

# 北京山区典型树种树干液流特征及其对环境因子的响应研究

杨芝歌<sup>1</sup>, 史宇<sup>2</sup>, 余新晓<sup>1</sup>, 张艺<sup>1</sup>, 陈杰<sup>1</sup>, 王奇<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,

北京 100083; 2. 中国环境监测总站, 北京 100012; 3. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

**摘要:**2010 年 6—9 月在妙峰山林场, 运用 SF-L 树干液流仪分别研究分析了典型晴天和生长季侧柏、栓皮栎、油松、刺槐的树干液流速率变化特征及树干液流速率对环境因子的响应。结果表明:4 种树种的树干液流速率变化规律呈单峰型, 其中侧柏的平均树干液流速率最大, 为 0.079 3 cm/min, 刺槐最小, 为 0.048 cm/min。4 种树种在各个月份的平均液流速率变化较大, 但均在 8 月份达到最大值。对环境因子影响树干液流速率的相关分析表明:气温、太阳辐射、VDP、土壤含水率和土壤水势与树干液流速率呈正相关, 而相对湿度与树干液流速率呈负相关关系, 风速、土壤温度与树干液流速率的相关性不明确。太阳辐射对树干液流速率的影响最大, 其中对阔叶树种刺槐和栓皮栎的影响比对针叶树种油松和侧柏更大。环境因子对阔叶树影响较大, 对针叶树影响较小。运用多元线性回归方法, 得出了 4 种不同树种的树干液流速率和环境因子的多元线性回归方程。

**关键词:**北京山区; 液流速率; 变化特征; 环境因子; 蒸腾

中图分类号:S727.2;Q945.79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0195-06

## Characteristic of Stem Sap Flux Velocity of Individual Trees and Its Response to Environmental Factors in the Beijing Mountain Area

YANG Zhi-ge<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>2</sup>, YU Xin-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Combating Desertification of

Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration,

Beijing 100012, China; 3. Survey and Planning Institute of State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

**Abstract:** The sap flow velocity and its response to the meteorological factors of *Platycladus orientalis*, *Quercus variabilis*, *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* were studied by heat dissipation probe technique from June to September in 2010. The study site was in Miaofengshang Forest. The results indicated that the stem sap flow velocity of all the trees in the typical clear day changed with a single peak type curve, the highest sap flow velocity was 0.079 3 cm/min for *Platycladus orientalis*, while the smallest one was 0.048 cm/min for *Robinia pseudoacacia*. The variation between each month has great differences, but they all reached the maximum value in August. Combined with the correlation analysis, the sap flow velocity was positively correlated with the solar radiation, the temperature, VDP, the soil moisture and soil water potential, whereas the relative humidity was negative correlation and the correlation with wind speed and soil temperature was uncertain. The most important environmental factor was solar radiation, while the influence on *Quercus variabilis* and *Robinia pseudoacacia* was greater than it on *Platycladus orientalis*, *Quercus variabilis*. The environmental factors had more effects on broadleaved trees than coniferous trees. Multiple linear regression analysis was employed to establish the liner model of four different trees stem sap flow velocity.

**Key words:** Beijing mountain area; sap flow velocity; variation characteristic; environmental factors; transpiration

收稿日期:2011-07-15

修回日期:2011-10-31

资助项目:林业公益性行业科研专项经费(201104005)

作者简介:杨芝歌(1989—),女,江西上饶人,在读研究生,主要研究方向:林业生态工程、水土保持。E-mail:yang\_zhige@126.com

通信作者:余新晓(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:森林水文、水土保持等。E-mail:yuxinxiao111@126.com

