

生长季内官厅库区小叶杨单株树干 液流通量密度的研究

管伟¹, 叶兵², 王彦辉^{*}, 柳立兵³, 田玉柱⁴

(1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2 中国林业科学研究院科技信息研究所, 北京 100091;
3 北京市延庆县水土保持工作站, 北京 102100; 4 北京市延庆县水资源局, 北京 102100)

摘要: 利用热脉冲液流仪和微型自动气象站, 在北京市延庆县上辛庄水土保持站观测研究了雨季不同天气条件下官厅库区的小叶杨树树干边材液流通量密度变化规律及其对环境因子(气象条件、土壤水分)的响应。结果表明, 边材液流通量密度曲线在不同天气条件下均具有明显的昼夜变化规律: 液流通量密度通常于清晨 5:30—6:30 时开始上升; 12:00—13:00 时达到峰值; 16:00 时开始持续下降, 20:00 时下降速度变慢, 至次日日出之前达到低谷。日液流通量密度(SFA)与日太阳辐射量(ESR)、日均空气温度(T_a)和日均空气相对湿度(RH)均存在极显著正相关关系, 与日均 0~40 cm 土层蓄水量($S_{w,40}$)存在极显著负相关关系, 经回归分析建立了日液流通量密度与各环境因子的线性关系: $SFA = 69.7 + 5.63ESR + 3.12T_a + 0.239RH - 1.13S_{w,40}$ ($R = 0.752$)。

关键词: 小叶杨; 热脉冲; 液流通量密度; 气象因子; 官厅库区

中图分类号: S715

文献标识码: A

A Study on the Stem Sap Flow of Individual Trees of *Populus simonii* under Different Weather Conditions in Rainy Season in Guanting Reservoir

GUAN Wei¹, YE Bing², WANG Yan-hui¹, LIU Li-bing³, TIAN Yu-zhu⁴

(1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China; 2 Research Institute of Forestry Policy and Information, CAF, Beijing 100091, China; 3 Soil and Water Conservation Station in Yanqing County, Beijing 102100, China; 4 Water Resource Bureau of Yanqing County, Beijing 102100, China)

Abstract By using the method of heat pulse velocity recorder and watch dog weather station, the sap flux density of individual trees of *Populus simonii* under different weather conditions in rainy season was measured and its relationship with environmental factors was analysed in Shangxinzhuan Research Station for Soil and Water Conservation of Guanting Reservoir which located in Yanqing County, Beijing. The results showed that the sap flow varied regularly with weather conditions in day time and in seasons. The sap flow started at 5:30—6:30 and ascended to the peak during 12:00—13:00, then began to decrease at 16:00 and slowly decrease since 20:00. It arrived at the lowest point at the time before the sun rises in next day. There were significant positive relationships between the daily accumulated sap flux(SFA) and some diurnal meteorological or soil environment factors, such as sun radiation(ESR), air temperature(T_a), and relative air humidity(RH). The relationship between SFA and soil moisture in

收稿日期: 2006-09-15

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目“管厅库区土壤水分承载力及植被恢复机理研究(6011003)”、国家林业局引进国际先进技术项目“林业生态环境建设决策支持系统引进(2006-4-43)”、科技部社会公益研究专项“植被建设与水资源相互关系调控决策支持系统(2004DE100341)”、国家林业局森林生态环境重点实验室资助

作者简介: 管伟(1978—),男,回族,河北张家口人,在读博士生; E-mail: guanweil997@126.com

* 通讯作者: 王彦辉, E-mail: wangyh@caf.ac.cn

the layer of 0~40 m (S_{w40}) was a significant and negative one. Their regression equation was $SFA = 69.7 + 5.63ESR + 3.12T_a + 0.239RH - 1.13S_{w40}$ ($R = 0.752$).

