

# 毛竹液流特征及其与环境因子的关系<sup>\*</sup>

侯小金 谢锦忠<sup>\*\*</sup> 格日勒图 杨前宇

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

**摘要** 运用 Dynamax 液流测量系统监测浙江庙山坞自然保护区毛竹液流的日变化, 采用型号为 EQ-15 的土壤水势仪监测 0~100 cm 土层的土壤水势, 利用自动气象站同步监测太阳总辐射、空气温度、空气相对湿度、风速等气象因子。结果表明: 晴朗天气条件下毛竹液流的日变化过程呈现单峰曲线, 具有显著的昼夜变化规律, 且变幅大; 阴雨天气时液流日变化过程呈双峰或多峰曲线, 而且日均液流速率和日液流量均低于晴朗天气, 变化较平缓; 不同径阶毛竹液流速率波动规律相同, 但径级较大毛竹的日均液流速率和液流量较大一些。当 0~100 cm 土层土壤水势在 -13~-10 kPa 时, 毛竹液流速率与土壤水势相关性不显著, 但当土壤水势低于 -200 kPa 左右时, 液流速率和土壤水势呈正相关, 土壤水分含量成为限制液流速率的主要因子之一; 相关性分析表明, 边材液流速率与空气温度、空气相对湿度、光合有效辐射、总辐射、水蒸气压亏缺呈极显著正相关, 与空气相对湿度呈极显著负相关。太阳辐射、气温、空气湿度、风速等环境因子作自变量, 以液流速率作因变量, 经过逐步回归, 建立了液流速率与环境因子的多元线性模型。

**关键词** 毛竹; 液流速率; 液流量; 土壤水势; 环境因子

**中图分类号** Q945.17 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)7-1263-07

***Phyllostachys pubescens* sap flow and its relationships with environmental factors.** HOU Xiao-jin, XIE Jin-zhong, Geriletu, YANG Qian-yu (Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1263–1269.

**Abstract:** A Dynamax sap flow measuring system was applied to monitor the diurnal variation of sap flow velocity of *Phyllostachys pubescens* stands in Miaoshanwu Nature Reserve in Zhejiang. In the meantime, Equitensiometer (EQ-15) was applied to measure the soil water potential at 0–100 cm, and an automatic weather station was utilized to record the total solar radiation, air temperature, air relative humidity, and wind speed. The diurnal variation of the sap flow velocity exhibited mono-peak curve, with a distinct diurnal course on clear days, and a multi-peak pattern on cloudy or rainy days. The average daily sap flow rate and the diurnal sap flux were lower on cloudy or rainy days than on sunny days. The magnitude of the sap flow changed considerably between sunny and rainy days. The daily sap flux of *P. pubescens* with different stem diameter followed similar pattern, but the stands with bigger stem diameter had the faster sap flow velocity and the higher daily sap flux. When the soil water potential in 0–100 cm layer was between -13 to -10 kPa, no obvious correlation was found between the sap flow velocity and the soil water potential. However, when the soil water potential was less than -200 kPa, the sap flow velocity was positively correlated with the soil water potential, and soil moisture content became one of the main limiting factors. The sap flow velocity had significant positive correlations with solar radiation, air temperature, vapor pressure deficit, and wind speed, but negative correlation with air relative humidity. Taking the solar radiation, air temperature, vapor pressure deficit, air relative

<sup>\*</sup> 浙江省重大科技专项(2008C02001-1)和中国林业科学研究院亚热带林业研究所中央级公益性科研院所基本业务费专项基金重点资助项目(RISF060701)。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: jzhxie@163.net

收稿日期: 2010-01-07 接受日期: 2010-04-19

humidity, and wind speed as independent variables and the sap flow velocity as dependent variable, the multiple linear equations of the sap flow velocity and environmental factors were established by stepwise regressing.

