

南方红壤区杜仲 (*Eucommia ulmoides*) 树干液流动态

曹 云, 黄志刚, 欧阳志云*, 郑 华, 王效科, 苗 鸿

(城市与区域生态国家重点实验室 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用根据热平衡原理设计的热扩散探针 (Thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP), 于 2004 年 7 月到 10 月对南方红壤区的杜仲人工林的树干液流进行连续监测, 结合所测定的相关因子, 分析杜仲液流的变化规律及其与各因子的关系。结果表明, 在不同月份, 杜仲液流速率的日变化规律基本一致, 呈单峰曲线, 但是树干液流在启动时间、峰值出现时间上存在差异; 从 7 月到 10 月份, 杜仲树干液流速率逐渐增大, 10 月份液流速率达到 $1.818 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$; 杜仲液流速率与太阳辐射、空气相对湿度、温度、风速等气象因子相关性显著, 但是太阳辐射和空气相对湿度是影响杜仲液流的重要因子, 其中 7 月到 9 月份, 太阳辐射是主要影响因子, 而 10 月份, 空气相对湿度占主导地位; 树干液流与胸径、冠层厚度以及胸径平方与树高之积呈现出显著的相关性。
关键词: 树干液流; 热扩散法; 杜仲; 红壤区

文章编号: 1000-0933(2006)09-2887-09 中图分类号: Q142, Q948.12, S718.5 文献标识码: A

Dynamics of stem sap flow velocity of *Eucommia ulmoides* in red soil region, Southern China

CAO Yun, HUANG Zhi-Gang, OU YANG Zhi-Yun*, ZHENG Hua, WANG Xiao-Ke, MIAO Hong (State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2887 ~ 2895.

Abstract: *Eucommia ulmoides* is a tree species commonly used for reforestation in Southern China. It is known to play an important role in water conservation, but the effects of tree structural and environmental factors on the transpiration and water balance of this species have not been fully studied. The aim of this study was to evaluate the diurnal and monthly variability of stem sap flow velocity in *E. ulmoides*, as well as to understand how structural features and environmental factors were potentially controlling the whole-plant water-use of the species. The study was conducted from July to October in 2004 at the Ecological Benefit Monitoring Station of the Yangtze River Protection Forest in Gili County, Hunan Province (29°30' N, 110°10' E). Stem sap flow velocity was measured using a thermal dissipation probe (TDP, Dynamax, Houston TX, U. S. A). With this probe, data were recorded automatically every 10 minutes. During the same time period, several environmental variables (i. e., mainly meteorological observations) were measured every 5 minutes at a weather station located within the study area. From July to October, stem sap flow velocity of *E. ulmoides* increased monotonically, reaching maximum values (i. e., $1.818 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$) during October. Diurnal variation of stem sap flow velocity was similar among the different months studied, exhibiting a unimodal pattern that resembled the ones observed for air temperature (T) and solar radiation (RAD). However, there are differences in sap flow starting time and peak time among different months. Stem sap flow velocity was significantly related with solar radiation (RAD), relative humidity (RH), air temperature (T), and wind speed (WS). Among these, RAD and RH seemed to be the most

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体资助项目 (40321101); 国家自然科学基金资助项目 (30230090)

收稿日期: 2005-11-25; 修订日期: 2006-09-06

作者简介: 曹云 (1977~), 男, 内蒙古人, 博士生, 主要从事植被生态学及生态系统水文服务功能机制研究. E-mail: Caoyuncy@sohu.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was supported by Innovation Group Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 40321101), National Natural Science Foundation of China (No. 30230090)

Received date: 2005-11-25; **Accepted date:** 2006-09-06

Biography: CAO Yun, Ph. D. candidate, mainly engaged in vegetation ecology and mechanics of ecosystem services. E-mail: Caoyuncy@sohu.com

important factors, as was indicated by their high partial correlation coefficients. *RAD* was the most important factor from July to September, while *RH* was the most important factor in October. Stem sap flow velocity of *E. ulmoides* also showed significant correlations with structural characteristics of the forest such as diameter at breast height (*DBH*), canopy height (H_{canopy}), and their interaction of $(DBH)^2$ and tree height (H) (i.e., $(DBH)^2 H$).

Key words: stem sap flow; thermal dissipation probe; *Eucommia ulmoides*; red soil region

造林与林分经营的关键是林地水分环境容量问题,即保证林分在整个生长发育阶段林地水量收支达到平衡^[1],而林地蒸散是森林水文平衡研究中一项重要过程,是森林水文循环中的主要课题^[2~4]。其中树木的蒸腾量占林地总蒸散量的一半以上^[5],在林地水分平衡中具有重要意义^[1,6,7]。树木整株耗水性的研究,影响造林树种选择与林分结构配置^[8,9]。目前关于树木耗水的测定方法很多,但大多在一定程度上存在缺陷^[9]。利用热量平衡原理设计的热扩散探针(Thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP),可在自然条件下活体测定树木的液流量,能够准确反映出树木日及其季节尺度上的变化,具有操作简单、测量精度高的优点^[9~13]。

杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliv.),属杜仲科落叶乔木,单属单种,喜光,生长迅速,通常 8~10a 开花结实。杜仲是第三纪孑遗珍贵树种,为我国特有,属国家二级保护植物,皮为贵重药材,生态适应性强,种植范围和面积广^[14],是长江防护林建设中主要造林树种之一,具有重要的经济和生态价值。以往对于杜仲林的研究集中在杜仲代谢^[15~17],生产状况^[14,18],光合蒸腾特性^[19~21]以及剥皮对杜仲影响^[22,23]等方面,所以本实验应用热扩散探针,监测杜仲不同时期的液流速率及其主要影响因子,分析杜仲液流的生理特性及其变化特征,揭示植物水分需求与周围环境因子的关系,为今后林地水分消耗的计算和林地经营管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点选在湖南红壤区国家长江防护林生态效益监测站,该站位于湖南省张家界市慈利县(29°30'N, 110°10'E),最低海拔 210m,最高峰 917m。张家界市的慈利县拥有全国第二大的杜仲林生产基地,栽培面积八千多亩,是国内外驰名的“杜仲之乡”。研究区母岩主要为板页岩、石灰岩,土壤为山地红壤和黄壤,整个小流域为 3km²^[24]。研究区处于亚热带湿润季风气候,年平均降雨量为 1347.2mm,7~9 月份雨量占全年的 47.5%,年平均气温 16.7℃,7 月份最热,平均气温 28.5℃;1 月份最冷,平均 4.8℃,无霜期 269d^[25]。

该流域主要林地类型:马尾松(*Pinus massoniana*)林、樟树(*Cinnamomum camphora*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、杜仲人工林、油桐(*Vernicia fordii*)人工林以及一些杂灌林,其中防护林占 65.2%,用材林占 17.3%,经济林占 17.5%^[24]。

1.2 研究对象

杜仲人工林于 1993~1994 年种植,年龄在 11~13a 之间,占研究区林地面积的 10.2%。乔木层为单层结构,无灌木层,存在少量的草本植物群落。样地杜仲胸径和树高基本呈正态分布(图 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 树干液流的测定 利用经 Granier 改进的双热电偶检测热耗散的热扩散液流探针(Thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP)直接测量植物液流量来确定植物的水分消耗(蒸腾)^[13,26,27]。热扩散探针(Dynamax, Houston TX, U.S.A.)由一对探针组成,测定两根探针在边材的温差值,利用 Granier 经验公式计算其液流速率^[11,28]。探针连接数据采集器(DL2e Data Logger, Delta-T Devices Ltd, UK)可连续测定液流速度。树干液流计算公式:

$$F_s = 0.0119 \times K^{1.231} \times 3600$$

式中, F_s (g/(cm²·h)) 为液流速度, $K = (dT_m - dT)/dT$, dT 为两探针之间的瞬时温差, dT_m 为记录的昼夜最大温差。

根据林地调查结果,选取生长良好,树干通直,无被挤压现象的杜仲 8~12 棵,在南向距树干基部 1.2~

1.5m 处刮掉树皮(面积约 10cm ×20cm),然后按照 Dynamax 说明书安装 TDP 探头,为了防止太阳辐射对探头的影响,使用特殊的锡箔隔热层包裹探针和树干。从 2004 年 7 月~10 月,每月测定 7~15d,每 10min 测定 1 次,30min 取 1 次液流平均值。后期通过生长锥取样,测量杜仲边材面积(79.2 ± 12.1) cm²。

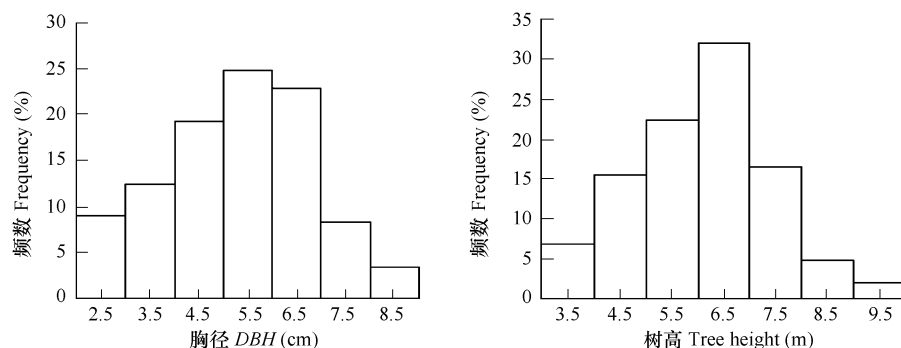


图1 杜仲林胸径和树高的分布

Fig. 1 Distribution of diameter at breast height and tree height in *E. ulmoides* forest

1.3.2 土壤含水量的测定 采用时域土壤水分计 (TRIME-T3 Moisture Meter, MKO, Germany) 测量土壤表层和土壤剖面的含水量。

1.3.3 气象资料收集 在监测站原有气象站基础上,利用自动气象站 (WatchDog Model 900ET Weather Stations, Spectrum, U. S. A), 每 5min 记录 1 次太阳辐射、空气温度、相对湿度、风向、风速等。

1.3.4 数据分析 使用 SPSS 11.0 统计软件对数据进行了分析。

2 结果与分析

2.1 树干液流日变化

从液流速率的日变化可以看出(图 2),在不同月份杜仲液流的昼夜变化趋势一致,基本呈单峰型,与太阳辐射和空气温度变化趋势相一致,白天液流要高于夜晚。以 7 月 22 日为例,在晚间液流相对稳定,变化平缓,维持较低水平;清晨时随太阳辐射逐渐地增强,气温地升高,相对湿度地降低(图 3),液流速率逐渐加快,一般会在正午前后达到最高值;而后随着太阳辐射地减弱,气温地降低,相对湿度地升高,液流速率剧烈降低,日落后液流最终趋于稳定。其中除了 10 月份杜仲液流明显为单峰型,而其他月份在液流趋于平缓前仍存在一个不太明显的小波动。

