

北京 4 种绿化树种树干液流特性对比分析

李少宁^{1,2}, 鲁绍伟^{1,2*}, 赵云阁^{1,2}, 陶雪莹³, 赵娜^{1,2}, 徐晓天^{1,2}

(1.北京市林业果树科学研究所,北京 100093;2.北京燕山森林生态系统定位观测研究站,北京 100093;3.沈阳农业大学,辽宁沈阳 110866)

摘要 选取北京地区 4 种常见绿化树种,利用 TDP 液流计测定其树干液流,分析不同树种液流特性差异,同时应用 Meter 全自动气象站对气象数据进行实时监测,探讨外界环境因素对树干液流的影响。结果表明:各树种液流日变化呈双峰或单峰曲线,昼夜变化规律明显。启动时间基本在 6:00—7:00,且液流密度日均值大小排序为国槐[$1.62 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 侧柏[$1.51 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 栾树[$0.80 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 油松[$0.58 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$],且各树种夜间液流均为夏季小于秋季;各树种的液流与不同层次土壤温度相关性多为不显著($P > 0.05$),与大气温度呈极显著正相关($P < 0.01$),而与大气相对湿度则呈显著($P < 0.01$)负相关,且液流变化与各环境因子均存在一定的时滞效应。研究结果可为水资源管理以及城市绿地规划提供数据支撑。

关键词 绿化树种;液流密度;环境因子

中图分类号 S718.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)20-0111-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.20.030



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Comparative Analysis of Four Greening Tree Species' Sap Flow Characteristics in Beijing

LI Shao-ning^{1,2}, LU Shao-wei^{1,2}, ZHAO Yun-ge^{1,2} et al (1. Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences, Beijing 100093; 2. Yanshan Forest Ecosystem Research Station of Beijing, Beijing 100093)

Abstract The study analyzed the differences of the sap flow characteristics for four common greening tree species to explore the influence of the external environment factors on the stem sap flow in Beijing, to measure its stem sap flow by using TDP sap flow meter. The daily variation of various tree species' sap flow variation showed bimodal or unimodal curve. And they changed clearly day and night. The sap flow of tree species started about 6:00-7:00, and the sap flow density was *Sophora japonica* [$1.62 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > *Platyclodus orientalis* [$1.51 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > *Koelreuteria paniculata* [$0.80 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > *Pinus tabulaeformis* [$0.58 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] on a daily average basis. Tree species' sap flow was in summer less than autumn during the night. And the sap flow was not significantly correlation with different levels, soil temperature ($P > 0.05$), and was significantly positive correlation with atmospheric temperature ($P < 0.01$), whereas was significantly negative correlation with atmospheric relative humidity ($P < 0.01$). The change of sap flow had a certain time lag effect with environmental factors. The result could provide data support for management of water resources and urban green space planning.

Key words Greening tree species; Sap flow density; Environmental factors

森林生态系统在调节水分循环和小气候方面具有重要功能,其基础之一是树木个体对水分运转的影响。树木在发挥巨大生态效益的同时,维持自身生长发育需要消耗大量水分^[1]。估算林木蒸腾耗水量对于水资源合理利用、合理分配以及绿地配置具有积极的作用^[2]。在当今水资源匮乏日益严重的大前提下,研究树木耗水特性,从而筛选出抗旱、低耗水的树种具有十分重要的意义。

由于树干边材液流速率及液流量是制约树木蒸腾耗水的重要因素,因而对树干液流进行标记并测定其流动速率就可以大致估算树冠蒸腾耗水量^[3-5]。热扩散技术可以对树干液流连续自动监测,时间分辨率高,对植物的正常生理活动影响小、野外操作方便^[6],近年在研究林木耗水方面得以广泛应用^[7]。利用热扩散技术测定林木蒸腾耗水的相关研究已较为成熟,但大多研究都只针对单一树种进行测定^[8-12],不能很好地对比不同树种耗水特性的差异。该研究选取北京地区 4 种常见园林绿化树种,利用热扩散法测定其液流特征,对比分析不同树种耗水特性差异,探讨树干液流日变化特征及其影响因素,为合理选择园林绿化树种、建立合理的

城市绿地灌溉制度以及提高城市绿地水分利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验区位于北京市顺义区高丽营镇,属于温带大陆性气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春季雨量少,蒸发量大。年均降水量 568.9 mm,年内的雨量分布极不均匀,7—9 月降水占全年降水的 60%~70%,土壤为砂土。光照时间较长,全年光照时间达 2 769.3 h。风向以北风、西北风为主,冬、春两季风多、风速大。乔木主要包括油松、侧柏、银杏、国槐、刺槐、柳树、杨树、栾树、苹果、李子、桃等;草本主要包括附地菜、灰灰菜等。

