

# 北京山区刺槐、栓皮栎生长旺季液流特性及影响因子

贾国栋, 余新晓, 朱建刚, 樊登星

(北京林业大学 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 利用热扩散式树干液流探针于2008年5—9月对北京西山地区刺槐、栓皮栎树干液流进行系统观测,同时结合环境因子的观测数据。分析结果表明,刺槐、栓皮栎树干液流速率的日变化规律在晴天为宽峰或双峰型曲线,阴雨天为多峰型曲线。5,6月,刺槐月平均树干液流速率小于栓皮栎,后者分别是前者的1.58和1.08倍;7—9月,刺槐月平均液流速率大于栓皮栎,前者分别是后者的1.391,1.408和1.450倍。栓皮栎不同高度处树干液流差异明显,5,6月典型晴天树干上位液流速率大于中位和下位,7—9月典型晴天树干下位液流速率大于上位和中位。生长旺季刺槐、栓皮栎树干液流速率均与太阳辐射强度、大气水势和空气水汽压亏缺呈正相关,与土壤水势呈负相关,建立了生长旺季观测期间的树干液流速率与环境因子多元线性回归方程,经F值检验,均达到极显著水平。

**关键词:** 林木耗水; 树干液流; 环境因子; 刺槐; 栓皮栎

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)05-0050-07

中图分类号: Q945.79

## Sap Flow Characteristics and Influencing Factors of *Robinia Pseudoacacia* and *Quercus Variabilis* in Rapid Growth Season in Mountain Area of Beijing City

JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, ZHU Jian-gang, FAN Deng-xing

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Sap flow of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus variabilis* in the city west mountain area of Beijing City was systematically measured from May to September of 2008 using thermal dissipation sap flow probes, combined with environmental factors. Diurnal variation of sap flow displayed a wide-peaked or double-peaked curve on sunny days and a multiple-peaked curve on overcast and rainy days. In May and June, the averaged sap flow velocities of *R. pseudoacacia* were 1.58 and 1.08 times slower than those of *Q. variabilis*, respectively, and in July, August, and September, 1.391, 1.408, and 1.450 times higher, respectively. In May and June, sap flow velocities of *Q. variabilis* were significantly faster at upper heights than median and lower heights and from July to September, faster at lower heights than median and upper heights on typical sunny days. During the season of rapid growth, sap flow velocities of both tree species were positively correlated with solar radiation intensity, atmosphere water potential, and vapor pressure deficit and negatively correlated with soil water potential. Multiple linear regression equations for environmental factors with sap flow velocity were established, which all met the significance at 0.01 levels with F test.

**Keywords:** water consumption by forest trees; sap flow; influencing factor; *Robinia pseudoacacia*; *Quercus variabilis*

树木在发挥巨大生态效益的同时,维持自身生长发育也需要消耗大量水分<sup>[1]</sup>,而水资源短缺业已成为当今全球日益突出的问题,因此造林树种本身的耗水量受到越来越广泛的关注<sup>[2-5]</sup>。由于树干边材液流速

率及液流量制约着整株树木的蒸腾量,因而对树干液流进行标记并测定其流动速率就可以简捷地确定树冠蒸腾耗水量<sup>[6]</sup>。Granier<sup>[7-8]</sup>利用热扩散原理发明了一种测量边材液流的方法,即在基本保持树木自然生活

收稿日期:2010-01-11

修回日期:2010-02-09

资助项目:北京市教委“基于首都圈森林生态系统定位站平台的林木耗水研究”(3606208);国家“十一五”科技支撑计划项目“华北土石山区防护林体系空间配置与结构优化技术研究”(2006BAD03A0201)

作者简介:贾国栋(1986—),男(汉族),河北省邢台市人,在读硕士,研究方向为林木耗水、水土保持。E-mail:bjfujgd@126.com。

通讯作者:余新晓(1961—),男(汉族),甘肃省平凉市人,博士,教授,研究方向为水土保持、生态水文。E-mail:yuxinxiao@bjfu.edu.cn。

状态不变的条件下,将微型热电偶传感器插入边材木质部中,根据电热转换和能量平衡原理测定树干边材液流的运移速率<sup>[9-10]</sup>。此法具有能够野外连续监测,时间分辨率高,对样木损伤较少,数据采集自动化等优点,因此引起许多学者对树干边材液流的关注<sup>[11-14]</sup>。