Key words *Populus simonii*; heat pulse; sap flux density; meteorological factors; Guanting reservoir

水资源短缺已成为制约首都持续发展的关键性因素。作为北京第二大水源地的官厅水库, 由于库体淤塞、水质恶化、来水量急剧减少等问题, 供水量已由 20 世纪 80 年代以前的 10 亿 m^3 以上降至目前的不到 3 亿 m^3 , 水质常年超过五类标准而丧失了饮用功能, 急需恢复和增加森林植被, 改善库区生态环境, 但又产生了植被建设生态用水与保障库区产水功能的突出矛盾。因此, 急需了解库区植被蒸散耗水规律, 准确估计森林植被的蒸散耗水量, 为合理协调和科学规划库区植被建设提供科学依据。林木蒸腾是干旱缺水地区林地蒸散耗水的最主要组成部分。对于植被稀疏、下垫面不均一的地区, 通过测定单株样树的树干木质部的上升液流而简捷地确定林木个体并经尺度转换获得林分的蒸腾耗水量, 是目前认为最实用可行的测定方法。热脉冲法是在基本保持树木自然状态的情况下通过测定树干液流而获得树木蒸腾量的一种可行途径, 该法由 Huber 于 1932 年首次用于测量树干木质部液流, 并由 Swanson^[1] 和 Edwards^[2] 等人改进完善。在国外, Hatton^[3]、Vertessy^[4]、Nadezhdina^[5]、Ford^[6]、Shigeki^[7] 等许多学者应用热脉冲方法测定树干液流; 在国内, 熊伟^[8]、张小由^[9]、张金池^[10]、司建华^[11]、曹文强^[12] 等学者也运用热脉冲方法进行了相关研究。但到目前为止的国内外研究中, 还较少从简化林木蒸腾耗水估算的角度出发而尝试在单株或林分蒸腾耗水量测定值与环境因素之间建立定量关系。本文采用热脉冲技术研究了作为官厅库区主要造林树种之一的小叶杨 (*Populus simonii* Carr.) 的树干边材液流规律, 并利用自动气象站同步监测气象因子, 同时测定土壤含水量, 然后分析小叶杨蒸腾耗水特性及与环境因素的关系, 以便为库区林业生态环境建设和流域水分管理提供科技基础。

1 试验地概况

研究地点是位于妫水河上游的北京市延庆县上辛庄小流域。妫水河是永定河的一级支流, 直接流入官厅水库, 在官厅库区环境治理中具有特殊重要的地位。该地具有大陆性季风气候, 是暖温带与中温带及半干旱区与半湿润区的过渡地带。年均降水

量 493 mm, 主要集中在 7—9 月雨季; 多年平均水面蒸发量 1 745.9 mm, 陆面蒸发量 400 mm; 该区风多风大, 年均风速 $3.1 m \cdot s^{-1}$ 。小流域内植被人为破坏严重, 小叶杨是现存的主要造林树种, 另种植有刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏 (*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、火炬树 (*Rhus typhina* Nutt.) 等。随海拔变化覆盖着不同厚度的黄土, 上部基岩裸露, 土层浅薄; 下部黄土层深厚, 水土流失严重, 沟壑纵横。

2 试验研究方法

2.1 样地的建立与调查

选择代表性的小叶杨人工林, 建立 $10 m \times 10 m$ 样地, 其坡度为 5° , 位于西坡的下部, 覆盖着深厚黄土 ($> 3 m$), 土壤类型为碳酸盐褐土。在标准地内每木检尺, 得到林木径阶分布 (表 1)。该样地林龄 8 a, 郁闭度 0.7, 树高 7 m, 胸径 10 cm, 冠幅直径 4 m, 叶面积指数 3.0, 灌木层覆盖度 0.1, 草本层盖度 0.3。

表 1 小叶杨人工林样地的林木径阶分布

径阶 /cm	4	6	8	10	12	14	16	18
株数 /株	1	3	8	1	1	1	0	1
平均高度 /m	3.3	5.6	6.0	7.0	6.8	8.5	-	12.5

2.2 边材液流的测定

在样地调查基础上, 选择生长良好、树干通直的 4 株样木, 其生长及边材特征见表 2。于 2004 年 5—8 月应用热脉冲式液流仪对这些样木逐个进行树干液流测定。仪器的安装及使用见刘奉觉^[13] 和李海涛^[14] 的报道。将各测定参数输入仪器自带软件 (包括 SAPCOM 2 数据设置通信软件, SAPPRO 液流数据分割软件和 SAPCAL 茎流数据分析和图形化软件), 自动进行文件分割、液流数据的转换分析和损伤校正, 模拟木质部液流径向分布模型, 计算出各项液流参数 [本文应用液流通量 ($L \cdot h^{-1}$)——单位时间内树干边材的液流量和液流通量密度 ($L \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2}$)——单位时间内单位面积树干边材的液流量, 进行分析]。

