

张家口崇礼区 3 种优势树种蒸腾耗水特征研究

李 洁<sup>1</sup>,任启文<sup>2\*</sup>,孙杰肖<sup>1</sup>

(1. 河北省水利科学研究院,河北 石家庄 050051;2. 河北省林业科学研究院,河北 石家庄 050061)

**摘 要:**依据组织热平衡原理,运用热扩散探针法,于2016年4月1日—2017年4月1日对张家口市崇礼区清水河流域油松、落叶松、白桦混交林中3个树种的树干液流速率进行连续监测,并同步观测气温、空气湿度、净辐射、总辐射、风速、日照时数、土壤温度、土壤含水量等环境因子,研究油松、落叶松、白桦的蒸腾耗水特征。结果表明:1)油松、落叶松、白桦3树种晴天条件下树干液流速率日变化呈典型的“单峰”曲线,阴天呈“双峰”或“多峰”曲线,雨天呈“多峰”曲线。3树种树干液流速率均表现为晴天>阴天>雨天。2)树龄相近的白桦、油松、落叶松生长季液流速率平均值分别为0.066、0.013、0.012 kg·h<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>,阔叶树种白桦液流速率明显高于针叶树种,分别是油松、落叶松液流速率的5.19和5.75倍。3)林分密度986株/hm<sup>2</sup>,油松、落叶松、白桦混交比例38%、54%、8%,林龄40a左右,林分生长季总耗水量297.4mm,其中油松、落叶松、白桦分别耗水98.0、118.1、81.3mm。生长季林分耗水量占同期降雨量的58.3%,4、5、9月降雨量小于耗水量,水分供不应求。4)Pearson分析结果表明,油松、落叶松、白桦树干液流速率与气温、净辐射、总辐射、风速、日照时数显著正相关,与空气湿度显著负相关;偏相关分析结果表明,影响3树种树干液流速率的主导气象因子为气温、土壤温度和日照时数。

**关键词:**油松;落叶松;白桦;蒸腾耗水;树干液流

**中图分类号:**S718.45      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2018)06-0040-07

Water Consumption of Three Dominant Tree Species at Qingshuihe Watershed  
of Chongli District in Zhangjiakou

LI Jie<sup>1</sup>, REN Qi-wen<sup>2\*</sup>, SUN Jie-xiao<sup>1</sup>

(1. Hebei Provincial Academy of Water Resources, Shijiazhuang, Hebei 050051, China;  
2. Hebei Academy of Forestry Science, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

**Abstract:**Based on tissue heat balance theory, thermal dissipation sap flow velocity probes (TDPs) were used to measure sap flow velocity of *Pinus tabulaeformis*, *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* at Qingshuihe watershed of Chongli district in Zhangjiakou, from April, 2016 to April, 2017. And the environmental factors such as air temperature, relative humidity, net radiation, total radiation, wind speed, sunshine duration, soil temperature, soil moisture content and so on were observed simultaneously to research water consumption characteristics of three tree species. The results showed that 1) in sunny days, the sap flow velocity daily changes of three tree species presented unimodal curve, with bimodal curve or polymodal curve in cloudy days and polymodal curve on rainy days. The sap flow velocity of three tree species represented as sunny days > cloudy days > rainy days. 2) The average values of sap flow velocity of *B. platyphylla*, *P. tabulaeformis* and *L. principis-rupprechtii* with similar tree ages were 0.066, 0.013, and 0.012 kg·h<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>, respectively. The sap flow velocity of broadleaved tree *B. platyphylla* was appar-

收稿日期:2018-02-01 修回日期:2018-04-09  
基金项目:河北省水利科技项目(2017-04);河北省重点研发项目(18226815D);河北省林业科技项目(1701484)。  
作者简介:李 洁,女,博士,高级工程师,研究方向:水土保持与森林生态。E-mail:hbskylj@126.com  
\* 通信作者:任启文,男,高级工程师,研究方向:森林生态。E-mail:blrenqiwen@126.com

ently higher than coniferous trees,that was 5.19 and 5.75 times to *P. tabuliformis* and *L. principis-rupprechtii*. 3) The stand density was 986 /hm<sup>2</sup>,and the mixed ratios of *P. tabuliformis*,*L. principis-rupprechtii* and *B. platyphylla* with about forty-year-old stand age were 38%,54%,and 8%,respectively. The total water consumption was 297.4 mm in growing season,and the water consumptions of *P. tabuliformis*,*L. principis-rupprechtii* and *B. platyphylla* were 98.0,118.1,and 81.3 mm,respectively. The total water consumption in growing season accounted for 58.3% of the rainfall,but the rainfalls in April,May and September were less than the water consumption,and the water supply was not enough. 4) The results of Pearson analysis showed that sap flow velocity of three tree species was positively correlated with air temperature,net radiation,total radiation,wind speed,sunshine duration,whereas a negative correlation with relative humidity. Partial correlation analysis showed that the dominant environmental factors which influenced sap flow velocity were air temperature,soil temperature and sunshine duration.

