

幼龄桉树茎流特征及其对环境因子的响应

吴喆滢¹, 赵从举^{2*}, 徐文娴², 卓志清², 朱敏捷²

(1. 海南师范大学 生命科学院, 海南 海口 571158; 2. 海南师范大学 地理与旅游学院, 海南 海口 571158)

摘 要:旨在揭示幼龄桉树茎流速率变化特征及其与环境因子关系, 为桉树人工林可持续经营与管理提供依据。于 2014 年 6—9 月利用 Dynagage 包裹式茎流传感器和 DL2e 环境因子测量系统对海南西部儋州林场幼龄桉树树液茎流及主要环境因子进行连续监测。结果表明, 1) 雨季幼龄桉树茎流速率具有“昼高夜低”的节律性, 夜晚茎流速率都很小, 约为日均值的 0.10%~7.27%。2) 晴天、阴天、雨天树液茎流速率差异明显, 晴天的树液茎流速率峰值、日均值分别为 13.861 mL·cm⁻²·h⁻¹ 和 2.349 mL·cm⁻²·h⁻¹, 是阴天的 2.27 倍和 1.50 倍, 雨天的 10.52 倍和 4.90 倍。3) 雨季幼龄桉树茎流速率与太阳辐射、空气湿度、空气温度等气象因子均具极显著的相关关系, 而受土壤水分影响较小; 晴天太阳辐射对茎流速率影响最大, 阴天和雨天空气温度对茎流速率影响最大。液流速率与环境因子逐步回归分析结果表明, 3 种天气条件下的影响液流速率变化的主导因子不同。

关键词:包裹式茎流传感器; 尾叶桉; 树干液流速率; 环境因子

中图分类号:S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)05-0046-07

Characteristics of the Sap Flow Rate of the Young *Eucalyptus* and Its Response to Environmental Factors

WU Zhe-ying¹, ZHAO Cong-ju^{2*}, XU Wen-xian², ZHUO Zhi-qing², ZHU Min-jie²

(1. School of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou, Hainan 571158, China;

2. School of Geography and Tourism, Hainan Normal University, Haikou, Hainan 571158, China)

Abstract: To explore the change characteristics of the sap flow rate of the young *Eucalyptus* and its relationships with environmental factors, and provide scientific basis for the sustainable operation and management. Danzhou Forest Farm, which lies in western Hainan Island, was chosen as a research area, where the sap flow rate and environmental factors were continuously measured by using Dynagage sap flow sensors (developed by Dynamax Inc.) and DL2e environmental data acquisition systems (developed by Delta-T Devices Ltd.) from June to September 2014. The results showed that, 1) during the rainy season, young *Eucalyptus* stem sap flow rate followed a diurnal pattern, whereby rates were high during the day and low during the night, and the sap flow rates were very small at night, about 0.10%—7.27% of daily average value. 2) In sunny, cloudy and rainy days, the stem sap flow rates were significantly different. In sunny days, the averages of peak values and daily mean values were 13.861, 2.349 mL·cm⁻²·h⁻¹, were about 2.27, 1.50 times of cloudy days, and 10.52, 4.90 times of rainy days, respectively. 3) Sap flow rate was significantly correlated with solar radiation, relative humidity, air temperature in rainy season, and little with soil water. Solar radiation was the predominant factor affecting stem flow rate in sunny

收稿日期: 2014-12-23 修回日期: 2015-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361006); 国家科技支撑计划项目(2012BAC18B04); 海南省自然科学基金项目(413126); 海南师范大学研究生创新项目(Hsyx2014-49)。

作者简介: 吴喆滢, 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物生态。E-mail: wzy-98jay@163.com

* 通信作者: 赵从举, 男, 教授, 研究方向: 土壤环境与生态水文。E-mail: congjuzh@hainnu.edu.cn

days, but the air temperature was the predominant factor in cloudy and rainy days. The multiple regression analysis of flow rates and environment factors showed that the dominating factors affecting the stem sap flow rates were different on sunny, cloudy and rainy days.