每年 5—9 月为树木的生长旺季,其蒸腾耗水量可达全年耗水总量的 70% 以上<sup>[15]</sup>。刺槐、栓皮栎为北京山区常见阔叶造林树种,以往研究中对于二者树干液流特性比较分析较少,且对其与影响因子<sup>[16-17]</sup>如土壤水势、大气水势和空气水汽压亏缺的相关性研究较少涉及。本研究采用热扩散式树干边材液流探针直接测定刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 的液流速率,同步监测土壤和气象等环境因子,揭示生长旺季北京山区刺槐、栓皮栎蒸腾耗水特性,研究树干液流速率与土壤和气象等环境因子的关系。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于北京林业大学西山教学实习林场,地理坐标:40°3'46" N,116°5'45" E。气候属于暖温带半湿润季风型大陆性气候,年均温 8.5 °C~9.5 °C,≥ 10 °C 有效积温 3 385 °C~4 210 °C,无霜期 150 d 左右,多年平均降水量 600 mm,其中 7—9 月占全年降水量的 70% 以上。试验林为 1958 年营造的人工刺槐、栓皮栎片状混交林。地处低山半阳坡(坡向:东偏南 15°),坡位下位,海拔 145 m,坡度 22°,土壤为坡积黄土,土层厚度 40~60 cm,通气透水性较差。林下灌木为荆条、酸枣、孩儿拳头和构树,盖度 80% 以上。刺槐平均树高 10.4 m,平均胸径 15.9 cm;栓皮栎林平均树高 13.7 m,平均胸径 20.9 cm。根据每木检尺的结果,选择刺槐林分平均木和栓皮栎林分平均木各 1 株,其中分别在栓皮栎样木树干上位(2.0 m)、树干中位即胸径处(1.3 m)和树干下位(0.5 m)选择 3 处测试点,在刺槐树干中位即胸径处(1.3 m)选择一处测试点。样木基本情况见表 1。

表 1 样木基本情况

树种	胸径/cm	树高/m	冠幅/m <sup>2</sup>	活枝下高/m
刺槐	15.8	11.3	6.1×4.6	2.9
栓皮栎	24.6	14.5	7.3×6.5	3.5

### 1.2 实验研究方法

1.2.1 液流速率测定 为避免由于方位及阳光直射引起的误差,于 2008 年 4 月初在选定刺槐、栓皮栎样木的西北侧,安装德国 Ecomatik 公司生产的 SF—L

型热扩散式树干边材液流测定装置,此装置包括 4 根热电偶探针, S<sub>2</sub>, S<sub>0</sub>, S<sub>3</sub> 这 3 根探针处于同一水平高度,探针 S<sub>1</sub> 在 S<sub>0</sub> 的正下方,由于树干为近圆柱形,故 4 根探针并不在同一水平面上。4 根探针尺寸规格同为:总长 33 mm,前端加热部分长 20 mm,直径 1.5 mm。根据树干胸径范围(15~20 cm),钻出 4 个直径 2 mm,深度 23 mm 的小孔,插入探针并将之与数据采集器相连。数据采集器的取值间隔为 30 min,其中前 15 min S<sub>0</sub> 不加热,以测定自然温差 ΔT<sub>R1</sub> 和 ΔT<sub>R2</sub>,后 15 min S<sub>0</sub> 加热,以测定加热温差 ΔT。探针安装的相对位置如图 1 所示。

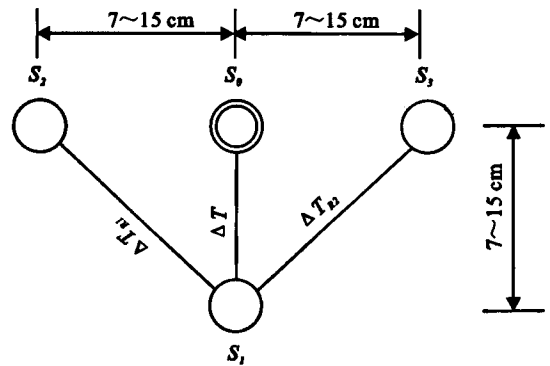


图 1 探针安装相对位置

注: S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 为 4 根探针; ΔT, ΔT<sub>R1</sub>, ΔT<sub>R2</sub> 分别为探针 S<sub>1</sub> 和 S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub>, S<sub>1</sub> 和 S<sub>3</sub> 之间的温差。

