

冀北山地油松树干液流特征及其对环境因子的响应

任启文^{1,2}, 毕君^{1,2}, 李联地^{1,2}, 尤海舟^{1,2}, 高克号³

(1. 河北省林业科学研究院, 石家庄 050061;

2. 河北小五台山森林生态系统定位研究站, 河北 涿鹿 075600; 3. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071001)

摘要: 依据组织热平衡原理, 运用热扩散探针法, 于2015年3月1日—2016年3月1日对冀北山地小五台山自然保护区油松的树干液流速率进行连续监测, 并同步观测气温、相对湿度、净辐射、总辐射、风速等环境因子的变化, 研究油松树干液流对环境因子的响应。结果表明: (1) 小五台地区, 油松树干液流启动于4月下旬, 结束于10月下旬, 前后历时184 d。晴天条件下, 油松不同月份树干液流速率日变化均呈典型的单峰曲线。不同月份油松树干液流的启动、到达峰值、结束时间以及液流升降速率存在差异。 (2) 油松树干液流速率日均值变化, 除4月和10月较低外, 其余各月都达到0.02 kg/(h·cm)以上, 尤以5月和8月最高, 分别达到0.028, 0.027 kg/(h·cm)。各月峰值变化与日均值变化基本一致。 (3) 油松树干液流速率与空气温度、净辐射、总辐射、水汽压亏缺、风速呈极显著正相关, 与空气湿度呈极显著负相关。各环境因子对油松树干液流速率影响大小顺序为空气温度>净辐射>总辐射>空气湿度>风速。 (4) 油松整个生长季单株总耗水量为(2679.58±579.83)kg, 以5月、8月耗水量最大, 分别为(585.14±110.92)kg和(510.08±87.96)kg。

关键词: 油松; 耗水量; 日变化; 月变化; 小五台山

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0183-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.029

Stem Sap Flow Characteristic of *Pinus tabulaeformis* and Its Response to Environmental Factors at Northern Mountain Areas of Hebei Province

REN Qiwen^{1,2}, BI Jun^{1,2}, LI Liandi^{1,2}, YOU Haizhou^{1,2}, GAO Kehao³

(1. Hebei Institute of Forestry Science, Shijiazhuang 050061; 2. Hebei Xiaowutai Forestry Ecosystem

Research Station, Zhuolu, Hebei 075600; 3. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001)

Abstract: Based on tissue heat balance theory, thermal dissipation sap flow velocity probes (TDPs) were used to measure sap flow velocity of *Pinus tabulaeformis* at Xiaowutai natural reserve in northern mountain areas of Hebei province. To explore the response of stem sap flow to environmental factors, the air temperature, relative humidity, solar net radiation, total radiation, and wind speed were simultaneously observed from March, 2015 to March, 2016. The results showed: (1) Stem sap flow of *Pinus tabulaeformis* started in late April and ended in late October, which lasted for 184 days at the Xiaowutai areas. On sunny days, the daily change of stem sap flow velocity presented unimodal curve in different months. There were differences in starting, peak and ending time and changing rate of stem sap flow in different months. (2) The diurnal average of stem sap flow velocity reached more than 0.02 kg/(h·cm) in every month except for April and October, especially higher in May and August in which it reached 0.028 and 0.027 kg/(h·cm). The monthly peak change of stem sap flow velocity was the same as diurnal average change. (3) Stem sap flow velocity was positively correlated with air temperature, solar net radiation, total radiation, vapor pressure and wind speed, whereas a negative correlation with relative humidity was observed. Influence of environmental factors to stem sap flow velocity was in the order of temperature > solar net radiation > total radiation > relative humidity > wind speed. (4) Water consumption of individual tree was (2 679.58±579.83)kg in the whole growth season, and the largest water consumption was in May and August with (585.14±110.92)kg and (510.08±87.96)kg.