在白天,树干液流速率相对较高,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^[29]。所以为了更好的分析液流格局差异,将全天液流分为白天(5:00~19:00),晚上(19:00~24:00)和凌晨(0:00~5:00)3 部分。

不同月份各时段液流速率及其单位面积液流量统计结果显示(表 1),从 7~10 月份,白天时段杜仲液流速率和液流量均明显高于晚上和凌晨时段的值,白天液流速率一般是晚上和凌晨时段的 2 倍,白天的液流量也占全天的 70 %以上,特别是在 10 月份,白天时段液流速率平均值是凌晨的 4 倍。

在不同月份,杜仲液流的日变化趋势一致,但是液流在启动时间、峰值大小及出现时间上具有差异性(表 2)。马履一等^[9]认为树木边材液流峰值出现时间的早晚是重要指标,既能反映树种耗水速率大小和耗水调控能力强弱,也能反映该树种树体水容大小和根系吸收与供应水分能力的大小。从 7 月到 10 月份,液流启动时间逐渐延迟,液流速率的峰值也相应的推迟出现,在 7 月份,杜仲液流峰值上午就出现,而 10 月份到下午才出现。液流趋于稳定的时间从 7~9 月份逐渐提前,但是在 10 月份反而在 20:00 停止,这可能与适宜的温度和相对湿度有关。

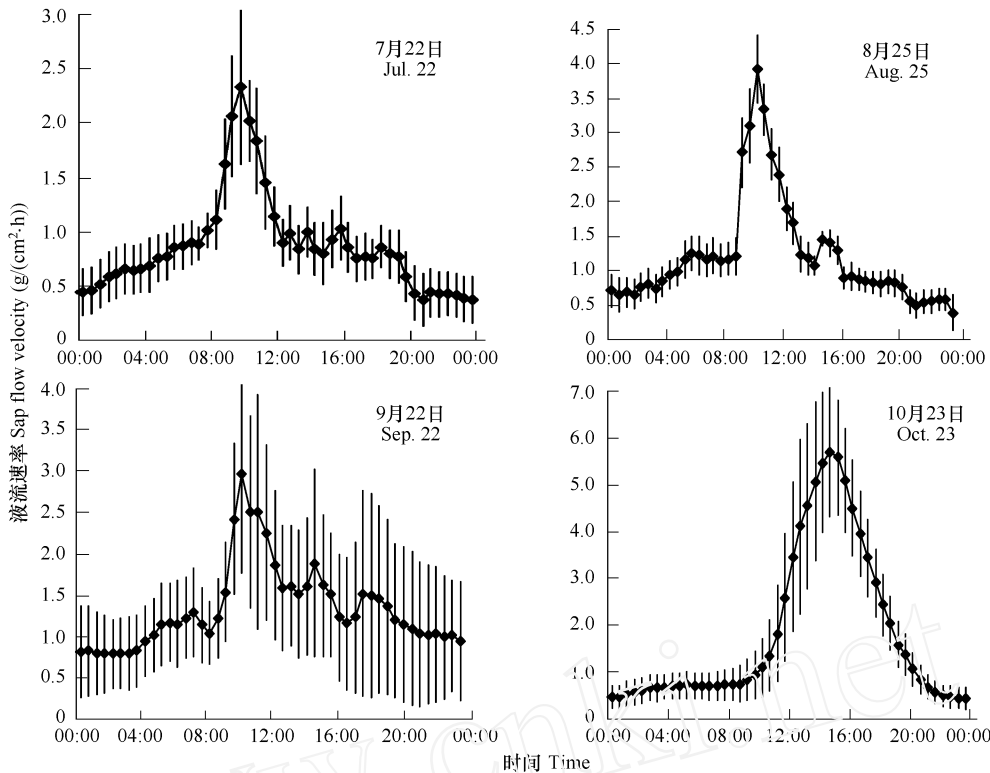


图2 杜仲液流速率日变化进程(±S.E)

Fig. 2 Diurnal variation of sap flow velocity of *E. ulmoides*

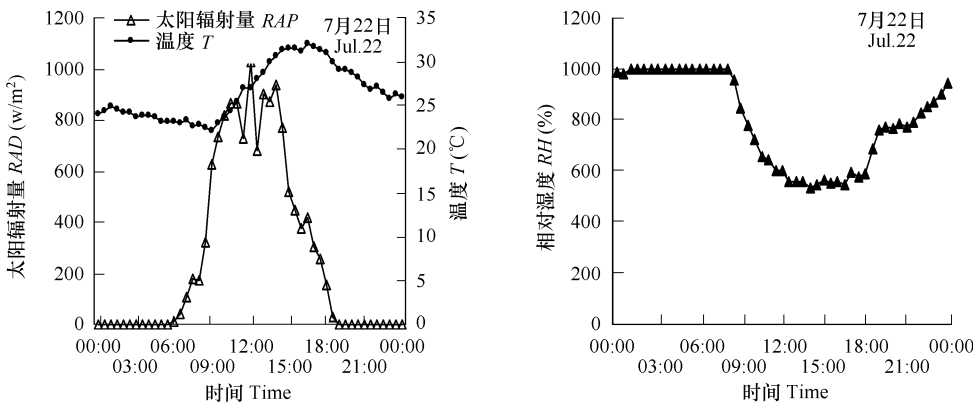


图3 7月22日相关气象因子的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of weather factors on 22th July

