



# 不同径级的西伯利亚红松树干液流及蒸腾耗水特征的差异

刘 华<sup>1</sup>,余春燕<sup>1</sup>,白志强<sup>2\*</sup>,李 倩<sup>1</sup>,刘 端<sup>2</sup>,韩燕梁<sup>2</sup>

(1 安徽农业大学 林学与园林学院,合肥 230036;2 新疆林业科学院森林生态研究所,乌鲁木齐 830000)

**摘要:**基于热扩散技术,采用 TDP 法连续监测了新疆喀纳斯国家自然保护区内不同径级西伯利亚红松的树干液流,分析其在生长季内(6~9 月)的液流变化及蒸腾耗水特性,为阐明喀纳斯保护区优势树种水分循环机理,以及理解区域尺度上森林生态系统水分循环及其过程应对未来气候变化的响应机制提供依据。结果显示:(1) 不同径级西伯利亚红松在晴、阴、雨 3 种天气条件下的树干液流日动态变化均呈昼高夜低的多峰型曲线,但变化频率和变化幅度差异明显,日最大液流值的排序为晴天>阴天>雨天。(2) 树干液流的发生较光合有效辐射的变化存在明显的滞后效应,不同径级西伯利亚红松的最大液流峰值滞后时间在 30~207 min。(3) 西伯利亚红松的月平均树干液流的大小顺序为 7 月>8 月>9 月>6 月,且相同径级树干阳生面的液流速率均大于阴生面。(4) 西伯利亚红松全株的蒸腾耗水量为 7 月份的最大,其值占整个生长季的 61.8%;且大径级阳生面的蒸腾耗水总量(6 716.79 g)和阴生面蒸腾耗水总量(4 649.08 g)分别是相应小径级阳生面和阴生面的 2.00 和 2.45 倍。(5) 气温、空气相对湿度和光合有效辐射是影响西伯利亚红松树干液流的主要因素,同时 0~5 cm 和 20~30 cm 土壤温度对其影响也较大。研究表明,西伯利亚红松在生长过程中,大径级树干的液流和蒸腾耗水量大于小径级,主要发生部位为树干的阳生面,且在 7 月份的变化最明显。

**关键词:**西伯利亚红松;径级;树干液流;蒸腾耗水

**中图分类号:**Q945.79

**文献标志码:**A

## Sap Flow and Transpiring Water-consumption of *Pinus sibirica* in Differernt Diameter Classes

LIU Hua<sup>1</sup>, SHE Chunyan<sup>1</sup>, BAI Zhiqiang<sup>2\*</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, LIU Duan<sup>2</sup>, HAN Yanliang<sup>2</sup>

(1 School of Forest & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Forestry Academy Science, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In order to know the different capacity of water cycle in the forest ecosystem, we monitored the trunk sap flow in different diameter at breast height (DBH) of *Pinus sibirica* which in sunny side and shady side using TDP (thermal dissipation method) constantly in the Kanas National Nature Reserve, northwest of Xinjiang. The aims were to explain the relationship between water cycle of tree and environment, and provide basis on forest ecosystem water cycle responding to the climate change in the regional scale. The results showed that:(1)the diurnal variation of sap flow in sunny day, rainy day, and cloudy day were all multi-peak type. There were significant changes on frequency and range among these three weather conditions. The sequence of daily maximum sap flow value was sunny day>cloudy day>rainy day. (2)

收稿日期:2015-10-30;修改稿收到日期:2016-01-03

基金项目:新疆林业生态服务功能的监测与评估(xjlk[2013]001 号);安徽农业大学学科与学位点建设项目(2013017)

作者简介:刘 华(1976—),女,博士,副教授,主要从事森林生态系统结构与功能方面的研究。E-mail:liuhuanmg@126.com

\* 通信作者:白志强,高级工程师,主要从事森林生态定位监测技术方面的研究。E-mail:bai1963@163.com

There was the hysteresis effect between sap flow and photosynthetically active radiation, hysteresis time of the maximum sap flow was about 30—207 min, respectively. (3) From June to September, the sap flow of *P. sibirica* in the sunny side were greater than those in the shady side, and the sequence of monthly mean sap flow was July > August > September > June. (4) The maximum transpiring water-consumption of *P. sibirica* was in July, and the value of it was 61.8% of the total value of whole growing season. Total transpiring water-consumption of *P. sibirica* with big diameter was 6 716.79 g in sunny side, while 4 649.08 g in the shady side. It was the 2.00 times and 2.45 times small diameter of *P. sibirica*, respectively. (5) Air temperature, air relative humidity, and photosynthetically active radiation were significant factors that affected the sap flow. Otherwise, the soil temperature in the layer of 0—5 cm and 20—30 cm were highly impacted on the sap flow too. This research showed that both sap flow and transpiring water-consumption of *P. sibirica* with big diameter were higher than that of *P. sibirica* with small diameter in the process of growth; these changes mainly happened in the sunny side of the trunk, especially in July.