Keywords: *Pinus tabulaeformis*; water consumption; diurnal variation; monthly variation; Xiaowutai Mountain

植物蒸腾是土壤—植物—大气循环中水热传输的一个极为重要的环节,在陆地生态系统水分循环和水文过程中具有重要作用。乔木由于其水分利用量大、蒸腾速率大和对环境影响较大,是森林生态系统水分传输的主体。长期以来一直受到生态学家、森林水文学家、林木生理学家的高度关注。过去采用剪枝称重法、气孔计法、蒸渗仪法等传统方法测定树木蒸腾量在便捷性和准确性上受到很大限制;近年来,热技术方法在测定树干液流及确定树木蒸腾耗水量上得到了广泛应用,且被公认为是目前测定树干液流较为准确便捷的方法。国内应用该技术研究了华北落叶松^[1] (*Larix principis-rupprechtii*)、辽东栎^[2] (*Quercus liaotungensis*)、湿地松^[3] (*Pinus elliotii*)、短萼海桐^[4] (*Pittosporum brevicalyx*) 等的树干液流特征。大量研究表明,植物体树干液流特征不仅受自身生理结构^[5-6] 及土壤水分^[7] 的控制,还与气象因子密切相关^[3]。前人对油松液流的研究大都集中在我国黄土区和北京山地,且缺乏长期观测,只能回答部分时段液流速率和耗水量,由于生长季各月、甚至每天液流速率的差异导致测算的油松全年耗水量误差很大,基于此很多文献只讨论液流速率变化特征,而对全生长季甚至各月耗水量的讨论较少。目前,冀北山地油松液流的研究比较缺乏,尚不能回答该地区油松耗水量及其变化特征的问题。油松作为冀北山地主要适生与造林树种之一,研究其树干液流及蒸腾耗水的时间变化特征以及与环境因子的关系,对冀北山地合理选择造林树种、优化林分结构配置、充分发挥森林水文生态效益具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省小五台山国家级自然保护区,气候属暖温带大陆季风型山地气候,具有雨热同季、冬长夏短、四季分明、夏季昼夜温差大等特点。年均气温 5~6℃,1 月平均气温 -12.3℃,7 月平均气温 22.1℃;无霜期 100~120 d,年均降雨量 420 mm;土壤属于森林褐土类。

样地选择在相对均一的典型坡面上,树种为油松、落叶松混交林,样地大小 25 m×25 m,海拔高度 1 402~1 407 m,坡向西偏北 10°,坡度 14°。林分密度 915 株/hm²,林龄 40 a,郁闭度 65%。油松平均胸径(17.15±5.58) cm,平均树高(9.26±2.42) m,平均冠幅 4.52 m×4.12 m,混交比例 42%。林内灌木主要有山刺玫(*Rosa davurica* Pall.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、刺梨(*Rosa roxburghii* Tratt.)等;草本层有唐松草(*Thalictrum petaloideum*)、龙牙草(*Agriponia pilosa* Ledeb.)、藁草(*Carex*)、芨芨草(*Achnatherum*

splendens)等,地表盖度 70%。根据林木所在空间位置和生长状况,在样地内选择树干通直无病虫害、不偏冠、生长状况良好的 3 株油松为样树(表 1)。

表 1 测定样树主要参数

编号	树高/ m	胸径/ cm	冠幅/ (m×m)	树皮+韧皮 部厚度/cm
NO. 1	9.60	16.30	4.60×4.30	0.94
NO. 2	9.15	17.80	5.30×4.50	1.12
NO. 3	8.95	17.50	4.90×4.30	1.06

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流测定方法 采用捷克生产的 Ems 51 Sap Flow System 型测定系统测定树干液流,该测定系统基于组织热平衡(THB)法来计算树干液流通量。在高约 1.3 m 处,用刀将树干死皮刮掉,不能损坏树木形成层,剩余树皮和韧皮部厚度不得超过 15 mm。用围尺测量样树胸径,用仪器配套专用工具测量树皮加韧皮部厚度。在树干上用配套专用工具插入上部 3 个终端电极和下部一个参比电极,然后将传感器探针按顺序插入电极槽中,最后将线缆连接器钩在传感器上。为避免环境影响,将测量系统安装在树干北侧,在电极及传感器上覆盖反光罩并固定。在数据采集器中设置每 5 min 采集 1 次数据,每 30 min 记录 1 次平均数据,时间为 2015 年 3 月 1 日—2016 年 3 月 1 日。

液流经过的木质部热平衡计算公式为:

$$P=Q \times dT \times C_w \times d + dT \times Z \quad (1)$$

由公式(1)得出液流速率:

$$Q = \frac{P \times 3600}{dT \times C_w \times d} - \frac{Z \times 3600}{C_w \times d} \quad (2)$$