为消除安装此装置对树干液流造成的影响,以使树干充分愈合,观测起始时间定于其后一个月,观测周期为 2008 年 5 月 1 日至 9 月 30 日,共计 5 个月。

这 4 根探针中,只有 S<sub>0</sub> 加热, S<sub>1</sub> 与 S<sub>2</sub> 间的温差 ΔT<sub>R1</sub> 和 S<sub>1</sub> 与 S<sub>3</sub> 间的温差 ΔT<sub>R2</sub> 都是树干的自然温度差,为尽可能减小误差,取二者平均作为自然温度梯度 ΔT,见公式(1)。由于树干通体并非同一温度,所以要考虑其自然温度梯度,因此需要进行温差校正,得校正值 ΔT<sub>C</sub>,见公式(2)。自然温度梯度:

$$\Delta T_R = (\Delta T_{R1} + \Delta T_{R2}) / 2 \quad (1)$$

温差校正值:

$$\Delta T_C = \Delta T - \Delta T_R \quad (2)$$

树干液流速率:

$$U = 0.714 \times \left( \frac{\Delta T_{Cmax} - \Delta T_C}{\Delta T_C} \right)^{1.231} \quad (3)$$

式中: U——树干液流速率(cm/min); ΔT<sub>Cmax</sub>——树干处于饱和状态时(即树干径向生长量为零,空气相对湿度为 100%,树木蒸腾量趋近于 0)的 ΔT<sub>C</sub> 值。

1.2.2 环境因子测定 土壤因子测定:(1)采用德国 Ecomatik 公司生产的 EQ15 型土壤水势测定装置,埋深为距地面以下 20 cm 处(根系主要分布区)进

行实时监测,数据采集间隔为30 min,其中土壤水势单位为(MPa);(2)采用美国 Decagon 公司生产的 5TE 型土壤温度测定装置,布设于距地面以下 5 cm (气温感应敏感区且滞后性小)并与数据采集器相连,取值间隔为 30 min。

气象因子测定:在与树干液流速率测定装置 50 m 远处的同一样地内、同一高度处,布设美国 Dynamax 公司生产的 DynaMet 型科研级自动气象站,测定各个气象因子,如太阳辐射、气温、空气相对湿度、风速等,数据采集间隔为 30 min;其中水汽压亏缺(kPa)和大气水势(MPa)分别由公式(4)、(5)得出,水汽压亏缺( $V_{PD}$ ):

$$V_{PD} = ae^{\left(\frac{bT}{T+c}\right)} (1 - R_H) \quad (4)$$

式中: $R_H$ ——空气相对湿度; $T$ ——摄氏温度;常数  $a=0.611$  kPa,  $b=17.502$ ,  $c=240.97$  °C<sup>[18]</sup>。

大气水势:

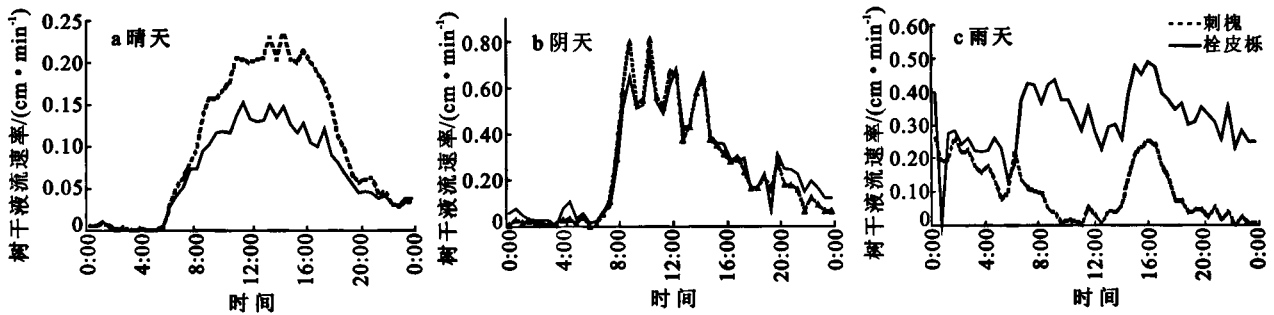


图2 不同天气条件下树干液流速率变化

晴天(7月6日),刺槐的液流为典型宽峰形曲线,启动时间为5:00左右,13:30前后到达峰值,液流到达峰值后伴有小幅度的波动,形成多个小峰组成的“高峰平台”,16:30起急剧下降,20:00后下降速度减缓,并缓慢到达低谷值,其日平均液流速率为0.098 cm/min。栓皮栎的液流曲线与刺槐相似,但其日平均液流速率仅为0.068 cm/min,启动时间同样为5:00左右,到达峰值时间较早,且处于高峰波动时间较长,17:30后缓慢下降,23:00左右到达低谷值。其中7:00—20:00二者的平均液流速率分别为0.162 cm/min和0.108 cm/min,液流量分别占全天的88.26%和90.77%,说明二者在晴天的蒸腾耗水主要在白天进行。刺槐、栓皮栎都没有明显的液流停止界限,夜间仍有液流微弱上升,这主要是由根压引起的。根压使水分以主动吸收的方式进入树木体内,补充白天蒸腾丢失的大量水分,恢复树木体内的水分平衡<sup>[20]</sup>。

阴天(6月30日),刺槐、栓皮栎的液流曲线十分相似,启动时间都为6:00左右,9:00前后到达第1个

$$\phi_a = \frac{r \cdot T}{V} \ln R_H = 0.462 \cdot T \cdot \ln R_H \quad (5)$$

式中: $r$ ——理想气体常数,  $r=8.314$  J/(mol·K);  $T$ ——绝对温度(K);  $V$ ——水的摩尔体积,  $V=0.018$  L/mol;  $R_H$ ——空气相对湿度<sup>[19]</sup>。

### 1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理与分析,并 SPSS 13.0 统计分析软件进行多元线性回归分析,并利用 SigmaPlot 10.0 进行分析图表的绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 树干液流的典型天气日变化及连日变化

选取生长旺季3个典型天气(晴天、雨天和阴天),以中位1.3 m处树干液流速率作为研究对象来反映其变化情况,可见在不同天气条件下树干液流的日变化规律差异明显(图2a,2b,2c)。

峰值,然后不断波动,形成“多峰型”曲线,14:30后缓慢下降,22:00左右到达低谷值。其中7:00—20:00二者的平均液流速率分别为0.041 cm/min和0.040 cm/min,液流量分别占全天的90.47%和85.51%,说明二者在阴天的蒸腾耗水也主要在白天进行。二者在阴天中的液流曲线类似,说明它们对天气变化的敏感程度相近,但平均液流速率以及峰值都明显小于晴天,说明阴天不如晴天适宜刺槐、栓皮栎的生长。

雨天(8月21日),根据自动气象站监测,降雨时段为3:00—14:00,刺槐液流随降雨速率开始逐渐下降,9:30左右至低谷值,此后一直在低谷值小幅波动,14:00后液流速率出现显著升高,16:00后缓慢下降直至低谷值。栓皮栎则保持了相对较高的液流速率,原因可能是栓皮栎和刺槐的气孔对光强的反映不同所造成的。栓皮栎启动时间较早,为5:30左右,7:00前后到达第一个峰值,然后小幅波动,9:00后液流速率缓慢下降,14:00后液流速率又有一定上升,16:00开始缓慢下降直至低谷值,但仍一直保持一定的液流速率。其中7:00—20:00二者的平均液流速率

率分别为 0.008 cm/min 和 0.037 cm/min,液流量分别占全天的 46.17% 和 64.96%。刺槐、栓皮栎在降雨后液流速率提升,说明降雨前树体处于水分亏缺状态,降雨后土壤水分状况得到改善,根系吸收土壤水分,导致树干液流加速,其在夜间仍保持一定的液流速率也证明这一点。