**Key words:** *Pinus sibirica*; diameter at breast height (DBH); thermal dissipation method; forest transpiration water consumption

蒸腾作用是森林水循环的一个主要部分,与光合作用及碳循环紧密相连<sup>[1]</sup>。林木蒸腾耗水过程包括林木从土壤中吸收的液态水,经由气孔蒸腾转化为气态水,并可通过测定树干液流来估算林木的蒸腾耗水量<sup>[2]</sup>。随着水分运移过程产生的树干液流是表征树体内水分动态变化及其生理功能的关键指标<sup>[3]</sup>。准确测定树干液流及估算林木蒸腾耗水速率是评估树木利用土壤水分及应对干旱危险的重要指标<sup>[4]</sup>。基于热扩散原理的液流测定技术(therm dissipation probe, TDP)具有野外携带方便、易操作、不受地形和空间异质性的影响的优点,适合持续测定山地环境条件下的林木液流及蒸散量<sup>[5]</sup>。研究表明,液流变化与环境温度<sup>[6]</sup>和水汽压亏缺(VPD)<sup>[7]</sup>密切相关。蒸散量估算包括树木体内、林木个体和林分3个尺度<sup>[8-10]</sup>。Tateishi等<sup>[11]</sup>对日本蓝橡树(*Quercus glauca* Thunb. ex Murray)的研究发现,其树干液流存在明显的时空差异,若只对一个方位进行测量推算整树耗水量,将会引起近20%的误差。在对单株进行蒸腾耗水量测算时,其差异影响较小,但在林分区域尺度上的差异则不容忽视。

西伯利亚红松[*Pinus sibirica* (Loud.) Mayr.]为松科松属的常绿乔木,在中国仅分布于阿尔泰山西北部,面积狭小,是中国特有的南泰加林的树种之一,也是国家二级保护渐危种。其球果易遭动物啃食,林下天然更新不良,幼苗极少。西伯利亚红松在森林生态系统水分循环、能量流动、有机物质累积以及碳增汇等方面具有重要的生态功能。目前对它的研究主要侧重林分结构、土壤呼吸、碳储量及干扰对其种群的影响等方面<sup>[12-15]</sup>。在全球气候变化引起的气温升高和降水格局变化的背景下,关于该树种参

与森林生态系统水分循环机理等方面的研究较少。因此,本研究利用热扩散法在生长季内连续对不同径级西伯利亚红松阳面与阴面的树干液流进行监测,分析树干液流的季节变化动态及其与环境因子的相互关系,揭示该树种蒸腾耗水特性和对环境条件改变的应激响应机制,为进一步探求其水分动态调控机制,分析其对森林生态系统物质循环关键过程提供基础数据。

## 1 研究区概况

研究地点位于新疆喀纳斯国家自然保护区内( $48^{\circ}26'18''\sim48^{\circ}38'56''N, 87^{\circ}01'45''\sim87^{\circ}33'50''E$ ),该保护区大陆性气候明显,年平均温度 $-0.2^{\circ}C$ ,最高气温 $29.3^{\circ}C$ ,最低气温 $-37^{\circ}C$ , $\geq10^{\circ}C$ 的年活动积温 $1 595.4^{\circ}C$ ,无霜期为 $80\sim100$  d,年均日照时数为2 157.4 h,年均降水量1 065.4 mm,年均蒸发量为1 097 mm。因其特殊的地理位置、多样的地貌和水热组合条件,土壤和植被类型表现出明显的垂直地带性,是中国唯一的欧洲西伯利亚植物区系。自然保护区内已知的维管束植物有83科298属798种,并保存以泰加林为代表的天然森林生态系统。区内乔木优势树种为西伯利亚红松、西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ledeb.)和西伯利亚云杉(*Picea obovata* Ledeb.),伴生有西伯利亚冷杉(*Abies sibirica* Ledeb.)、疣枝桦(*Betula pendula* Roth.)、山杨(*Populus tremula* Linn.)等。其中,西伯利亚云杉、西伯利亚冷杉、西伯利亚红松被列入国家二级濒危野生植物。灌木优势种有大叶绣线菊(*Spiraea chamaedryfolia* Linn.)、多刺蔷薇(*Rosa spinosissima* Linn.)、蓝果忍冬(*Lonicera caerulea* Linn.)