式中: P 为热输入功率(W); Q 为液流速率(kg/(h·cm)); dT 为测量点的温度变化(K); C_w 为水的比热容(J/(kg·K)); d 为加热树干的有效宽度(cm); Z 为测量点的热损失系数(W/K)。

公式(2)中第 2 项 $\frac{Z \times 3600}{C_w \times d}$ 代表传感器的热损失,其数值可以依据下雨或凌晨日出前实际液流较小时的记录数据进行测算。

本方法不需要测定边材厚度,只需将传感器探针插入到芯材部位即可。在计算整株树的树干液流速率时,需要用到安装时测定的胸径和树皮加韧皮部厚度,用于计算木质部周长,样树树皮加韧皮部厚度见表 1。整株树的树干液流速率计算公式为:

$$Q_t = Q \times (A - 6.28 \times B) \quad (3)$$

式中: Q_t 为整株树的树干液流速率(kg/h); Q 为液流速率(kg/(h·cm)); A 为树干周长(包括树皮,cm); B 为树皮加韧皮部厚度(cm)。

1.2.2 环境因子测定方法 应用美国 HOBO Onset 公司生产的小型自动气象站测定空气温度(T ,℃)、空气湿度(RH ,%)、净辐射(NR ,W/m²)、总辐射

($TR, W/m^2$)、风速($S, m/s$),以 1 h 为步长记录在数采仪上。水汽压亏缺(VPD, kPa)由空气温度和空气湿度求出:

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

1.2.3 单株耗水量计算方法 由于每月连续监测数据存在一些断续,无法实现按照每小时耗水量相加计算单株耗水量,因此取每月所有监测数据的平均值作为该月的平均小时耗水量,单株耗水量计算公式为:

$$V=\sum_{i=k}^n V_i \tag{5}$$

$$V_i=E\times 24\times d \tag{6}$$

式中: V 为树木生长季单株耗水量(kg); V_i 为第*i*月的单株月耗水量(kg); k 为该树种在一个生长季开始有树干液流的月份; n 为该树种在一个生长季树干液流结束的月份; E 为月平均小时耗水量(kg/h); d 为该月有树干液流的天数。

1.2.4 数据处理 采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件

进行数据处理和统计分析。采用 SPSS 19.0 软件对树干液流速率与环境因子进行 Pearson 相关系数、直接通径系数和多元回归分析,采用 LSD 多重比较法比较不同月份树干液流速率的差异。用 Excel 2007 进行作图。

2 结果与分析

2.1 树干液流的日变化

根据年度连续观测数据分析得出,油松树干液流启动于 4 月 20 日左右,结束于 10 月 21 日左右,前后历时 184 d。由图 1 可知,3 月没有明显树干液流,4 月 21 日开始出现,直至 10 月 22 日结束。4—10 月晴天条件下油松树干液流均呈“昼高夜低”单峰曲线。由图 2 可知,晴天条件下不同季节油松树干液流速率峰值均表现为宽峰型,春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)11:00—17:00 液流速率均保持在较高水平。油松夜间树干液流均处于非常低的水平,流量相对稳定,变化较小。