表1 不同时段液流速率及其液流量的比较

Table 1 Comparison of sap flow velocity and sap flow flux in different period of time

月份 Month	凌晨 Wee hours (0:00 ~ 5:00)			白天 Daytime (5:00 ~ 19:00)			晚上 Night (19:00 ~ 24:00)		
	平均值 Mean	液流量 Sap flow	占全天液 流量百分比	平均值 Mean	液流量 Sap flow	占全天液 流量百分比	平均值 Mean	液流量 Sap flow	占全天液 流量百分比
	(g/(cm ² ·h))	flux (g/cm ²)	Percentage (%)	(g/(cm ² ·h))	flux (g/cm ²)	Percentage (%)	(g/(cm ² ·h))	flux (g/cm ²)	Percentage (%)
7 Jul.	0.60	3.01	14.5	1.10	15.47	74.5	0.46	2.29	11.0
8 Aug.	0.77	3.87	13.1	1.56	22.67	76.7	0.61	3.04	10.3
9 Sep.	0.84	4.18	13.1	1.60	22.41	70.1	1.08	5.40	16.9
10 Oct.	0.62	3.02	7.0	2.56	36.34	83.8	0.80	3.99	9.2

2.2 树干液流月动态

从杜仲液流速率及其土壤含水量和降雨量的季节变化不难看出(图 4,图 5),2004 年 7~10 月,降雨量不断下降,7 月为 410mm 的降雨量,10 月份仅为 76mm,土壤含水量也从 22.0 %下降到 11.1 %,但是杜仲液流速率反而逐渐提高。结合相关的气象因子变化(表 3)可以看出,在降雨量多的 7 月和 8 月份,尽管太阳辐射和温度较高,土壤含水量高,但是空气相对湿度也达到了最大(85.4 %),风速又小,极不利于植物水分的提升。而且降水会造成气孔关闭,无蒸腾作用,导致液流速率的明显降低^[30]。

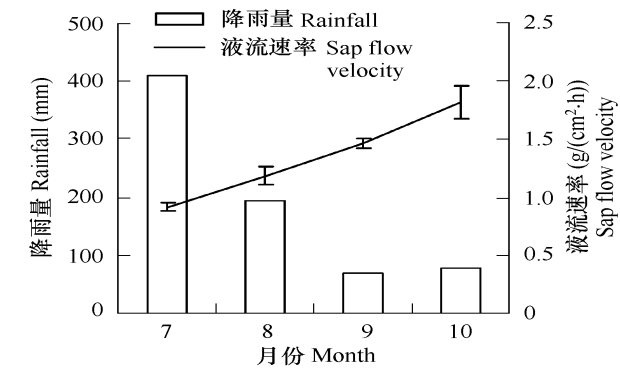


图 4 杜仲液流速率及其同期降雨量的月变化
Fig. 4 Monthly changes of sap flow velocity and rainfall

表 2 杜仲树干液流速率的波动规律
Table 2 Dynamics of sap flow velocity of *E. ulmoides* in different months

月份 Month	液流平均启动 时间 Sap flow starting time	峰值出现时间 Sap flow peak time	液流峰值 Sap flow peak height	液流稳定时间 Sap flow steady time
7	7:00	9:30	2.45	20:00
8	8:00	10:30	3.99	17:00
9	9:00	11:00	4.11	16:30
10	10:30	14:30	5.69	20:00

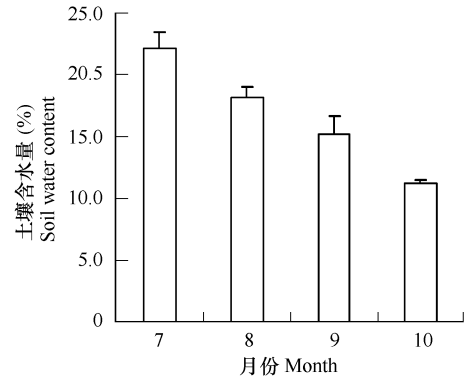


图 5 杜仲林土壤含水量的月变化(±S.E)
Fig. 5 Monthly changes of soil water content of *E. ulmoides* forest

对白桦树干液流的研究,孙慧珍等^[7]也认为在土壤水分供应充分,天气晴朗,空气温度不是主要限制因子,空气相对湿度是树木蒸腾的驱动力(物理过程)。曹文强等^[28]研究结果也表明,降雨增加了空气湿度,叶片内外的蒸汽压梯度大大降低,降雨还促使叶片气孔的关闭,因而对液流上升具有巨大的制约作用。所以降雨量和土壤含水量的增加,并不能一定会促进液流的上升。