等。草本优势种有多叶苔草 (*Carex polypylalla* Kar. et Kir.)、早熟禾 (*Poa nemoralis* Linn.)、白喉乌头 (*Aconitum leucostomum* Worosch.)、柳兰 [*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.] 等植物。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验材料

在喀纳斯自然保护区内海拔 1 400 m 处的长期固定监测大样地内,选择生长良好、曲干通直、无病害的 2 个径级的西伯利亚红松各 3 株,树皮厚度和边材面积在试验完成后用生长锥和直尺测定,其特征见表 1。

### 2.2 试验方法

在 2013 年 6~9 月期间,采用 FLGS-TDP XM1000 插针式热耗散植物茎流计 (Dynamax, USA) 对已选择的 6 株样树的树干液流进行测定。先在样木的 1.3 m 处,去除阳生面、阴生面粗糙的树皮,各形成一个长 10 cm、宽 4 cm 的矩形(不破坏形成层),后用 10% chlorox 清洗过的 0.059" 钻头钻孔,将 TDP 50 探针缓慢平滑插入钻孔内,直至西伯利亚红松的木质部。再在探针周围涂抹胶泥密封并安装 1/4 球状泡沫,以防止因水分接触探针而引起热沉效应,并保护传感器,增加探针周围的绝热效果。最后用反射性泡沫铝膜把树干的泡沫球和 TDP50 探针安装部位包裹起来,用胶带密封包裹的上方,下方留出适当的空隙以便部分水分流出。将探针 TDP50 缆线与数据采集器 (DT50) 相应接口连接,接通电源,启动 PC400 测定程序,设定为每隔 1 min 记录 1 次数据。测定树干液流的同时,利用样地内安装的 AMS-1000 自动气象站,收集气温、太阳有效辐射、空气相对湿度、风速等数据。并在样地内布设 EM50 土壤水分监测仪,测定 L<sub>1</sub>(0~5) cm、L<sub>2</sub>(5~10) cm、L<sub>3</sub>(10~20) cm 和 L<sub>4</sub>(20~30) cm 层的土壤温度。

### 2.3 数据处理

液流指数、液流速率和液流质量流量和蒸腾耗水量的计算分别见公式(1)~(4)。其中,液流指数 (K) 是由液流测量温度差值( $dT$ )和无液流时的温差最大值( $dT_M$ )决定<sup>[16]</sup>; 液流速率( $V$ )表示测量位点液流大小; 液流通量( $F_s$ )表示测量位点木质部的液流量大小; 蒸腾耗水量( $T$ )可根据液流通量求出<sup>[17]</sup>。不同径级西伯利亚红松树干液流采用 SPSS 17.0 进行方差分析和检验差异显著性。

$$K = (dT_M - dT) / dT \quad (1)$$

$$V(\text{cm/s}) = 0.0119 \times K^{1.231} \quad (2)$$

$$F_s(\text{g/h}) = S_A \times V \times 3600 \quad (3)$$

$$T(\text{g}) = F_s \times t \times 99.8\% \quad (4)$$

式中,  $S_A$  为胸径处边材面积( $\text{cm}^2$ ),  $t$  为测定时间, 99.8% 表示叶片的蒸腾作用所占树干液流的比例。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同天气条件下西伯利亚红松树干液流速率的日变化特征

由图 1 可知, 不同径级西伯利亚红松树干液流, 在晴、阴和雨 3 种天气条件下均呈昼高夜低的变化规律, 但在液流启动时间、最大液流峰值大小及达到峰值的时间存在一定差异。相同径级的阳生面与阴生面树干液流变化趋势、启动时间及达到峰值时间一致, 且阳生面的树干液流速率均大于阴生面的。大、小径级的西伯利亚红松在 3 种天气条件下的树干液流平均值大小顺序均表现为晴天 > 阴天 > 雨天。其中, 大径级西伯利亚红松阳生面树干液流的日变化峰值在晴天、阴天和雨天分别为 22.67、22.11 和 17.14 cm/h, 分别是相应阴生面的 1.30、1.16 和 1.25 倍; 小径级西伯利亚红松阳生面树干液流日变化峰值在晴天、阴天和雨天条件下则分别为 19.68、19.51 和 11.81 cm/h, 分别是相应阴生面的 1.36、1.35 和 1.44 倍。

树干液流变化在 3 种天气条件下均为多峰型。

表 1 研究区内西伯利亚红松样树的特征

Table 1 Characteristics of *P. sibirica* sample trees in the experimental site

径级 Diameter class	样树编号 No.	树高 Height/m	胸径 DBH/cm	冠幅 Crown width/m <sup>2</sup>	边材面积 Sapwood area/cm <sup>2</sup>	树皮厚度 Bark thickness/cm
大径级 Big diameter	1	19.3	22.1	14.23	326.56	0.56
	2	18.9	17.5	11.19	206.17	0.47
	3	19.0	20.2	13.72	285.39	0.51
小径级 Small diameter	4	9.6	11.6	5.16	77.72	0.45
	5	9.3	11.2	4.83	61.53	0.43
	6	8.7	9.0	4.09	49.24	0.39

其中,晴天条件下液流变化的频率较高,且大径级西伯利亚红松的树干液流活动时间较小径级的长。13:00~17:00时段内的液流维持较高的水平,其变化的最大峰值接近;10:00前大小径级的西伯利亚红松树干液流均较低,随着光照强度及温度的增加,叶片光合气孔的开放促进了树液流动,但小径级西伯利亚红松在12:00~20:00时段内的液流波动较 大径级的剧烈。20:00之后随着光合有效辐射及气温的下降,液流开始下降。22:00~2:00夜晚时段,大径级西伯利亚红松树干液流处于低水平,由于白天蒸腾消耗水分较多进而通过夜间补水,维持自身水分平衡<sup>[18]</sup>,而小径级西伯利亚红松在22:00起的树干液流基本为0。在阴天条件下,不同径级西伯利亚红松树干液流最大值均出现在16:00左右,其夜间的树干液流明显。受光合有效辐射的影响,大小径级西伯利亚红松在雨天条件下树干液流启动时间均比晴天晚约6 h,比阴天晚约2 h,并在17:00时