7 月 20—22 日为连续晴天,3 日刺槐平均液流速率为 0.082 cm/min,栓皮栎的较小,为 0.050 cm/min (图 3)。

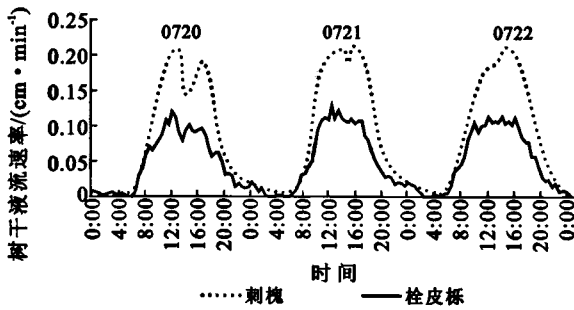


图 3 7 月 20—22 日刺槐、栓皮栎树干液流速率的日变化

20 日刺槐、栓皮栎的液流日变化都为典型的双峰型曲线,说明 13:30 左右太阳辐射和空气温度较高,诱导其叶片气孔关闭,导致蒸腾作用减弱,树干液流速率下降。21 日,刺槐液流日变化曲线仍为双峰型,而栓皮栎则为典型单峰型曲线,液流启动时间同为 5:30 左右,不同的是,夜间栓皮栎液流速率趋近于 0,而刺槐仍保持一定液流速率,可知刺槐在白天由于蒸腾耗水强烈,在夜间由于气孔关闭失水很少,水势差变小,加上根压的作用相对变大反而有利于消除空穴栓塞促进水分输导,来弥补树冠白天的水分消耗<sup>[21]</sup>。22 日,刺槐、栓皮栎液流都为典型单峰型曲线,峰值分别出现在 13:00—14:00 和 12:00—13:00,分别为 0.215 cm/min 和 0.114 cm/min。针对已有数据分析得出,整个生长旺季刺槐、栓皮栎并无两日的液流日变化曲线完全一致,这说明树干液流不但和气象因子有关,和树体当时本身的生理活动和水分状况也密切相关。刺槐、栓皮栎在连续晴天的树干液流速率特征指标见表 2。

表 2 刺槐、栓皮栎树干液流速率特征指标

树种	观测日期	启动时间	达到峰值时间	峰值/ (cm·min <sup>-1</sup> )	平均液流速率/ (cm·min <sup>-1</sup> )	速降时间
刺槐	0720	5:30	12:30	0.211	0.080	17:00
	0721	5:00	13:30	0.217	0.083	16:30
	0722	5:00	13:30	0.215	0.084	16:00
栓皮栎	0720	6:00	12:00	0.120	0.048	16:30
	0721	5:00	12:00	0.130	0.050	16:30
	0722	5:30	11:30	0.114	0.050	15:30

2.2 树干液流速率的月变化及整个生长季的变化

仍以中位 1.3 m 处树干液流速率为研究对象来反映其变化情况。将每月全天 24 h 刺槐、栓皮栎的树干液流速率做加权平均,得到当月每天的树干液流速率的加权平均值,再将不同月份每天的平均树干液流速率做加权平均得到各个月份的树干液流速率平均值(表 3)。

由表 3 可知,生长旺季中,刺槐、栓皮栎平均树干液流速率同在 5 月份最小,分别为 0.024 5 cm/min 和 0.036 6 cm/min;同在 7 月份最大,分别为 0.065 1 cm/min 和 0.046 8 cm/min。其中,刺槐 7 月份的树干液流速率是 5 月份的 2.66 倍,而栓皮栎为 1.21 倍。此外,整个研究期间,5,6 月刺槐平均树干液流速率小于栓皮栎,7—9 月刺槐平均树干液流速率大于栓皮栎,这种变化表明该地区栓皮栎比刺槐较早进入全叶期<sup>[22]</sup>。从 5—9 月,二者树干液流速率比值不断增加。这表明,阔叶树种中,不同树种的树干液流速率有较大差异。

表 3 生长旺季各月树干液流速率平均值

树种	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
刺槐	0.025	0.037	0.065	0.052	0.046
栓皮栎	0.039	0.040	0.047	0.037	0.032
刺槐/栓皮栎	0.630	0.920	1.390	1.410	1.450

2.3 栓皮栎树干不同高度树干液流的变异规律

选取 5—9 月每月中下旬典型晴天的液流日变化作为研究对象,其中 7 月 20—22 日为连续晴天。栓皮栎树干不同高度液流速率差异明显(表 4)。每天树干上位液流启动最早,一般在 4:00—5:00 之间,随太阳逐渐升高,气温升高,太阳辐射增强,树木开始蒸腾耗水,树干上位距离树冠较近,液流受树冠叶片蒸腾作用影响耗水较早,程度较大,首先拉动上位液流启动,使树体产生水势梯度,带动树干中位和下位的液流。实验测得树干中位的液流启动时间一般在 5:00—6:00,比上位晚 1~1.5 h 左右;树干下位在 5,

6,8和9月典型晴天中,液流启动时间一般比上位液流晚1.5~2h左右。但在7月20和22日中,下位液流启动时间反而比上位早0.5h,此时树冠叶片蒸腾还未开始,原因是由于前一天蒸腾作用强烈导致树体水分严重亏缺,树木根系吸收土壤水分以补充树体水分不足。此现象说明树体自身具有一定的水容调节能力,在其作用下形成一定的水分储备,因此能在很大程度上缓冲水势梯度的波动,弥补树干根系白天吸水能力的不足,使树体水分状况保持稳定,维持正常的生长和生理活动,同时也说明树干下位液流受树冠蒸腾的影响较晚且小,受根系吸水影响大。从液流到

