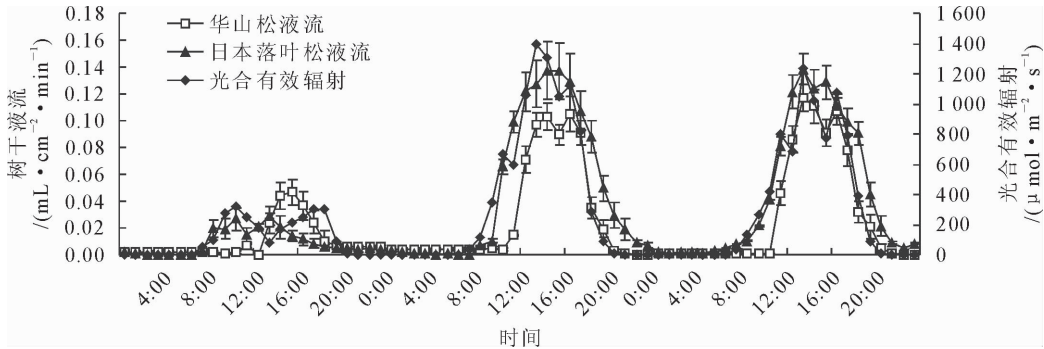


图 3 树干液流与太阳辐射日变化

Fig. 3 Diurnal variation of sap flow density and solar radiation intensity

表 3 方程回归系数显著性检验(小时尺度)

Table 3 Significant test of regression coefficients

变量	华山松			日本落叶松		
	回归系数	F	显著性	回归系数	F	显著性
降水量	−0.088	4.91	0.030 4	/	/	/
空气温度	−0.812	5.41	0.023 2	/	/	/
空气相对湿度	−0.287	4.99	0.029 0	−0.345	5.62	0.020 6
光合有效辐射	0.005	217.49	0.000 0	0.006	353.35	0.000 0
蒸汽压亏缺	4.330	3.91	0.052 3	−0.358	2.89	0.093 6
风速	3.134	15.84	0.000 2	4.432	24.79	0.000 0
土壤含水率	35.716	9.00	0.003 9	/	/	/
土壤温度	0.862	10.50	0.001 9	0.554	4.26	0.042 9

3.2.2 日尺度下树干液流与环境因子的关系 对 2 个树种日均液流密度与单个环境因子分别进行相关性分析(表 4)。从表 4 中可知,华山松和日本落叶松日均树干液流密度与空气温度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺、风速和土壤温度呈正相关,而与降水量、空气相对湿度和土壤含水率呈负相关,这与小时尺度下的规律一致。华山松日均液流密度与降水量、空气相对湿度、光合有效辐射及风速相关性达到

极显著水平($P<0.01$),与蒸汽压亏缺相关性达到显著水平($P<0.05$),而与空气温度、土壤含水率和土壤温度相关性不显著($P>0.05$);日本落叶松日均液流密度与降水量、空气温度、空气相对湿度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺及风速相关性达到极显著水平($P<0.01$),而与土壤含水率和土壤温度相关性不显著($P>0.05$)。

表 4 日尺度树干液流密度与环境因子的 Pearson 相关性

Table 4 Pearson correlation between sap flow and environmental factors at daily scales

指标	降水量	空气温度	空气相对湿度	光合有效辐射	蒸汽压亏缺	风速	土壤含水率	土壤温度
华山松	−0.379 **	0.237	−0.349 **	0.701 **	0.249 *	0.514 **	−0.143	0.127
日本落叶松	−0.482 **	0.335 **	−0.416 **	0.794 **	0.346 **	0.518 **	−0.207	0.179

注: $n=92$ 。

为进一步说明环境因子对华山松和日本落叶松日均液流密度的综合影响,同样以这 8 个环境因子为自变量,与树干液流密度($Y, \text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)进

行逐步回归分析,建立树干液流密度与环境因子的回归方程,确定影响华山松和日本落叶松日均液流密度的主要因子,以及各因子的影响程度大小。

2 个树种的回归方程分别为：

$$Y_{\text{华山松}} = -0.478X_1 - 0.334X_3 + 0.054X_4 + 20.946X_5 + 33.692X_6 + 196.775X_7 - 63.269, F = 17.11^{**}, R^2 = 0.635; \tag{6}$$

$$Y_{\text{日本落叶松}} = -17.312X_2 + 0.183X_4 + 154.318X_5 - 131.399X_7 + 35.131, F = 40.43^{**}, R^2 = 0.726. \tag{7}$$