**Key words:** *Phyllostachys pubescens*; sap flow rate; sap flux; soil water potential; environmental factor.

树木蒸腾耗水是森林生态系统中土壤-植物-大气连续体水分循环中重要的一个环节,树木蒸腾耗水量是树木生长与水分环境研究的重要参数,它的准确测算是低耗水树种选择、树种的合理搭配和林分结构调整等林业生态工程建设中最关键、最核心的问题(Wullschlegel *et al.*, 1998)。因此,树木蒸腾耗水研究对于提高林木水分利用效率、调控林分密度、稳定林分结构和解决水分供需矛盾等问题具有重大的理论和现实意义。

目前,树木蒸腾耗水的研究主要分为4个层次,即叶片水平、单株水平、林分水平和区域水平,不同层次的研究方法不同。叶片水平上有剪枝称重法和气孔计法等;单株水平上有热技术法、整树容器称重法、同位素示踪法和蒸渗仪法等;林分水平上有水量平衡法、波文比-能量平衡法和涡度相关法等;区域水平上有遥感法和气候学方法等。上述方法中,热技术法具有其他方法无法比拟的优点,可在树木自然正常生长条件下测定树木树干边材液流速率,不受环境条件的影响,能更准确地测算单树木树干边材的液流速率。近年来,国内外许多学者利用热技术法对林木耗水问题进行了大量卓有成效的研究,主要涉及以下3个方面:第一,研究树干木质部水分传输的时空变化规律,具体包括树干液流的日季变化规律(夏桂敏等, 2006; Daley & Phillips, 2006)、树干木质部不同位点的液流速率分布规律(Cermak *et al.*, 2007; Burgess & Dawson, 2008)和不同径级的树干液流变化规律(Delzon *et al.*, 2004)。第二,研究影响树干液流大小的因子即生物学结构因素(Stan & Anthony, 2000; 李吉跃等, 2002)、土壤因素(Cochard *et al.*, 2000; Bovard *et al.*, 2005)和气象因子(严昌荣等, 1999; Oren & Pataki, 2001)。第三,估算林木蒸腾耗水量(Kumagai *et al.*, 2005)。

毛竹(*Phyllostachys pubescens*)属于禾本科(Poaceae)竹亚科(Bambusoideae)植物,是我国分布最广、面积最大的竹种之一,具有生长快、产量高、效益好等诸多经济价值和保持水土、涵养水源、调节气候等生态价值。已有一些关于毛竹液流的研究,但

这些研究是在砍伐毛竹(张文燕等, 1994; 汪奎宏等, 1995)或者在毛竹竹秆表面钻出一定大小的孔(李雁群, 1997)的前提下,通过收集伤流来进行的。本文利用热平衡方法监测毛竹自然生长状况下的液流速率,并对其与环境因子(空气温度、空气相对湿度、总辐射、水蒸气压亏缺等)的关系作了分析,旨在揭示毛竹液流的生理特性及其变化特征,为今后毛竹林地的水分消耗计算和经营管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区概况

试验区位于庙山坞部级自然保护区(30°03'N—30°06'N, 119°56'E—120°02'E),属浙西低山丘陵区天目山系余脉,海拔290~530 m,平均坡度22℃。气候为亚热带湿润季风气候,年均气温16.1℃,年平均降水量1427.2 mm。毛竹林地土壤属红壤,土层厚度>100 cm,枯落物层1~3 cm。试验林为毛竹纯林,大小年制经营,年龄1~4年生,立竹密度2000株·hm<sup>-2</sup>,平均胸径9.8 cm,平均高度10.5 m,郁闭度0.3。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 热平衡法的基本原理** 采用Dynamax液流测量系统,应用热平衡法原理检测茎干液流。其原理是向电加热元件通以稳定持久的电流,对植物茎或枝条表面连续加热,通过3组温度测量探头来感应茎表面的温度,测定从加热部位进入和出去的温度差来计算出被液流流动所带走的热量,求出液体速率。

**1.2.2 茎流测量系统的安装** 于2009年4月选取生长状况良好、1年生、胸径分别在13.5~14.0 cm和9.5~10.0 cm之间的毛竹各2株,径级13.5~14.0 cm和9.5~10.0 cm的液流速率分别是各径级的2株毛竹液流速率的加权平均值。精确测定安装部位茎干的直径,然后在安装部位的茎干表面涂抹一层油脂,以防止水分顺茎干流入测定部位,保护探头不受损伤,将探头紧紧包裹处理好的茎干,然后用

隔热环套将探头的上、下两头密封严实。为了减少外界环境温度的变化对探头产生影响,在安装好探头后,分别在探头的上下部位用棉被包裹茎干2圈。最后,外层安装防辐射护罩,用胶带密封,防止雨水进入。

用数据传输电缆连接探头与数据采集器,将数据采集器的电源线与电源接通。将笔记本电脑与数据采集器连接,设置数据采集器的工作参数(茎的截面积、探头电压、茎的类型等),数据采集间隔时间设定为30 min,于4月1日开始进行24 h不间断测量。