**Key words:** *Pinus tabuliformis*; *Larix principis-rupprechtii*; *Betula platyphylla*; water consumption; sap flow

张家口崇礼区作为 2022 年北京-张家口冬奥会举办地,生态建设十分重要。然而,该区域随着人工林面积的不断扩大,部分地区林木出现了生长不良现象,原因之一是区域水分承载力与林木耗水量不匹配。为了兼顾水资源供给与生态建设的平衡,研究张家口崇礼区优势造林树种的蒸腾耗水特征,对科学指导迎奥运生态建设具有重要意义。一般用木质部边材液流量表征树木的蒸腾耗水量,边材液流量是在叶片蒸腾作用下水分从木质部自下而上的运输过程<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>(*Larix principis-rupprechtii*)、辽东栎<sup>[3]</sup>(*Quercus liaotungensis*)、胡杨<sup>[4]</sup>(*Populus euphratica*)、刺槐<sup>[5]</sup>(*Robinia pseud-oacacia*)等的树干液流特征。大量研究结果表明,植物体树干液流特征不仅受自身生理结构<sup>[6-7]</sup>及土壤水分<sup>[8]</sup>的控制,还与气象因子密切相关<sup>[9-10]</sup>。目前我国应用热技术方法对树干液流的研究较多,但主要集中于单一树种的研究,缺乏将不同树种放在相同立地、相同气候条件下的对比研究;各树种分别处于不同地理位置和气候条件下,蒸腾耗水特征缺

乏可比性,难以准确衡量耗水量的大小。因此,本文将处于相同位置的油松、落叶松、白桦作为研究对象,消除立地、气候等因子的影响,使 3 个树种的蒸腾耗水特征具有可比性。

1 材料与方法

1.1 研究区和样地概况

本研究区位于河北省张家口市崇礼区清水河流域,属东亚大陆性季风气候,处于中温带亚干旱区,具有雨热同季,冬季寒冷漫长,夏季凉爽短促,昼夜温差大,雨量集中等特点。夏季平均气温 19℃,冬季平均气温-12℃;无霜期 100~120 d,年均降雨量 450~550 mm。

样地为油松、落叶松、白桦人工混交林,样地大小 25 m×25 m,海拔高度 1 404~1 410 m,坡向西偏北 13°,坡度 16°。林分密度 986 株/hm<sup>2</sup>,郁闭度 65%,乔木树种主要参数见表 1。灌木主要有土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、山刺玫(*Rosa davurica*)等;草本有披针藁草(*Carex lancifolia*)、龙牙草(*Agrimonia pilosa*)等,地表盖度 75%。依据林木空间位置和胸径大小,选择各径级有代表性的油松、落叶松、白桦各 3 株为样树,样树主要参数见表 2。

表 1 样地内乔木树种主要参数

Table 1 Major parameters of arbor tree species in the sample plots

树种	树龄 /a	平均胸径 /cm	平均树高 /m	平均冠幅 /(m×m)	混交比例 /%	备注
P	40	17.15±5.58	9.26±2.42	4.52×4.12	38	人工林营造时为油松、落叶松混交林
L	40	17.41±4.43	9.97±2.34	4.72×4.44	54	
B	37	22.28±3.43	11.60±0.60	6.40×6.74	8	白桦为造林 3 年后的补植树种

注:P 代表油松;L 代表落叶松;B 代表白桦。下同。

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 62 系统测定树干液流,该测定系统基于组织热平衡

原理来计算树干液流通量。在高约 1.3 m 处树干上安装传感器探针,覆盖反光罩并固定。每 5 min 采集 1 次数据,每 30 min 记录 1 次平均数据,2016