经检验回归方程均达到极显著水平,说明此回归方程可以较好地用于日尺度下神农架华山松和日本落叶松树干液流密度的预测。由回归方程可知,影响华山松日均液流密度的 6 个主要环境因子是降

水量、空气相对湿度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺、风速和土壤含水率,而影响日本落叶松日均液流密度的 4 个主要环境因子是空气温度、光合有效辐射、蒸汽压亏缺和土壤含水率。进一步对方程各自变量回归系数进行显著性检验(表 5),可知环境因子对华山松日均液流密度的影响大小依次为土壤含水率>蒸汽压亏缺>光合有效辐射>降水量>空气相对湿度>风速;对日本落叶松树干液流密度的影响大小依次为光合有效辐射>蒸汽压亏缺>土壤含水率>空气温度。

表 5 方程回归系数显著性检验(日尺度)

Table 5 Significant test of regression coefficients

变量	华山松			日本落叶松		
	回归系数	F	显著性	回归系数	F	显著性
降水量	-0.478	5.37	0.024 0	/	/	/
空气温度	/	/	/	-17.312	4.71	0.033 9
空气相对湿度	-0.334	3.43	0.068 9	/	/	/
光合有效辐射	0.054	7.18	0.009 5	0.183	130.57	0.000 0
蒸汽压亏缺	20.946	13.68	0.000 5	154.318	5.87	0.018 3
风速	33.692	3.17	0.080 4	/	/	/
土壤含水率	196.775	16.29	0.000 2	-131.399	5.80	0.019 0
土壤温度	/	/	/	/	/	/

4 结论与讨论

4.1 结论

神农架华山松和日本落叶松 2 个针叶树种在生长旺季(6—8 月)月树干液流密度分别为 1 026.15 mL·cm⁻² 和 1 824.80 mL·cm⁻²。2 个树种北侧树干液流密度略>南侧,其中华山松北侧比南侧高 6.20%,日本落叶松北侧比南侧高 7.80%。2 个树种在雨天树干液流密度均显著<晴天,在晴天树干液流密度均表现为“昼高夜低”的单峰曲线,而在雨天树干液流密度全天变化不明显。华山松和日本落叶松树干液流密度均以白天为主,夜间树干液流密度分别占整日液流密度的 5.45%和 8.98%。不同时间尺度下,影响树干液流的环境因子发生显著变化。在较小时间尺度上,液流密度受较多环境因子影响;在较大时间尺度上,通过对少量环境因子的监测便能推算树木耗水量。

4.2 讨论

不同树种在相近环境条件下树干液流密度也存在较大差异,这主要是由于植物本身的生理生化特性不同,使得不同树种在水分消耗能力上有所差异^[17]。神农架华山松和日本落叶松 2 个树种树干液流日变化过程大致相似,均有明显的昼夜变化规律,树干液流密度均以白天为主,观测期夜间液流密

度占整日液流密度的比例均<10%,这与池波等^[9]和李浩等^[18]研究结果一致。夜间树干液流虽然很小,但仍然存在,主要是由于根压的作用,水分以主动吸收方式进入树体,补充白天因蒸腾损失的大量水分,维持植物自身生长需要与生理活动^[19]。2 个树种的液流密度日变化规律整体表现为早上启动、中午前后达到高峰、夜间进入低谷,这与以往大多研究结果相似^[20-21],但王华田等^[22]认为在严重干旱条件下,树干液流会出现傍晚启动、凌晨达到峰值、下午进入低谷的现象,并且随着干旱胁迫程度加强,树干液流峰值出现时间提前,峰值逐渐减小,因此特殊环境条件下的树干液流日变化规律值得进一步研究。

不同天气条件下的树干液流密度与日变化规律差异明显。华山松和日本落叶松晴天液流密度分别为雨天的 11.6 倍和 4.2 倍,与晴天相比,雨天液流密度显著降低。以往研究结果表明树干液流大小表现为晴天>雨天^[18,23],这主要是因为雨天空气相对湿度大,叶片内外的蒸汽压差较小,且降雨可以导致叶片气孔关闭,因而对树木蒸腾有较大的抑制作用。大多研究认为树干液流在晴天呈单峰型,但也有研究发现呈双峰型^[24];在雨天树干液流日变化规律不明显,呈无规律振动。本研究中,华山松和日本落叶松在晴天树干液流日变化均呈单峰型,但日本落叶松较华山松树干液流启动时间和达到峰值时间早,