出现液流的波谷;自22:00起的夜晚时段,大径级西伯利亚红松液流处于低水平,小径级西伯利亚红松树干液流接近于0。

### 3.2 大小径级西伯利亚红松树干液流月变化特征

在生长季内,大、小径级西伯利亚红松6~9月的平均树干液流变化趋势为先增后减,这与光合有效辐射的月变化规律具有一致性,两者大小变化规律均为7月>8月>9月>6月(图2)。

表2显示了6~9月树干液流与光照强度的动态关系。随着太阳高度角的偏移,日照时间变短,树干液流开启时间随着光合有效辐射开启时间的后移出现了明显的滞后现象。光合有效辐射达到峰值的时间为14:10~15:00,而对于不同径级西伯利亚红松来说,达到峰值的时间在14:42~17:20之间,滞后时间在30~207 min之间。其中,大径级西伯利亚红松树干液流开启时间比小径级的早52~184 min,这主要是因为大径级西伯利亚红松处于林冠

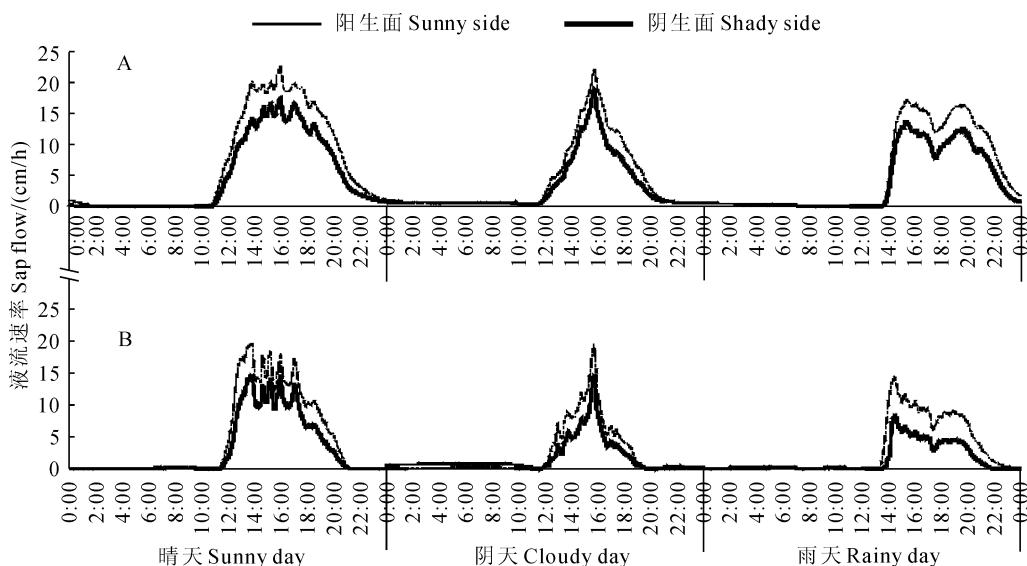


图1 不同天气条件下大(A)、小(B)径级西伯利亚红松树干液流速率的日变化

Fig.1 Sap flow diurnal variation of big(A) and small(B) diameter classes of *P. sibirica* in sunny, cloudy and rainy day

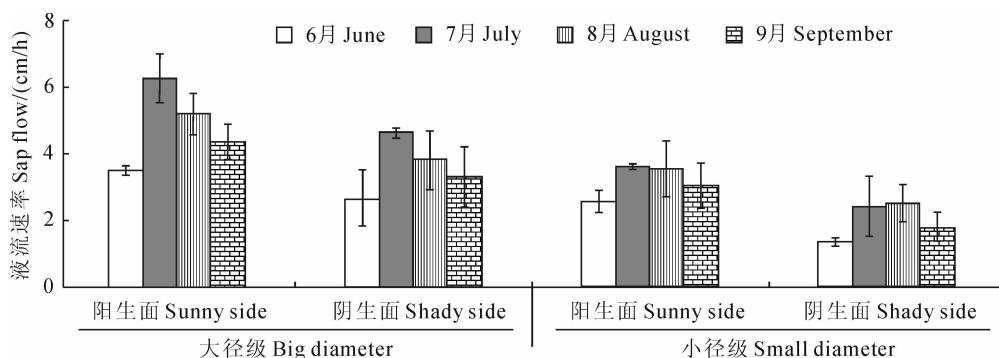


图2 不同径级西伯利亚红松月平均树干液流速率

Fig.2 Average monthly changes of sap flow of sample trees in the growing season

上层,接受到光照的时间早于小径级的。另外,在不同月份中,二者阳生面的树干液流均大于阴生面的,大径级和小径级西伯利亚红松阳生面树干液流分别是其阴生面的1.07~1.32倍和1.16~1.37倍;大、小径级西伯利亚红松阳生和阴生面的月平均树干液流排序均为7月>8月>9月>6月。