**1.2.3 环境因子的测定** 土壤水势采用德国 Ecomatik 公司生产的 EQ-15 (Equitensiometer-15) 型号土壤水势探头监测,并与 Delta-T Logger 数据采集器相联(每30 s测读1次,每30 min进行平均并存储数据),探头埋深分别为0~20 cm、40~60 cm和80~100 cm,最后将3层的土壤水势加权平均,得到0~100 cm土层的平均水势。太阳辐射、大气温度、空气相对湿度、风速等气象因子均采用美国 Weatherhawk 公司生产的 Weatherhawk-232 标准自动气象站测定,30 min记录1次平均值。将液流与土壤水势、太阳辐射等环境因子的数据采集时间设定为同步。

1.3 统计分析

分别采用 SPSS 11.0 和 Excel 进行数据分析和绘图。不同土壤水势条件下,土壤水势与毛竹液流速率之间的关系采用 Pearson 相关分析法,毛竹液流速率与主要环境因子之间的关系采用 Pearson 相关分析法和多元线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同天气条件下的毛竹液流的日进程与日液流量

由图 1A 可知,毛竹液流在晴朗的天气条件下具有显著的昼夜节律性,呈单峰型曲线,毛竹液流的启动时间为 6:00—8:00,而后开始迅速上升,12:00—15:00 到达峰值,之后,液流速率开始迅速下降,到 20:00—22:00 下降至极低值,以后一直维持在较低水平,直至次日 6:00 左右又开始上升,液流速率均值和峰值均值分别为 0.3881 和 1.711 kg·h<sup>-1</sup>。从图 1B 可以看出,毛竹液流在阴雨天气条件下表现为双峰或多峰曲线,变化幅度较晴天小,液流速率均值和峰值均值分别为 0.06541 kg·h<sup>-1</sup> 和 0.2434 kg·h<sup>-1</sup>,均小于晴朗天气。

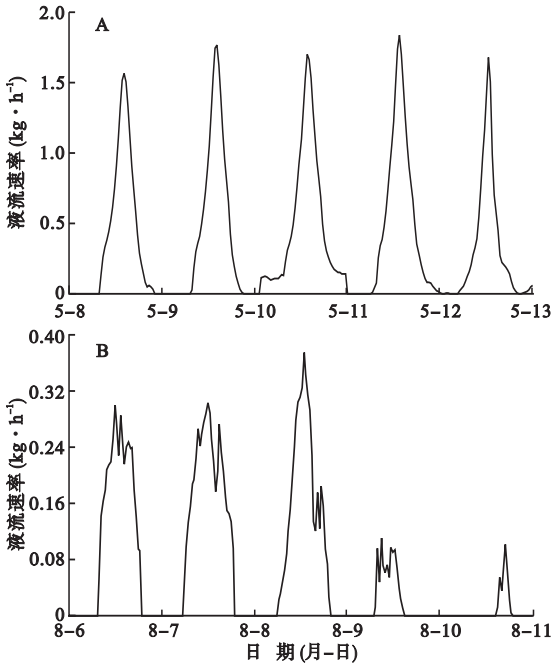


图 1 不同天气条件下毛竹液流速率昼夜变化  
Fig. 1 Changes of sap flow rate for *Phyllostachys pubescens* under sunny or rainy weather  
A:晴朗天气 B:阴雨天气。

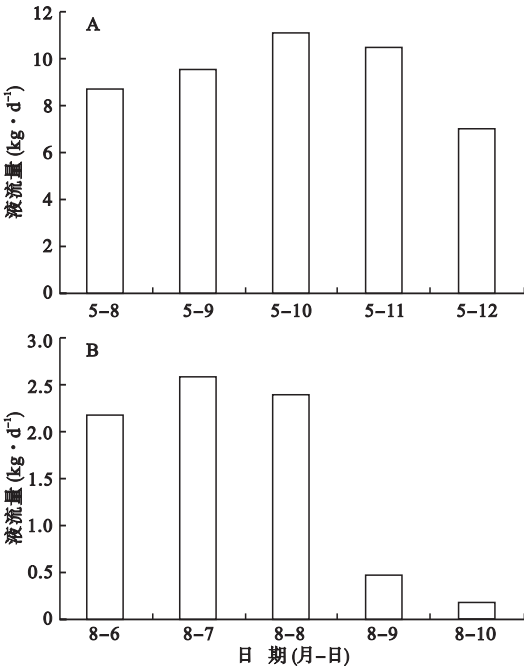


图 2 不同天气条件下毛竹日液流量  
Fig. 2 Daily sap flux of *Phyllostachys pubescens* under sunny or rainy weather  
A:晴朗天气,B:阴雨天气。