表 2 热脉冲测定液流的小叶杨样木特征及测定参数

样木编号	测定起始时间	测定终止时间	树高 /m	胸径 /cm	心材直径 /cm	木质部直径 /cm	边材面积 /cm ²	液质比 %	木质比 %	探头深度 /mm	热脉冲长度 /s	测定时间间隔 /min
1	05-27	06-01	5.8	8.9	2.9	7.9	42.20	0.27	0.37	5, 10, 15, 20	0.1	30
2	06-27	07-16	12.5	17.2	2.6	16.6	210.95	0.10	0.38	2, 4, 8, 10	0.1	30
3	07-30	08-06	6.5	12.4	4.0	11.2	86.14	0.49	0.45	8, 16, 24, 32	0.1	30
4	08-06	08-13	7.0	9.6	2.0	8.3	51.79	0.25	0.31	4, 8, 12, 24	0.1	30

2.3 气象因子的测定

应用 Watch Dog (Australia Spectrum Technologies Inc) 自动气象站, 与液流仪同步记录气象因子, 包括风速 ($W_s, \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)、风向 (W_v)、太阳总辐射强度 ($ESR, \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)、空气相对湿度 ($RH, \%$)、气温 ($T_a, ^\circ\text{C}$)、5 cm 深度的土壤温度 ($T_s, ^\circ\text{C}$) 以及降水 (P, mm)。

2.4 土壤含水率的测定

采用土钻分层取土测定土壤含水率, 深度为 300 cm, 具体各层分别为 0~10Q, 10~20Q, 20~30Q, 30~40Q, 40~60Q, 60~80Q, 80~100Q, 100~120Q, 120~150Q, 150~180Q, 180~200Q, 200~250Q, 250~280Q, 280~300 cm。在 2004 年 5—8 月内每 10 d 取土 1 次, 在各次降水后的次日增加 1 次取土。取回的土样用烘干法 (105°C) 测定含水率。

3 结果与分析

3.1 树体大小 (边材面积) 对树干液流的影响

树干边材是树木的水分传导组织, 边材面积一般随着树体增大而增加, 边材面积在很大程度上影响着树干的液流量。图 1 和图 2 是在 5 月 28 日至 8 月 5 日测定的晴天条件下的几株样树的树干液流量和液流量密度的比较。其中 5 月 28 日测定值对应于样树 1, 7 月 2 日和 7 月 14 日测定值对应于样树 2, 8 月 5 日测定值对应于样树 3。由于样树 2 树体高大, 边材面积大, 所以其液流量明显大于另外 2 株样树 (图 1), 在其他天气条件下, 这种边材面积的影响同样存在 (文中未列出)。

在进行不同树种和不同样树的液流特征比较时, 一般采用液流量密度的指标, 以便排除边材面积不同的影响。在将液流量换算成为液流量密度以后 (图 2), 可以看到样树之间的差异明显变小, 特别是样树 1 的液流量密度已经接近样树 2 的水平; 但仍然存在高大样树液流量密度较大的趋势, 如样树 3 的液流量密度依然较低, 这可能与高大树木接受光照较多和根系吸水能力较强有关^[15], 也可能和 8 月 5 日的具体气象条件有关, 还可能与 8 月份的树木生长速度下降有关。无论如何, 在本文

