

绦柳树干液流变化及其影响因子研究

陈崇¹ 李吉跃^{1,2} 王玉涛¹

(1 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 2 华南农业大学林学院)

摘要:该文于2006年4—11月利用Granier热扩散探针观测了绦柳的树干液流速率在生长季节的动态变化,并利用全自动气象站同步监测了环境因子。观测结果显示,在土壤水分充足的8月份,绦柳树干平均液流速率为0.004 1 cm/s,液流峰值为0.014 6 cm/s;而在相对干旱的5月份平均液流速率为0.000 503 cm/s,液流峰值为0.003 47 cm/s;土壤水分充足时期液流速率明显高于相对干旱期。在整个生长季节,绦柳液流速率日变化均为明显的单峰曲线,5—11月份各月的峰值分别为0.002 8、0.002 4、0.004 8、0.008 6、0.006 1、0.005 8、0.004 2 cm/s,启动时间和达到峰值时间具有明显的规律性;以太阳辐射强度、气温、空气湿度、风速、不同层次土温等环境因子作为自变量,以边材液流速率作为因变量,经过逐步回归,建立了绦柳液流速率与环境因子的多元线性模型,回归方程极显著,其主要影响因子为空气温度、空气相对湿度和太阳辐射强度。

关键词:绦柳; 树干液流速率; 影响因子

中图分类号:S792.12 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2008)04-0082-07

CHEN Chong¹; LI Ji-yue^{1,2}; WANG Yu-tao¹. **Variation of stem sap flow of *Salix matsudana* and its impact factors.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(4) 82-88 [Ch, 20 ref.]

1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, P. R. China.

By means of Granier's thermal dissipation probe and micro-meteorological station, daily meteorological factor and stem sap flow velocity (SFV) of *Salix matsudana* were measured from April to November in 2006. Results show that in the August, the average SFV was 0.004 1 cm per second, and the peak velocity was 0.014 6 cm per second. In the May, the average SFV was 0.000 503 cm per second and the peak velocity was 0.003 47 cm per second. SFV in sufficient soil water supply period is higher than in deficient soil water supply period. In whole growing season, the curve of SFV is an obvious single peak. From May to November, SFV was 0.002 8 cm per second, 0.002 4 cm per second, 0.004 8 cm per second, 0.008 6 cm per second, 0.006 1 cm per second, 0.005 8 cm per second, 0.004 2 cm per second, respectively. There is an obvious regularity at start-up and peak of SFV. Taking solar radiation intensity, air temperature, air humidity, wind speed and soil temperature as independent variables and SFV as dependent variable, by stepwise regression, multiple linear equation of SFV and environmental factors are established. The equation is significant and the principal impact factors are air temperature, air relative humidity and solar radiation intensity.

Key words *Salix matsudana*; stem sap flow velocity; impact factor

水资源短缺已经成为制约北方地区经济社会发展的一个不可忽视的因素。对于稀缺的水资源应该如何管理和科学合理的利用,已成为各级部门和单位亟待解决的问题。由于没有科学的观测数据和分

析结果,许多单位对如何充分有效地利用好现有的水资源没有明确的概念。树木的蒸腾耗水是一个关键的指标,国内外目前对植物的蒸腾耗水都在进行研究,其中城市园林绿化植物耗水作为城市用水支

收稿日期:2007-09-13

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:北京市科技计划项目(D0605001040191)、北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室课题(JD100220535)。

第一作者:陈崇。主要研究方向:抗旱造林技术。电话:010-62391446 Email:bluesky-1821@163.com 地址:100083 北京林业大学 1053 信箱。