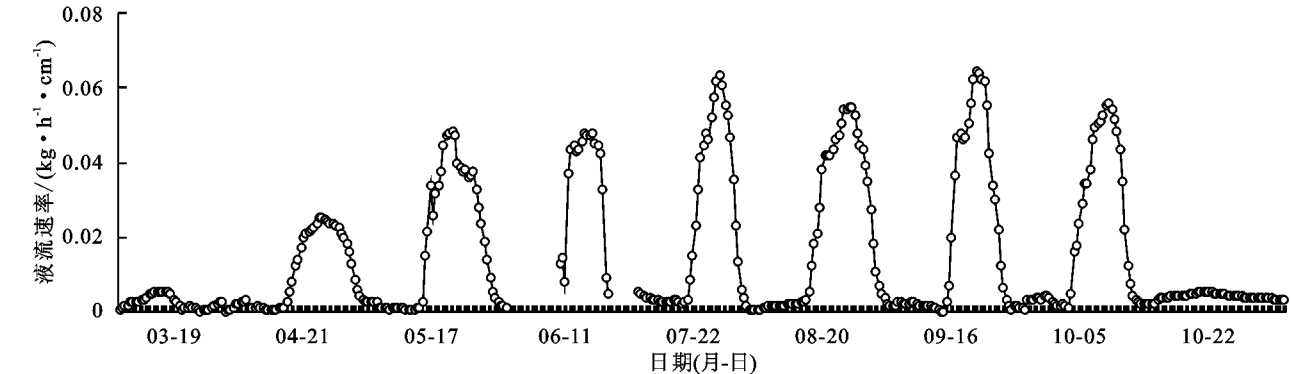


图 1 油松生长季各月树干液流速率日变化

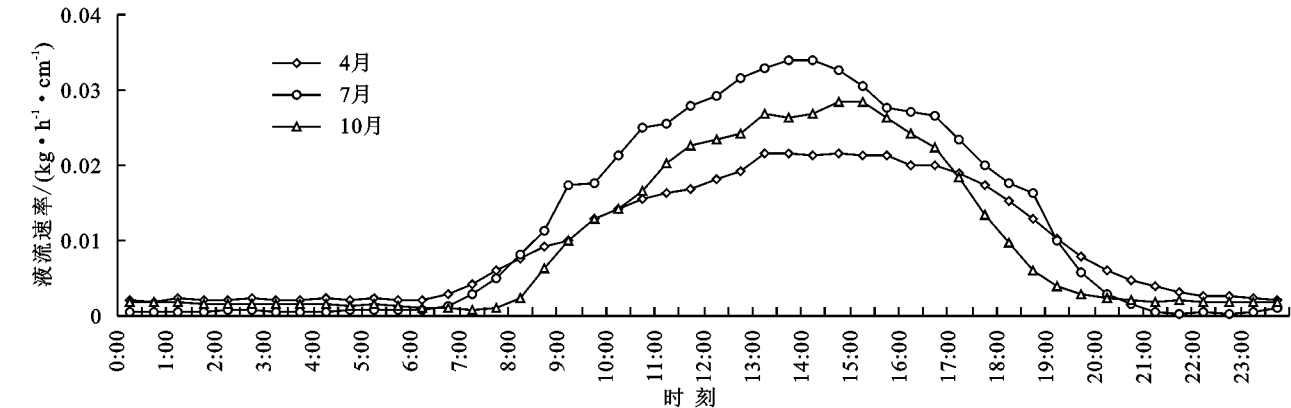


图 2 4 月、7 月、10 月油松树干液流速率日变化

油松树干液流速率日变化存在明显的季节性差异,主要表现在液流启动时间、达到峰值时间、峰值区间差异以及液流升降速率。由表 2 可知,4—6 月油松液流启动时间从 7:00 提前到 6:30,而液流结束时间由 21:00 推后到 21:30;6—10 月启动时间从 6:30 推后到 8:00,结束时间从 21:30 提前到 19:30。这与当地日出日落时间变化相一致,小五台山地区 4—6 月日出时间从 6:03 提前到 4:50 左右,日落时间从 18:44 推后到 19:52 左右;而 6—10 月日出时间从 4:50 推后到 6:48,日落时间从

19:42 提前到 17:19。油松液流启动与结束时间明显滞后于日出日落时间。液流启动后,随着太阳辐射的增强,气温逐渐升高,空气相对湿度降低,冠层气孔导度不断升高,液流速率逐渐增加。春季(4—5 月)油松树干液流峰值出现在 12:30—13:00 左右,夏季(6—8 月)出现在 14:00 左右,秋季(9—10 月)出现在 14:30—15:00 左右。随着季节推进油松树干液流峰值出现的时间有逐渐推后的趋势,夏季液流峰值比春季滞后 60~90 min,秋季液流峰值比夏季滞后 30~60 min。

表 2 不同月份油松树干液流日变化特征值

月份(月)	启动时间 (时:分)	到达峰值时间 (时:分)	结束时间 (时:分)	峰值/ (kg·h ⁻¹ ·cm ⁻¹)	日平均液流速率/ (kg·h ⁻¹ ·cm ⁻¹)
4	7:00	13:00	21:00	0.02160±0.01019b	0.01585±0.00494c
5	6:30	12:30	21:30	0.04013±0.00394a	0.02829±0.00548a
6	6:30	14:00	21:30	0.03880±0.00351a	0.02184±0.00451b
7	7:00	14:00	21:00	0.03388±0.00802ab	0.02201±0.00528b
8	7:30	14:00	21:00	0.04113±0.00758a	0.02732±0.00479a
9	8:00	14:30	20:00	0.03930±0.01446a	0.02426±0.00757ab
10	8:00	15:00	19:30	0.02838±0.00399b	0.01677±0.00370c