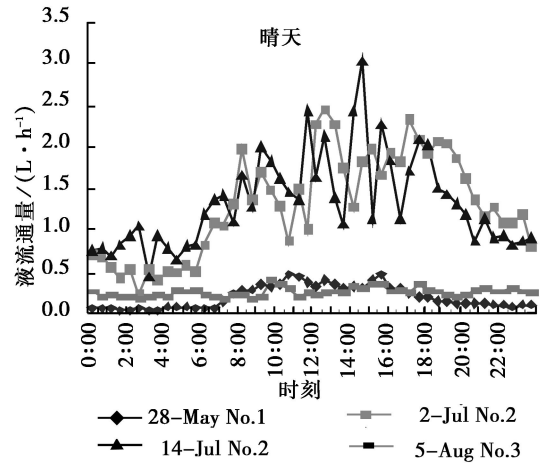


图 1 晴天条件下树干边材液流量日变化

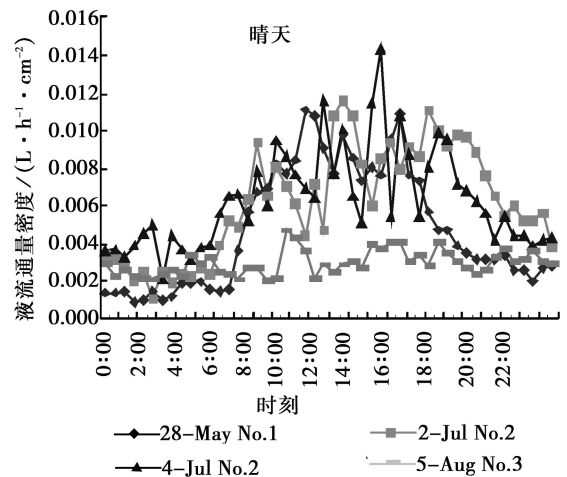


图 2 晴天条件下的树干边材液流量密度日变化

后面的分析和比较中, 均采用了液流量密度指标。

3.2 典型天气条件下边材液流量密度的日变化特征

3.2.1 晴天时的树干液流量密度变化 晴天时的观测表明 (图 2), 各时期的液流量密度日内变化都表现出较明显的单峰趋势, 但波动较大。随着观测时期的不同, 液流启动时间变动在 6:15—7:15 期间, 其中 7 月 14 日 (启动值 $0.0057 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 和 7 月 2 日 ($0.0040 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 最早, 5 月 28 日 (启动值 $0.0036 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 稍迟, 8 月 5 日最晚且不明显, 这主要与日出时间及其辐射强

度紧密相关。日出后,一方面总辐射强度逐渐增大,导致气孔张开,同时气温、土温增加,使液流速率不断上升;并且从 8:15 开始直到日落前 18:00 左右出现 2~3 次高峰。峰值高低受环境条件影响,包括太阳辐射、土壤水分供给情况等。在水分供应良好时,液流通量密度的峰值较高(7月 14 日, $0.0143 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$);当土壤水分不足时(5月 28 日和 7月 2 日, $0.011 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右),会出现曲线断续现象,使液流通量密度的峰值不明显。在 8 月 5 日没有明显的峰值,同时全天的液流通量密度都不高。在 16:00 之后,液流通量密度随着太阳辐射下降而有所降低;在 21:00 以后,下降速度变慢,维持在一个相对稳定的较低水平,直至来日日出前后到达低谷。

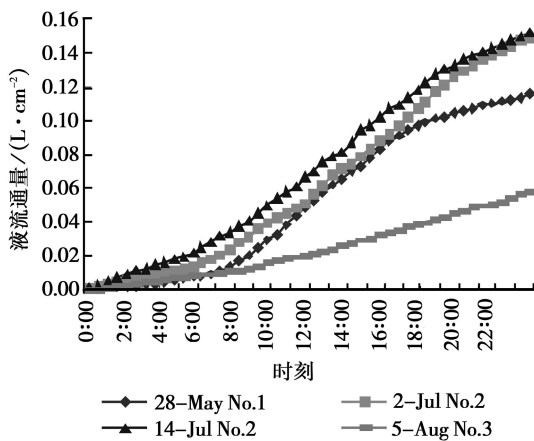


图 3 晴天边材累计液流量日变化

日落时间对液流停止时间的影响远不像日出时间对液流启动时间的影响那样明显,而且夜间液流也没有完全停止,甚至 7 月 14 日的夜间液流通量密度还高过 8 月 5 日白天的液流通量密度,夜间存在的树干液流,可认为是受根压的作用^[14 16]。

由图 3 可以看出,不同时期的晴天条件下的单位边材面积的日累计液流量(液流密度)存在较大差别,其中 5 月 28 日、7 月 2 日和 7 月 14 日之间相差不大,但仍然表现为液流通量密度随时间逐渐增高的趋势,主要因为这个时期是小叶杨的生长旺季;一天当中各个时段的液流通量密度累计值均显著高于 8 月 5 日。生长季节小叶杨边材液流密度的日变化总体上呈单峰曲线,但白天存在较为显著的波动现象,夜间液流活动明显变小,尤其是在 6 月份。