随着全球气候变暖,水资源短缺问题日益突出,对水资源进行科学管理和合理利用变得十分重要,研究林分耗水规律具有重要意义。不同树种耗水量存在很大差异<sup>[1]</sup>,树种的耗水量除了受树木自身的生理解剖结构<sup>[2-3]</sup>、土壤供水水平影响外<sup>[4]</sup>,还受周围气象因子的制约<sup>[5-7]</sup>。树干液流的潜在能力由树木的生物学特性决定<sup>[8]</sup>,树干液流的实际水平由土壤供水决定<sup>[9-10]</sup>,而液流的瞬间变动由气象因素决定<sup>[11]</sup>。系统研究并掌握主导环境因子的变化规律及其对树干液流的影响,对于建立科学合理的林木耗水模型具有非常重要的意义。

几十年来,国内外研究者陆续提出了各种不同的树木耗水量测定方法,利用热技术原理测定边材木质部液流运移速率进而推算整树蒸腾的热技术被认为是目前测定乔木蒸腾最准确的方法。热扩散技术可以在保持树木自然生长条件下连续测定树干液流速率,利用 Grainer 热扩散传感器原理,把两根热电偶探针直接插入边材,上面的探针包含一个电加热器,下面的探针作为参照。传感器用以测量加热探针和其下面边材温度之间的差异。由  $d_t$  (探针间的温差) 变量和 0 流速时的  $d_{\max}$  (最大温差) 可以直接转换为液流速度,再根据边材面积,求出液流通量<sup>[12]</sup>。本研究采用 SF—L 型热扩散式液流计,其与 Grainer 热扩散式液流计的区别在于在上部探针两边各增加了一个热电偶,用于测定未加热状态的树干自然温度梯度。另外, SF—L 型热扩散式液流计能够测定夜间液流速度。采用智能可编程数据采集器进行数据采集。本研究采用该技术对北京市常见造林树种油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、刺槐 (*Robinia*

*pseudoacacia*) 的蒸腾作用进行测定,对其规律性进行分析研究,并同时测定环境因子,分析树干液流速率对环境因子的响应程度。

## 1 研究区概况

研究区位于北京市西北郊太行山北部的妙峰山林场,北纬  $39^{\circ}54'$ ,东经  $116^{\circ}28'$ ,面积  $811.73 \text{ hm}^2$ ,境内山峦绵延,高差大,地形复杂。岩石山低到高依次交错分布有花岗岩、石灰岩、凝灰岩、砂岩及砾岩等。妙峰山林场属于温带落叶林带的山地栎林和油松林带,年均温  $12.2^{\circ}\text{C}$ ,最高气温  $39.7^{\circ}\text{C}$ ,最低  $-19.6^{\circ}\text{C}$ ,降雨量近  $700 \text{ mm}$ ,多集中在 7—8 月。

## 2 研究方法

### 2.1 试验地选择

以北京林业大学妙峰山林场生态站的数采室为中心,在附近  $4 \text{ hm}^2$  范围内的侧柏林、栓皮栎林、油松林和刺槐林各选定一块  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的小样方作为长期定位监测的典型森林生态系统,所选定的 4 个长期观测的森林生态系统样方基本情况见表 1。4 种森林生态系统的海拔、坡度、坡向等条件差异不大,这有利于在相同的地形特征下比照相互的差异。

### 2.2 环境因子测定方法

在侧柏小样方内设立小型气象站同步测定林内降雨、净辐射 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )、空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、空气相对湿度 (%)、水面蒸发 ( $\text{mm}$ )、风速 ( $\text{km}/\text{h}$ ) 和风向等指标,每隔  $15 \text{ min}$  测定一次。在各个样地林下土层深度为  $5 \text{ cm}$  和  $15 \text{ cm}$  处埋藏 5TE 土壤三参数(土壤温度、土壤体积含水量、土壤电导率)和土壤水势探头,并配以 EM50 数采,可每隔  $15 \text{ min}$  连续测定土壤相关参数值。

表 1 各试验样地自然概况

指标	侧柏	栓皮栎	油松	刺槐
海拔/m	137.5	135.2	139.3	130.6
坡度/ $^{\circ}$	21	20.5	17	15
坡向	南偏东 $80^{\circ}$	南偏东 $24^{\circ}$	南偏东 $30^{\circ}$	南偏东 $86^{\circ}$
林分密度/(株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ )	1500	1200	1200	900
郁闭度	0.8	0.8	0.7	0.6
灌木盖度/%	15	26	35	32
草本盖度/%	5	50	28	65
土层厚度/cm	45	60	42	31
枯落物厚度/cm	4.2	7	5	2.5