责任作者:李吉跃,教授,博士生导师。主要研究方向:森林培育及栽培生理生态。电话:13535111309 Email:ljjymy@vip.sina.com 现工

作单位地址:510642 广州市华南农业大学林学院。

出的一个重要方面,其需求为多少,耗水规律如何,怎样通过其耗水规律来指导城市园林植物用水,理应成为当前研究的重点。

20世纪80年代,热技术(包括:热扩散技术、热脉冲技术和热平衡技术)成为测定树干液流变化、估算树冠蒸腾耗水的必要手段而得到广泛应用。热扩散技术由 Granier 发明并首先使用,该技术能在树木自然生活状态下,确定树冠蒸腾耗水量。近年来,国内外学者利用热技术对林木及林分的蒸腾耗水进行了有益的研究^[1-4]。马履一等^[5]对油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)和君迁子(*Diospyros lotus*)等树种的蒸腾耗水进行了对比研究。结果发现,树种之间在耗水量、耗水节律、耗水生态对策,以及耗水的调节机制方面存在很大差异。其中,树木的叶片蒸腾速率、树干木质部边材宽度、边材导管分布与形态特征、根系空间分布特征等因素对单木耗水量均有不同程度影响。孙慧珍等^[6]对东北东部山区主要树种水曲柳(*Fraxinus amurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、核桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)和红松(*Pinus koraiensis*)幼树树干液流进行了研究对比,发现树干液流密度日变化主要受光合有效辐射(PAR)和蒸汽压亏缺(VPD)的影响。尹光彩等^[7]应用热技术法测定两个地区不同环境因子对尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)人工林水分利用影响程度的差异,分析结果表明土壤有效持水量和饱和水汽压差等环境因子是决定两地人工林树液流通量变化的主要因素。曹文强等^[8]也利用 TDP 法对辽东栎(*Quercus liaotungensis*)树干液流进行研究,得知土壤相对含水量对雨天液流的影响最大。

绦柳(*Salix matsudana*)为杨柳科柳属植物,其春季放叶早,见绿快,植株生长迅速,冠大荫浓,姿形优美,适应性强,是北方园林绿化的基调树种。绦柳在生长季节蒸腾耗水占全年的70%以上。本试验采用 Dynamax 公司生产的当前国际最先进的热扩散式树干边材液流探针(TDP-30)直接测定绦柳的液流速率,并同步监测气象和土壤因子,在此基础上分析绦柳蒸腾耗水特性和规律。研究结果对北方城市绿化低耗水树种选择和林地生态用水估算具有重要意义。

1 试验地概况、材料与方

1.1 试验地概况

试验地点位于北京市植物园,地处北京市西郊,39°34'N, 116°28'E,气候属于暖温带半湿润大陆性季风

气候型,年平均气温 12.8℃,年有效积温 4 500℃,无霜期 150 d,年降水量 600 mm 左右,其中7—9月的降水量占全年的70%以上,年蒸发量 1 835.8 mm。

试验地点设在植物园管理处内,土壤为沙壤土,土层厚度 50 cm 左右,因此地曾经为河床,所以下部为石块,通气透水性较好。试验林地为人工混交林,主要树种除绦柳外,还有圆柏(*Sabina chinensis*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、雪松(*Cedrus deodara*)、山桃(*Prunus davidiana*)、碧桃(*Prunus persica*),林相整齐,生长良好。林下灌木主要有金银木(*Lonicera maackii*)、紫叶小檗(*Berberis thunbergii*);草本植物主要是结缕草(*Zoysia japonica*)、黑麦草(*Lolium perenne*)。

1.2 试验材料

于2006年4月选择树干圆满、不偏心、不偏心且胸径上下50 cm处无节疤、无病虫害的绦柳进行研究,测定树干年龄、树高、胸径。被测样木现况如表1。

表1 被测样木现况

TABLE 1 Information of the tested trees

编号	树龄/a	树高/m	胸径/cm
1	9	12.5	24.19
2	9	12.4	24.51
3	9	11.8	23.40

1.3 测定方法

绦柳树干液流速率使用 TDP 探针进行测定。TDP 探针是一种改良的热扩散传感器,是由 Granier^[9]提出的,利用位于热探针下方测定茎流温度的参比探针,来测量植物茎流线性热源的温度。根据茎流速率和温度差之间的关系,计算出茎流速率。安装 TDP 探针时,先将树干外层树皮刮掉,露出内层活树皮,然后在树干胸径处选定相距 10 cm 的两个测试点进行安装。本次试验使用的是 TDP-30 探针。树干边材液流计算公式为:

$$K = (dt_m - dt) / dt$$

式中, K 为无量纲参数; dt 是测定期间各测点 TDP 探头两个探针之间的瞬时温差(℃); dt_m 为边材液流停止时的探针温差,即测定期间的最高探针温差(℃),应选择连续 7~10 d 的最大值。在此基础上,计算边材液流速率 V_s (cm/s):

$$V_s = 0.0119K^{1.231}$$

野外气象因子利用 Dynamax (USA) 公司提供的气温、空气相对湿度、太阳辐射强度、风速、土壤温度等传感器和数据采集器(Data-T Logger)组成的全自动微型气象站测定。所有与数据采集器相连的探头设定采集间隔期为 10 min,然后每隔 30 min 纪录 3