### 3.3 不同径级西伯利亚红松生长季的蒸腾耗水量

树木从土壤中吸收水分的90%都用于蒸腾作用,树干液流的99.8%都用于叶片的蒸腾作用<sup>[17]</sup>。大、小径级西伯利亚红松阳生面和阴生面树干液流在不同月份的总量及其总蒸腾耗水量存在差异(表3)。大径级西伯利亚红松的月液流总量和蒸腾耗水总量均大于小径级的。这是由于阳生面与阴生面的冠幅大小差异及光照对导管分布的影响,导致西伯利亚红松阳生面与阴生面的树干液流与蒸腾耗水量也存在不对等性。大径级和小径级西伯利亚红松阳

生面蒸腾耗水量分别是其相应阴生面的1.28~1.55倍和1.32~2.54倍;大径级西伯利亚红松的全株蒸腾耗水量是小径级的2.16倍,两者分别为11 365.87和5 255.74 g。在生长季内,大小径级西伯利亚红松树干液流总量和蒸腾耗水总量以7月份的最大,6月份的最小,大小排序均为7月>8月>9月>6月。在7月份,大、小径级西伯利亚红松阳生面的月蒸腾耗水量均占全株总蒸腾耗水量的37.6%,其阴生面的月蒸腾耗水量分别占全株总蒸腾耗水量的24.2%和19.7%;而6月份的大、小径级西伯利亚红松阳生面的月蒸腾耗水量分别占全株总蒸腾耗水量的4.46%和2.54%,其阴生面的蒸腾耗水量分别占全株总蒸腾耗水量的5.49%和4.16%。

### 3.4 西伯利亚红松树干液流与环境因子的相关性

以大小径级西伯利亚红松树干阳生面、阴生面

表2 光合有效辐射及不同径级西伯利亚红松树干液流的月变化

Table 2 Monthly changes of PAR and trunk sap flow of *P. sibirica* in the growing season

月份 Month	光合有效辐射 PAR/(μ mol·m⁻²·s⁻¹)			树干液流 Sap flow/(cm/h)			
	开启时间 Starting time	峰值时间 Peak time	峰值 Peak	样本 Sample tree	开启时间 Starting time	峰值时间 Peak time	峰值 Peak
6	5:50	14:10	2 357.17	BDP	SSP	10:33	25.47
				SHP	10:40	14:39	21.28
				SDP	SSP	11:40	18.86
				SHP	11:57	17:09	13.85
7	6:10	15:00	2 539.147	BDP	SSP	11:04	26.38
				SHP	11:34	14:50	19.91
				SDP	SSP	11:53	22.37
				SHP	12:19	17:20	16.38
8	6:50	14:20	2 215.154	BDP	SSP	11:14	24.74
				SHP	11:53	15:29	19.80
				SDPP	SSP	12:16	24.00
				SHP	12:36	16:21	18.04
9	7:40	14:30	1 955.847	BDP	SSP	11:36	25.49
				SHP	11:51	14:53	23.89
				SDP	SSP	12:10	15:02
				SHP	12:28	17:57	20.98
						12:28	18.14

注:BDP. 大径级西伯利亚红松;SDP. 小径级西伯利亚红松;SSP. 树干阳生面;SHP. 树干阴生面;下同。

Note: BDP. *P. sibirica* with big diameter; SDP. *P. sibirica* with small diameter; SSP. Sunny side of trunk; SHP. Shady side of trunk; the same as below.

表3 不同径级西伯利亚红松的月树干液流总量和月蒸腾耗水总量

Table 3 Monthly sap flow volume and monthly transpiration consumption of *P. sibirica*

月份 Month	树干液流总量 Total sap flow/g				总蒸腾耗水量 Total transpiration consumption/g			
	BDP		SDP		BDP		SDP	
	SSP	SHP	SSP	SHP	SSP	SHP	SSP	SHP
6	507.39d	396.40c	289.39d	219.23c	506.38d	395.61c	288.81d	218.79c
7	4 280.07a	2 761.29a	1 981.42a	1 046.29a	4 271.51a	2 755.77a	1 977.46a	1 044.20a
8	1 081.53b	848.04b	651.35b	457.45b	1 079.37b	846.34b	650.05b	456.54b
9	861.26c	652.67b	445.77c	175.38d	859.54c	651.36b	444.88c	175.03c
总计 Total	6 730.25	4 658.04	3 367.93	1 898.35	6 716.79	4 649.08	3 361.19	1 894.55

注:同列不同字母表示不同月份间树干液流和蒸腾耗水量在0.05水平存在显著性差异。

Note: The different letters in the same column mean significant difference of sap flow and transpiration consumption among months at 0.05 level.