### 2.3 树干液流速率测定方法

每块监测样地内选择一株树高、胸径接近于样地林分均值且生长状况良好的标准木作为观测样木。将热扩散式探针安装在典型树种样木  $0.5 \text{ m}$ ,  $1.3 \text{ m}$

或  $2.0 \text{ m}$  高处,连续监测树干液流速率。共用常规液流监测(探针高度  $1.3 \text{ m}$ )探针 4 组,包括栓皮栎、油松、侧柏、刺槐各 1 组。液流速率计算方法:

$$J_s = 0.714 \times (d_{\max}/d_{\text{tact}} - 1)^{1.231} \quad (1)$$

$$d_t = T_{1-0} - (T_{1-2} + T_{1-3}) / 2 \tag{2}$$

式中： $J_s$ ——树干液流速率 [ $\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ];  
 $d_{t_{\max}}$ ——当  $J_s=0$  时根据式(2)计算得出,一般是在夜间空气湿度 100% 长达 2 d 或树干直径停止变化处于相对稳定状态时计算的  $d_t$  值。 $d_{\text{fact}}$  为根据式(2)计算出的  $d_t$  值。 $T_{1-0}$ ——探头  $S_0$  与探头  $S_1$  的温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ ); $T_{1-2}$ ——探头  $S_2$  与探头  $S_1$  的温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ ); $T_{1-3}$ ——探头  $S_3$  与探头  $S_1$  的温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

3 结果与分析

3.1 树干液流速率日变化特征

选取 2010 年 7 月 23 日和 7 月 24 日连续两天的典型晴好天气作为研究时段,期间不同树种的树干液流速率变化过程如图 1 所示。

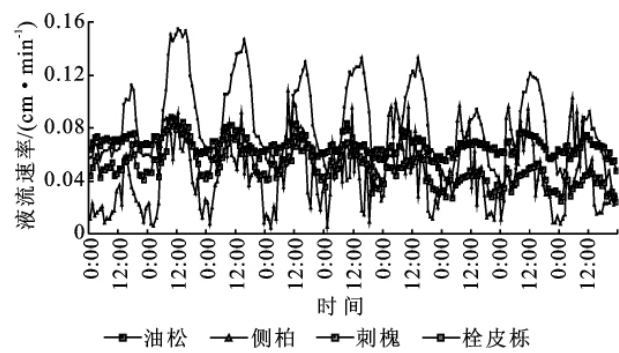


图 1 不同树种典型晴天树干液流速率变化

由图 1 可见,各树种在晴天条件下,树干液流速率的日变化都呈单峰曲线趋势,各树种的变化趋势

基本相同。研究中发现不同树种的树干液流均于 4:00—4:30 开始上升,启动时间差异不大,随着辐射量的增加而不断增加之后达到峰值。不同树种液流速率日变化达到峰值的时间不同,油松在 10:30,侧柏在 11:00 左右,刺槐在 14:00 左右,而栓皮栎在 14:30,这很可能是由于其所在坡度坡向以及周边树木干扰条件不同导致树木接受辐射最大值的时间不同造成的。各树种白天树干液流速率普遍大于夜晚,这是由于白天树木蒸腾量大,大量水分通过根系以被动方式吸入体内,夜间树干内存在微弱流量主要是由根压引起的,水分以主动方式进入树体补充白天蒸腾失水<sup>[13]</sup>。

不同树种的树干液流速率在数值上有较为显著的差异,从每日变化的波动幅度上看侧柏变化幅度最大,其日最大值和最小值差异可达 0.11  $\text{cm}/\text{min}$ ,而油松的变化幅度最小,波峰和波谷之间的差异只有 0.02  $\text{cm}/\text{min}$  左右。