1.2 样木选择 在样地每木检尺的基础上,各树种分别选择 3 棵标准杨树(生长状况良好、环境一致、大小差别不大),应用热扩散式液流测定系统进行连续测定,测定时间为 2016 年 6—10 月,各树种具体情况见表 1。

表 1 各树种基本情况

Table 1 The basic situation of tree species

树种 Tree species	林龄 Age a	胸径 DBH cm	树高 Tree height m	边材面积 Sapwood area// cm^2
侧柏 <i>Platyclodus orientalis</i>	4	10.5	1.7	43.31
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	4	9.8	1.7	50.14
国槐 <i>Sophora japonica</i>	4	8.9	2.8	53.91
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	4	8.3	2.7	50.78

基金项目 北京市农林科学院科技创新能力建设资助项目(KJXC20200207, KJXC20190301, KJXC20190403, KJXC20200601)。

作者简介 李少宁(1975—),男,河北滦州人,副研究员,博士,从事城市森林生态功能研究。*通信作者,研究员,博士,从事水土保持、森林生态服务功能研究。

收稿日期 2020-03-11

1.3 测定方法 树干边材液流速率用热扩散式边材液流探针 TDP(thermal dissipation probe)测定。TDP 探头包括 2 个探针,将 2 个探针插入树干,上方探针持续加热,下方探针为环境探针,通过测量这 2 个固定距离的探针的温度之差,用 Granier 等^[13]经验公式计算树干液流密度:

$$J_s = 0.0119 \times [(dT_m - dT)/dT]^{1.231} \quad (1)$$

式中, J_s 为液流密度 [$\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]; dT_m 为分析日 24 h 内上下探针的最大温度差 ($^{\circ}\text{C}$); dT 为某时刻瞬时温差值 ($^{\circ}\text{C}$),即当时测定的温差值。

1.4 环境因子测定 试验林内设有 Meter 全自动气象站,用于实时监测空气温度、湿度、风速、风向、光合有效辐射、土壤温湿度等因素,所有传感器均与数据采集器相连,数据采集时间间隔为 1 h。

2 结果与分析

2.1 不同绿化树种连日液流变化 4 种绿化树种液流日变化特征如图 1 所示,在图 1a 中,侧柏和油松均为针叶树,但其日变化特征明显存在差异。其中,侧柏呈双峰型变化,2 个峰值分别出现在 08:00 和 14:30 左右,10:00—11:00 液流密度出现低谷值。而油松日变化呈单峰型,形似“拱桥”,高峰

较为圆滑。由此可见,侧柏液流呈现出明显的“午休”现象,而油松液流却没有“午休”现象。说明侧柏在中午出现高温时,叶片气孔开闭比油松易受到高温胁迫。

在图 1b 中,国槐和栎树作为阔叶树,其液流日变化较为相似,2 个树种液流均存在明显的“午休”现象,但其日变化曲线与侧柏的典型双峰型具有一定差别。国槐和栎树的日变化曲线在低谷后液流有所上升,之后保持相对平稳的变化,无明显高峰。

从启动时间来看,侧柏和油松的启动时间较为相近,均在 05:20 左右,而国槐和栎树则较晚,在 06:10 左右。这意味着针叶树的启动时间早于阔叶树。

综上所述,不同树种液流日变化明显不同,侧柏呈双峰型,油松呈单峰型,国槐和栎树大致呈单峰,却具有明显的“午休”。但各树种均具有明显的昼夜节律变化,即白天液流密度高,晚上液流密度低,接近 0。这一现象的产生主要与外界环境中温度和太阳辐射等热因子有关,尤其是太阳辐射,当太阳辐射增大,林木蒸腾效率加快,导致液流密度随之增加,当日落后,太阳辐射变为 0,林木蒸腾因叶片气孔的大量关闭,蒸腾效率骤然下降。