不同月份杜仲液流速率的统计结果(表 4)也显示,从 7 月到 10 月份,杜仲平均液流速率逐渐增加,10 月份液流速率达到最大 1.818 g/(cm²·h),是 7 月份的 2 倍,但是 10 月份液流标准误差和变异系数也最大,这可能是由于 10 月份平均相对湿度较低,白天液流会在适宜的温度和相对湿度下明显提高,导致白天平均液流高于其他月份(表 1),而 10 月份夜晚温度要低于前几个月,夜间液流达到最低,所以 10 月份的杜仲液流在白天和夜晚间差异增加,从而该月液流值的变异性也增加。

表 3 2004 年 7~10 月相关气象因子统计
Table 3 Statistics of weather factors from July to October in 2004

	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.
RAD	196.0 ±3.07	138.8 ±2.26	129.5 ±2.53	77.7 ±1.77
RH	85.4 ±2.26	81.6 ±1.35	75.1 ±0.23	64.8 ±0.43
T	25.3 ±2.36	24.1 ±1.39	22.4 ±0.05	17.6 ±0.46
WS	1.4 ±2.38	2.8 ±1.43	2.3 ±0.04	8.2 ±0.43
VPD	1591.8 ±11.07	1581.2 ±8.24	1526.6 ±1.17	1302.7 ±6.09

表中数据为平均值 ±标准误差 Data presented are means ±S.E

表 4 不同月份杜仲液流描述统计分析

Table 4 Stem sap flow statistics of <i>E. ulmoides</i> in different months							
月份 Month	样本数 N	平均值 Mean	标准差 Std. Deviation	标准误 Std. Error	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV
7	176	0.911	0.191	0.037	0.320	2.610	0.21
8	158	1.183	0.266	0.078	0.360	4.150	0.22
9	259	1.468	0.274	0.042	0.400	4.081	0.19
10	136	1.818	0.46	0.148	0.284	5.924	0.25

2.3 树干液流与影响因子的关系

2.3.1 树干液流与形态特征的关系 杜仲平均液流速率与各测树因子的相关分析表明(表 5),杜仲液流与胸径,冠层厚度和胸径平方与树高之积具有显著的相关性,与树高和冠幅的相关性没有达到显著性水平。对杜仲液流与各显著性因子进行回归模拟(表 6)。

2.3.2 树干液流与环境因子的关系 在不同月份,将树干液流速率与有关的环境因子如太阳辐射量、空气相对湿度、温度等进行相关分析(表 7),结果表明杜仲液流速率与各气象因子均具有很好的相关性。在 9 月份,尽管杜仲液流仅与太阳辐射量和空气温度的相关性达到显著水平,但是液流与其他因子的相关系数也较大,基本接近显著水平。在不同气象因子中,太阳辐射量在各月份中均与杜仲液流具有显著的正相关性,相对湿度与液流的相关系数也较大,呈负相关性。但是通过偏相关分析,各环境因子对杜仲液流的影响程度不同。在 7,8,9 月份,太阳辐射量是影响杜仲液流速率变化的主导因子,而在 10 月份,空气相对湿度与液流的偏相关系数最大,是杜仲液流速率变化的重要控制因子。

3 讨论与结论

利用热扩散原理研究树木液流的变化规律及其影响因子,进而可以推算林地蒸腾耗水量^[40],并且利用 TDP 测定单株树木水分变化具有许多的优点^[11, 12]。

表 5 杜仲树干液流与各测树因子的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between stem sap flow and other stand description factors

液流速率 Sap flow velocity	胸径 DBH	树高 H	冠幅 Canopy	冠层厚度 H_{canopy}	胸径平方与树高之积 $(DBH)^2 H$
相关系数 Pearson correlation	0.64 *	0.48	0.18	0.67 *	0.64 *
显著性 Sig. (2-tailed)	0.02	0.12	0.62	0.02	0.02
样本数 N	12	12	12	12	12

*表示在 0.05 水平上显著相关 Correlation is significant at $p < 0.05$ (2-tailed)

表 6 杜仲液流与各因子的回归模型

Table 6 Regression models of sap flow velocity of *E. ulmoides*

	回归方程 Regression equation	显著性检验 Test of significance	样本数 N
F_s 与 DBH	$F_s = 0.566 DBH - 1.823$	$F = 11.353$ Sig. = 0.007	12
F_s 与 H_{canopy}	$F_s = 1.167 H_{canopy} - 3.527$	$F = 17.612$ Sig. = 0.002	12
F_s 与 $(DBH)^2 H$	$F_s = 35.07 (DBH)^2 H + 0.767$	$F = 8.755$ Sig. = 0.014	12

表 7 杜仲液流速率与气象因子的相关分析

Table 7 Correlation analysis between sap flow velocity and other weather factors

月份 Month	相关分析 Correlation	太阳辐射 RAD	相对湿度 RH	空气温度 T	风速 WS	蒸汽压差 VPD
7	相关系数 Pearson Correlation	0.567 **	- 0.287 **	0.250 **	0.155 *	- 0.272 **
	显著性 Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.001	0.039	0.000
	样本数 N	176	176	161	176	176
8	相关系数 Pearson Correlation	0.652 **	- 0.402 **	0.353 **	0.243 *	- 0.381 **
	显著性 Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000
	样本数 N	158	158	158	158	158
9	相关系数 Pearson Correlation	0.245 **	- 0.121	- 0.124 *	0.118	0.119
	显著性 Sig. (2-tailed)	0.000	0.053	0.047	0.058	0.057
	样本数 N	259	259	259	259	259
10	相关系数 Pearson Correlation	0.682 **	- 0.984 **	0.929 **	0.562 **	- 0.755 **
	显著性 Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	样本数 N	136	136	136	136	136