3.2 不同月份树干液流速率差异

一般来讲,进入生长季后树木的液流速率和液流量迅速增加,在生长季不同时段随着树木本身的生长过程和外界环境的变化,树干液流速率各月份之间会有一定的差异。连续测定 6—9 月的降水量、湿度和温度等环境因子以及树干液流速率,各月的降水量、湿度、温度和风速的平均值和标准差见表 2 所示。计算每月各树种的平均树干液流速率、最大树干液流速率和最小树干液流速率,得出结果如表 3 所示。

表 2 6—9 月环境因子平均值和标准差

项目	6 月		7 月		8 月		9 月	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
降水量/mm	1.293	2.496	1.277	3.204	3.626	11.343	3.723	7.431
温度/ $^{\circ}\text{C}$	24.941	2.646	27.664	3.396	25.559	1.817	22.412	3.13
湿度/%	60.415	14.849	67.076	18.116	25.559	14.678	68.799	14.027
风速/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	0.911	0.259	0.849	0.533	1.167	0.737	1.118	0.641

表 3 各树种生长季不同月份树干液流速率  $\text{cm}/\text{min}$

项目	月份	油 松	刺 槐	栓皮栎	侧 柏
平均值	6 月	0.0710	0.0692	0.0926	0.0628
	7 月	0.0692	0.0600	0.0646	0.0613
	8 月	0.1150	0.0941	0.1414	0.0958
	9 月	0.0901	0.0539	0.0859	0.0947
最大值	6 月	0.0917	0.2490	0.1725	0.1944
	7 月	0.1941	0.2359	0.2566	0.1897
	8 月	0.2250	0.2562	0.5241	0.2384
	9 月	0.1970	0.2166	0.2334	0.2624
最小值	6 月	0.0583	0.0000	0.0233	0.0000
	7 月	0.0467	0.0224	0.0114	0.0041
	8 月	0.0123	0.0183	0.0126	0.0141
	9 月	0.0577	0.0000	0.004	0.0311

从表 3 可以看出,不同月份树干液流速率差异显著。所有树种平均液流速率的最大值都在 8 月,这是由于 8 月平均气温仅次于 7 月,降水量为 7 月的 3 倍,降水日数比 7 月略少且降水日较为分散。因此同时具备了充分的水分供给和较强的蒸腾拉力,有益于植物的蒸腾作用。排在其次的是 6 月或 9 月,一些研究表明在降水月分布较为均匀的地区生长季林木的蒸腾耗水量是逐月递减的,因此 6 月份由于植物生理活动旺盛,蒸腾能力较强,而 9 月由于其降水量较高(接近于 8 月)也有较大的蒸腾量。7 月的平均温度最高,但月中连续一周左右的时间白天有少量降水,大大减少了植物蒸腾作用,使得 7 月的平均树干液流

速率值为所研究几个月份中最低。研究中还能发现最大树干液流速率一般出现在暴雨后的晴朗天气中,因此各树种最大树干液流速率大都出现在 8 月,而最小树干液流速率一般出现在空气湿度较大而温度较低的夜晚。

### 3.3 树木蒸腾特征与环境因子的关系

(1) 树干液流速率与环境因子相关性。树干液流速率主要受太阳辐射、大气温度、大气相对湿度、土壤温度、风速及其他多个环境因子的影响,但不同学者对不同地区和不同树种得出的研究结果有一定的差异<sup>[14-15]</sup>。本研究为了深入了解不同树种树木蒸腾特征和气象、土壤环境因子的相关性,选取多个连续日的逐小时树干液流速率和 8 项环境指标进行相关性分析。研究时段选定在 7 月 1 日至 7 月 9 日连续 9 d,期间有两场降雨 5 个连续晴好天气和一个阴天。选定的主要气象指标有大气温度( $^{\circ}\text{C}$ )、太阳辐射( $\text{W}/\text{m}^2$ )、相对湿度(%)、风速( $\text{m}/\text{s}$ )、水汽压亏缺 VDP 共 5 项,都为林外气象站测定的数据;主要土壤指标为 20 cm 深土壤水势、5 cm 深土壤温度和土壤体积含水率,由林下土中布设的两种传感器测得。7 月 1 日 0 时至 7 月 9 日 0 时期间不同树种树干液流速率和各类气象、土壤指标变化情况见图 2。