次数据的平均值。

从2006年4—11月对试验对象进行连续观测。

1.4 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 13.0 等统计软件对数据进行整理和分析。

2 结果与分析

2.1 树干液流连日变化规律

2006年7、8月为一年当中雨水充足时期,8月份土壤平均含水量为18.35%;4、5月为土壤相对干旱时期,5月份土壤平均含水量为10.66%,故各取其中一段时间比较在不同土壤水分供应期绦柳树干液流的变化情况。

在土壤水分相对充足时期(图1),在白天,树干液流速率远高于夜间,变化幅度大,受太阳辐射、空气温度、空气湿度等环境因素的影响大;而在晚上和凌晨,液流缓慢,变化幅度小,但是这对于树木补充白天消耗的水分和增强生理适应性等方面具有重要的意义。绦柳树干液流最高值达到0.0143 cm/s,连日变化呈明显的单峰曲线,启动时间为06:30—07:00,到达峰值时间为11:30—12:00之间,液流速率均值为0.0041 cm/s。7、8月份雨水充足,在降雨过后,光照强度增大,林内温度上升幅度和空气湿度下降幅度大,树干液流速率增大,从而加大了树木的蒸散耗水量。而在土壤相对干旱的4、5月份(图2),树干液流速率启动时间明显迟于土壤水分充足时期,树干液流启动时间在07:30—08:30之间,液流速率峰值出现时间也往后推迟,在13:00—14:00出现,在观测期间,最高值为0.00347 cm/s,液流速率平均值为0.000503 cm/s。

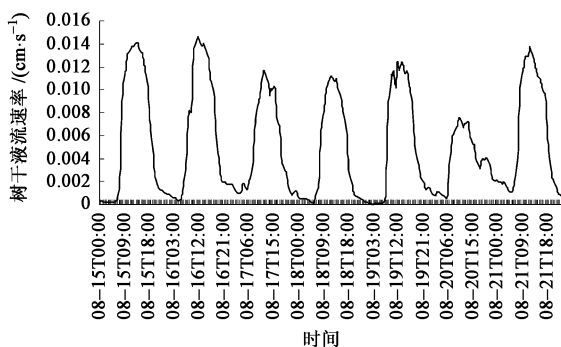


图1 土壤水分充足时期树干液流速率动态
FIGURE 1 Dynamic changes of SFV in sufficient soil water supply period

可以看出,5月份的液流速率,无论是最高值还是平均值,都明显低于8月份。由图1和图2可以看出,在土壤水分充足时期,单日树干液流变化呈明显的钝峰形曲线,而在相对干旱时期,则呈尖峰形曲

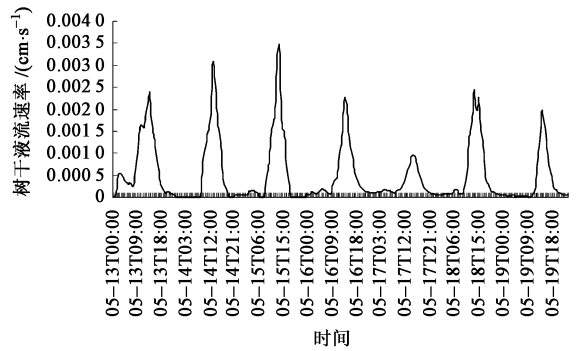


图2 土壤干旱时期树干液流速率动态
FIGURE 2 Dynamic changes of SFV in deficient soil water supply period

线。8月份与5月份树干平均液流速率比值达到了8.151:1。孙慧珍等^[10]对白桦树(*Betula platyphylla*)进行液流速率的季节变化观测,结果表明土壤水分充足期与相对干旱期液流速率比值达到9:1左右。由此可以推断,树干液流与土壤的水分含量有比较密切的关系。进入11月份,气温开始降低,树木蒸发受到一定影响,开始尽量减少水分丧失,做好休眠前的准备。