注:同列数据后不同小写字母表示月份间差异显著($P<0.05$)。

2.2 树干液流及单株耗水量的月变化

由表 2 可知,生长季各月油松树干液流速率日均值变化与峰值变化基本相同。日均值除生长季初期 4 月和生长季末期 10 月较低外,其余各月都达到 0.02 kg/(h·cm)以上,尤其以 5 月、8 月最高,分别达到 0.028, 0.027 kg/(h·cm);峰值除 4 月、10 月外,其余月份均达到 0.03 kg/(h·cm)以上,5 月、8 月峰值最高,达到 0.04 kg/(h·cm)以上。生长季各月油松日耗水量为 10.81~18.88 kg;生长季单株总耗水量为(2 679.58±579.83)kg,其中以 5 月和 8 月耗水量最大,分别为(585.14±110.92) kg 和 (510.08±87.96) kg(表 3)。这主要是由油松的生长规律决定的,有研究表明油松胸径生长的高峰期主要集中在 5 月、8 月和 9 月,高生长主要在 5 月^[8]。

2.3 树干液流速率对环境因子的响应

为了探讨油松树干液流速率对环境因子变化的响应,取油松液流速率与同步监测的空气温度、空气湿度、净辐射、总辐射、水汽压亏缺、风速进行相关性分析(图 3)。结果表明,油松树干液流速率与空气温度、净辐射、总辐射、水汽压亏缺、风速呈极显著正相关,与空气湿度呈极显著负相关。为了揭示各环境因子对油松树干液流速率的影响程度,通过通径分析中的直接通径系数研究各环境因子对油松树干液流速率的作用程度(表 4)。各环境因子对油松树干液流速率影响大小顺序为空气温度>净辐射>总辐射>空气湿度>风速(水汽压亏缺为气温和湿度共同作用的结果,故不参与通径分析),表明气温和辐射对油松树干液流速率影响较大。

为进一步描述各环境因子对油松树干液流速率的综合影响,采用多元线性回归分析建立了油松液流速率与各环境因子的回归方程。由表 5 可知,油松树干液流速率与气温、湿度、净辐射、总辐射、风速的回归方程中,风速不能入选方程($P>0.05$),最终建立油松树干液流速率与各气象因子模型方程 $Q=(1.65T-0.29RH+0.28NR+0.017TR+24.03)/1000(R^2=0.734)$,水汽压亏缺为气温和湿度共同作用的结果,故不参与建模。以 2016 年 8 月、9 月部分实测数据作为校核,绘制实测值和模型计算值日过程(图 4),可以看出模型方程计算的树干液流值与实测值较为接近,综合误差为 11.42%。

表 3 油松生长季单株耗水量情况

月份(月)	月耗水量/kg	日耗水量/kg	液流天数/d
4	119.89±32.84	10.90±2.99	11
5	585.14±110.92	18.88±3.58	31
6	392.49±77.08	13.08±2.57	30
7	421.14±93.27	13.59±3.01	31
8	510.08±87.96	16.45±2.84	31
9	434.62±133.32	14.49±4.44	30
10	216.21±44.44	10.81±2.22	20
合计	2679.58	—	184