太阳的辐射能量是导致气象因子变化的直接原因,受太阳辐射影响和气流影响,气温日变化呈单峰曲线型,由于空气有一定热容,气温的变化要滞后于太阳辐射。林内空气相对湿度随太阳辐射和气温的变化而波动,但变化方向相反;水汽压亏缺同样受太阳辐射和气温的影响而变化,虽然波型与后二者较相似,但其到达峰值的时间一般在 15:00—16:00,滞后于后二者约 2~3 h。林内风速的变化受大气气流运动的影响,规律不明显。但风速增大会加速水汽的蒸发过程。当风速在较低范围内波动时,液流速率随风速的增加而加快,而当风速在较高范围内波动时,此情况会导致气孔开度降低,甚至关闭,从而抑制树干液流。由于土壤的热容性及热传导阻力很大,且随着土层深度的加大,日周期温度波动幅度越来越小,因此选择 5 cm 土壤温度作为研究对象,其受气温影响敏感度较高,滞后性较小。而土壤水势和土壤含水量是影响植物根系吸水的最直接指标,因此选定了根际区分布最多的 20 cm 深度作为研究对象。将各树种的树干液流速率测得的逐小时数据同其对应的气象和土壤因子进行 Pearson 相关分析结果见表 4。

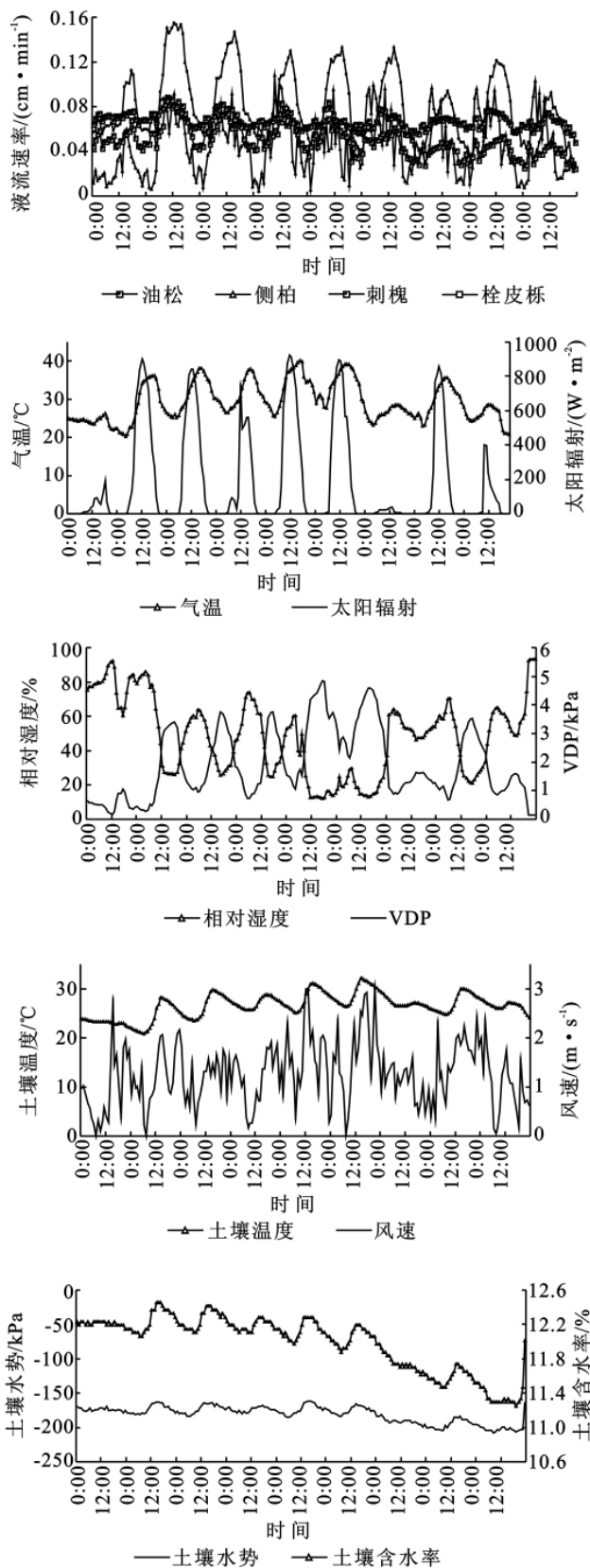


图 2 液流速率与不同环境因子的连续日变化

从表 4 中可以看出,不同树种对环境因子的响应有着一定的差异性。在这些环境因子中,气温、太阳辐射、VDP、土壤含水率和土壤水势与树干液流速率呈正相关,而相对湿度与树干液流速率呈负相关关

系,风速、土壤温度与树干液流速率的相关性不明确。按相关系数的高低,环境因子对油松液流速率的影响强度依次为:太阳辐射(0.533)>土壤温度(−0.375)>风速(−0.164)>土壤含水率(0.152)>土壤水势(0.135)>相对湿度(0.073)>VDP(−0.057)>气温(0.007);对侧柏依次为:太阳辐射(0.328)>相对湿度(−0.174)>VDP(0.115)>气温(0.101)>土壤含水率(−0.068)>土壤水势(−0.067)>风速(0.02)>土壤温度(0.018);对刺槐依次为:太阳辐射(0.645)>土壤含水率(0.567)>土壤水势(0.557)>气温(0.325)>VDP(0.248)>相对湿度(−0.185)>土壤温度(−0.143)>风速(0.015);对栓皮栎依次