年4月1日—2017年4月1日连续测定。液流经过的木质部热平衡可用如下公式表示：

$$Q=\frac{P\times3\,600}{dT\times Cw\times d}-\frac{Z\times3\,600}{Cw\times d}\tag{1}$$

式中, $Q$ 为液流速率( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), $P$ 为热输入功率( $\text{W}$ ), $dT$ 为测量点的温度变化( $\text{K}$ ), $Cw$ 为水的比热容( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), $d$ 为加热树干的有效宽度( $\text{cm}$ ), $Z$ 为测量点的热损失系数( $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$ )。

表 2 测定样树主要参数

Table 2 Major parameters of sample trees

树种	编号	树高 /m	胸径 /cm	冠幅 /(m×m)
P	NO. 1	8.60	12.30	4.60×4.30
	NO. 2	10.15	21.80	5.30×4.50
	NO. 3	9.75	17.50	4.90×4.30
L	NO. 1	9.50	13.50	3.90×3.40
	NO. 2	9.80	17.10	4.30×3.30
	NO. 3	10.40	20.30	4.80×3.50
B	NO. 1	9.80	20.20	6.20×6.50
	NO. 2	11.50	22.50	6.80×6.70
	NO. 3	10.60	21.85	6.45×6.64

林分耗水量计算公式如下：

$$V=\sum_{i=k}^nV_i\tag{2}$$

$$V_i=Q_i\times C\times24\times d_i\tag{3}$$

式中, $V$ 为某树种生长季林分耗水量( $\text{kg}$ ), $V_i$ 为某树种第*i*月的林分耗水量( $\text{kg}$ ), $k$ 为该树种在1个生长季开始有树干液流的月份, $n$ 为该树种在1个生长季树干液流结束的月份, $Q_i$ 为该树种第*i*月的月平均液流速率( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), $C$ 为该树种的木质部周长总和( $\text{cm}$ ), $d_i$ 为第*i*月的液流天数。

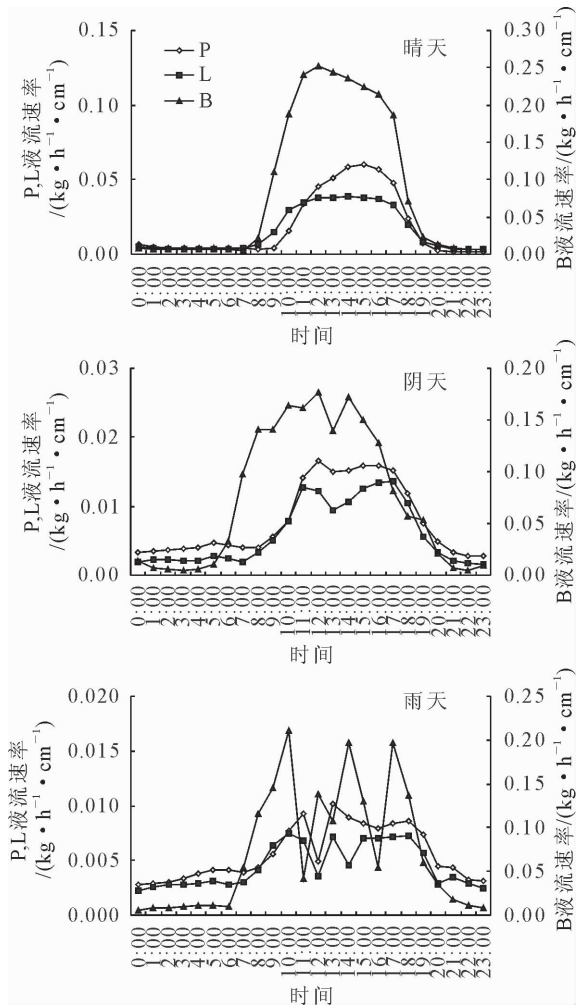
1.2.2 环境因子测定方法 运用美国 HOBO 公司的自动气象站监测气温( $T_a$ , $^{\circ}\text{C}$ )、湿度( $RH$ ,%)、净辐射( $NR$ , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )、总辐射( $TR$ , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )、风速( $S$ , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、降雨量( $R$ , $\text{mm}$ )、日照时数( $SD$ , $\text{h}$ )、20 cm 土壤温度( $T_s$ , $^{\circ}\text{C}$ )、20 cm 土壤含水量( $SWC$ ,%),以1 h为步长记录在数采仪上。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同天气条件下树干液流速率日变化