3 讨论

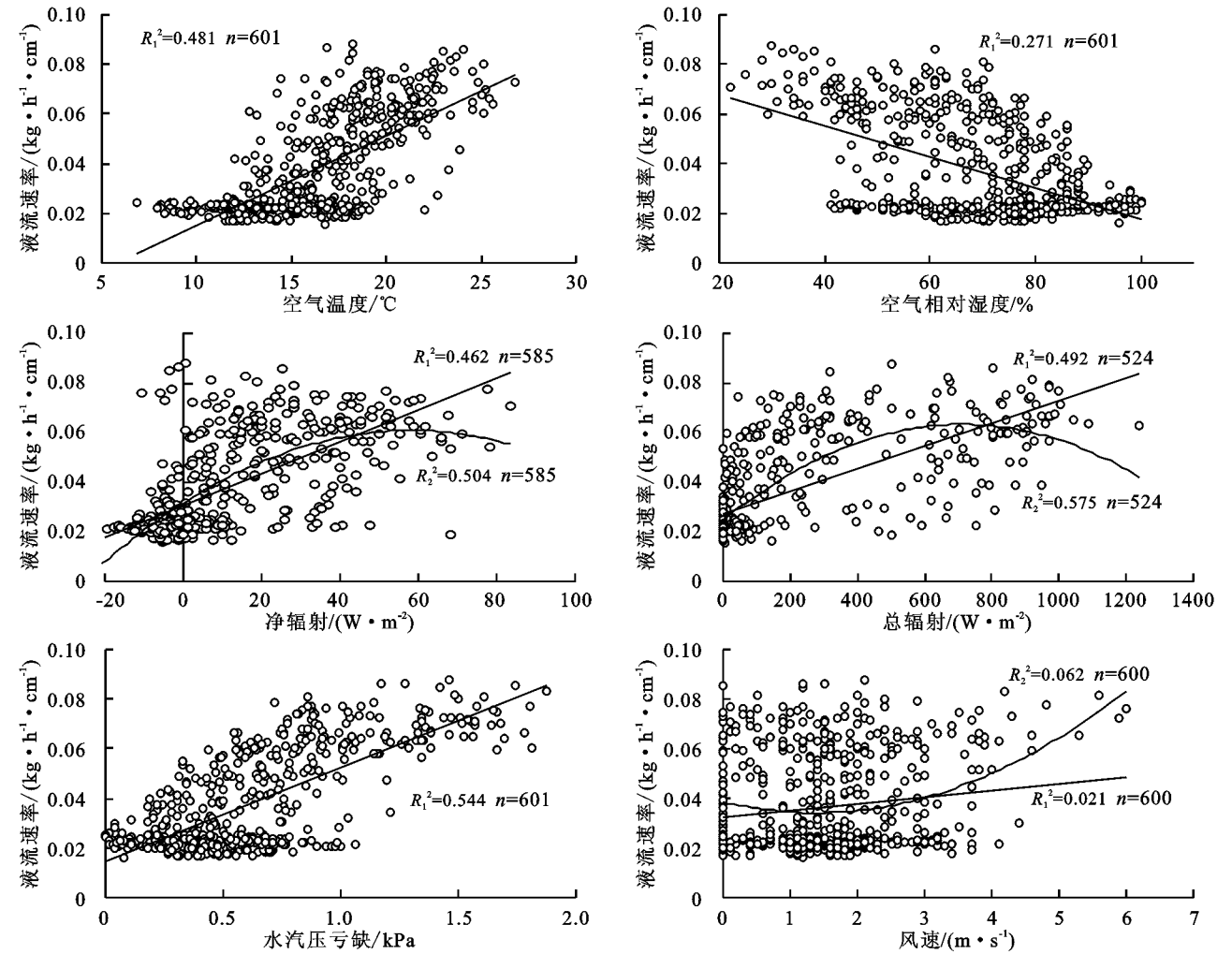
晴天条件下,油松不同月份树干液流速率日变化均呈典型的单峰曲线。这与程静等^[9]研究的鼎湖山针阔叶混交林中马尾松、木荷、锥栗和广东润楠的树干液流日变化规律一致。徐利岗等^[10]研究宁夏枸杞得出,晴天液流速率变化曲线呈宽峰型,峰值出现在正午左右,11:00—15:00 保持较高水平,与本文 11:00—17:00 保持较高峰值的研究结果相似。有研究表明新疆艾比湖区胡杨(*Populus euphratica*)树干液流呈典型双峰曲线,蒸腾午休现象明显^[11];在干旱胁迫下沙漠梭梭(*Haloxylon ammodendron*)树干液流变化呈现没有明显峰谷的多峰型特征^[12];降雨、阴天影响气温、湿度、太阳辐射等环境因子的瞬时变化,在这种天气情况下会出现多峰曲线^[13]。可见不同土壤水分条件、不同植物其液流速率的日变化规律表现不同,对环境因子的瞬时变化也非常敏感。