表 4 不同径级西伯利亚红松树干液流与环境因子的相关系数

Table 4 The correlation coefficient between meteorological factors and sap velocity of *P. sibirica* with different diameters

树种 Species	气温 <i>T</i>	空气相对湿度 <i>AH</i>	水汽压 <i>VDP</i>	光合有效辐射 <i>PAR</i>	风速 <i>WS</i>	土壤温度 <i>ST</i>			
						0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
BDP	SSP	0.818 **	-0.777 **	0.053 **	0.559 **	0.298 **	0.079 **	0.018	0.015
	SHP	0.800 **	-0.769 **	0.032 **	0.542 **	0.294 **	0.062 **	0.001	-0.003
SDP	SSP	0.743 **	-0.806 **	0.149 **	0.633 **	0.320 **	-0.153 **	-0.187 **	-0.173 **
	SHP	0.697 **	-0.772 **	0.099 **	0.578 **	0.302 **	-0.184 **	-0.217 **	-0.203 **

的树干液流为因变量,以空气相对湿度、光合有效辐射、水汽压、气温、风速以及不同层次的土壤温度为自变量,进行相关分析,相关系数值见表 4。从相关系数的绝对值来看,气象因子对大径级西伯利亚红松树干液流影响排序为:气温>空气相对湿度>光合有效辐射>风速>水汽压,小径级西伯利亚红松则为:空气相对湿度>气温>光合有效辐射>风速>水汽压,气温、空气相对湿度、光合有效辐射均居前三位,相关系数绝对值均在 0.5 以上,关系更为密切。其中,大径级西伯利亚红松阳生面、阴生面树干液流与气温、水汽压、光合有效辐射、风速、0~5 cm 土壤温度和 20~30 cm 土壤温度均呈极显著正相关,与空气相对湿度均呈极显著负相关( $P<0.01$ );小径级西伯利亚红松阳生面、阴生面树干液流与气温、水汽压、光合有效辐射、风速呈极显著正相关,与空气相对湿度和不同层次土壤温度呈极显著负相关( $P<0.01$ )。0~5 cm、20~30 cm 土层是西伯利亚红松侧根和主根主要分布的范围,因此不同层次土壤温度对大径级西伯利亚红松的影响差异较大;土壤因子对不同径级西伯利亚红松树干液流影响差异较大,这主要因为小径级西伯利亚红松还处于幼龄林阶段,其生理代谢速率较慢,光合作用的受到影响小,从土壤中吸收的水分已足够自身的生理代谢所需,能够通过自身调节机制控制水分的进出。

基于环境因子对不同径级西伯利亚红松的树干液流的影响,建立树干液流与环境因子的预测回归模型。结果表明,光合有效辐射对阳生面树干液流有影响,对阴生面树干液流无影响,其它环境因子(气温、空气相对湿度、水汽压、风速)对树干液流影响也选入了方程,相关系数 *R* 均大于 0.8,影响决定系数 *R*<sup>2</sup> 均大于 0.7,说明方程均能很好地说明不同径级西伯利亚红松阳生面、阴生面树干液流随环境因子的变化规律。

$$Y_1 = -3.253 + 0.553T - 0.067AH - 5.384VDP + 0.001PAR (R=0.885, R^2=0.782) \quad (5)$$

$$Y_2 = -3.218 + 0.455T - 0.039AH - 5.157$$

$$VDP - 0.011WS (R=0.875, R^2=0.766) \quad (6)$$

$$Y_3 = 1.896 + 0.73T - 0.001AH - 7.509VDP + 0.001PAR (R=0.869, R^2=0.755) \quad (7)$$

$$Y_4 = 0.326 + 0.699T - 0.046AH - 8.285VDP - 0.052WS (R=0.847, R^2=0.717) \quad (8)$$

式中,  $Y_1$  和  $Y_2$  分别为大径级西伯利亚红松阳生面和阴生面的树干液流;  $Y_3$  和  $Y_4$  分别为小径级西伯利亚红松阳生面和阴生面的树干液流。

#### 4 讨论与结论

TDP 技术是基于热补偿性原理,在树木自然生长状态下测量其树干木质部上升液流的速度及流量,进而间接确定树冠蒸腾耗水量,具有较高的准确性和简便性<sup>[19-20]</sup>。树干液流的变化所受影响因子复杂。首先,从树木特性上,阔叶树的树干液流速率通常大于针叶树<sup>[21]</sup>,乔木的液流速率及蒸腾耗水量均大于灌木的<sup>[22]</sup>,但不管是常绿的还是落叶的,在由生长季进入非生长季时常会出现一个液流峰值,是树木应对冬眠的一种生理措施<sup>[23]</sup>;同龄林中树体优势度大的树干液流速率及流量等指标均大于优势度小的<sup>[24]</sup>。Delzon 等<sup>[25]</sup>的研究也显示树龄大小对树干液流也存在明显的影响,若忽视 10 年、32 年、54 年和 91 年生海松(*Pinus pinaster*)树干液流的径向变化,会导致林冠蒸腾分别被高估 4%、14%、26% 和 47%。本研究结果表明,不同径级西伯利亚红松阳面树干液流均大于阴面树干液流,若以阳面树干液流来测算整棵西伯利亚红松的液流,大径级西伯利亚红松将会被高估 15.4%,小径级西伯利亚红松将会被高估 21.8%。因此,在进行预测区域林分蒸腾耗水时,由于树干方位不同产生的液流差异不容忽视,如何能更准确测定试验材料的树干液流,这将是下一步研究的重点。