2.2 不同月份树干液流变化规律

树木年周期内树干液流速率的变化受到其自身发育状况和各种外界因素的影响,呈现出明显的季节变化规律。绦柳在整个生长旺季的树干液流速率变化如图3所示。不同月份绦柳的液流速率曲线均呈明显的单峰形,无论是液流上升还是下降过程,都比较平缓,高峰持续时间短,呈现圆滑或尖锐的峰形;在不同的月份,液流在启动时间、峰值大小及出现时间上具有差异性,夜间液流情况也有较大的不同(如图3)。

在不同月份,绦柳液流的日变化趋势一致。总体来说,5—6月份启动时间大约在07:30—08:30之间;8月份开始,大致在06:30—07:30之间。但是在雨水充沛的7、8月份,遇到阴雨天气,绦柳树干液流速率启动时间向后延迟,在08:00—09:00之间启动。峰值的大小在4—8月份之间呈现逐渐增加的趋势,进入9月份,降雨量减少,土壤水分表现出相对干旱,液流速率也随之开始转入下降态势。这与其他阔叶树种如元宝枫(*Acer truncatum*)^[11]、栓皮栎(*Quercus variabilis*)^[12]等相一致。在生长季节最旺盛的时节即8月份绦柳树干的液流速率是整个生长季节最高的时段,液流趋于稳定的时间比较稳定。5—11月份绦柳树干液流速率峰值分别为0.0028、0.0024、0.0048、0.0086、0.0061、0.0058、0.0042 cm/s。肖以华等^[13]对马占相思(*Acacia mangium*)的研究表明,在雨季其树干液流速率也达到0.0081

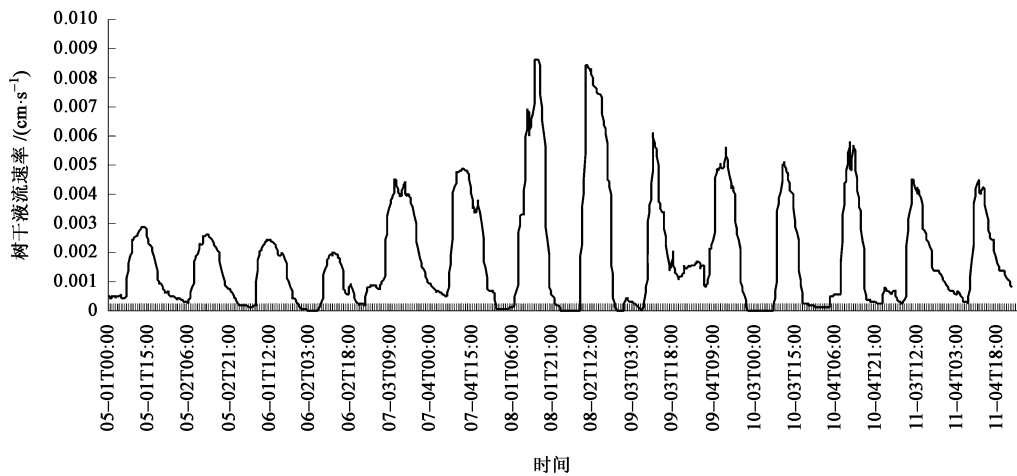


图3 不同月份绦柳树干液流速率变化

FIGURE 3 Dynamic changes of SFV in different months

cm/s; 而王瑞辉等^[11]在土壤水分充裕期,对元宝枫树干液流观测结果表明其最大液流为0.004 1 cm/s; 王华田等^[14]对于针叶树种油松研究表明,在8月份其树干液流峰值仅为0.001 8 cm/s。这表明不同树种其耗水速率的大小和耗水能力的强弱有较大的差别,同时,对于不同的液流峰值也反映了该树种树体水容大小和根系吸收与供应水分能力的大小^[4]。

2.3 树干液流影响因子分析

绦柳生长季节树干液流速率的变化规律受到其自身生长特性和气候因子的双重影响,了解其液流速率变化环境因子响应的机制,可以为园林单位科学合理的灌溉提供依据。

2.3.1 风速的动态变化规律

如图4所示,风速的变化并没有规律可循,完全是由于气流的运动所控制,但是并不能说风速对树干的液流速率变化没有影响。理论上讲,大气气流的运动会加快带走停留在叶片表面的水分,可以加快蒸腾作用的进行。在风速较低时候,随着风速增大,可加快叶片水气的散失,从而引起树干液流速率的增加,但在风速增加到一定程度,反而会引起叶片气孔的关闭,导致树干液流速率的下降,起到抑制蒸腾的作用。9月3日和9月4日,在15:49和10:49