达峰值的时间来看,树干不同高度处液流差异明显,树干上位一般在11:00—13:30达到液流峰值,中位一般在11:30—13:30,下位一般在11:30—13:30;峰值大小也存在较大差异,5月和6月典型晴天中,树干上位液流速率大于中位和下位,是中、下位的1.5~2倍;而7—9月典型晴天,树干下位液流速率大于中位和上位,是中、上位的1~2倍,说明在高温天气情况下,叶片关闭部分气孔以阻止水分大量蒸腾,此时树体蒸发占林木耗水总量的比例增大,树体总耗水量仍维持在较高水平,迫使根系从土壤中吸水,所以树干下位的液流速率比上、中位大。

表4 栓皮栎树干不同高度液流速率变化动态

部位	观测项目	5月19日	6月22日	7月20日	7月21日	7月22日	8月19日	9月18日
上位	A	4:00	4:00	5:00	4:00	4:30	4:30	5:00
	B	11:00	13:00	12:30	13:30	12:00	11:30	11:30
	C	0.1640	0.1695	0.1306	0.1340	0.1293	0.1142	0.1137
	D	14:00	17:00	16:30	17:00	15:00	16:30	15:30
中位	A	5:00	6:00	6:00	5:00	5:30	6:00	6:00
	B	11:30	13:30	12:00	12:00	11:30	13:30	12:30
	C	0.1117	0.1041	0.1202	0.1299	0.1138	0.0973	0.1039
	D	11:30	14:00	16:30	16:30	15:30	16:30	15:00
下位	A	5:30	5:00	4:30	5:30	4:00	6:30	6:30
	B	11:30	13:30	11:30	11:30	13:00	13:00	12:30
	C	0.0909	0.0934	0.1902	0.1917	0.1864	0.1306	0.1397
	D	12:30	15:00	16:30	13:30	13:00	15:30	15:00

注:A为液流启动时间;B为峰值出现时间;C为液流峰值/( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ );D为液流速降时间。

#### 2.4 环境因子变化与树干液流的相关性

太阳的朝出夕落是导致气象因子变化的直接原因。太阳辐射的日周期变化显著,每天6:30左右辐射强度开始上升,12:00—13:30间达到峰值,此后迅速下降,19:00前后进入低谷。

受太阳辐射影响和气流影响,气温日变化曲线呈峰型,与图3中树干液流速率的波动规律相似。由于土壤巨大的热容性及热传导阻力,导致土壤温度的波动远远滞后于空气温度变化进程,且随着土层深度的

加大,日周期温度波动幅度越来越小<sup>[15]</sup>;故取5cm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(图4)。

林内风速的变化受当时大气气流运动的影响规律不明显。但是,从理论上讲,风速增大会加速水分的蒸发过程。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,此情况导致气孔开度降低,甚至关闭,从而抑制树干液流。

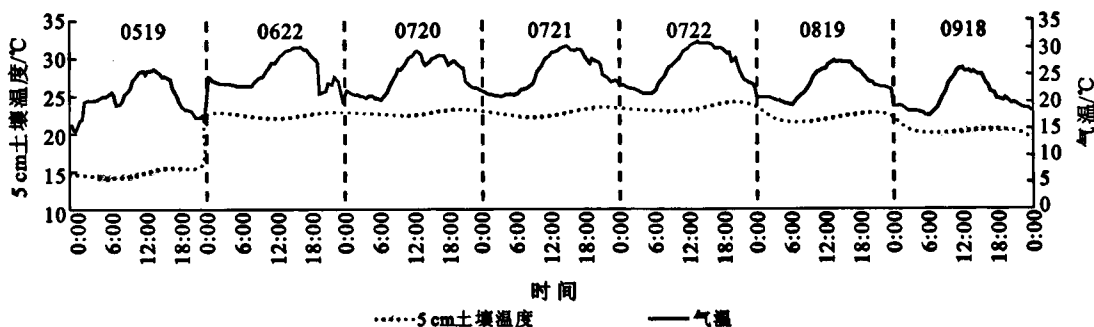


图4 气温和5cm土壤温度日变化

林内空气相对湿度随太阳辐射和气温的变化而波动,但波幅相反,即前者开始上升、下降的时间与后者相反,大气水势与其波动规律相似;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 左右,滞后于后二者约 2~3 h,说明树木本身具有时滞效应<sup>[23-24]</sup>。