考虑到晴天、阴天和雨天等特殊天气情况对树干液流的影响,分别选取2016年夏季6月晴天、阴天和雨天典型天气下的液流数据进行分析。由图1可见,油松、落叶松、白桦3个树种晴天条件下树干液流速率日变化呈典型的“单峰”曲线,曲线较为平滑;阴天条件下日变化呈“双峰”或“多峰”曲线,波动略大;雨天条件下呈“多峰”曲线,上下波动剧烈。油松晴天、阴天、雨天液流速率日均值分别为0.019、

0.008  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.006  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,落叶松为0.016、0.006  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.005  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,白桦为0.088、0.075  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.072  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,均表现出晴天>阴天>雨天的变化规律。



注:晴天:2016年6月20日;阴天:2016年6月13日;雨天:2016年6月17日。

图 1 不同天气条件下树干液流速率日变化

Fig. 1 Daily change of sap flow velocity under different weather conditions

### 2.2 不同树种树干液流速率月变化

由图2可见,油松生长季树干液流速率于5月和8月出现2个峰值,分别达到0.017  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.014  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,生长季初期(4月)和末期(10月)液流速率较低,其余各月均达到0.012  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以上。落叶松和白桦生长季树干液流速率均于8月出现峰值,分别达到0.015  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和0.083  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。白桦、油松、落叶松生长季液流速率平均值分别为0.066、0.013、0.012  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,表现为白桦>油松>落叶松,白桦液流速率分别是油松、落叶松液流速

率的 5.19 和 5.75 倍,经多重比较白桦与油松、落叶松液流速率差异显著( $P<0.05$ ),可见阔叶树种白桦的液流速率要明显高于针叶树种油松、落叶松。

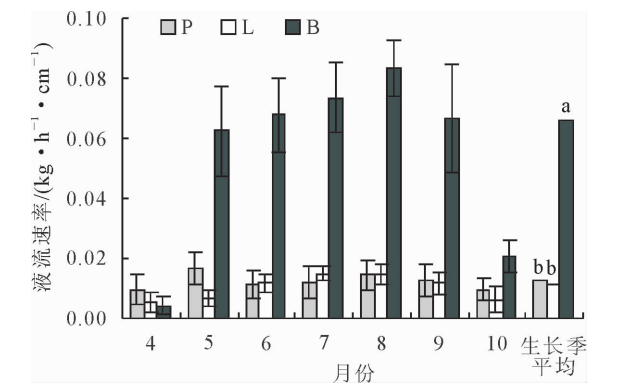


图 2 不同树种树干液流速率月变化  
Fig. 2 Monthly changes of sap flow velocity of different tree species

2.3 不同树种林分耗水量月变化

计算林分耗水量,需要用到整块样地 3 个树种的木质部周长总和。在实际操作中,每个树种选取 20 株钻取木质部,建立木质部周长与胸径的关系式(图 3)。依据样地每木检尺的胸径数据,计算出样地内油松、落叶松、白桦木质部周长总和分别为 1 085.53、1 605.49 cm 和 192.27 cm,代入式(2)和式(3)即可求出林分耗水量  $V$ , $V$  比样地面积即可得出以毫米为单位的耗水量(表 3)。

整个样地林分一个完整生长季总耗水量 297.4 mm,其中油松、落叶松、白桦分别耗水 98.0、118.1、81.3 mm。从样地林分生长季各月耗水量来看,其变化呈“单峰”型,耗水集中在生长旺季 5—9 月,以 7、8 月最高,达到 60.7 mm 和 66.1 mm;5、6、9 月次之,达到 48 mm 以上。对比同期降雨量可见,生长