由图 2 可以看出,晴朗天气条件下日液流量值在 6.987 ~ 11.10 kg·d<sup>-1</sup>,均值为 9.338 kg·d<sup>-1</sup>。阴雨天气日液流量值在 0.1780 ~ 2.606 kg·d<sup>-1</sup>,均

值为  $1.576\text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。晴天毛竹的日液流量是高于阴雨天气。

2.2 不同胸径的毛竹液流比较

由图 3A 可以看出,毛竹径级为  $13.5 \sim 14.0\text{ cm}$  的液流速率明显大于毛竹径级  $9.5 \sim 10.0\text{ cm}$  的液流速率。不同径级毛竹的液流在夜间差别不是很大,随着液流速率的增加,差距越来越明显,液流速率最大时差值也达到最大的  $0.8870\text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同径级的毛竹受共同环境因子的影响导致其液流具有相同的波动趋势,但液流速率较高植株的液流波动幅度大,说明液流速率越大,越容易受环境因素的影响而波动。

由图 3B 可知,径级分别为  $13.5 \sim 14.0\text{ cm}$  和  $9.5 \sim 10.0\text{ cm}$  毛竹的日累积流量曲线均为倒“S”型,二者的液流速率 6:00 启动后,液流累计量缓慢增长,随后 8:00—18:00 的累计量迅速增大,分别从 8:00 的  $0.4649$  和  $0.2839\text{ kg}$  增大到 18:00 的  $21.54\text{ kg}$  和  $13.90\text{ kg}$ ,18:00 以后增长速度都减缓,曲线变得平缓,到 22:00 液流速率均降低为零,日累计量分别为  $23.31$  和  $14.67\text{ kg}$ ,表明胸径较大者的耗水量也大一些。

2.3 不同土壤水势条件下的毛竹液流变化状况

由图 4 和图 5 可知,在 8 月 20—24 日,0 ~

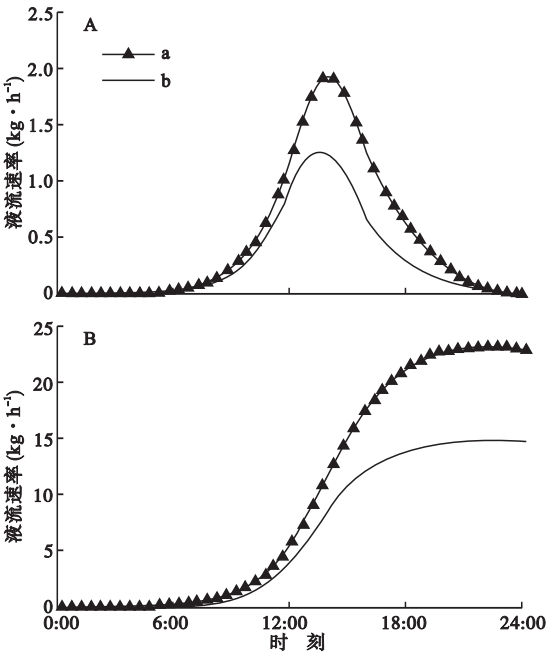


图 3 不同直径毛竹液流日变化 (A) 和日累积量 (B)  
Fig. 3 Diurnal fluctuation (A) and daily sap flow accumulation (B) of sap flow rate of *Phyllostachys pubescens* under different basal diameters  
(a) 径级  $13.5 \sim 14.0\text{ cm}$ ; (b) 径级  $9.5 \sim 10.0\text{ cm}$ 。

100 cm 土层的平均水势在  $-13.41 \sim -10.22\text{ kPa}$  变化,毛竹的平均液流速率和平均日液流量分别为  $0.4462\text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $10.83\text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。需要注意的是,毛竹的日液流量并不随着土壤水势的降低而呈下降趋势。相关性分析表明,液流速率与土壤水势相关性不显著。