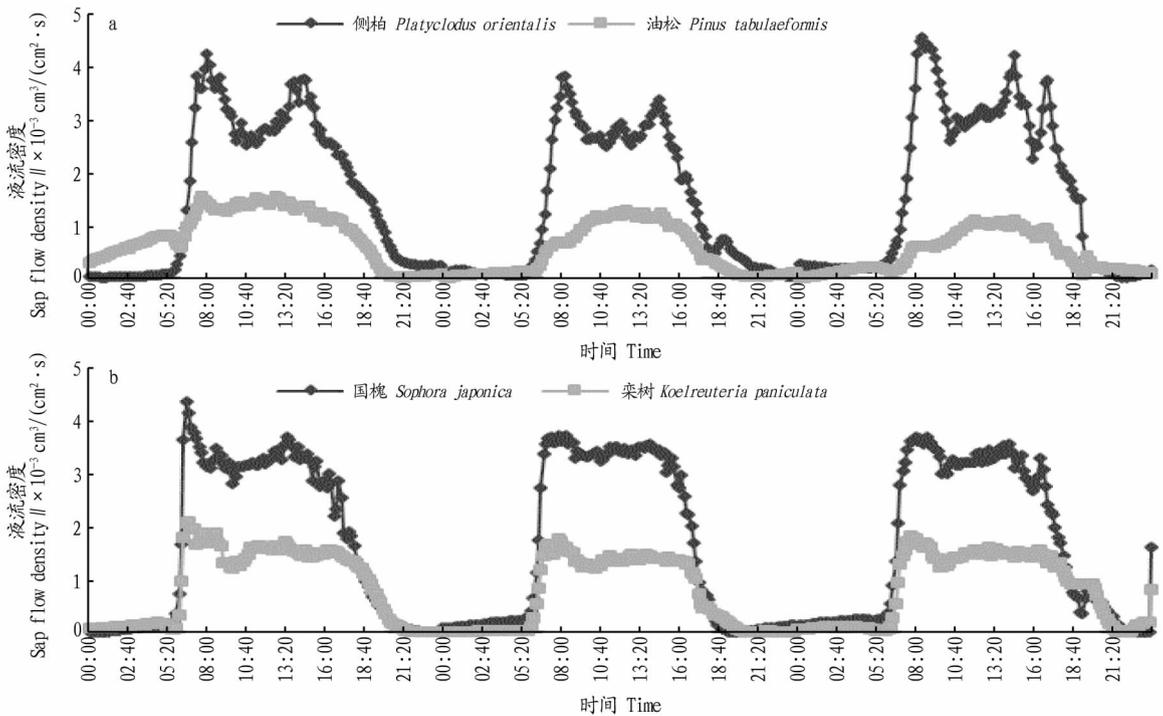


图 1 不同树种连日液流密度变化

Fig.1 Variation characteristics of sap flow density in different tree species

2.2 夜间液流在夏、秋季的变化 根据北京市当年的气候状况,并结合各树种的生长季情况,以降雨量最大的 7 月中旬代表夏季,以 10 月中旬代表秋季。如图 2 所示,7 月和 10 月夜间液流变化的规律为 7 月的 18:00—21:00,各树种液流变化幅度较大,介于 $0.02 \times 10^{-3} \sim 1.50 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。进入后半夜直到第 2 天 05:00,液流密度较为平稳,基本维持在同一水平,且密度极小。各树种夜间液流的整体变化呈先下降后平稳的趋势;10 月则是从 18:00 开始到第二天 02:00,基本变化幅度

较小,且液流密度较小,液流值介于 $0 \sim 0.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,在第 2 天 02:30—03:00 时液流密度开始出现较大波动,呈逐渐上升的趋势,整体的变化刚好与 7 月相反,呈先平稳再上升的趋势。这说明各树种在夏季和秋季夜间液流维持平稳状态的时间虽然相近,几乎为 9 h,但时间段不同,夏季进入平稳液流的时间较晚,而秋季则早于夏季 2~3 h。

对比夏、秋季液流密度值发现,各树种在夏季(7 月)的夜间液流值要小于秋季(10 月)。以油松为例,夏季液流密度为

$0.20 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 秋季则为 $0.51 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。这是由于夜间液流尤其是观察到的平稳时段的液流主要是皮孔蒸腾和成熟叶片的角质层蒸腾所生产的。说明夏季时树木的皮孔蒸腾和成熟叶片角质层蒸腾比秋季时较弱。对比夏、秋季各树种夜间液流密度大小得到:夏季(7月)时,各树种的夜间液流密度均值大小为国槐 [$0.43 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 侧柏 [$0.43 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 栾树 [$0.41 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 油松 [$0.23 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]; 秋季(10月)时,各树种夜间液流密度大小则为侧柏 [$0.73 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 国槐 [$0.52 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 油松 [$0.50 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] > 栾树 [$0.41 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]。

2.3 土壤温度对树干液流的影响 由于试验经过人工控制,土壤始终保持水分充足,故没有对土壤湿度的影响进行分析。图3为不同层次土壤温度的日变化情况,由图可知,各层次土壤中0~10 cm(表层土壤)的土壤温度日变化最为剧烈,介于22~30 °C,其次是>10~20 cm的土壤温度变化,在22~25 °C,其余层次土壤温度变化幅度则明显较小。这主要是因为表层土壤极易受到外界环境因素影响,所以相比深层次的土壤其变化较为剧烈。且对比各层次土壤温度变化的转折点,发现>0~10 cm与其他各层存在明显的时滞效应。如>10~20 cm的土壤温度高峰值时间为16:00,明显比0~10 cm晚2 h。