相同树种,不同地域、不同气候都会对树干液流速率产生影响。刘明国等^[14]研究得出辽西地区油松液流速率峰值出现在 6 月、8 月,与本文出现在 5 月、8 月的研究结果相似。而殷秀辉等^[15]研究陕西秦岭油松树干液流特征发现,液流速率在 5—8 月呈现上升趋势,9—10 月逐渐下降,液流峰值出现在 8 月。不同树种蒸腾耗水特征差异明显,内蒙古中部华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*.)、刺槐(*Robinia pseud-acacia* L.)、新疆杨(*Populus bolleana* Lauche.)6—10 月单株耗水量分别为 1 897.2,1 576.4,4 385.0 kg^[16],本文研究油松生长季单株耗水量为(2 679.58±579.83) kg。同一树种不同个体差异和不同林分结构对树干液流也有影响,熊伟等^[17]研究华北落叶松得出,不同径级树木的树干日液流量存在较大差异,胸径和液流速率

是其主要影响因子,而树木在林分内的空间位置和树冠重叠状况也对其液流速率有影响。

本文研究得出油松树干液流速率与空气温度、净辐射、总辐射、水汽压亏缺、风速呈显著正相关,与空气湿度呈显著负相关,气温和辐射是影响油松树干液流速率的主要因子。与殷秀辉等^[15]对秦岭地区油松的研究结果一致,与刘明国等^[14]的研究结果相似,但与郭跃等^[18]研究的毛乌素沙地花棒茎干液流速率主要受太阳总辐射和风速影响的结果不同。树干液流的影响因子可以分为植物因素、土壤因素和气象因素,植物因素决定液

流的潜在能力,土壤因素决定液流的总体水平,而气象因素决定液流的瞬间变动。土壤含水量不同,影响树干液流过程的主导因素也不同,只有土壤含水量达到一定数值之后,气象因素才上升为主导因素^[12]。王华等^[19]研究发现不同时间尺度上紫玉兰液流速率对环境因子的响应也不同。随着时间尺度的加大,影响树干液流速率的主导因子逐渐由地上转入地下。在年时间尺度上,对树干液流影响最大的为土壤温度和湿度^[20]。可见,地点不同、树种不同、时间尺度不同影响其液流速率的主导环境因子也不尽相同。



注: R_1 表示线性相关; R_2 表示二次多项式相关。

图 3 树干液流速率与环境因子的相关关系

表 4 树干液流速率与环境因子的 Pearson 相关系数和直接通径系数

系数类型	主要环境因子					
	空气温度	空气湿度	净辐射	总辐射	水汽压亏缺	风速
Pearson 相关系数	0.694**	-0.521**	0.680**	0.702**	0.738**	0.145**
直接通径系数	0.341	-0.242	0.300	0.266	—	-0.028

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$); * 表示显著相关($P<0.05$); $n(T, RH, NR, TR, VPD, S)=601, 601, 585, 524, 601, 600$ 。
HJ】

表 5 树干液流速率与环境因子的多元线性回归

环境因子		回归方程	R^2	n	Sig. F	P				
						T	RH	NR	TR	S
全部因子	T, RH, NR, TR, S	$Q=(1.69T-0.30RH+0.28NR+0.017TR-0.53S+24.80)/1000$	0.734	510	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
入选因子	T, RH, NR, TR	$Q=(1.65T-0.29RH+0.28NR+0.017TR+24.03)/1000$	0.734	510	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

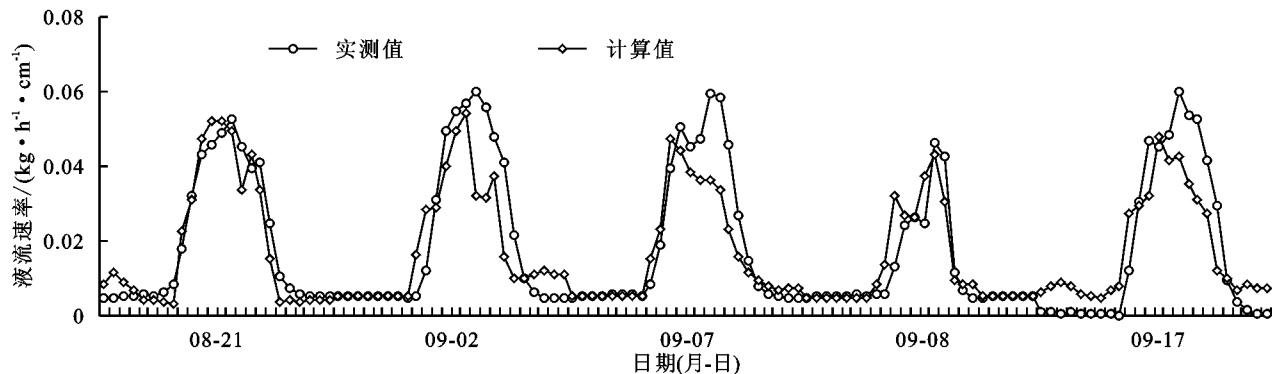


图 4 油松树干液流回归方程计算值和实测值对比

4 结论

(1)小五台地区,油松树干液流启动于 4 月下旬,结束于 10 月下旬,前后历时 184 d。晴天条件下,油松不同月份树干液流速率日变化均呈典型的单峰曲线。不同月份油松树干液流的启动、到达峰值、结束时间以及液流升降速率存在差异。