** 在 0.01 水平上显著相关 Correlation is significant at $p < 0.01$ (2-tailed)

3.1 液流影响因子分析

树干液流的日变化及其季节变化规律受到环境各种因子的影响。尽管在不同月份,杜仲液流的日变化趋势一致,但是关于液流变化的一些重要指标,如液流启动时间、液流峰值出现时间以及液流趋于稳定的时间上具有差异。从 7~10 月份,随着太阳辐射量逐渐减小,空气温度相应降低,液流启动时间从 7:00 开始延迟了 3h。但是随着月平均相对湿度的降低,杜仲平均液流在 10 月份达到最大。曹文强等^[28]对辽东栎树干流的研究发现,太阳辐射以及由辐射影响的温度和湿度,是影响液流清晨启动时间的主要因素。对杜仲液流与各环

境因子的相关分析结果也说明,太阳辐射、相对湿度和温度三者共同影响着液流变化。但是在不同时期,影响杜仲液流的主导因子具有差异,从 7~9 月份,太阳辐射是主要影响因子;10 月份,液流主要是由相对湿度决定的。

在其他地点,一些研究者对不同种类树木液流的研究也发现,影响液流的各种环境因子中,太阳辐射、相对湿度和空气温度是影响液流变化的主导因子^[7, 28, 31~33]。但是随着时空的变化,影响液流的主导因子也会发生变化^[13]。孙慧珍等^[7]研究白桦液流变化时发现,6~9 月份是由相对湿度与辐射决定,其中相对湿度占主导地位;在 10 月中旬树干液流主要是由空气温度决定,而在空气温度适宜时,树干液流速率主要由相对湿度决定。Granier 等^[27, 34],Oren 等^[35]和张宁南等^[32]认为液流主要是由蒸汽压差(VPD)决定的。严昌荣等^[30]和周国逸等^[5]研究认为空气温度和相对湿度是影响液流的两个重要的环境因子,而 Ham and Heilman^[36]和熊伟等^[33]研究表明太阳辐射与液流变化同步,是主要影响因子。各学者对影响液流的主导因子认识不同,但是在太阳辐射、相对湿度和温度 3 个因子间,并不是独立存在和作用的,其间还存在相互制约和相互协调,太阳辐射影响温度和相对湿度,而蒸汽压差(VPD)是温度和相对湿度的函数^[7, 28]。所以需要进一步开展在可控试验条件下,监测树干液流的变化,研究各因子对树干液流影响机制。

液流的变化不仅受到周围环境因子的影响,而且还受到树木自身生物学结构的制约,它决定液流的潜在能力^[32]。本研究表明杜仲液流与胸径,冠层厚度和胸径平方与树高之积呈显著的正相关。在其他不同树种研究中,也具有相同的结论。常学向等^[37, 38]对二白杨和沙枣树干液流的研究中,发现胸径和胸径平方与树高之积与液流显著相关;张宁南等^[32]也发现具有相同胸径的尾叶桉树液流相似,树木大时液流速率大,树木小时液流速率小。胸径对杜仲液流变化的影响,可能是因为杜仲根系量明显受到胸径大小的影响^[14, 18],胸径大的杜仲根系也较多(表 8),所以随着树木胸径地增加,根系更发达且分布的范围广,进而可从土壤深层吸收更多水分,液流速率也相应地增加^[32]。

3.2 根压的存在

通常,杜仲白天液流速度高于夜晚,在白天,随着气孔张开,植物蒸腾耗水产生水分上升的拉力,相应的植物液流也发生变化,逐渐上升,中午前后达到全天最大值,但是晚上和凌晨杜仲液流依然存在,速率低,相对稳定,变化平缓。严昌荣等^[30]对核桃楸树干液流研究中,也发现树干液流速度在晚上时很低,但总是存在而且稳定,气孔关闭,蒸腾作用停止,则树干

内水分上升拉力消失,而晚上出现液流,只能说明根压的存在。在其他的一些研究中,不同种类的树木,也存在着由于根压而引起的晚上液流出现^[28, 33, 39],所以根压可能是杜仲晚上液流的存在的原因。

根压是由于根系的生理活动使液流从根部上升的压力,尽管根压对水分的提升能力有限,但是根压对补充植物体内水分具有重要的意义。在白天树干液流的活动情况与冠层光合作用是紧密相关,而在晚上气孔关闭以后,由于根压的作用,水分以主动方式吸收进入体内,可以在一定程度上补充白天植物蒸腾丢失的大量水分,恢复植物体内的水分,以保证第 2 天冠层正常耗水所需^[33],因而晚上液流存在对植物体水分平衡起到不可忽视的作用。

References :

[1] Wang H T, Zhang G C, Liu X. Principles of silvicultural tree species selection for loess hilly areas. World Forestry Research, 2001, 14(5) : 74~78.

[2] Black T A, Hartog G, Neurnam H H, et al. Annual cycles of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. Global Change Biology, 1996, 2: 219~229.

[3] Calderl I R, Rosier P T W, Prasanna K T, et al. Eucalyptus water use greater than rainfall input-a possible explanation from southern India. Hydrology and Earth System Sciences, 1997, 1(2) : 249~258.