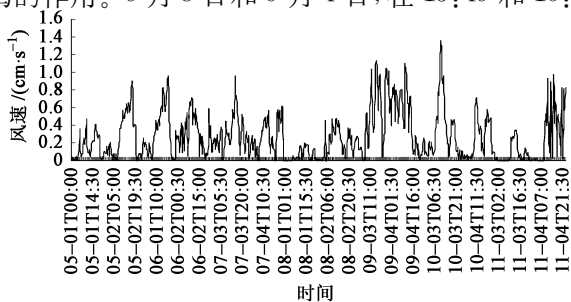


图4 风速月变化

FIGURE 4 Monthly change of wind velocity

风速达到最大值,分别为1.03和1.095 m/s,此时的液流速率分别为0.002 589和0.004 87 m/s,并不是一天之中的最大值。在液流速率总体下降的情况下,风速的增大又能稍微促进液流速率的增大,如在9月3日17:00—18:00的气流运动,就导致了液流速率出现小幅的上升。

2.3.2 太阳辐射强度的动态变化规律

如图5所示,太阳辐射强度和绦柳树干液流速率的变化有很好的 consistency,随着太阳辐射的日变化进程,液流速率呈现明显的规律性波动,其变化进程与太阳辐射并不是同步进行的,而是普遍存在0.5 h左右的时滞。在所选取测定的时期,除7月3日以外,在太阳辐射强度明显增强的0.5 h以后,绦柳树干液流才开始启动,同样在辐射强度到达峰值的0.5 h以后,液流速率达到峰值。根据本试验测定,绦柳与太阳辐射的时滞效应在不同的土壤水分含量时期有所差异,在土壤水分充足时期小于土壤相对干旱时期,这与马玲等^[15]所研究的马占相思树干液流对光合有效辐射的响应相一致。