季林分总耗水量占降雨量的 58.3%,但水量分配不均;6、7、8、10 月降雨量远远大于耗水量,水分供大于求;但 4、5、9 月降雨量小于耗水量,水分供不应求。

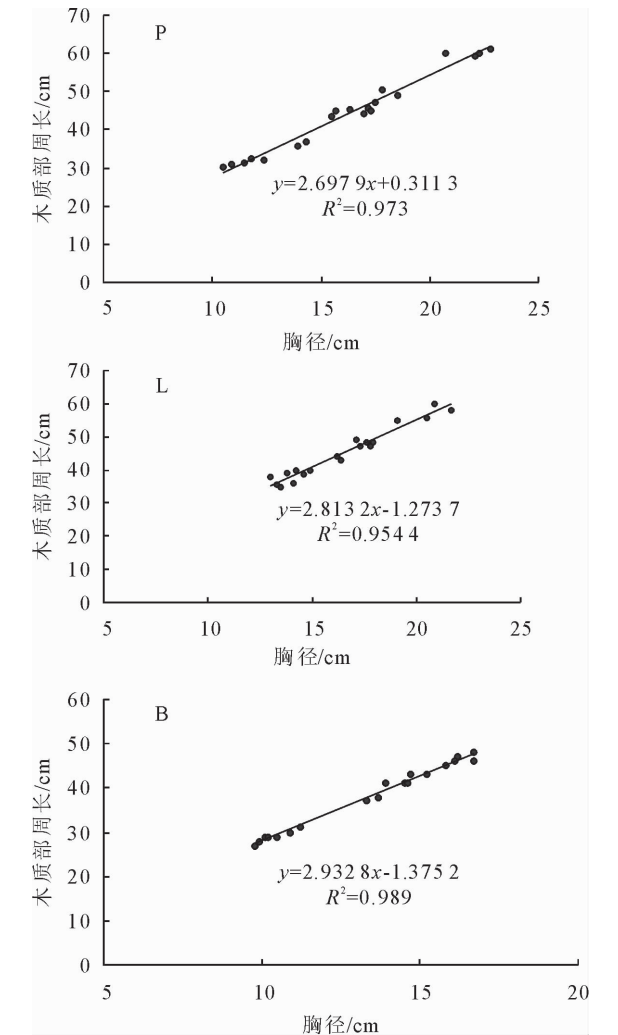


图 3 3 树种木质部周长与胸径的关系  
Fig. 3 Relationship between xylem perimeter and DBH of three tree species

表 3 生长季林分耗水量及同期降雨量特征									
Table 3 Characteristics of forest water consumption in growth season and rainfall in the same period									
树种	项目	月份							合计
		4	5	6	7	8	9	10	
P	耗水量/mm	4.39	21.40	14.36	15.41	18.66	15.90	7.91	98.02
L	耗水量/mm	1.94	13.10	21.86	28.46	28.34	21.64	2.73	118.08
B	耗水量/mm	0.19	14.31	15.00	16.85	19.07	14.77	1.08	81.25
小计	耗水量/mm	6.52	48.81	51.21	60.71	66.07	52.31	11.71	297.35
	同期降雨量/mm	3.10	39.70	54.60	174.70	172.30	41.30	24.50	510.20

2.4 不同树种树干液流速率与环境因子的关系  
通过各环境因子与 3 树种液流速率的 Pearson 相关性分析表明:油松、落叶松、白桦液流速率与气温、净辐射、总辐射、风速、日照时数呈极显著正相关,与空气湿度呈极显著负相关,与土壤温度和土壤含水量相关关系不显著(表 4)。偏相关系数绝对值

的大小可以表征各环境因子在对树干液流速率综合作用中的作用程度。在各环境因子对 3 树种树干液流速率的影响中,气温、土壤温度、日照时数的影响顺序有所变化,但均处于前 3 位,可见气温、土壤温度、日照时数对 3 树种液流速率影响较大。  
为通过气象因子估测小时尺度树干液流速率,

采用多元线性逐步回归分别建立了油松、落叶松、白桦液流速率与环境因子的回归模型(表 5)。油松、落叶松、白桦回归方程决定系数  $R^2$  分别达到 0.825、0.885 和 0.724,说明纳入的相关因子可以解

释液流速率变化的 82.5%、88.5%和 72.4%,可以为气候相近地区油松、落叶松、白桦通过环境因子估测液流速率提供参考。

表 4 树干液流速率与环境因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between sap flow velocity and environmental factors

树种	系数类型	环境因子							
		$T_a$	$RH$	$NR$	$TR$	$S$	$SD$	$T_s$	$SWC$
P	Pearson 相关系数	0.778**	-0.556**	0.469**	0.497**	0.438**	0.798**	0.032	-0.087
	偏相关系数	0.488**	-0.254**	0.103*	0.092*	0.193**	0.353**	-0.282**	-0.025
L	Pearson 相关系数	0.787**	-0.464**	0.458**	0.532**	0.377**	0.877**	-0.002	-0.032
	偏相关系数	0.593**	-0.035	0.071	0.124**	0.110*	0.549**	-0.435**	0.025
B	Pearson 相关系数	0.560**	-0.214**	0.627**	0.622**	0.308**	0.822**	-0.109	-0.037
	偏相关系数	0.260*	0.110	0.101	0.205**	-0.075	0.539**	-0.243**	0.000