其次是环境因子,西伯利亚红松树干液流在 6~9 月生长季内均呈昼夜节律变化规律,主要的影响因素为气温、空气相对湿、水汽压亏缺和光照强度。这不同于荒漠生态系统中胡杨<sup>[26]</sup>及干旱区的

苹果树<sup>[27]</sup>的树干液流主要影响因子——光合有效辐射和空气相对湿度。此外,土壤温度虽不是影响不同径级西伯利亚红松树干液流的主导因子,但其存在显著关系。徐军亮等<sup>[28]</sup>研究表明土壤温度虽不是影响液流大小的直接因子,但对液流的活动有着重要的影响,尤其在土壤冻结初期和解冻时期。西伯利亚红松是浅根系树种,0~5 cm 和 20~30 cm 土壤温度对西伯利亚红松树干液流影响极显著,因为这主要是西伯利亚红松的主根和侧根分布的土层范围。土壤温度通过影响根系层吸水温度,进而改变植物的水力导度起作用,同时也影响土壤的孔隙结构和供水性能,进一步对土壤中水的运动特性以及水分的有效性产生作用,最终影响植物的蒸腾。Chelcy 等<sup>[29]</sup>认为在土壤含水量相对充足时,树木蒸腾耗水则与直接作用于蒸腾作用介质的气象因子相关更为密切。土壤中的水分是如何与树木根部协同作用的,是否存在一定的量化关系,且土壤不同层次湿度与树干液流之间是否也存在着一定相关性,还有待于进一步研究。

树干液流与各气象因子变化具有非同步性,存在一定的时滞效应。一方面是由于树木生理反应对气象因子有滞后过程;因水容的存在,树木首先利用的水分是自身存储水,当气孔开启,冠层叶片先利用自身的储存水进行蒸腾作用,等体内水分被蒸腾消耗到一定程度,水势下降,拉动树干的水分向上移动从而启动树干液流。西伯利亚红松树干液流与光合有效辐射存在明显的滞后效应,西伯利亚红松树干液流开启时间比太阳辐射滞后 5~6 h,达到峰值时间比太阳有效辐射滞后 29 min~1 h。另一方面是高温、强辐射、高水汽压亏缺可能会对树木蒸腾造成胁迫;赵春彦等<sup>[30]</sup>的研究发现胡杨树干液流开启时间比太阳有效辐射晚 1~4 h,达到峰值时间比太阳有效辐射晚 5~7 h。梅婷婷等<sup>[31]</sup>研究发现树干水分传输过程中存在液流再分配的现象,边材的导水效率可能是影响时滞的重要原因。如何准确估算林分的蒸腾耗水量,掌握植株水分需求,对选择节水耐旱植株、确定合理的造林密度、建立科学合理的耗水模型具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] JASECHKO S, SHARP Z D, GIBSON J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. *Nature*, 2013, 496:347-350.
- [2] ORTUÑO M F, GARCÍA-ORELLANA Y, CONEJERO W, et al. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees[J]. *Trees*, 2006, **20**(1):1-8.
- [3] STEPPE K, VANDEGEHUCHTE M W, TOGNETTI R, et al. Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning[J]. *Tree Physiology*, 2015, **35**(4):341-345.
- [4] BAUMGATEN M, WEIS W, KÜHN A, et al. Forest transpiration-targeted through xylem sap flux assessment versus hydrological modeling[J]. *European Journal of Forest Research*, 2014, **133**(4):677-690.
- [5] FORD C R, HUBBARD R M, KLOEPPEL B D, et al. A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **145**(3-4):176-185.
- [6] CHANG X X, ZHAO W Z, HE Z B. Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **187**:14-21.
- [7] JUHÁSZ Á, SEPSI P, NAGY Z, et al. Water consumption of sweet cherry trees estimated by sap flow measurement[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, **164**:41-49.
- [8] GEBAUER T, HOMA V, LEUSCHNER C. Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species[J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**(12):1 821-1 830.
- [9] KUME T, OTSUKI K, DU S, et al. Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees; its impact on stand-scale transpiration estimates[J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(8):1 161-1 168.
- [10] KUME T, TSURUTA K, KOMATSU H, et al. Effects of sample size on sap flux-based stand-scale transpiration estimates[J]. *Tree Physiology*, 2010, **30**(1):129-138.
- [11] TATEISHI M, KUMAGAI T, UTSUMI Y, et al. Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial-porous wood: comparisons with anatomical observations[J]. *Trees*, 2008, **22**(1):23-30.
- [12] 张帆, 刘华, 方岳, 等. 阿尔泰山地天然针叶林林分空间结构特征[J]. 安徽农业大学学报, 2014, **41**(4):629-635.  
ZHANG F, LIU H, FANG Y, et al. Stand spatial structure of natural coniferous forest in the Altai Mountains of Xinjiang [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, **41**(4):629-635.
- [13] 叶高, 刘华, 白志强, 等. 喀纳斯自然保护区 3 种天然林分土壤呼吸速率的动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(3):77-80.  
YE G, LIU H, BAI Z Q, et al. Dynamics of soil respiration rate of