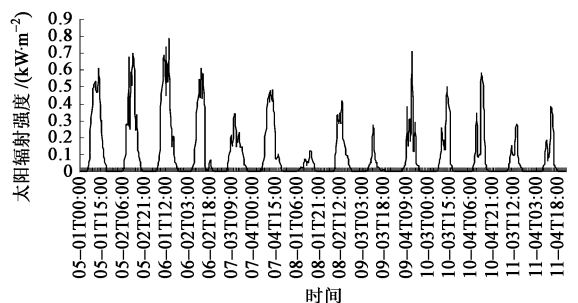


图5 太阳辐射强度月变化

FIGURE 5 Monthly change of solar radiation intensity

2.3.3 空气和土壤温度的动态变化规律

如图6所示,林内气温的变化和树干液流速率

存在一致性,土壤表层温度受大气温度的影响也表现出日周期性,两者之间存在着一定的时滞性,土壤温度的反应总是要慢一些,对于土壤根系层和深根

层的温度,变化很微弱,近似于一条直线。在9月份以后,夜间土壤温度显著高于气温。

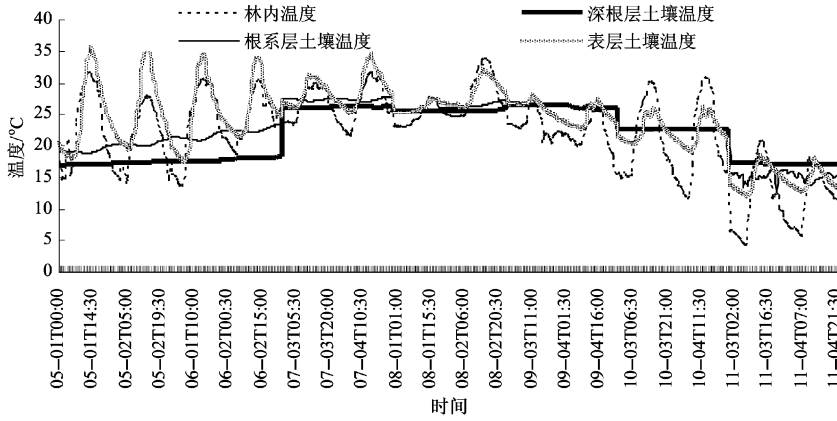


图6 土壤及大气温度月变化

FIGURE 6 Monthly changes of air and soil temperatures

2.3.4 空气相对湿度的动态变化规律

如图7所示,空气相对湿度的变化呈现明显的日周期性,随着太阳辐射强度和气温的增高,空气相对湿度下降,当太阳辐射下降,或者气温降低,则空气相对湿度上升。所以,空气相对湿度的波动情况和太阳辐射及树干液流速率的曲线相反。在空气相对湿度增大的情况下,大气中水分分压增大,使边界层水汽压与叶片气孔内腔水汽梯度减小,水的汽化过程变慢。同时还应该考虑到气温对水汽压的影响,因为温度较高时大气水汽压会比同样空气相对湿度时低,大气与气孔内腔之间水汽压梯度增大,蒸腾作用会得到加强,液流速率也更快。

通过多元统计分析方法来实现,通过对土壤因子、大气因子进行逐步回归分析,以0.05的可靠性作为因变量的入选和剔除依据,可以得到:

$$V_s = 1.3259 \times 10^{-4} + 1.6936 \times 10^{-4} x_1 - 1.836 \times 10^{-5} x_2 + 2.532 \times 10^{-4} x_3 + 2.493 \times 10^{-3} x_4 - 1.18 \times 10^{-4} x_5 - 1.94 \times 10^{-4} x_6 + 6.35 \times 10^{-4} x_7$$

式中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 分别为空气温度、空气相对湿度、深根层土壤温度、太阳辐射强度、土壤表层温度、根系层土壤温度、风速。经过对回归系数和相关系数检验,上述回归方程均达到极显著水平。

同时,利用偏相关分析,可以比较得出几项因子与树干液流的相关关系(如表2),紧密程度依次为空气温度、太阳辐射强度、空气相对湿度、风速、土壤表层温度、深根层土壤温度和根系层土壤温度。通过比较,可以总结出空气温湿度和太阳辐射强度是影响树干液流的主导因子。

在土壤水分相对充足的时期,个别日期出现液流速率降低的现象,反而不如9、10月份高,这说明虽然太阳辐射强度和温度比较大,但是由于降雨的原因,导致空气相对湿度较高,如在8月26日(图8),空气相对湿度达到90.5%,这种较高的水汽压导致了气孔的关闭,抑制了蒸腾作用,所以树干液流速率反而没有土壤相对干旱时期高。曹云等^[16]对南方红壤区杜仲(*Eucommia ulmoides*)的研究中也出现了这种情况。试验中发现绦柳在夜间存在并维持

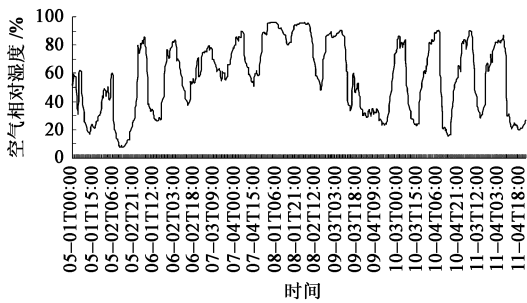


图7 空气相对湿度月变化

FIGURE 7 Monthly change of air relative humidity

2.3.5 影响树干液流因子的分析

绦柳树干液流速率对环境因子变化的响应可以

表2 各因子偏相关系数

TABLE 2 Partial correlation coefficient of each factor

因子	空气温度	太阳辐射强度	空气相对湿度	风速	土壤表层温度	深根层土壤温度	根系层土壤温度
偏相关系数	0.614 8	0.585 6	-0.515 0	0.471 9	0.390 2	0.184 3	0.090 6