表 8 不同胸径杜仲根量变化^[14]

Table 8 Change of root biomass among the different DBH of *E. ulmoides*

地区 Site	胸径 DBH(cm)	树高 Height (m)	根量 Root biomass (kg)
遵义 Zunyi	18.8	14.2	74.2
	12.8	13.6	17.0
	7.0	10.3	3.5
慈利 Gli	17.5	15.2	22.3
	10.6	13.6	6.5
	4.8	9.5	1.3

- [4] Culf A D, Allen S J, Gash J H C, *et al.* Energy and water budgets of an area of patterned woodland in the Sahel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 66: 65 ~ 80.
- [5] Zhou G Y, Yi G C, Jim M, *et al.* Measured sap flow and estimated evapotranspiration of tropical *Eucalyptus urophylla* Plantations in South China. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(2): 202 ~ 210.
- [6] Zhou X F. Long-term research on China 's forest ecosystems. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1994.
- [7] Sun H Z, Zhou X F, Zhao H X. A research on stem sap flow dynamics of *Betula platyphlla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1387 ~ 1391.
- [8] Wullschlegler S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, 1998, 18: 499 ~ 512.
- [9] Ma L Y, Wang H T, Lin P. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area. *Journal of Beijing Forestry*, 2003, 25(2): 1 ~ 7.
- [10] Wang H T, Ma L Y. Measurement of whole tree 's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6): 661 ~ 667.
- [11] Lambs L, Muller E. Sap flow and water transfer in the Garonne River riparian woodland, France: first results on poplar and willow. *Annual of Forest Science*, 2002, 59: 301 ~ 315.
- [12] Grime V L, Morison J I L, Simmonds L P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1995, 74: 1 ~ 25.
- [13] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stands by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3: 309 ~ 320.
- [14] Zhou Z X, Xie S X. Studies on the biomass and productivity of *Eucommia ulmoides* plantation. *Forest Research*, 1994, 7(6): 646 ~ 651.
- [15] Wang Y Q, Zhang K J. Advances in research on secondary metabolites of *Eucommia ulmoides*. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2004, 35(7): 836 ~ 839.
- [16] Zhang K J, Wang Y Q, Ma X H, *et al.* An ecological study of secondary metabolites of the leaves of *Eucommia ylmoides*. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(6): 28 ~ 34.
- [17] Qi Z M, Zhong Z C, Deng J. The effects of simulated acid rain on nitrogen metabolism of *Eucommia ulmoides* Leaves. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 544 ~ 548.
- [18] Pan P, Li R W, Qin Z G, *et al.* A study on biomass and productivity of *Eycommia ulmoides* plantation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, 9(1): 71 ~ 77.
- [19] Li S R, Tan F. Studies on the adaptation of *Eucommia ulmoides* to light intensity. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 1995, 20(3): 293 ~ 296.
- [20] Guo L W, Shen Y G, Wu H, *et al.* Study on the Photosynthetic Characteristics of *Eucommia ulmoides* Leaves. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(4): 283 ~ 286.
- [21] Tan F, Liang L, Zhou Y B. Analysis of the factors affecting the transpiration rate of the *Eucommia ulmoides* Leaves. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 1996, 21(2): 162 ~ 167.
- [22] Cui K M, Xin Z L. Effect of regeneration after girdling on tree growth in *Eucommia ulmoides*. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(11): 1115 ~ 1121.
- [23] Hou H W, Kalima-N K M, Wang Y Q, *et al.* Changes of soluble protein, peroxidase activity and distribution during regeneration after girdling in *Eucommia ulmoides*. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(2): 216 ~ 223.
- [24] Li X Q, Tian Y X, Yuan Z K, *et al.* Effects of different vegetative types on soil and water conservation at erosion areas. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(2): 153 ~ 157.
- [25] Zhang W T, Shao R X, Zhang W, *et al.* The influence of climatic and geographical factors on the growth of *Eucommia ulmoides* in Gili County. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9(4): 41 ~ 45.
- [26] Granier A. A new method of sap flow measurements in tree stems. *Annales des Sciences Forestieres*, 1985, 42(2): 193 ~ 200.
- [27] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78: 19 ~ 29.
- [28] Cao W Q, Han H R, Ma Q Y, *et al.* Sap Flow Flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leaved forest of Taiyue Mountain in Shanxi Province. *Scinetia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2): 174 ~ 177.
- [29] Sun H Z, Zhou X F, Kang S Z. Effect of leaf spot on the stem sap flow of *Betula platyphylla*. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2004, 24(5): 837 ~ 842.
- [30] Yan C R, Alec D, Han X G, *et al.* A study on sap flow of *Juglans mandshurica* of growth season in deciduous broad-leaved forest Beijing Mountain area. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 193 ~ 197.
- [31] Wang H T, Ma L Y, Sun P S. Sap flow fluctuations of *Pins tabulaformis* and *Platyclusus orientalisin* late autumn. *Scinetia Silvae Sinicae*, 2002, 38(5): 31 ~ 37.