为:太阳辐射(0.849)>气温(0.596)>VDP(0.535)>土壤水势(0.481)>相对湿度(−0.453)>土壤含水率(0.392)>风速(0.233)>土壤温度(0.184)。太阳辐射对所有典型树种的影响均较大,但总体来说,对刺槐和栓皮栎的影响比对油松和侧柏大,说明太阳辐射对阔叶树树干液流速率影响更大。这是由于阔叶树叶片较大,其蒸腾作用对太阳辐射的响应更为明显。另外,对油松和侧柏来说,除太阳辐射外,其他环境因子对其液流速率的影响均相对较小,而刺槐和栓皮栎与其他环境因子的相关性较大,这很可能是由于其他环境因子对阔叶树的蒸腾作用影响较大,从而对液流速率产生较大影响。

表 4 各树种树干液流速率与相应环境因子的相关分析

树种	项目	气温	相对湿度	太阳辐射	风速	VDP	土壤水势	土壤含水率	土壤温度
油 松	相关系数	0.007	0.073	0.533**	−0.164*	−0.057	0.135*	0.152*	−0.375**
	显著性	0.922	0.283	0.000	0.016	0.409	0.048	0.026	0.000
侧 柏	相关系数	0.101	−0.174*	0.328**	0.020	0.115	−0.067	−0.068	0.018
	显著性	0.140	0.010	0.000	0.769	0.093	0.328	0.319	0.798
刺 槐	相关系数	0.325**	−0.185**	0.645**	0.015	0.248**	0.557**	0.567**	−0.143*
	显著性	0.000	0.007	0.000	0.824	0.000	0.000	0.000	0.036
栓皮栎	相关系数	0.596**	−0.453**	0.849**	0.233**	0.535**	0.481**	0.392**	0.184**
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.007