利用多元线性回归方法,在多日(5月19日、6月22日、7月20—22日、8月19日、9月18日)典型晴天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,得到栓皮栎上、中、下位和刺槐中位的树干液流速率和环境因子的多元线性回归方程(表 5)。

表 5 树干液流速率与环境因子的多元线性回归方程

树种	观测部位	回归方程	F	R
栓皮栎	上	$V_{\text{上}} = -0.018 + 0.033x_1 + 0.010x_2 + 8.564 \times 10^{-4}x_3 - 0.036x_5 + 5.514 \times 10^{-3}x_7$	415.627	0.929
	中	$V_{\text{中}} = -0.28 + 0.082x_1 + 0.031x_2 + 7.064 \times 10^{-4}x_3 - 1.162 \times 10^{-4}x_4 - 0.0086x_6$	527.123	0.943
	下	$V_{\text{下}} = -0.272 + 0.087x_1 + 0.033x_2 + 7.459 \times 10^{-4}x_3 - 0.117x_5 - 4.789 \times 10^{-3}x_8$	282.242	0.926
刺槐	中	$V_{\text{中}} = -0.557 + 0.141x_1 + 0.047x_2 + 1.508 \times 10^{-3}x_3 - 2.820 \times 10^{-3}x_4 - 0.025x_5 - 0.205x_6$	282.531	0.915

注:  $x_1$  为太阳辐射强度( $\text{kW}/\text{m}^2$ );  $x_2$  为空气水汽压亏缺(kPa);  $x_3$  为大气水势(MPa);  $x_4$  为空气相对湿度;  $x_5$  为风速(m/s);  $x_6$  为土壤水势(MPa);  $x_7$  为气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $x_8$  为 5 cm 土壤温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

由表 5 知,4 式的相关系数分别为 0.929, 0.943, 0.926 和 0.915, F 检验均达到极显著水平。栓皮栎和刺槐树干液流速率共同的影响因子是太阳辐射强度、空气水汽压亏缺、大气水势和土壤水势,二者均与太阳辐射强、空气水汽压亏缺和大气水势呈正相关,与土壤水势呈负相关,说明这 4 个环境因子对不同树种和同一单株树干不同高度液流速率的影响作用趋势一致。从回归方程中看,刺槐中位树干液流速率的影响因子除了上述因子外,还包括空气相对湿度、风速;栓皮栎上、中位树干液流速率共同的影响因子除上述 4 个因子外,还分别包括气温和空气相对湿度,而下位则还包括 5 cm 土壤温度,结合栓皮栎上、中、下位土壤水势的参数可知在栓皮栎树干液流中,较高位的树干液流速率与气象因子关系较显著,而下位则与土壤因子关系较显著,说明同一单株树干不同高度的液流速率环境影响因子不同。

### 3 结论

刺槐、栓皮栎的树干液流速率日变化曲线在不同天气条件下差异明显,与环境因子相关关系显著。晴天中,二者树干液流速率曲线都为典型宽峰型曲线,每日启动时间为 5:00 前后,11:30—13:30 到达峰值,此后液流速率在峰值附近上下波动,16:30—17:30 开始迅速下降,20:00 以后下降速度变缓,直至来日日出前到达低谷;阴天中,二者液流曲线极为相似,都为“多峰型”曲线,树干液流速率都维持在较低水平,说明阴天较之晴天不适宜二者生长;雨天中,二者的平均液流速率很低,在降雨停止后,液流速率都有所上升。在晴天和阴天中,刺槐、栓皮栎的蒸腾耗水主要

在白天进行,而在雨天中,在夜间也有相当一部分蒸腾耗水。树干液流速率连日变化曲线峰型相似,各自峰值与平均液流速率连续 3 日差别不大。

刺槐和栓皮栎的月平均树干液流速率有明显不同。5, 6 月,刺槐月平均树干液流速率均小于栓皮栎,而 7, 8, 9 月,前者月平均树干液流速率均大于后者;从 5—9 月,二者树干液流速率比值不断增加,表明阔叶树种不同树种的树干液流速率有较大差异。