由图 6 和图 7 可知,0 ~ 100 cm 土层的平均水势从  $-117\text{ kPa}$  迅速下降到  $-362\text{ kPa}$ ,毛竹的平均液流速率和平均日液流量分别为  $8.94$  和  $0.3715\text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ,均低于土壤水势在  $-13 \sim -10\text{ kPa}$  的平均日液流量。相关性分析表明,此阶段液流速率与土壤水势显著相关,相关系数为  $0.1410$ 。值得一提的是,随着土壤水势的下降,毛竹日流量和液流峰值起初并不下降,而当土壤水势下降至低于  $-200\text{ kPa}$  左右时,毛竹日液流量和液流峰值随着土壤水势的减少呈下降的趋势。

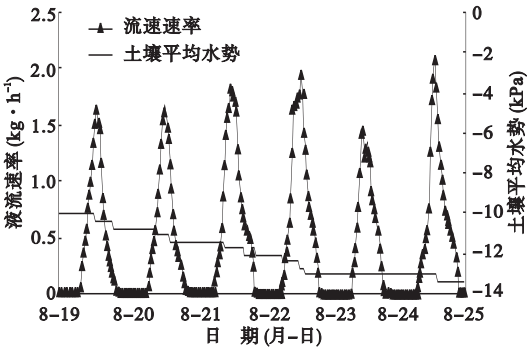


图 4 土壤水分充足时毛竹液流速率与土壤平均水势之间的关系  
Fig. 4 Relationship between the sap flow rate of *Phyllostachys pubescens* and the average soil water potential when soil moisture was sufficient

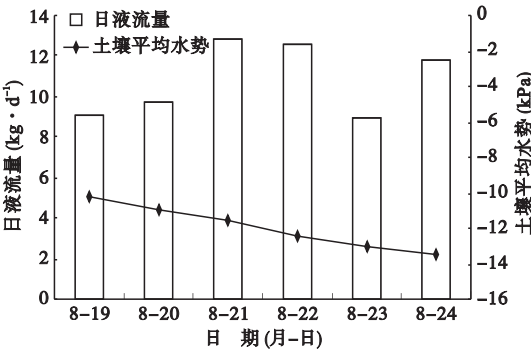


图 5 土壤水分充足时毛竹日液流量与土壤平均水势之间的关系  
Fig. 5 Relationship between the daily sap flux of *Phyllostachys pubescens* and the average soil water potential when soil moisture was sufficient



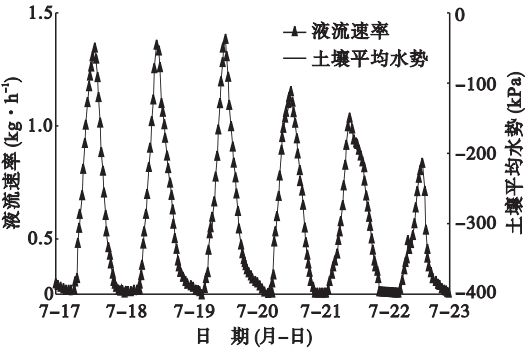


图6 土壤干旱时毛竹液流速率与土壤平均水势之间的关系  
Fig. 6 Relationship between the sap flow rate of *Phyllostachys pubescens* and the average soil water potential under soil drought

2.4 毛竹液流与气象因子之间的关系

为直观表达液流速率和主要环境因子的变化特

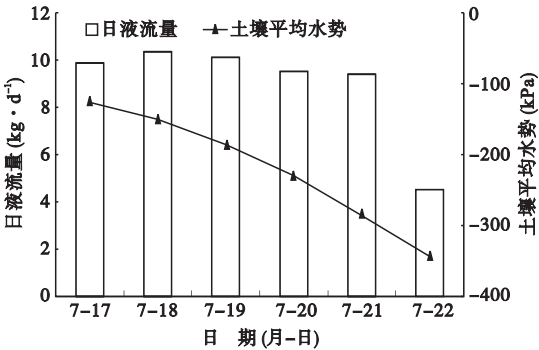


图7 土壤干旱时毛竹日液流量与土壤平均水势之间的关系  
Fig. 7 Relationship between the daily sap flux of *Phyllostachys pubescens* and the average soil water under soil drought