且维持较高水平的时间长;在雨天 2 个树种树干液流日变化规律均不明显,且 1 d 中降雨时段对树干液流的日变化存在影响。

树干液流的影响因素很多,主要包括树木自身生物学特性、土壤供水水平以及气象因素 3 个方面,生物学特性决定树干液流的潜在能力,土壤供水状况决定树干液流的总体水平,气象因素决定树干液流的瞬间变化^[21,25]。以往研究表明,由于地理位置、环境因子、时间尺度以及季节等因子的不同,即使处于同一生境中的同一物种,各环境因子对树干液流的影响差异也很大。如姚依强等^[26]研究认为,在小时尺度和日尺度上,华北落叶松树干液流的主要影响因子是蒸汽压亏缺、太阳辐射强度、土壤温度和空气相对湿度;在月尺度上,其主要影响因子是蒸汽压亏缺。王文杰等^[14]研究认为,在小时尺度上,兴安落叶松树干液流主要影响因子在不同季节不同,最主要因子是光照和空气湿度;在日尺度上,其主要影响因子是土壤温度、光照和空气温度;在月尺度上,土壤温度和土壤湿度是主要影响因素。本研究中华山松和日本落叶松所处生境基本相同,但无论是同一树种在不同的时间尺度下,还是 2 个树种在同一时间尺度下,影响树干液流的主要环境因子都不相同,而且与前人研究结果差异也很大,证实了树木蒸腾耗水影响和调控机制的复杂性和相对性^[25]。

在分析树干液流与环境因子关系的基础上,构建树干液流与环境因子的多元回归模型,可以通过环境指示对单木耗水的预测,并进一步实现由单木耗水至群体蒸腾耗水的尺度扩展^[22,25]。王文杰等^[14]、张静等^[27]、吴鹏等^[28]研究认为随着时间尺度增大,与树干液流显著相关的环境因子有减少趋势,且回归方程相关系数随着时间尺度的增大而增大。本研究中华山松和日本落叶松树干液流在日尺度下的影响因子少于小时尺度下的影响因子数量,这与前人结论一致;但是日尺度下的回归方程相关系数低于小时尺度下的相关系数,与前人结论不一致。因此,要构建一套科学的树木蒸腾耗水预测模型和调控机制,需要考虑在不同时间尺度上对环境因子和树干液流的关系进行模拟。

参考文献:

[1] 周晓峰. 中国森林与生态环境[M]. 北京:中国林业出版社, 1999.

[2] KUMAGAI T, SAITOH T M, SATO Y, *et al.* Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a low land mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287: 237-251.

[3] 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.

[4] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.

[5] 张雷, 孙鹏森, 刘世荣. 树干液流对环境变化响应研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5600-5610.

[6] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 98-105.

ZHAO C Y, SI J H, F Q, *et al.* Stem sap flow research: progress and prospect[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 98-105. (in Chinese)

[7] DU S, WANG Y L, KUME T, *et al.* Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 1-10.

[8] WANG H, WANG X K, ZHAO P, *et al.* Transpiration rates of urban trees, *Aesculus chinensis* [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24: 1278-1287.

[9] 池波, 蔡体久, 满秀玲, 等. 大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 21-26.

CHI B, CAI T J, MAN X L, *et al.* Effects of influencing factors on stem sap flow in *Larix gmelinii* in northern Da Hinggan Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 21-26. (in Chinese)

[10] 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 Y F, YU P T, LIU X D, *et al.* Variation in sap flow density among levels of tree dominance in *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3106-3114. (in Chinese)

[11] 殷秀辉, 程飞, 张硕新. 油松树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 24-29.

YIN X H, CHENG F, ZHANG S X. Variation of stem sap flow of *Pinus tabulaeformis* and its impact factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 24-29. (in Chinese)

[12] 刘鑫, 张金池, 王春林, 等. 长三角地区典型树种杉木液流速率变化特征[J]. 南京林业大学学报, 2014, 38(2): 86-92.

LIU X, ZHANG J C, WANG C L, *et al.* The variation characteristics of sap flow of Chinese fir in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2014, 38(2): 86-92. (in Chinese)

[13] 涂洁, 胡良, 刘琪琛, 等. 江西千烟洲杉木生长期树干液流特征及影响因子[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(2): 257-263.

[14] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 等. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 77-85.

WANG W J, SUN W, QIU L, *et al.* Relations between stem sap flow density of *Larix gmelinii* and environmental factors under different temporal scale [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(1): 77-85. (in Chinese)

[15] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 39(4): 309-320.