边材液流通量密度连日变化曲线的各日峰形基本相同,但峰值差异较大,其影响原因主要受当时的气象因子(太阳辐射、空气温度、空气湿度、土壤温

度、风速等)影响(表 3)。

3.2.2 阴天时的树干液流通量密度变化 与晴天相比,阴天时的边材液流通量密度的各观测时期数值更趋于一致(图 4),且单峰趋势更加明显,曲线比较平滑。8 月 9 日的液流通量密度曲线波动比较明显,且高峰值甚至达到 $0.023 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,这是由该时段内太阳辐射强度变动较为剧烈引起的。阴天时液流启动时间与晴天基本相同,也在 7:00 左右,但启动过程平缓得多,而且之后是缓慢上升,直至达到高峰(不超过 $0.010 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 7 月 10 日和 8 月 9 日);液流通量密度的高峰持续时间比晴天要长得多,一直到 17:00 左右,之间会伴随轻微的波动。即使在阴天条件下,夜间液流也并未停止,即仍然存在一定的夜间液流,这与孙龙^[17]的研究结果一致。

在比较晴天和阴天两种天气类型条件下的液流通量密度变化曲线时发现,晴朗干燥天气时的液流通量密度曲线的数值整体较高;而阴天条件下由于辐射强度小、空气温度低、空气相对湿度大,液流通量密度曲线的数值整体较低,但其峰值与晴天相比并没有显著减小。这说明,在本研究地区,树木蒸腾不仅受气象条件影响,也受到土壤水分条件的限制性影响,属于土壤水分不足条件下的蒸腾。

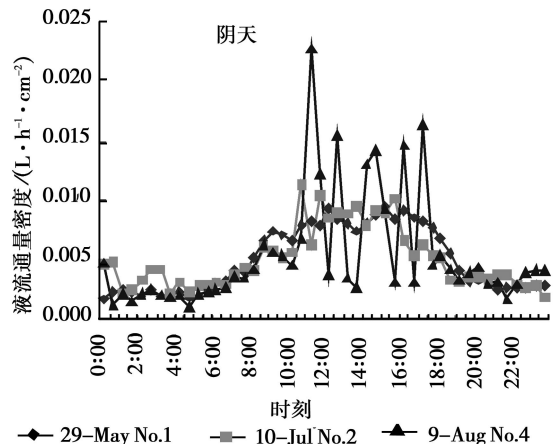


图 4 阴天条件下树干边材液流通量密度日变化

3.2.3 雨天时的树干液流通量密度变化 本文中将根据降水类型简单地划分为连阴雨和短时段降水两种类型。分析表明,不同降水类型时的树干液流通量密度变化曲线有较显著的差异。此外,短时段降水的降水时间分布也对液流通量密度变化产生影响(图 5)。

在连阴雨条件下(如 6 月 30 日样树 2 和 8 月 11 日样树 4),树干液流并未停止,且处于不同生长期的树干液流通量密度大体相同,两个典型连阴雨天气下的树干液流通量密度均保持在 $0.002 \sim 0.004 \text{ L}$

· h⁻¹ · cm⁻²之间。一般认为连阴雨天气条件下树木蒸腾作用应该停止,但我们观测结果表明仍然存在树干液流,因其液流通量密度大体相同,因而认为可能是根压在起主要作用。

在整个生长季中,短时段降水一般都出现在午后到傍晚前后。图 5 中展示了两场短时降水(7月 4 日样树 2, 18:00 降水; 7月 7 日样树 2, 15:00 降水。降水时间均不超过 1 h)的情况。短时降水并未对全天的树干液流通量密度变化产生较大影响,只是降水时段内液流通量密度因为天气条件变化而出现了较明显的下降。