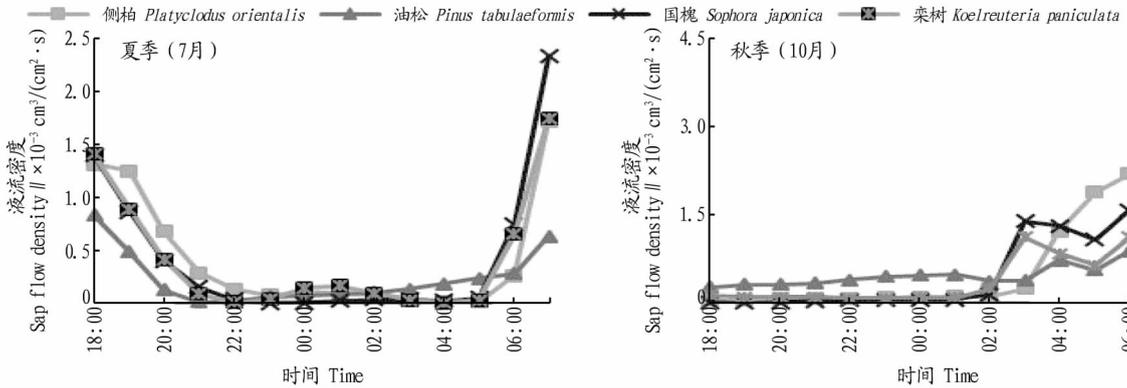


图2 夏秋两季各树种的夜间液流密度变化

Fig.2 Characteristics of nighttime sap flow density in summer and autumn

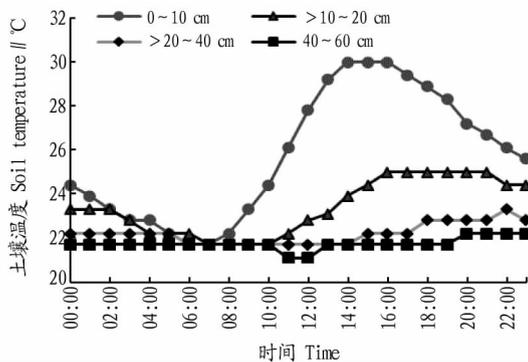


图3 不同层次土壤温度日变化

Fig.3 Diurnal variation of soil temperature at different levels

由表2可以看出,各树种与不同层次土壤温度的相关性各不相同。其中,侧柏液流与0~10 cm层的土壤温度(表层土壤)和>40~60 cm层的土壤温度均无显著相关性,但与

>10~20 cm (Pearson 系数为-0.290)和>20~40 cm (Pearson 系数为0.293) 2个层次土壤温度的相关性为显著负相关 ($P < 0.05$);油松和国槐的液流与各层次土壤温度的关系与侧柏相同, Pearson 相关系数见表2;栾树则与各层土壤温度均无显著相关。

由此可见,从不同层次土壤温度角度比较,大部分树种液流与0~10 cm(表层土壤)土壤温度呈正相关,而与其他层次的土壤温度均为负相关,且相关性较为显著 ($P < 0.05$)的基本为10~40 cm的土壤温度。这是由于0~10 cm的土壤虽然容易受外界环境影响,但林木位于这部分土壤的部位多是树木基部树干,并不是树木根系,而液流的产生则主要与树木吸收和运输水分有关,所以根系所处的位置会受到其周围土壤温度的影响,而试验所种植的树木根系则刚好位于10~40 cm,因此此处的土壤温度比其他深度的土壤温度更容易对树木液流产生影响。

表2 各树种液流与不同层次土壤温度的相关性

Table 2 Correlation between sap flow and soil temperature at different levels

树种 Species	0~10 cm		>10~20 cm		>20~40 cm		>40~60 cm	
	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P
侧柏 <i>Platyclodus orientalis</i>	-0.024	0.869	-0.290*	0.046	-0.293*	0.043	-0.174	0.236
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	-0.046	0.755	-0.302*	0.037	-0.274*	0.049	-0.225	0.124
国槐 <i>Sophora japonica</i>	-0.055	0.710	-0.304*	0.036	-0.288*	0.047	-0.194	0.187
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	0.023	0.875	-0.236	0.106	-0.244	0.095	-0.228	0.120

注: *表示在0.05水平上显著

Note: * indicated significant at the 0.05 level

不同树种的对比结果表明,侧柏和油松2种针叶树与土壤温度相关性大于国槐和栎树。这说明针叶树的液流值比阔叶树更易受到土壤温度变化的影响。但整体上,在土壤水分饱和和状态下,土壤温度对树木液流的影响并不显著($P>0.05$)。