注: $T_a$ (气温), $RH$ (空气湿度), $NR$ (净辐射), $TR$ (总辐射), $S$ (风速), $SD$ (日照时数), $T_s$ (20 cm 土壤温度), $SWC$ (20 cm 土壤含水量);  
\* \*  $P<0.01$ ; \*  $P<0.05$ ;  $N_P=528$ ,  $N_L=528$ ,  $N_B=252$ 。

表 5 树干液流速率与环境因子的多元线性回归

Table 5 Multiple linear regression of sap flow velocity and environmental factors

树种	林龄/a	回归方程	$R^2$	$n$	$sig. F$	$P$							
						$T_a$	$RH$	$NR$	$TR$	$S$	$SD$	$T_s$	$SWC$
P	40	$Q=(2.39T_a+11.13SD-0.18RH-1.96T_s+4.46S+0.015NR+0.003TR+25.80)/1000$	0.825	528	0	0	0	0.019	0.034	0	0	0	0.573
L	40	$Q=(2.02T_a+11.79SD-2.08T_s+1.87S+0.002TR+20.74)/1000$	0.885	528	0	0	0.427	0.104	0.005	0.012	0	0	0.564
B	37	$Q=(2.42T_a+77.12SD-6.11T_s+0.039TR+108.41)/1000$	0.724	252	0	0.012	0.085	0.114	0	0.243	0	0	1.000

注: $T_a$ (气温), $RH$ (空气湿度), $NR$ (净辐射), $TR$ (总辐射), $S$ (风速), $SD$ (日照时数), $T_s$ (20 cm 土壤温度), $SWC$ (20 cm 土壤含水量)。

3 讨论

不同树种由于其生物学特性和生长规律不同,而呈现出不同的耗水量变化规律。有学者研究得出辽西地区油松液流速率峰值出现在 6、8 月<sup>[11]</sup>;宁夏六盘山华北落叶松 7、8 月液流速率最高<sup>[12]</sup>;吉林省长春市白桦树干液流速率呈单峰型,峰值出现在 8 月<sup>[13]</sup>。以上研究结果与本文 3 个树种生长季树干液流变化规律基本一致。3 树种随生长月份耗水量表现不同,油松 5 月和 8 月耗水量最大,落叶松和白桦 8 月出现峰值,这主要是由不同树种的生长规律决定的。有研究表明油松胸径生长的高峰期主要集中在 5 月和 8 月,高生长主要在 5 月<sup>[14]</sup>;而落叶松高生长和胸径生长主要集中在 7—9 月<sup>[15]</sup>。然而相同树种在不同的立地、气候条件下由于受到外界因素的胁迫制约,而表现出不同的生长季耗水规律。国内有学者研究得出宁夏六盘山华北落叶松各月液流速率为 6 月>5 月>7 月>8 月>9 月>10 月<sup>[16]</sup>,同一地区不同年度姚依强等<sup>[17]</sup>得出华北落叶松液流速率 7 月最大,5 月次之;东北地区白桦生长季各月树干液流速率呈双峰型,峰值分别出现在 7 月中

和 8 月末<sup>[18]</sup>;经深入分析造成这种情况的主要原因是生长季的干旱胁迫。

白桦液流速率显著高于油松、落叶松,生物学特性是影响其耗水特性的内在因素。生物学特性中,茎木质部构造直接决定了植物体内水分运输的效率,很大程度上决定着蒸腾耗水特征<sup>[9]</sup>。油松、落叶松为裸子植物,木材为无孔材,输水组织由管胞构成;而白桦为被子植物,木材为散孔材,输水组织由导管构成。管胞和导管的结构不同,管胞输水是通过管胞壁上的纹孔,从一个细胞流向另一个细胞;导管输水是通过导管分子间的一个或数个大的孔。白桦输水通过穿孔直接沟通,阻力小,输水能力明显大于管胞<sup>[20]</sup>。这也是大多数被子植物液流速率大于裸子植物液流速率的主要原因。另外,植物受干旱胁迫时木质部形成栓塞和空穴化,抑制水分蒸腾,这种机制与导管的管径、长度、密度有关<sup>[19]</sup>。本研究的 3 个树种受到的干旱胁迫较轻,木质部栓塞和空穴化应不是其耗水差异的主要原因。