- three natural forests in Kanas Nature Reserve[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, **42**(3): 77-80.
- [14] 方 岳, 刘 华, 藏润国, 等. 新疆喀纳斯保护区森林植被碳储量、碳密度研究[J]. *南京林业大学学报*, 2014, **38**(6): 17-22.  
FANG Y, LIU H, ZANG R G, et al. Spatial pattern of carbon storage and carbon density in forest vegetation of the Kanas National Natural Reserve[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2014, **38**(6): 17-22.
- [15] 刘翠玲, 潘存德, 巴扎尔别克·阿斯勒汗, 等. 自然火干扰对新疆喀纳斯旅游区森林景观树种结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(3): 555-562.  
LIU C L, PAN C D, ALESIHAN B, et al. Effects of natural fire disturbance on structure of tree species in Kanas Tourism District, Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(3): 555-562.
- [16] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, **8**: 309-320.
- [17] 王 森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 长白山地区红松树干呼吸的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(1): 7-13.  
WANG M, JI L Z, LI Q R, et al. Stem respiration of *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(1): 7-13.
- [18] 陈立欣, 张志强, 李湛东, 等. 大连4种城市绿化乔木树种夜间液流活动特征[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(5): 535-546.  
CHEN L X, ZHANG Z Q, LI Z D, et al. Nocturnal sap flow of four urban greening tree species in Dalian, Liaoning Province, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2010, **34**(5): 535-546.
- [19] NICOLAS E, TORRECILLAS A, ORTUNO M F, et al. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, **72**: 131-145.
- [20] LU P, URBAN L, ZHAO P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees; theory and practice[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **46**(6): 631-646.
- [21] 聂立水, 李吉跃, 瞿洪波. 油松、栓皮栎树干液流速率比较[J]. *生态学报*, 2005, **25**(8): 1 934-1 940.  
NIE L S, LI J Y, ZHAI H B. Study of the rate of stem sap flow in *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* by using the TDP method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(8): 1 934-1 940.
- [22] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(5): 585-590.  
ZHANG X Y, GONG J D, ZHOU M X, et al. A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamarix* spp. by heat pulse technique[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(5): 585-590.
- [23] 陈仁升, 康尔泗, 张智慧, 等. 黑河流域树木液流秋末冬初的峰值现象[J]. *生态学报*, 2005, **25**(5): 1 221-1 228.  
CHEN R S, KANG E S, ZHANG Z H, et al. Peak phenomenon of sapflow in late autumn to early winter in Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(5): 1 221-1 228.
- [24] 李振华, 王彦辉, 于澎涛, 等. 华北落叶松液流速率的优势度差异及其对林分蒸腾估的计影响[J]. *林业科学研究*, 2015, **28**(1): 8-16.  
LI Z H, WANG Y H, YU P T, et al. Variation of sap flow density of *Larix principis-rupprechtii* with dominances and its impact on stand transpiration estimation[J]. *Forest Research*, 2015, **28**(1): 8-16.
- [25] DELZON S, SARTORE M, GRANIER A, et al. Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine[J]. *Tree Physiology*, 2004, **24**: 1 285-1 293.
- [26] 周孝明, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游胡杨树干液流特征研究[J]. *中国沙漠*, 2008, **28**(4): 673-678.  
ZHOU X M, CHEN Y N, LI W H, et al. Study of sap flow in stem of *Populus euphratica* in lower reaches of Tarim River [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(4): 673-678.
- [27] 石游, 李建贵, 杨振. 新疆阿克苏干旱区富士苹果树干液流动态变化研究[J]. *西北植物学报*, 2012, **32**(3): 546-554.  
SHI Y, LI J G, YANG Z. Studies on the variation law of stem sap flow of Fuji apple in arid area[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2012, **32**(3): 546-554.
- [28] 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): 6 107-6 112.  
XU J L, MA L Y. Influence of soil temperature on sap flow of *Pinus tabulaeformis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(12): 6 107-6 112.
- [29] CHELCY R F, CAROL E G, ROBERT J M, 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**: 941-950.
- [30] 赵春彦, 司建华, 鱼腾飞, 等. 胡杨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.
- [31] 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.  
MEI T T, WANG C K, ZHAO P, et al. Dynamics of trunk sap flux density of *Schima superba*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, **46**(1): 40-47.

(编辑:裴阿卫)