2.4 大气温度对各树种液流密度的影响 大气温、湿度是环境中的2个重要组成因素,同时,对林木耗水也具有一定程度的影响。由于大气中的温度并不是固定不变的,而是随着一天中时间的推移具有一定的变化规律,因此在试验期随机选取1d(晴朗,天气状况稳定)的大气温度和各树种液流密度的数据(由于气象数据采集频率为1h1次,因此此处液流密度单位换算为h),得到各树种液流密度与大气温度的日变化(图4)。

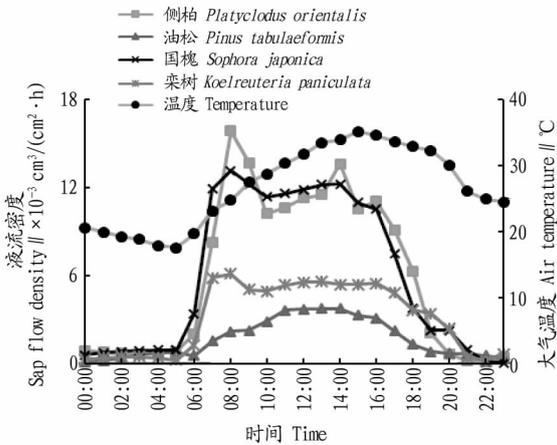
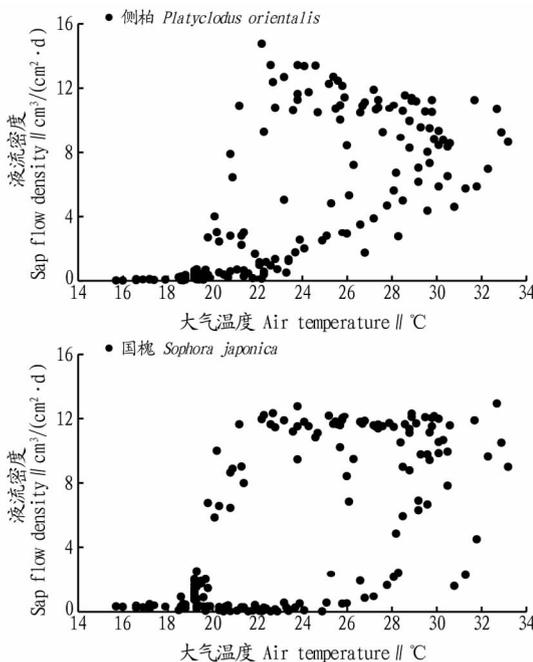


图4 各树种液流密度与大气温度日变化曲线

Fig.4 Diurnal variation of sap flow density and atmospheric temperature

各树种液流在00:00—05:00的变化与大气温度变化存在明显不同,即液流在00:00—05:00时基本呈一条直线,介



于 $0.40\sim 3.10\text{ cm}^3/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$,而大气温度此时段的变化则是下降趋势,由 $20.5\text{ }^\circ\text{C}$ 下降至 $17.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。05:00以后液流开始启动,在08:00—17:00处于一天中的最高水平,整体波动不大,而大气温度则是从08:00的 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐上升至15:00的 $35\text{ }^\circ\text{C}$,之后再从最高点($35\text{ }^\circ\text{C}$)逐渐下降,至21:00开始变化幅度减弱,甚至不变,维持在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。由此可见,液流变化并非完全与大气温度的变化相同,且液流变化与温度变化存在明显时滞差异。如油松变化与温度变化极为相似,但油松在14:00达到最高值 $3.70\text{ cm}^3/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$,之后开始逐渐下降,早于大气温度的15:00;国槐液流下降时间(14:00)早于大气温度1h;栎树则是在07:00—18:00时液流较高,为 $4.83\sim 6.60\text{ cm}^3/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$,18:00以后开始下降,晚于大气温度3h。

综合各树种的液流密度与大气温度变化,反映出各树种液流密度变化与大气温度具有一定关系,但其变化规律并不完全相同。通过相关性分析得到:各树种液流与大气温度均呈极显著($P<0.01$)相关性,其中侧柏、油松、国槐、栎树的 Pearson 系数依次为0.658、0.492、0.589和0.649,且大气温度对液流密度的影响未出现明显的针、阔叶差异。

表3 各树种液流密度与大气温度的相关性

Table 3 Correlation between sap flow density and air temperature

树种 Species	Pearson	P
侧柏 <i>Platyclodus orientalis</i>	0.658**	0
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.492**	0
国槐 <i>Sophora japonica</i>	0.589**	0
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	0.649**	0

注: *表示在0.05水平上显著; **表示在0.01水平上显著

Note: * indicated significant at the 0.05 level; ** indicated significant at the 0.01 level