栓皮栎不同高度处树干液流速率的变化差异明显,数据表明每日树干上位液流启动和到达峰值时间最早,中位液流比上位分别晚 1~1.5 h 和 0.5~2 h 左右,下位在 5, 6, 8 和 9 月典型晴天中比上位分别晚 1.5~2 h 和 1~1.5 h 左右,但在 7 月 20 和 22 日,下位液流启动时间反而比上位早 0.5 h,此时树冠蒸腾尚未开始,此现象说明树体本身具有很强的水容调节能力,它在树木耗水过程中起着极其重要的作用,一方面,水容能够有效调节日周期内水势梯度的大幅度波动,保持树木整株水分关系的相对平衡,从而维持正常的生长和生理活动;另一方面,树木由于存在水容而具备水分储备和释放能力,这样能在很大程度上弥补根系吸水能力的不足,极大缓解蒸腾过程对根系吸水的压力<sup>[25]</sup>。峰值大小也存在较大差异,5 月和 6 月典型晴天中,树干上位液流速率是中、下位的 1.5~2 倍;而 7—9 月典型晴天中,树干下位液流速率是中、上位的 1~2 倍,说明高温胁迫诱导叶片气孔部分关闭,迫使根系从土壤中吸水。

生长旺季刺槐、栓皮栎树干液流速率共同的影响因子是太阳辐射强度、空气水汽压亏缺、大气水势和土壤水势,回归分析表明,它们均与太阳辐射强度、空

气水汽压亏缺和大气水势呈正相关,与土壤水势呈负相关。

本研究的研究区域位于半阳坡,关于阳坡、阴坡、半阴坡的树干液流特性是否会有明显变化还有待于进一步研究;关于树干液流速率与其他土壤因子如土壤含水量、土壤比水容重、土壤导水率的关系还须继续深入研究;本研究仅从单株水平上来研究树干液流特性,在以后的研究中可采用一定的方法进行尺度扩展,这样就可以比较林分水平的树干液流特性,从而更好地对水源涵养林区低耗水树种选择和林地水分管理提供参考价值。

### 【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] 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.
- [3] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15:1074-1078.
- [4] Zhang X Y, Kang E S, Zhou M X. Evaluation of the sap flow using heat pulse method to determine transpiration of the *Populus euphratica* canopy [J]. Frontiers of Forestry in China, 2007, 2(3):323-328.
- [5] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 林木蒸腾作用测定和估算方法[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6):1051-1058.
- [6] 高岩, 张汝民, 刘静. 应用热脉冲技术对小美旱杨树树干液流的研究[J]. 西北植物学报, 2001, 21(4):644-649.
- [7] Granier A. A new method for measure sap flow [ J ]. Annals of Forest Science, 1985, 42:193-200.
- [8] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement[J]. Tree Physiology, 1987, 3:309-320.
- [9] Linton M J, Sperry J S, Williams D G. Limits to water transport in *Juniperus osteosperma* and *Pinus edulis*: implications for drought tolerance and regulation of transpiration[J]. Functional Ecology, 1998, 12(6):906-911.
- [10] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因素研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3):23-27.
- [11] 聂立水, 李吉跃, 翟洪波. 油松、栓皮栎树干液流速率比较[J]. 生态学报, 2002, 38(5):31-37.
- [12] 张刚华, 陈步峰, 聂洁珠, 等. 热带山地雨林尖峰栲边材液流及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4):742-748.
- [13] 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.
- [14] 王华田, 马履一. 利用热扩散式边材液流探针(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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Liu X J, Zhao P, Rao X Q, et al. Responses of canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* forest to environmental driving factors[J]. Frontiers of Forestry in China, 2008, 3(1):64-71.
- [18] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environment biophysics [J]. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 1998:36-51.
- [19] S Luna V, J Figueroa M, B Baltazar M, et al. Maize pollen longevity and distance isolation requirements for effective pollen control [J]. Crop Science, 2001, 41(5):1551-1557.
- [20] 王华, 赵平, 王权, 等. 马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4):476-482.
- [21] 刘奉觉, 郑世铠, 巨关升, 等. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2):117-126.
- [22] 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):53-59.
- [23] 赵平, 刘惠, 孙谷畴. 4种植物气孔对水汽压亏缺敏感度的种间差异[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007, 46(4):63-68.
- [24] 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.
- [25] Steinberg S L, Mcfarland M J, Worthington J W. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in Pecan [J]. J. Exp. Bot., 1990, 41(6):653-659.