征,绘出2009年5月20—28日的液流速率、蒸气压亏缺、太阳总辐射、空气湿度、空气温度、风速等各个气象环境因子变化曲线图(图8)。

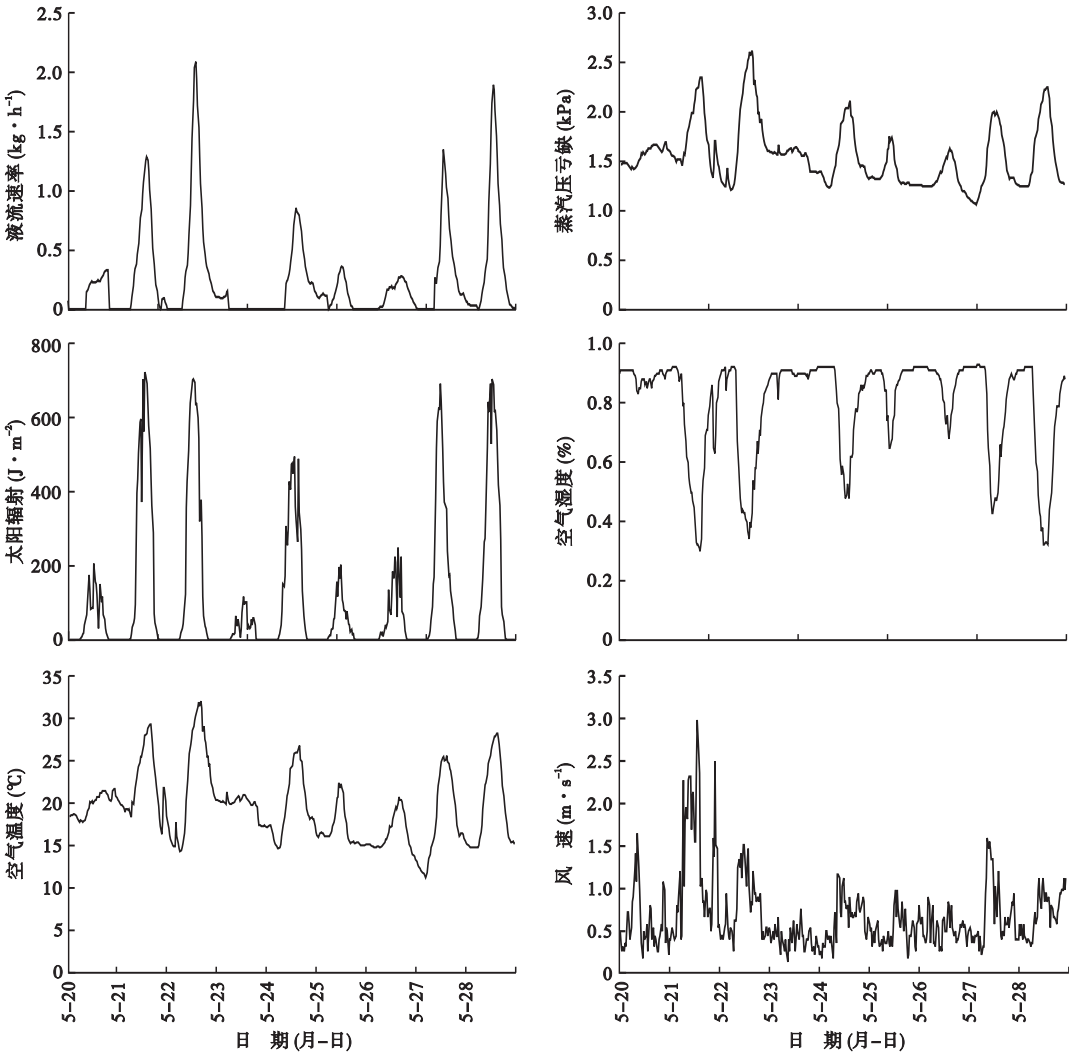


图8 液流速率和主要环境因子变化过程  
Fig. 8 Fluctuations of sap flow rate and some main environmental factors

表 1 液流变化与各环境因子变化的相关性分析  
Tab.1 Analysis of partial correlations between sap flow and each environmental factors

分析变量	液流速率		样本数量
	相关系数	Sig	
湿度	-0.912 **	0.000	432
温度	0.822 **	0.000	432
总辐射	0.813 **	0.000	432
空气水汽压亏缺	0.856 **	0.000	432
风速	0.474 **	0.000	432