将液流密度数据与大气温度数据进行回归拟合(图5),同时根据决定系数 R^2 筛选出拟合度较高的拟合模型(液流

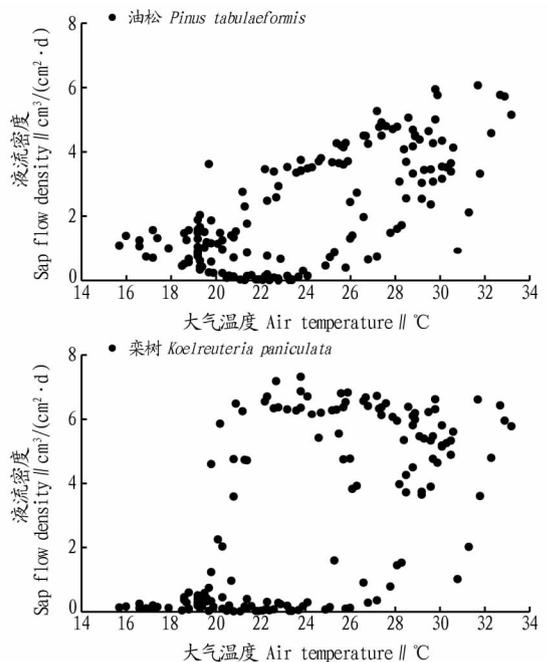


图5 各树种液流密度对大气温度的响应

Fig.5 Response of sap flow density of different tree species to atmospheric temperature

表 4 各树种液流密度与大气温度之间的回归分析

Table 4 Regression analysis between sap flow density of different tree species and air temperature

树种 Species	方程 Equation	R^2	P
侧柏 <i>Platyclodus orientalis</i>	$y = -0.007x^3 + 0.463x^2 - 8.906x + 51.567$	0.528	<0.001
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	$y = -0.003x^3 + 0.2x^2 - 4.813x + 37.799$	0.519	<0.001
国槐 <i>Sophora japonica</i>	$y = -0.005x^3 + 0.352x^2 - 6.904x + 41.277$	0.418	<0.001
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	$y = -0.002x^3 + 0.146x^2 - 2.615x + 13.221$	0.415	<0.001

密度为因变量,大气温度为自变量),并对其进行检验(表 4),4 种绿化树种的液流密度与大气温度最优拟合方程均为三次曲线方程。且由各树种拟合后的决定系数 R^2 可以看出,各树种的液流密度与大气温度的拟合均不高, R^2 最高不超过 0.6。

2.5 大气相对湿度对各树种液流密度的影响 由树种液流密度与大气相对湿度变化曲线可以看出(图 6),00:00—05:00,大气相对湿度呈上升趋势,由 84% 逐渐上升到 92%,而各树种液流密度保持小幅度变化。如侧柏介于 0.02~0.30 $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,国槐介于 0.08~0.67 $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,栾树介于 0.32~0.43 $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。由此可见,此时段各树种液流虽有所波动,但变化幅度较小,且没有明显的逐渐上升趋势。从 05:00—15:00 大气相对湿度开始呈持续下降的趋势,由 92% 逐渐下降至最低点 25%,此时,多数树种液流则在 07:00—08:00 达到较大值后,便不再有大幅度下降或上升趋势。如栾树保持在 4.74~4.99 $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,只有油松在此时段的变化趋势与大气相对湿度相反,呈逐渐上升的趋势,变化为 1.20~3.70 $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。同时,液流与大气相对湿度同样存在时滞性,如油松最高值的时间与大气相对湿度最低值的时间相差 1 h。

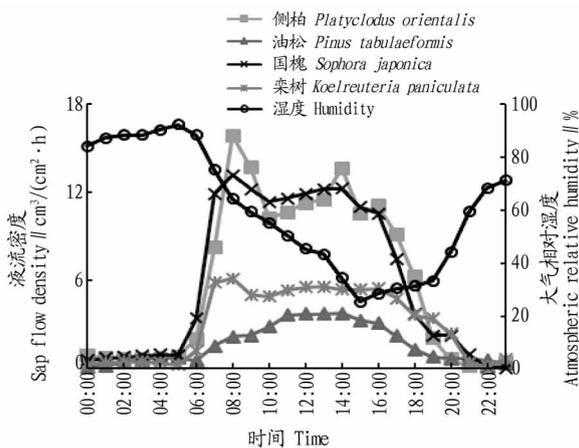


图 6 各树种液流密度与相对湿度的日变化

Fig.6 Variation of sap flow density of different tree species and relative humidity

对各树种的液流密度与大气相对湿度进行相关性分析表明(表 5),液流密度与大气相对湿度均呈显著负相关。其中,刺槐和杨树的显著性尤其高,Pearson 系数为 0.8 以上,且 $P=0.000<0.01$ 。其余树种的显著性也分别在 0.05 水平和 0.01 水平呈显著相关。且大气相对湿度对针叶树和阔叶树的响应在相关性上没有明显区别。