当前,热技术方法测定的树干液流都是基于单位边材面积或单位木质部周长的局部液流速率,在上推到林分耗水量时,需要林分的边材面积(或木质

部周长),这种上推是基于单株不同方位和林分不同个体之间树干液流速率无显著差异这一假设的。但是,由于导水组织结构和边材厚度存在空间变异,树木在林分中所处空间位置和分化等级也存在空间差异,导致精确测定单株耗水量尤其是林分耗水量变的十分复杂。有研究表明,辽东栎供试木不同方位液流密度表现出显著差异,北侧、东侧和西侧的液流通量密度较高,南侧较低<sup>[3]</sup>;而黄土山地苹果(*Malus pumila*)液流通量南向最大,北向最小,东西向介于南北向之间<sup>[21]</sup>;各方向变化规律基本一致,而那个方向最具代表性尚没有定论。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<sup>[22]</sup>,东北红松(*Pinus koraiensis*)优势木的日液流通量明显大于中等木,大于被压木<sup>[23]</sup>,因此树干液流在树木空间位置和分化等级上的差异也是造成林分耗水量估算误差的一个原因。但是,就目前技术手段,应用热扩散技术测定树干液流速率,估算单株耗水量和林分耗水量是比较简单可靠的方法,今后有必要深入研究由树干液流速率准确推算林分耗水量的科学方法。

4 结 论

油松、落叶松、白桦 3 树种晴天树干液流速率日变化呈典型的“单峰”曲线,阴天呈“双峰”或“多峰”曲线,雨天呈“多峰”曲线。3 树种树干液流速率均表现为晴天>阴天>雨天。

树龄相近的白桦、油松、落叶松生长季液流速率平均值分别为 0.066、0.013、0.012 kg·h<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>,阔叶树种白桦液流速率明显高于针叶树种,分别是油松、落叶松液流速率的 5.19 倍和 5.75 倍。

林分密度 986 株/hm<sup>2</sup>,油松、落叶松、白桦混交比例分别为 38%、54%、8%,林龄 40 a 左右,林分生长季总耗水量 297.4 mm,其中油松、落叶松、白桦分别耗水 98.0、118.1、81.3 mm。生长季林分耗水量占同期降雨量的 58.3%,4、5、9 月降雨量小于耗水量,水分供不应求。

Pearson 分析结果表明,油松、落叶松、白桦树干液流速率与气温、净辐射、总辐射、风速、日照时数显著正相关,与空气湿度显著负相关,与土壤温度和土壤含水量相关关系不显著;偏相关分析结果表明,影响 3 树种树干液流速率的主导气象因子为气温、土壤温度和日照时数。

参考文献:

[1] 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.

CHENG J,OYANG X,HUANG D W,*et al.* Sap flow characteristics of four dominant tree species in a mixed conifer-broad-leaf forest in Dinghushan[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2015,35(12):4097-4104. (in Chinese)

[2] 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.

SUN L,GUAN W,WANG Y H,*et al.* Simulations of *Larix principis-rupprechtii* stand mean canopy stomatal conductance and its responses to environmental factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2011,30(10):2122-2128. (in Chinese)

[3] 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.

ZHANG J G,YAN M J,SHI W Y,*et al.* Seasonal dynamics and azimuthal variations of sap flow in *Quercus liaotungensis* and their effects on transpiration estimates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2011,25(3):193-197. (in Chinese)

[4] 赵春彦,司建华,鱼腾飞,等. 胡杨树树干液流进程与太阳辐射的关系[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(5):99-104.

ZHAO C Y,SI J H,YU T F,*et al.* Relationship between process of xylem sap flow of *Populus euphratica* and solar radiation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2015,29(5):99-104. (in Chinese)

[5] 秦永建,贾波,毛培利,等. 滨海盐碱地不同衰退程度刺槐树干液流规律[J]. 西北林学院学报,2016,31(6):45-49.

QIN Y J,JIA B,MAO P L,*et al.* A study on variation of stem sap flow of declined *Robinia pseudoacacia* in costal saline soil [J]. *Journal of Northwest Forestry*,2016,31(6):45-49. (in Chinese)

[6] 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.

[7] ORTUNNO 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.

[8] KOHLER M,SCHWENDENMANN L,HOLSCHER D. Throughfall reduction in a cacao agroforest:tree water use and soil water budgeting[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2010,150(7):1079-1089.