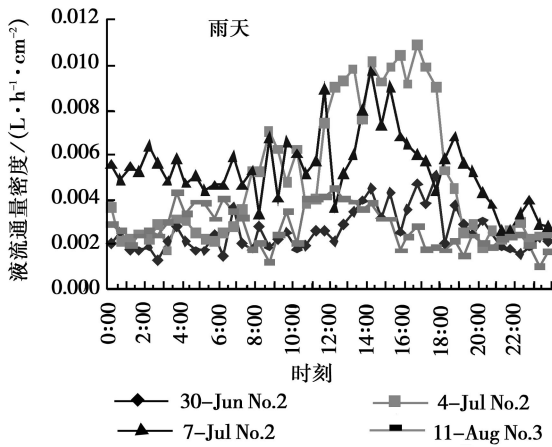


图 5 雨天条件下树干边材液流通量密度日变化

3.3 环境因子对液流通量密度的影响

树干液流通量密度与环境因子存在着密切关系。本文选择了日太阳辐射量、空气温度、地表温度、空气相对湿度、风速、0~ 1Q、10~ 2Q、20~ 3Q、30~ 4Q、40~ 6Q、60~ 80和 80~ 100 cm 各土层含水量 (W_{S10}、W_{S20}、W_{S30}、W_{S40}、W_{S60}、W_{S80}、W_{S100}, mm)以及 0~ 40 cm 土壤蓄水量 (S_{w40}, mm) 作为自变量,与日液流通量密度进行偏相关分析。结果(表 3)表明,除土壤温度和风速外各环境因子均与 SFA 呈显著或极显著相关。具体表现为与太阳辐射相关系数最高 (R = 0.596),为极显著水平,太阳辐射影响叶片气孔的开闭,直接控制树冠的蒸腾作用;与空气温度的相关系数达到 0.350 的显著水平,这是由于温度与树木光合物质的形成、积累和消耗紧密相连;SFA 与空气相对湿度也呈显著相关 (R = -0.383),它与树干形成层细胞分裂和伸长所需要的水分紧密相连,空气湿度的下降也为树木体内水分蒸腾创造了必要的水势梯度;在土壤水分因子中,0~ 100 cm 各土层含水量均与 SFA 呈显著相关,尤其是 40 cm 以上各层呈极显著相关,说明土壤水分对于树木的蒸腾具有相当重要的作用,是树木蒸腾的水分来源。

表 3 日液流通量密度与环境因子相关分析的偏相关系数

	SFA	ESR	T _a	T _s	RH	W _s	S _{w40}	W _{S10}	W _{S20}	W _{S30}	W _{S40}	W _{S60}	W _{S80}	W _{S100}
SFA	1.000	0.596**	0.350*	0.231	-0.383*	0.215	-0.475**	-0.417*	-0.482*	-0.491**	-0.463**	-0.370*	-0.390*	-0.413*
ESR		1.000	0.288	0.070	-0.480**	0.134	-0.137	-0.119	-0.146	-0.131	-0.146	-0.028	-0.135	-0.209
T _a			1.000	0.871**	-0.226	-0.026	0.003	-0.107	-0.010	0.024	0.141	0.113	0.150	0.220
T _s				1.000	0.191	-0.251	0.108	-0.018	0.094	0.131	0.252	0.173	0.229	0.285
RH					1.000	-0.695**	0.451**	0.416	0.452**	0.441*	0.439*	0.274	0.248	0.241
W _s						1.000	-0.513	-0.475**	-0.506*	-0.499**	-0.510*	-0.347	-0.296	-0.284
S _{w40}							1.000	0.945**	0.997**	0.987**	0.937*	0.835**	0.498**	0.455**
W _{S10}								1.000	0.957**	0.886**	0.776*	0.639**	0.212	0.168
W _{S20}									1.000	0.977**	0.916*	0.802**	0.446	0.408
W _{S30}										1.000	0.972*	0.896**	0.618**	0.570**
W _{S40}											1.000	0.946**	0.741**	0.710**
W _{S60}												1.000	0.832**	0.788**
W _{S80}													1.000	0.977**
W _{S100}														1.000

注:表中 SFA、ESR、T_a、T_s、RH、W_s、S_{w40}、W_{S10}、W_{S20}、W_{S30}、W_{S40}、W_{S60}、W_{S80}、W_{S100} 分别表示日液流通量密度、日太阳辐射量、空气温度、20 cm 土层温度、空气相对湿度、风速、0~ 40 cm 土层蓄水量、0~ 1Q、10~ 2Q、20~ 3Q、30~ 4Q、40~ 6Q、60~ 80和 80~ 100 cm 土层含水量; ** 表示 0.01 水平显著, * 表示 0.05 水平显著。