表 5 各树种液流密度与大气相对湿度的相关性

Table 5 Correlation between sap flow density of different tree species and relative humidity

树种 Species	Pearson	P
侧柏 <i>Platyclodus orientalis</i>	-0.602 *	0.002
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	-0.303 *	0.015
国槐 <i>Sophora japonica</i>	-0.495 *	0.014
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	-0.588 **	0.003

注: * 表示在 0.05 水平显著; ** 表示在 0.01 水平显著

Note: * indicated significant at the 0.05 level; ** indicated significant at the 0.01 level

由上述各树种液流密度与大气相对湿度的变化分析可知:①树种液流密度与大气相对湿度均具有显著负相关性($P<0.05$);②各树种的液流密度与大气相对湿度的变化存在着明显的时滞现象,但滞后时间因树种的不同而具有差异。这些均说明大气相对湿度对树种的液流密度变化具有一定程度的影响。

3 讨论

3.1 不同树种液流特性分析 树干液流的变化规律是内因和外因共同作用的结果^[14]。各树种自身生长特性的差异导致其液流密度有明显差异,但树木液流密度变化规律是基本一致的,均呈明显昼夜变化,曲线多为单峰曲线,这与刘春鹏等^[15]、于红博等^[16]研究得到的结论是一致的。夜间没有光照,树木蒸腾作用较弱,清晨随着太阳的出现,树木开始进行光合、蒸腾等一系列生理活动,从而导致液流启动,液流密度急剧上升。

从树木液流变化的启动时间对比来看,该研究中各树种的启动时间均表现为夏季早于秋季近 1 h,这与徐利岗等^[17]的研究结果一致。这主要是因为夏季大气温度和太阳辐射相比秋季要高,使树木叶片气孔张开较早,光合和蒸腾随之增强,造成此时的液流相对启动较早。而典型天气下,该研究中得到的结果为雨天的启动时间晚于晴天和阴天。

液流密度的变化规律受到其自身生长特性和环境因子的双重影响,环境因子对液流密度的影响是一种制约,某一时刻液流密度的高低与相应的环境因子是不可分割的。因此,该研究针对外界环境因素(大气温、湿度和土壤温度)对树干液流的影响作出具体分析。

3.2 外界环境因素对树干液流的影响 树木液流和蒸腾耗水受诸多因素的影响。多数研究结果表明,环境因子(如温度、湿度、太阳辐射以及风速等)对其影响尤为显著^[18-20]。该研究中,通过结合同步观测的气象数据和土壤因子的日动态变化,掌握各树种液流规律与环境因子之间的变化规律。结

果显示,土壤因子中的土壤温度与树木液流的变化相关性并非均显著,多数树种与土壤温度呈不显著相关($P>0.05$),且相关性分析还反映出土壤温度与树木液流基本均呈负相关性。这说明土壤温度虽不是树木液流的主要影响因素,但依旧对其有一定的影响力。这一结果与徐军亮等^[21]的研究结果相似。而土壤因子中的另一因子——土壤水分同样与液流存在着密不可分的关系,但到底存在着怎样的量化关系还需进一步研究,这也是该研究的欠缺点。气象因子虽是直接影响蒸腾作用的介质^[22],但其对树木液流的影响却并非具有同步性。该研究结果显示气象因子中的大气温度和相对湿度因子均与各树种液流变化存在显著的时滞效应,且因树种不同,时滞效应的差异时间明显不同,这与王华等^[23]的研究结果相似。产生此现象的原因是树木水分传输过程中存在液流再分配的现象^[24],而液流传输主要是通过边材来进行,所以不同树木的边材导水效率成为这种时滞效应差异的主要原因。通过相关性分析得到,日尺度下,各树种液流均与大气温度呈极显著($P<0.01$)正相关,而与大气相对湿度呈显著负相关($P<0.05$, Pearson 系数为负数),这与涂杰等^[25]得到的生长季内液流与平均温度呈显著正相关,与湿度呈显著负相关的结果一致。

4 结论

各树种液流密度的连日变化规律基本呈单峰或双峰曲线,且单峰曲线因宽度不同,又分为拱形或“n”型;各树种夜间液流在夏、秋季的差异为夏季夜间液流密度明显小于秋季,且不同树种夜间液流密度大小因季节不同明显不同。其中,夏季夜间液流密度大小排序为国槐、侧柏、栎树、油松;秋季则为侧柏、国槐、油松、栎树。不同环境因子对液流的影响不同。其中,不同层次的土壤温度与液流的相关性不显著,大气相对湿度与液流呈显著负($P<0.05$)相关,而大气温度与液流呈极显著($P<0.01$)正相关。