- [32] Zhang N N, Xu D P, Jim M, *et al.* Characteristics of sap flow in *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula. *Forest Research*, 2003, 16 (6): 661 ~ 667.
- [33] Xiong W, Wang Y H, Xu D Y. Regulations of water use for transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in Southern Ningxia hilly area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 29 (2): 1 ~ 7.
- [34] Granier A, Claustre J P. Water relations of a Norway spruce (*Picea abies*) tree growing in natural condition: variation within the tree. *Acta Oecologica*, 1989, 10 (3): 295 ~ 310.
- [35] Oren R, Sperry J S, Ewers B E, *et al.* Sensitivity of mean canopy stomatal conductance to vapor pressure deficit in a flooded *Taxodium distichum* L. forest: hydraulic and non-hydraulic effects. *Oecologia*, 2001, 126: 21 ~ 29.
- [36] Ham J M, Heilman J L. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum Japonicum*. *HortScience*, 1990, 25: 465 ~ 467.
- [37] Chang X X, Zhao W Z. Sap flow of *Elaeagnus angustifolia* and its relation with growth regime in middle reaches of Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2004, 24 (4): 473 ~ 478.
- [38] Chang X X, Zhao W Z. Sap flow of Gansu poplar in farm land shelter forest during the growing season in desert oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (7): 1436 ~ 1441.
- [39] Li H T, Chen L Z. A study on the volume and velocity of stem-sapflow of *Betula dahurica* and *Acer moni* forests by the heat-pulse technique. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20 (1): 1 ~ 6.
- [40] Granier A, Anfodillo T, Sabatti M, *et al.* Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 1994, 14: 1383 ~ 1396.

参考文献:

- [1] 王华田, 张光灿, 刘霞. 论黄土丘陵区造林树种选择的原则. *世界林业研究*, 2001, 14 (5): 74 ~ 78.
- [5] 周国逸, 尹光彩, Jim Morris, 等. 华南桉树人工林树液流量及蒸散作用. *植物学报*, 2004, 46 (2): 202 ~ 210.
- [6] 周晓峰. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994.
- [7] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究. *生态学报*, 2002, 22 (9): 1387 ~ 1391.
- [9] 马履一, 王华田, 林平. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究. *北京林业大学学报*, 2003, 25 (2): 1 ~ 7.
- [10] 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. *植物生态学报*, 2002, 26 (6): 661 ~ 667.
- [14] 周政贤, 谢双喜. 杜仲人工林生物量及生产力研究. *林业科学研究*, 1994, 7 (6): 646 ~ 651.
- [15] 王亚琴, 张康健. 杜仲次生代谢物的研究进展. *中草药*, 2004, 35 (7): 836 ~ 839.
- [16] 张康健, 王亚琴, 马希汉, 等. 杜仲叶次生代谢物生态学研究初报. *林业科学*, 1999, 35 (6): 28 ~ 34.
- [17] 齐泽民, 钟章成, 邓君. 模拟酸雨对杜仲叶氮代谢的影响. *植物生态学报*, 2001, 25 (5): 544 ~ 548.
- [18] 潘攀, 李荣伟, 覃志刚, 等. 杜仲人工林生物量和生产力研究. *长江流域资源与环境*, 2000, 9 (1): 71 ~ 77.
- [19] 李淑容, 谈锋. 杜仲对不同光强度的适应性研究. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 20 (3): 293 ~ 296.
- [20] 郭连旺, 沈允钢, 武海, 等. 杜仲光合特性的研究. *植物学报*, 1996, 38 (4): 283 ~ 286.
- [21] 谈锋, 梁莉, 周彦兵. 杜仲叶片蒸腾速率的因子分析. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1996, 21 (2): 162 ~ 167.
- [22] 崔克明, 辛正理. 杜仲剥皮再生对生长的影响. *植物学报*, 2000, 42 (11): 1115 ~ 1121.
- [23] 侯宏伟, Kalima N Koma Mwange, 王雅清, 等. 杜仲剥皮再生过程中可溶性蛋白和过氧化物酶含量及分布的变化. *植物学报*, 2004, 46 (2): 216 ~ 223.
- [24] 李锡泉, 田育新, 袁正科, 等. 湘西山地不同植被类型的水土保持效益研究. *水土保持研究*, 2003, 10 (2): 153 ~ 157.
- [25] 张维涛, 邵如喜, 张伟, 等. 慈利县气候生态因子对杜仲生长的影响. *西北林学院学报*, 1994, 9 (4): 41 ~ 45.
- [28] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栋夏季树干液流量研究. *林业科学*, 2004, 40 (2): 174 ~ 177.
- [29] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠. 叶斑病对白松树树干液流的影响. *西北植物学报*, 2004, 24 (5): 837 ~ 842.
- [30] 严昌荣, Alec Downey, 韩兴国, 等. 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*, 1999, 19 (6): 193 ~ 197.
- [31] 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. *林业科学*, 2002, 38 (5): 31 ~ 37.
- [32] 张宁南, 徐大平, Jim Morris, 等. 雷州半岛尾叶桉人工林树液流特征的研究. *林业科学研究*, 2003, 16 (6): 661 ~ 667.
- [33] 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. *林业科学*, 2003, 29 (2): 1 ~ 7.
- [37] 常学向, 赵文智. 黑河中游沙枣树干液流的动态变化及其与林木个体生长的关系. *中国沙漠*, 2004, 24 (4): 473 ~ 478.
- [38] 常学向, 赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化. *生态学报*, 2004, 24 (7): 1436 ~ 1441.
- [39] 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. *北京林业大学学报*, 1998, 20 (1): 1 ~ 6.