[9] 杨广远,张涛,戴锋,等. 天目山柳杉树干液流春秋季节特征及影响因素分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(2):8-14.

YANG G Y,ZHANG T,DAI F,*et al.* Characteristics of stem sap flow of *Cryptomeria fortunei* and relevant factor analysis in spring and autumn at mount Tianmu[J]. *Journal of Northwest Forestry*,2013,28(2):8-14. (in Chinese)

[10] 吴喆滢,赵从举,徐文娟,等. 幼龄桉树茎流特征及其对环境因子的响应[J]. 西北林学院学报,2015,30(5):46-52.

WU Z Y,ZHAO C J,XU W X,*et al.* Characteristics of the sap flow rate of the young *Eucalyptus* and its response to environmental factors[J]. *Journal of Northwest Forestry*,2015,30(5):46-52. (in Chinese)

[11] 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.

LIU M G, TANG J C, WANG Y T, *et al.* Sapwood flow of chinese pine and its affecting factors in west Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(2): 175-179. (in Chinese)

[12] 李海光, 李钢铁, 王彦辉, 等. 六盘山北侧华北落叶松耗水特性研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2008, 29(3): 72-76.

LI H G, LI G T, WANG Y H, *et al.* Study on water consumption characteristics of *Larix principis-rupprechtii* in the North of Liupanshan mountains[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2008, 29(3): 72-76. (in Chinese)

[13] 王慧, 郭静, 王灵艳, 等. 白桦和新疆杨树干茎流变化规律及与环境因子的关系[J]. 吉林林业科技, 2011, 40(4): 18-24.

WANG H, GUO J, WANG L Y, *et al.* Variation of stem flow of *Betula platyphylla* and *Populusalba* var. *pyramdalis* and their relationships to environmental factors[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2011, 40(4): 18-24. (in Chinese)

[14] 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.

[15] 徐成立, 赵久宇, 原民龙, 等. 冀北山地落叶松早期生长监测及管理技术[J]. 河北林果研究, 2006, 21(2): 173-176.

XU C L, ZHAO J Y, YUAN M L, *et al.* Growth observation and management of larch seedlings in Northern Hebei Province[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2006, 21(2): 173-176. (in Chinese)

[16] 冯永建, 马长明, 王彦辉, 等. 华北落叶松人工林蒸腾特征及其与土壤水势的关系[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 93-98.

FENG Y J, MA C M, WANG Y H, *et al.* Relationship between the characteristics of transpiration of *Larix principis-rupprechtii* forest and soil water potential[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(1): 93-98. (in Chinese)

[17] 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素及关系的时间尺度变化[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 155-161.

YAO Y Q, CHEN K, WANG Y H, *et al.* Relationships between sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and environmental factors and their variation with time scales[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 155-161. (in Chinese)

[18] 孙慧珍. 东北东部山区主要树种树干液流动态及其与环境因子关系[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002: 45-46.

[19] 刘春鹏, 马长明, 王连春, 等. 酸枣荆条耗水特征及其茎木质部解剖构造[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 92-97.

LIU C P, MA C M, WANG L C, *et al.* Water-consumption characteristics and stem xylem anatomical structure of *Zizyphus jujuba* and *Vitex negundo* var. *heterophylla*[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 92-97. (in Chinese)

[20] 王秀伟, 毛子军. 输导组织结构对液流速度和树干 CO<sub>2</sub> 释放通量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 9-15.

WANG X W, MAO Z J. Effects of conducting tissue structure on sap flow density and stem CO<sub>2</sub> efflux[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 9-15. (in Chinese)

[21] 孟秦倩, 王健, 张青峰, 等. 黄土地带苹果树树体不同方位液流速率分析[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3555-3561.

MENG Q Q, WANG J, ZHANG Q F, *et al.* Directional flow rate determination in trunks of apple trees in China's Loess Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3555-3561. (in Chinese)

[22] 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.

XIONG W, WANG Y H, YU P T, *et al.* Variation of sap flow among individual trees and scaling-up for estimation of transpiration of *Larix principis-rupprechtii* stand[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(1): 34-40. (in Chinese)

[23] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 等. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 8-14.

SUN L, WANG C K, YANG G T, *et al.* Sapflow flux of *Pinus koraiensis* plantation measured by thermal dissipation probes[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(11): 8-14. (in Chinese)