[16] 孙英君, 王劲峰. 一种空气饱和差区域分布的推算方法[J]. 国

土资源遥感,2004,16(1):23-26.

SUN Y J,WANG J F. A method for computation of regional aerial saturation deficiency[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2004,16(1):23-26. (in Chinese)

[17] GONG X Y,CHEN Q,LIN S,*et al.* Tradeoffs between nitrogen-and water-use efficiency in dominant species of the semi-arid stepper of Inner Mongolia[J]. Plant and Soil,2011,340(1):227-238.

[18] 李浩,任启文,马香玲,等. 冀西北山地油松和落叶松树干液流昼夜变化特征及其与环境因子的关系[J]. 东北林业大学学报,2018,46(7):18-22.

[19] 王文,朱烨,诸葛绪霞,等. 尾巨桉树干液流特征及其影响因子分析[J]. 水土保持通报,2013,33(3):159-164.

[20] 买尔当·克依木,玉米提·哈力克,古丽比亚·乌买尔,等. 胡杨树干液流日变化及其与气象因素的相关关系[J]. 冰川冻土,2018,40(1):166-175.

[21] 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 J,CHEN Y M,TANG Y K,*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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(3):763-771. (in Chinese)

[22] 王华田,马履一. 利用热扩散式边材液流探针(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.

[23] 绪海红,郭向红,仇群伊. 不同天气条件下苹果树液流日变化规律研究[J]. 中国农学通报,2015,31(22):120-124.

XU H H,GUO X H, QIU Q Y. Research on daily variation of sap flow of apple trees under different weather conditions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2015,31(22):120-124. (in Chinese)

[24] 朱亚,吕光辉,胡颖颖,等. 艾比湖自然保护区胡杨树干液流特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(11):69-73.

[25] 李浩,胡顺军,朱海,等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. 生态学报,2017,37(21):7187-7196.

[26] 姚依强,陈珂,王彦辉,等. 华北落叶松树干液流速率主要影响因子及关系的时间尺度变化[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):155-161.

[27] 张静,王力,韩雪,等. 不同尺度下黄土塬区 19 年生苹果树干液流速率与环境因子的关系[J]. 中国农业科学,2016,49(13):2583-2592.

[28] 吴鹏,杨文斌,崔迎春,等. 喀斯特区天峨槭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.* Characteristics of sap flow and correlation analysis with environmental factors of *Acer wangchii* in the Karst Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(22):7552-7567. (in Chinese)

(上接第 20 页)

[7] DU J H,YAN P,E Y H. Distribution patterns and characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkha at its different evolvment stages in the Minqin County of Gansu Province [J]. Chinese Journal of Ecology,2007,26(8):1165-1170.

[8] 杨金玲,李德成,张甘霖,等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报,2008,45(3):413-419.

[9] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2010.

[10] 伏耀龙,张兴昌,王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报,2012,28(3):120-125.

FU Y L,ZHANG X C,WANG J G. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,2(3):120-125. (in Chinese)

[11] 管孝艳,杨培岭,吕烨. 基于多重分形的土壤颗粒粒径分布于土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报,2011,42(3):44-50.

[12] 郑子成,李卫,李廷轩,等. 基于分形理论的设施土壤水分特征曲线研究[J]. 农业机械学报,2012,43(5):49-54.

[13] TYLER S W,WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Sci. SOC. A. M. ,1992,56:362-369.

[14] WANG D,FU B J,ZHAO W W,*et al.* Multifracttal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau,China [J]. Catena,2008,72:39-36.

[15] SU Y Z,ZHAO H L,ZHANG W Z,*et al.* Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification [J]. Geoderma,2004,122(1):43-49.

[16] 高亚军. 陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.

[17] 邹诚,徐福利,闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J]. 中国农学通报,2008,24(12):424-427.

ZOU C,XU F L,YAN Y D. The analysis of soil mechanical composition and available nutrient under different Land uses patterns in the Loess Hilly Gully Region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(12):424-427. (in Chinese)

[18] LANGFORD R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico,U. S. A [J]. Journal of Arid Environment, 2000,46,25-41.

[19] 马成忠,邓继峰,丁国栋,等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):230-235.

MA C Z,DENG J F,DING G D,*et al.* Effects of different planting densities of mongolian pine oon the soil particle size characteristics in southern Mu Us Desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(1):230-235. (in Chinese)