参考文献

- [1] 王华田.林木耗水性研究述评[J].世界林业研究,2003,16(2):23-27.
- [2] 李新宇,李延明,孙林,等.银杏蒸腾耗水与环境因子的关系研究[J].北京林业大学学报,2014,36(4):23-29.
- [3] 李海涛,陈灵芝.应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究[J].北京林业大学学报,1998,20(1):1-6.
- [4] 高岩,张汝民,刘静.应用热脉冲技术对小美旱杨树干液流的研究[J].西北植物学报,2001,21(4):644-649.
- [5] 樊敏,马履一,王瑞辉.刺槐春夏季树干液流变化规律[J].林业科学,2008,44(1):41-45.
- [6] 孙慧珍,周晓峰,赵惠勋.白桦树干液流的动态研究[J].生态学报,2002,22(9):1387-1391.
- [7] 徐先英,孙保平,丁国栋,等.干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J].生态学报,2008,28(3):895-905.
- [8] 李广德,王晓辉,贾黎明,等.国槐枝叶水分特征及其对树干边材液流的影响[J].中南林业科技大学学报,2010,30(1):23-28.
- [9] 孙迪,关德新,袁辉,等.辽西农林复合系统中杨树液流速率与气象因子的时滞效应[J].应用生态学报,2010,21(11):2742-2748.
- [10] 马履一,王华田.油松边材液流时空变化及其影响因子研究[J].北京林业大学学报,2002,24(3):23-27.
- [11] 王瑞辉,马履一,奚如春,等.元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素[J].生态学杂志,2006,25(3):231-237.
- [12] 刘德良.油松树干边材液流空间变化规律[J].东北林业大学学报,2008,36(5):15-18.
- [13] GRANIER A, BRÉDA N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements[J]. Annales des sciences forestières, 1996, 53(2/3):537-546.
- [14] 龚道枝,王金平,唐绍忠,等.不同水分状况下桃树根茎液流变化规律研究[J].农业工程学报,2001,17(4):34-38.
- [15] 刘春鹏,翟明普,马长明,等.华北石质山区4种乡土树种耗水特征[J].东北林业大学学报,2010,38(7):29-32.
- [16] 于红博,杨劫,臧春鑫,等.皇甫川流域中国沙棘树干液流日变化及其相关因子[J].生态学杂志,2008,27(7):1071-1076.
- [17] 徐利岗,苗正伟,杜历,等.干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素[J].生态学报,2016,36(17):5519-5527.
- [18] OGUNTUNDE P G. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand[J]. Plant and soil, 2005, 278:371-383.
- [19] 吴皓莹.热带半湿润半干旱区桉树茎流特征及其与环境因子的关系研究[D].海口:海南师范大学,2015.
- [20] MCDOWELL N G, WHITE S, POCKMAN W T. Transpiration and stomatal conductance across a steep climate gradient in the southern Rocky Mountains[J]. Ecohydrology, 2008, 1(3):193-204.
- [21] 徐军亮,马履一.土壤温度对油松(*Pinus tabulaeformis*)树干液流活动的影响[J].生态学报,2008,28(12):6107-6112.
- [22] FORD C R, GORANSON C E, MITCHELL R J, et al. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: Predicting total stem flow in *Pinus taeda* [J]. Tree physiology, 2004, 24(9):951-960.
- [23] 王华,赵平,蔡锡安,等.马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应[J].应用生态学报,2008,19(2):225-230.
- [24] 梅婷婷,王传宽,赵平,等.木荷树干液流的密度特征[J].林业科学,2010,46(1):40-47.
- [25] 涂杰,胡良,刘琪璟,等.江西千烟洲杉木生长季树干液流特征及影响因素[J].浙江农林大学学报,2015,32(2):257-263.

(上接第70页)

- [5] 宋迎新,陈建杰,钟和曦.以土地管理制度改革推动新型城镇化健康发展[J].浙江国土资源,2013(10):39-43.
- [6] 张明斗,曲峻熙.中国城市化的均衡性发展及政策调控[J].学习与实践,2019(9):48-54.
- [7] 何仁伟,谢磊,孙威.京津冀城市群城市化质量综合评价研究[J].地域研究与开发,2016,35(6):42-47.

- [8] 程开明,姜山.城市化、城市集中度与人力资本积累:基于省级面板数据的实证研究[J].商业经济与管理,2019(9):44-56,78.
- [9] 龙花楼,戈大专,王介勇.土地利用转型与乡村转型发展耦合研究进展及展望[J].地理学报,2019,74(12):2547-2559.
- [10] 胡其玉,陈松林.基于生态服务价值量的土地利用变化环境效应研究[J].生态科学,2019,38(5):58-67.
- [11] 李小康,王晓鸣,华虹.土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J].生态经济,2018,34(1):14-19.