(2)油松树干液流速率日均值变化,除 4 月、10 月较低外,其余各月都达到 $0.02 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{cm})$ 以上,尤以 5 月、8 月最高,分别达到 $0.028, 0.027 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{cm})$ 。各月峰值变化与日均值变化基本一致。

(3)油松整个生长季单株总耗水量为 $(2679.58 \pm 579.83) \text{ kg}$,其中以 5 月和 8 月耗水量最大,分别为 $(585.14 \pm 110.92) \text{ kg}$ 和 $(510.08 \pm 87.96) \text{ kg}$ 。

(4)油松树干液流速率与空气温度、净辐射、总辐射、水汽压亏缺、风速呈极显著正相关,与空气湿度呈极显著负相关。各环境因子对油松树干液流速率影响大小顺序为空气温度>净辐射>总辐射>空气湿度>风速。气温和辐射是影响油松树干液流速率的主要因子。油松液流速率与各气象因子的模型方程为 $Q = (1.65T - 0.29RH + 0.28NR + 0.017TR + 24.03)/1000 (R^2 = 0.734)$,综合误差 11.42%。

参考文献:

- [1] 孙林,管伟,王彦辉,等.华北落叶松冠层平均气孔导度模拟及其对环境因子的响应[J].生态学报,2011,30(10):2122-2128.
- [2] 张建国,闫美杰,时伟宇,等.辽东栎不同方位边材液流季节动态及其对蒸腾耗水测算的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):193-197.
- [3] 涂洁,刘琪璟.亚热带红壤区湿地松边材液流的尺度扩展及其对环境因子的响应[J].水土保持学报,2007,21(2):197-200.
- [4] 刘延惠,舒德远,崔迎春,等.茂兰喀斯特森林亚优势种短萼海桐树干液流特征及其环境因子响应[J].水土保持学报,2016,30(5):205-211.
- [5] Liu X Z, Kang S Z, Li F S. Simulation of artificial neural network model for trunk sap flow of pyrus pyrifolia and its comparison with multiple-linear regression[J].

Agricultural Water Management,2009,96(6):939-945.

- [6] Ortuño M F, Conejero W, Moreno F, et al. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives [J]. Agricultural Water Management,2010,97(1):1-11.
- [7] 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):1079-1089.
- [8] 郭存珍.油松林生长周期调查分析[J].陕西农业科学,2009,55(6):114-115.
- [9] 程静,欧阳旭,黄德卫,等.鼎湖山针阔叶混交林 4 种优势树种树干液流特征[J].生态学报,2015,35(12):4097-4104.
- [10] 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):1-9.
- [11] 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.
- [12] 孙鹏飞,周宏飞,李彦,等.古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J].生态学报,2010,30(24):6901-6909.
- [13] 凡超,邱燕萍,李志强,等.荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J].生态学报,2014,34(9):2401-2410.
- [14] 刘明国,唐敬超,王玉涛,等.辽西地区油松树干液流变化规律及影响因子研究[J].沈阳农业大学学报,2011,42(2):175-179.
- [15] 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.
- [16] 陈彪.半干旱地区城市环境下 5 种典型树种蒸腾耗水[D].北京:北京林业大学,2014.
- [17] 熊伟,王彦辉,于澎涛,等.华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推[J].林业科学,2008,44(1):34-40.
- [18] 郭跃,丁国栋,吴斌,等.毛乌素沙地花棒茎干液流规律研究[J].水土保持学报,2010,24(5):110-113.
- [19] 王华,欧阳志云,任玉芬,等.北京市绿化树种紫玉兰的蒸腾特征及其影响因素[J].生态学报,2011,31(7):1867-1876.
- [20] 王文杰,孙伟邱,岭祖元,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.