\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, $n=216$ 。

(2)树干液流速率的环境影响因子模型。利用多元线性回归方法,在连续日对油松、侧柏、栓皮栎、刺槐进行树干液流速率系统观测的基础上,以树干液流速率为因变量,以气象和土壤因子作为自变量进行逐步回归。分别以 5%和 10%的可靠性作为因变量的入选和剔除临界值,得到 4 种不同树种的树干液流速率和环境因子的多元线性回归模型:

油松:  $y=0.092+0.002x_1+0.015x_2-0.15x_3-0.006x_5-1.101x_6-0.003x_7(R^2=0.710)$

侧柏:  $y=-0.786+0.044x_2-1.668x_6+0.044x_8(R^2=0.374)$

刺槐:  $y=-0.029+0.003x_1+0.023x_2-2.8\times10^{-4}x_3-0.01x_5-0.004x_7+0.011x_8(R^2=0.771)$

栓皮栎:  $y=0.145+0.006x_1+0.067x_2-0.008x_5-0.007x_7(R^2=0.837)$

式中:  $y$ ——树干液流速率(cm/min);  $x_1$ ——大气温度(℃);  $x_2$ ——太阳辐射(kW/m<sup>2</sup>);  $x_3$ ——相对湿度(%);  $x_4$ ——风速(m/s);  $x_5$ ——水汽压亏缺 VDP(kPa);  $x_6$ ——土壤水势(MPa);  $x_7$ ——土壤温度(℃);  $x_8$ ——土壤体积含水率(%)。

以上 4 个方程式的  $F$  检验都达到了在 0.01 水平上显著,油松、刺槐、栓皮栎的复相关指数  $R^2$  值都达到 0.7 以上,拟合效果较好。侧柏的复相关指数  $R^2$

值只有 0.374,相关性不是很强,这可能与侧柏的生理特征、样木的位置或者其他位置因素影响有关。阔叶树种栓皮栎和刺槐的蒸腾特征对环境因子的响应比针叶树种油松和侧柏更为敏感,与环境因子的相关性和方程拟合精度更高。

4 结 论

(1)综合来看,油松、侧柏、栓皮栎和刺槐的树干液流速率呈单峰型,日变化趋势相似。平均的树干液流速率排序为:侧柏(0.079 3 cm/min)>油松(0.065 cm/min)>栓皮栎(0.060 4 cm/min)>刺槐(0.048 cm/min)。

(2)4 种树种平均液流速率都在 8 月份达到最大值,油松、侧柏、栓皮栎和刺槐的分别为:0.115,0.095 8,0.141 4,0.094 1 cm/min。排在其次的是 6 月或 9 月、7 月的平均树干液流速率值为所研究几个月份中最低。

(3)总体来说,太阳辐射对 4 种树种的液流速率影响最大,对阔叶树种刺槐和栓皮栎影响更大。除太阳辐射外的其他环境因子对阔叶树液流速率影响都较大,对针叶树影响较小。

(4)栓皮栎的树干液流速率同所有环境因子的相

关性都达到了 0.01 水平极显著相关,相关性最高的是太阳辐射,其次为气温和 VDP;刺槐的树干液流速率除了同风速不相关,同土壤温度达到 0.05 水平显著相关外,同其他环境因子都达到了 0.01 水平的极显著相关,相关系数最高为太阳辐射,其次为土壤水势和土壤含水率;油松的树干液流速率同太阳辐射、土壤温度在 0.01 水平上极显著相关,同土壤水势、风速和土壤含水率在 0.05 水平上显著相关,与气温、相对湿度、VDP 都无显著相关性;侧柏的树干液流速率只与太阳辐射呈 0.01 水平极显著相关,与相对湿度呈 0.05 水平显著负相关,与其他因子都不显著相关。