$P<0.01$ 。

由图 8 可以看出,毛竹液流变化趋势与环境因子变化趋势相吻合。由表 1 可知,液流与空气相对湿度、空气温度、太阳总辐射、水蒸气压亏缺和风速的相关系数分别为-0.912、0.822、0.813、0.856 和 0.474,相关系数的显著性概率均为 0.000,均达到了极显著水平,说明液流的变化与各环境因子的变化相关性很强,各环境因子都对液流有较大影响。

为揭示环境因子对液流的综合影响,采用逐步剔除法进行多元线性回归分析。将液流作为因变量,空气相对湿度、空气温度、太阳总辐射、水蒸气压亏缺和风速等环境因子作为自变量进行分析,发现空气相对湿度、水蒸气压亏缺、空气温度、太阳总辐射和风速全部参与模型的建立。方差分析结果显示模型的显著性概率为 0.000,说明因变量与自变量间存在着较强的线性相关关系。得回归方程:

$$V_s = -1.156RH - 0.109T + 3.010R - 0.001VPD - 0.190W_s \tag{1}$$

式中, $V_s$  为液流, $RH$ 、 $T$ 、 $R$ 、 $VPD$  和  $W_s$  分别为空气相对湿度、空气温度、太阳总辐射、蒸气压亏缺和风速。对回归系数进行检验,得各个自变量系数的显著性概率均为 0.000,常数项显著性概率为 0.257,  $R^2 = 0.890$ ,可见回归方程能较好地揭示液流变化与各环境因子变化的相关规律。

3 讨 论

晴天,毛竹液流的日变化过程呈现单峰曲线,白天的液流速率高于晚间,具有极显著的昼夜变化节律。一般情况下,白天的树干液流速率要比晚间大,这是由于白天树木蒸腾量大,大量的水分通过根部以被动方式吸入体内。夜间树木边材液流速率急剧降低,数值很小,产生这一现象的原因是为了补充白天蒸腾引起的贮水部位的水分亏缺(Daley & Phillips, 2006)。研究还发现,阴雨天气下毛竹液流呈现双峰或多峰曲线,而且晴天的日均液流速率、变化幅

度和日液流量均高于阴雨天气的。这与夏桂敏等(2006)对柠条树干液流的研究结果类似。主要原因可能是阴雨天气太阳辐射低,空气相对湿度大,树木的蒸腾量很小,导致其液流速率和液流量很低;而在晴朗天气里,空气相对湿度较小,VPD 变大,太阳辐射增加,气温升高,其蒸腾耗水随之增加,液流速率和液流量也就变大了。另外,本研究在晴朗天气条件下毛竹的日液流量均值为  $9.338 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ,远远大于张文燕等(1994)研究指出的毛竹日平均伤流  $0.123 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其原因是由于张文燕等(1994)采用的是砍伐技术去测量伤流量,毛竹砍伐后,从收伤口溢出的伤流仅仅是由于根压的存在,而与叶片等蒸腾作用无关,这降低了毛竹的蒸腾量,从而使得液流量降低。

胸径大小不同树木的液流量有一定的差异,且不同树种之间的差异程度也不相同。对不同胸径大小的毛竹对比研究表明,大胸径毛竹的液流速率和日液流量大于小胸径。张宁南等(2003)对不同直径尾叶桉茎流密度比较研究指出,相同直径的树木茎流密度相似,树木大时茎流密度大,树木小时茎流密度小,这主要与树木根系分布有关。树木胸径大时,根系更发达且分布的范围大,可从土壤深层吸收水分,因此茎流密度大。毛竹的日累计液流曲线呈现倒 S 型,主要原因可能是由于在 0:00—8:00 和 20:00—23:00,蒸腾很小,所以水分消耗量也很少,液流累积量曲线上升很慢,在 10:00—20:00 这段时间蒸腾作用加强,植物水分消耗速度增加,曲线上升的速度较快(许浩等,2007)。

在土壤水分过多或者亏缺时,树木叶片气孔导度和液流速率都下降(解婷婷等,2008)。Bovard 等(2005)研究指出,当土壤水分含量充足时,随着饱和和蒸气压亏缺值的增加,气孔开闭程度没有多大变化。但是,当土壤水分含量较低时,气孔对于饱和和水汽压亏缺的敏感性会增强,发生不同程度的关闭。本研究表明,当 0 ~ 100 cm 土层土壤水势在 -13 ~ -10 kPa 时,毛竹日液流量和液流速率与土壤水势相关性不显著,但当土壤水势低于 -200 kPa 左右时,液流速率和土壤水势的高低呈正相关。可能是由于,当 0 ~ 100 cm 土层土壤水势在 -13 ~ -10 kPa 时,土壤水分含量充足,土壤水势为非限制性因子,此时 2 种之间相关性不显著。但当土壤水势低于 -200 kPa 左右时,土壤水分亏缺,毛竹收到水分胁迫,土壤水势成为影响液流速率的重要因子之一。