在相关分析的基础上,选取相关性较大同时易于取得的部分环境因子,进行多元线性回归,建立了小叶杨单株树木的日液流通量密度与环境因子之间的线性关系 (R = 0.752):

$$SFA = 69.7 + 5.63ESR + 3.12T_a + 0.239RH - 1.13S_{w40}$$

式中: SFA 为日液流通量密度, ESR 为日太阳辐射量, 回归范围: 0.667~ 11.625 MJ · m⁻², T_a

为日均空气温度, 回归范围: 15.4~26.3℃, RH 为日均空气相对湿度, 回归范围: 20.3%~97.6%, S_{w40} 为 0~40 cm 土层蓄水量, 回归范围: 38.0~92.5 mm。经方差分析的 F 检验, 表明方程回归显著。利用此关系式, 可以较为方便地计算小叶杨的单株日液流通量密度和日液流量, 并基于林分特征 (边材面积、树干直径、叶面积等) 通过尺度上推而估计出林分的日或生长季的蒸腾耗水量^[3]。

4 结论

(1) 树体大小和树干边材面积对树干液流量具有显著影响, 但对树干液流通量密度的影响较小。生长季内的树干液流通量密度在生长旺盛的 6~7 月份显著高于其他各月。液流通量密度日变化曲线总体呈单峰型, 白天受气象条件变化影响存在较显著的波动现象。无论是阴天还是晴天, 夜间的液流活动并没有停止, 虽然数值明显变小。

(2) 天气条件对液流通量密度及其变化具有显著影响。在晴天条件下, 液流通量密度变化规律表现为单峰趋势: 液流通量密度于清晨 5:30—6:30 时开始上升; 12:00—13:00 时达到峰值; 16:00 时开始持续下降, 20:00 时下降速度变慢, 至次日日出之前达到低谷。在连阴雨天气条件下, 由于根压作用仍具有上升液流; 在阵雨天气条件下, 仅在雨时液流有所下降; 在阴天条件下, 液流启动时间推迟, 结束时间提前, 日均液流通量密度降低, 但峰值没有显著降低。

(3) 液流通量密度和日液流通量密度与环境因子的相关分析表明, 太阳辐射量和土壤蓄水量的影响最为显著, 相关系数分别达到 0.596 和 -0.475。其他环境因子 (空气温度、空气相对湿度等) 也均和液流通量密度达到极显著或者显著相关。

(4) 建立了日液流通量密度与主要气象条件和土壤含水量的线性回归方程, 其相关系数 R 值为 0.752。利用此关系式可计算小叶杨单株日液流通量密度和日液流量, 并进而估计林分的蒸腾耗水量。

参考文献:

- [1] Swanson R H, Whitfield D W A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice[J]. *J. Exp. Bot.* 1981, 32: 221~239
- [2] Edwards W R N, Warwick N W M. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1984, 27: 537~543
- [3] Hutton T J, Moore S J, Reece P H. Estimating stand transpiration in *Eucalyptus pquheae* woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies[J]. *Tree Physiology*, 1995, 15: 219~227
- [4] Vertessy R A, Hutton T J, Reece P, et al. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique[J]. *Tree Physiology*, 1997, 17: 747~756
- [5] Nadezhda N, Bernák, Ceulmans R. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understorey species: scaling errors associated with positioning of sensors[J]. *Tree Physiology*, 2002, 22: 907~918
- [6] Ford C R, McGuire M A, Mitchell R J et al. Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use[J]. *Tree Physiology*, 2004, 24: 241~249
- [7] Shigeki H, Atsushi K, Shinichi T, et al. Stem water transport of *Lithocarpus edulis*, an evergreen oak with radial porous wood[J]. *Tree Physiology*, 2005, 25: 221~228
- [8] 熊伟, 王彦辉, 徐德应. 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
- [9] 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): 586~589
- [10] 张金池, 黄夏银, 鲁小珍, 徐淮平原农田防护林带杨树树干液流研究[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(4): 21~25, 36
- [11] 司建华, 冯起, 张小由. 热脉冲技术在确定胡杨幼树干液流中的应用[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 503~508
- [12] 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
- [13] 刘奉觉, Edwards W R N, 郑世锴, 等. 杨树树干液流时空动态研究[J]. *林业科学研究*, 1993, 6(4): 368~372
- [14] 李海涛, 陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究[J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(1): 1~6
- [15] Hunt M A, Beadle C L. Whole tree transpiration and water use partitioning between *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in a short rotation plantation in northeastern Tasmania[J]. *Tree Physiology*, 1998, 18: 557~563
- [16] Kramer P J. *Water Relation of Plants*[M]. Academic Press, Inc. 1983
- [17] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 等. 生长季红松树干液流密度的特征[J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(1): 12~14