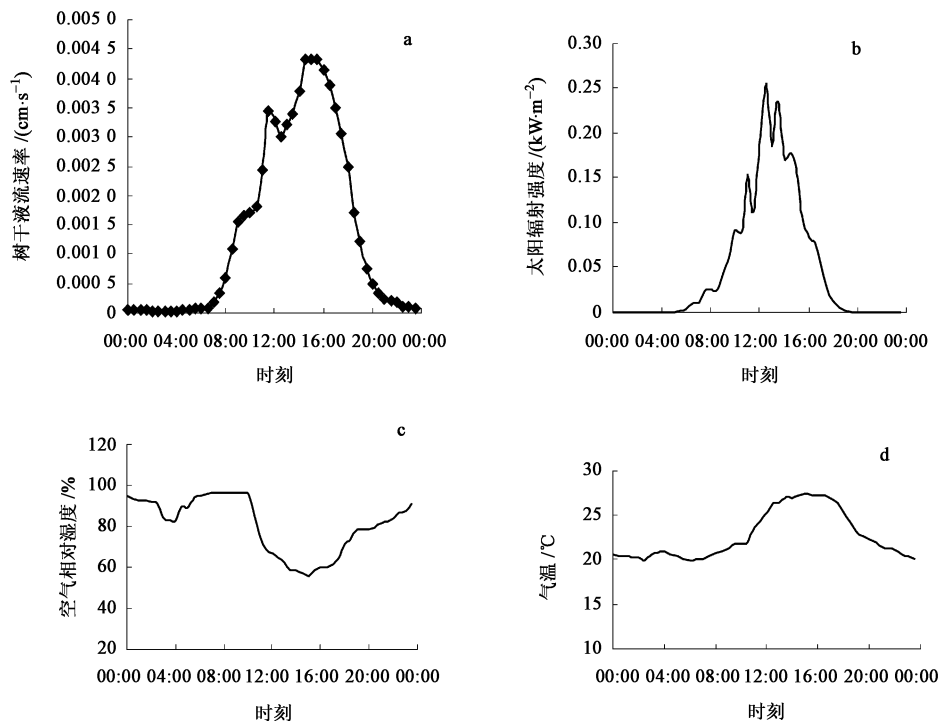


图8 8月26日树干液流速率及主要环境因子日变化

FIGURE 8 Daily changes of SFV and main environmental factors on 26th August

着一定的液流,孙鹏森^[2]在其研究中也发现树木夜间存在上升液流,部分原因可能是由于白昼树冠的蒸腾作用,导致树冠部位水势较低。白天由于气孔开放,形成了根部-树冠-叶片的水势差,从而造成了蒸腾作用的产生^[17]。夜间气孔闭合,此时水势差并没有立即消失,由于水势差的存在,仍会有一部分水分在一段时间内被动地通过根部进入树干及树冠,形成夜间补偿流,使树干部位的水分储存得以恢复,进而在夜间产生一定的液流现象。王华田等^[14]对油松液流进行研究后得到过相似结论。李海涛等^[1,18]对五角枫(*Acer mono*)、棘皮桦(*Betula dahurica*)等阔叶树种及湿地松(*Pinus elliotii*)等针叶树种进行研究后,根据Kramer等^[17]提出的水分吸收机制,认为树木在夜间蒸腾速率几乎为0,虽不会有大量水分涌入根部,此时根系内皮层内由于生理代谢产生溶质积累,在根系内皮层内外导致渗透势差形成水势梯度,产生根压,使得水分仍可由土壤进入根部,并上升至树体的一定位置。因此夜间上升液流的动力可能是由于根压的存在。鲁小珍^[12]对栓皮栎夜间液流的产生也做过类似探讨。

3 结论与讨论

结果表明,绦柳树干液流速率在土壤水分充足时期和相对干旱时期存在着较大差别。在土壤水分充足的8月份,绦柳树干平均液流速率为0.004 1

cm/s,液流峰值为0.014 6 cm/s;而在相对干旱的5月份平均液流速率为0.000 503 cm/s,液流峰值为0.003 47 cm/s。8月份平均液流速率和液流峰值分别为5月份的8.151和3.29倍。土壤水分含量对液流速率的大小有较大的影响。

不同月份之间,绦柳树干液流速率在5—8月份呈现出增加的趋势,8月份以后逐渐下降,9、10、11月份虽然峰值仍较高,但由于其持续时间短暂,平均液流速率仍低于8月份。

通过多元统计分析,得出空气温度、空气相对湿度、太阳辐射强度为影响绦柳树干液流的主导因子,这与虞沐奎等^[19]对火炬松(*Pinus taeda*)树干液流影响因子的研究相一致。但与赵平等^[20]对马占相思的研究及孙慧珍等^[6]对东北东部主要山区主要树种的研究不一致,他们均认为光合有效辐射强度为最主要影响因子。是否树种间和地区差异会造成树干液流主导影响因子的差异,仍有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 李海涛,陈灵芝.应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干耗水量的研究[J].北京林业大学学报,1998,20(1):1-6.
LI H T, CHEN L Z. A study on the volume and velocity of stem sap flow of *Betula dahurica* and *Acer mono* forests by the heat pulse technique[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(1): 1-6.
- [2] 孙鹏森.京北水源保护林格局及不同尺度树种蒸腾耗水特性研究[D].北京:北京林业大学,2000.