Oren 和 Pataki (2001) 研究认为, 太阳辐射和水气压亏缺是树木冠层蒸腾的主要驱动力, 对树干液流的影响是正效应。马玲等 (2005) 研究表明, 马占相思树干液流速率与光合有效辐射、总辐射、空气温度、空气相对湿度、水蒸气气压亏缺等环境因子均显著相关。严昌荣等 (1999) 研究认为, 核桃楸树干液流速率的日进程和空气相对湿度、温度的日进程具有很好的生态学同步性。本研究结果为, 毛竹液流速率与空气相对湿度、空气温度、太阳总辐射、水蒸气气压亏缺和风速均呈极显著相关, 除了与空气相对湿度为负相关外, 其余均为正相关。

环境因子对树干液流的影响是否在不同地区不同树种间有较大差异, 有待进一步深入研究。另外, 本研究只是考虑毛竹液流变化相对于微环境因子变化是同步进行的, 而二者之间是否具有滞后效应未涉及, 需要进一步研究。

## 参考文献

- 解婷婷, 张希明, 梁少民, 等. 2008. 不同灌溉量对塔克拉玛干沙漠腹地梭梭水分生理特性的影响. 应用生态学报, **19**(4): 711-716.
- 李吉跃, 翟洪波, 刘晓燕. 2002. 树木水力结构特征的昼夜变化规律. 北京林业大学学报, **24**(4): 39-44.
- 李雁群. 1997. 毛竹活立竹竹秆创口的伤流. 林业科学研究, **10**(1): 108-110.
- 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 2005. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系. 生态学报, **25**(9): 2145-2151.
- 汪奎宏, 黄伯惠, 胡正坚. 1995. 毛竹周年采伐的伤流规律研究. 竹子研究汇刊, **14**(1): 33-41.
- 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 2006. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化. 生态学报, **26**(4): 1186-1193.
- 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 2007. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝桠柳茎干液流及耗水量. 应用生态学报, **18**(4): 735-741.
- 严昌荣, Downey A, 韩兴国, 等. 1999. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究. 生态学报, **19**(6): 793-797.

- 张宁南, 徐太平, Morris J, et al. 2003. 雷州半岛尾叶桉人工林液流茎流特征的研究. 林业科学研究, **16**(6): 661-667.
- 张文燕, 马乃训, 封剑文, 等. 1994. 毛竹代桩伤流及其控制技术. 林业科学研究, **7**(4): 414-419.
- Bovard BD, Curtis PS, Vogel CS, et al. 2005. Environmental controls on sap flow in a northern hardwood forest. *Tree Physiology*, **25**: 31-38.
- Burgess SSO, Dawson TE. 2009. Using branch and basal trunk sap flow measurements to estimate whole-plant water capacitance: A caution. *Plant and Soil*, **305**: 5-13.
- Cermak J, Kucera J, Bauerle WL, et al. 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, **27**: 181-198.
- Cochard H, Rodolphe M, Patrick G, et al. 2000. Temperature effects on hydraulic conductance and water relations of *Quercus robur* L. *Journal of Experimental Botany*, **51**: 1255-1259.
- Daley M, Phillips NG. 2006. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest. *Tree Physiology*, **26**: 411-419.
- Delzon S, Sartore M, Granier A, et al. 2004. Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine. *Tree Physiology*, **24**: 1285-1293.
- Kumagai T, Aoki S, Nagasawa H, et al. 2005. Effects of tree-to-tree and radial variations on sap flow estimates of transpiration in Japanese cedar. *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**: 110-116.
- Oren R, Pataki DE. 2001. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. *Oecologia*, **127**: 549-559.
- Stan DW, Anthony WK. 2000. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees. *Tree Physiology*, **20**: 511-518.
- Wullschlegel S, Meinzer FC, Vertessy RA. 1998. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, **18**: 499-512.

---

**作者简介** 候小金, 男, 1984 年生, 硕士研究生。主要从事水文生态方面的研究。E-mail: houjun188@126.com

**责任编辑** 王 伟

---