(5)侧柏的树干液流速率对环境因子的响应并不敏感,即在环境发生强烈变化时,侧柏依然能保持相对稳定的液流速率,这很可能是由于侧柏是深根性树种,因而浅层土壤含水量、土壤水势等环境因子对其蒸腾作用影响不大。这对北京山区造林树种的选择具有借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 马克平,陈灵芝,于顺利,等.暖温带森林生态系统结构与功能的研究[M].北京:科学出版社,1997.
- [2] Tyree M T. A dynamic model for water flow in a single tree:evidence that models must account for hydrologic architecture[J]. Tree Physiology,1988(4):195-227.
- [3] 王华田,马履一.树木耗水性比较的研究[J].北京林业大学学报,2003,25(1):1-6.
- [4] Sperry J S, Hake U G, Ren R, et al. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply[J]. Plant, Cell and Environment,2002,25:251-263.
- [5] 熊伟,王彦辉,徐德应,等.宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J].林业科学,2003,39(2):1-7.
- [6] Schaeffer S M, Williams D G, Goodrich. Transpiration of cottonwood/willow forest estimated from sap flux[J]. Agric. For. Meteorol.,2000,105(1/3):257-270.
- [7] 张小由,龚家栋,周茅先,等.胡杨树干液流的时空变异性研究[J].中国沙漠,2004,24(4):489-492.
- [8] 孙慧珍,周晓峰,康绍忠,等.应用热技术研究树干液流进展[J].应用生态学报,2004,15(6):1074-1078.
- [9] 奚如春,马履一,王瑞辉,等.林木耗水调控机理研究进展[J].生态学杂志,2006,25(6):692-697.
- [10] 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,2006,25(9):2145-2151.
- [11] 徐军亮.京西山区油松、侧柏单木耗水环境影响因子评价与模拟[D].北京:北京林业大学,2006.
- [12] 王华田,马履一.利用热扩式边材液流探针(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.
- [13] 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.
- [14] 周海光,刘广全,焦醒,等.黄土高原水蚀风蚀复合区几种树木蒸腾耗水特性[J].生态学报,2008,28(9):4568-4573.
- [15] 于占辉,陈云明,杜盛.黄土高原半干旱区人工林刺槐展叶期树干液流动态分析[J].林业科学,2009,45(4):53-58.
- [6] 王秀伟,毛子军.7个光响应曲线模型对不同植物种的实用性[J].植物研究,2009,29(1):43-48.
- [7] 叶子飘,王建林.植物光合光响应模型的比较分析[J].井冈山学院学报:自然科学版,2009,30(4):9-13.
- [8] 叶子飘.光合作用对光合 CO<sub>2</sub> 响应模型的研究进展[J].植物生态学报,2010,34(6):727-740.
- [9] 曹雪丹,李文化,鲁周民,等.北缘地区枇杷春季光合特性研究[J].西北林学院学报,2008,23(6):33-37.
- [10] 叶子飘,于强.一个光合作用响应新模型与传统模型的比较[J].沈阳农业大学学报,2007,38(6):771-775.
- [11] Ye Z P, Yu Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat[J]. Photosynthetica,2008,46(4):637-640.
- [12] 张弥,吴家兵,关德新,等.长白山阔叶红松主要树种光合作用光响应曲线[J].应用生态学报,2006,17(9):1575-1578.
- [13] 高鹤,宗俊勤,陈静波,等.7种优良观赏草光合生理日变化及光响应特征研究[J].草业学报,2010,4(19):87-93.
- [14] 杜占池,杨宗贵,崔晓勇.草原植物光合生理生态研究[J].中国草地,1999(3):20-27.
- [15] 张淑勇,周泽福,张光灿,等.半干旱黄土丘陵区4种天然次生灌木光合生理和水分利用特征[J].林业科学研究,2008,44(12):140-146.
- [16] 王宇,陈丽华,余新晓,等.北京山区典型针叶林树种蒸腾特性比较[J].北京林业大学学报,2008,30(2):193-196.
- [17] 时慧君,杜峰,张兴昌.毛乌素沙地几种主要植物的光合特征[J].西北林学院学报,2010,25(4):29-34.
- [18] 刘国华,王福升,丁雨龙,等.4种地被竹光合作用日变化及光合光响应曲线[J].福建林学院学报,2009,29(3):258-263.

(上接第 194 页)