- SUN P S. *The study on configuration of the watershed protection forest system and the character of trees transpiration in different scale in the north area Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2000.
- [3] 王华田, 马履一. 油松人工林 SPAC 水势梯度时空变化规律及其对边材液流传输的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 637-643.
- WANG H T, MA L Y. Water potential and its impact on sap wood flow velocity [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5): 637-643.
- [4] PHILIP G. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278: 371-383.
- [5] 马履一. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 1-7.
- MA L Y. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(2): 1-7.
- [6] 孙慧珍, 孙龙, 王传宽. 东北东部山区主要树种树干液流研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 36-42.
- SUN H Z, SUN L, WANG C K. Sapflow of the major tree species in the eastern mountainous region in northeast China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3): 36-42.
- [7] 尹光彩, 周国逸, 王旭, 等. 应用热脉冲系统对桉树人工林树干液流通量的研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1 984-1 990.
- YIN G C, ZHOU G Y, WANG X, et al. A study on sap flux density of two eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) plantations in southeastern China by heat-pulse method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 1 984-1 990.
- [8] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 174-177.
- CAO W Q, HAN H R, MA Q Y, et al. Sap flow flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leaf forest of Taiyue Mountain in Shanxi Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2): 174-177.
- [9] GRANIER A. A new method for measure sap flow [J]. *Ann Sci For*, 1987, 42: 193-200.
- [10] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1 387-1 391.
- SUN H Z, ZHOU X F, ZHAO H X. A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1 387-1 391.
- [11] 王瑞辉, 马履一, 奚如春. 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.
- WANG R H, MA L Y, XI R C. Fluctuation of *Acer truncatum* sap flow in rapid growth season and relevant variables [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(3): 231-237.
- [12] 鲁小珍. 马尾松、栓皮栎生长盛期树干液流的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2001, 28(4): 401-404.
- LU X Z. Study on sap flow of *Pinus massoniana* and *Quercus variabilis* in growing season [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2001, 28(4): 401-404.
- [13] 肖以华, 陈步峰, 陈嘉杰. 马占相思树干液流的研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 331-335.
- XIAO Y H, CHEN B F, CHEN J J, et al. A study on the stem sap flow of *Acacia mangium* [J]. *Forest Research*, 2005, 18(3): 331-335.
- [14] 王华田, 马履一, 孙鹏森. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 31-37.
- WANG H T, MA L Y, SUN P S. Sap flow fluctuations of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* in late autumn [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(5): 31-37.
- [15] 马玲, 赵平, 饶兴权. 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, 2005, 25(9): 2 145-2 151.
- MA L, ZHAO P, RAO X Q. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2 145-2 151.
- [16] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云. 南方红壤区杜仲树干液流动态[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2 887-2 895.
- CAO Y, HUANG Z G, OUYANG Z Y. Dynamics of stem sap flow velocity of *Eucommia ulmoides* in red soil region, Southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2 887-2 895.
- [17] KRAMER P J, KOZLOWSKI T T. *Physiology of woody plants* [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [18] 李海涛, 向乐, 夏军. 应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(10): 31-38.
- LI H T, XIANG L, XIA J. Applying the heat dissipation technique to study the sap flow of *Pinus elliottii* in the red earth area of subtropical China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(10): 31-38.
- [19] 虞沐奎, 姜志林, 鲁小珍. 火炬松树干液流的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 7-10.
- YU M K, JIANG Z L, LU X Z. A study on the stem sap flow of *Pinus taeda* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 27(3): 7-10.
- [20] 赵平, 饶兴权, 马玲. 马占相思树干液流密度和整树蒸腾的个体差异[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4 050-4 058.
- ZHAO P, RAO X Q, MA L. The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4 050-4 058.

(责任编辑 董晓燕)