Key words: Dynagage sap flow sensors; *Eucalyptus urphylla* clone U6; stem sap flow rate; environmental factor

桉树(*Eucalyptus* spp.)具有生长快、轮伐期短、适应性强等特征,是我国南方速生丰产林战略树种,在缓解木材等林产品短缺等方面发挥着重要的作用^[1]。但桉树人工林生态环境问题一直备受关注,尤其对于桉树的水分利用存在很多争议^[2-3]。蒸腾耗水是树木水分散失的主要途径^[4],开展桉树蒸腾耗水科学测量,对揭示桉树的蒸腾耗水特性及其对土壤水分和气象等环境因子的响应,客观评价桉树水分利用情况具有重要意义。20世纪90年代以后,基于热平衡法原理的热脉冲法(Heat Pulse Method, HPM)和热扩散探针法(Thermal Dissipation Probe, TDP)逐渐成为乔灌木整株蒸腾研究的主要方法^[5]。热扩散探针法是 Granier 在热脉冲法的基础上经过改进后用来测定整株蒸腾的最新方法^[6-7]。热扩散液流探针还可配合其他传感器,测量环境因子(光照、气温、湿度等)影响下的茎干树液流量及其与环境因子之间关系^[8-9]。其中热平衡法(Stem Heat Balance)是一种直接测量蒸腾耗水的精确手段^[5]。孙慧珍^[10]、马玲^[11]等利用热扩散法对白桦(*Betula platyphylla*)、马占相思(*Acacia mangium*)树干液流及其环境因子进行了研究。岳广阳^[12]、高阳^[13]、李思静^[14]等利用包裹茎流仪测定了小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、玉米/大豆(*Zea mays*/*Glycine max*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)的茎干液流特征,取得了满意的结果^[15]。桉树速生丰产林轮伐期一般不超过6~7 a,幼林在轮伐期中占较长时段,其蒸腾耗水是轮伐期内桉树林耗水准确估算的重要基础。桉树蒸腾耗水研究多集中于3~4 a之后的桉树人工林,而对幼龄桉树的蒸腾耗水特性及连续动态研究较少^[16-17]。基于此,本研究选取海南西部儋州林场为试验场地,采用以热平衡为原理的包裹式茎流测量系统,测定了尾叶桉 U6 无性系幼林(*Eucalyptus urphylla* S. T. Black U6)树干液流速率动态,分析液流速率对太阳辐射、空气相对湿度、空气温度、以及不同土层的土壤含水量的响应,揭示幼年桉树茎流变化特征及其对环境因子的响应规律,为轮伐期内桉树林耗水准确估算以及桉树人工林可持续经营提供科学依据。

1 研究地区概况

试验于2014年6—9月进行,儋州林场位于海

南省儋州市西北部,109°20'3"E、19°43'3"N。地形以平原、台地为主,海拔40~50 m;属热带半湿润季风气候区,年平均温度23.8℃,年均降水800~1 200 mm,年均蒸发量1 200~2 500 mm;干湿季分明,11月—次年5月为干季,6—10月为雨季。缺少地表径流,大气降水是土壤水分最主要的补给来源。样地地表较为平坦,土壤为砂质砖红壤,桉树人工林连片分布。

2 材料与方法

2.1 茎流与环境因子测定

在研究区样地选取2年生幼林桉树标准木,于2014年6月9日安装包裹式茎流仪,对2年生桉树的茎流速率进行连续监测。标准木植株要求生长良好、树干通直、无节疤、无病虫害。用生长锥在与标准木相似植株胸径处不同方向取样,结果表明2年生桉树并没有形成心材。2年生桉树标准木植株树高6.78 m,胸径为5.64 cm,边材面积为24.97 cm²。

在2年生桉树标准木植株胸高1.3 m处安装包裹式茎流仪。将树干外的死树皮刮掉,尽量避免损伤树干的韧皮部,用游标卡尺测量传感器安装位置的直径,然后用蒸馏水擦干净,并在被测区涂上一层G4硅胶(提高导热性能),确保被测植株茎杆与探头接触良好,安装SGB 50-ws型号的探头。之后,用探头包裹好茎杆,并在外层裹上带有反光的PVC防护罩,再用防水胶带封住,在封口处涂上玻璃胶,防止水分进入,减小外界环境的影响。

在距离桉树林样地50 m建1座12 m高的小气候观测塔,测量林冠层附近的太阳辐射、有效辐射、大气降水;在林间搭建1座2.5 m高的相对湿度、温度测量装置;林下不同深度土层(10、40、60 cm)埋设土壤水分传感器(TDR);Dynagage包裹式茎流传感器、环境因子传感器与数据采集器(DL2e data Logger)连接,组成全自动数据采集系统,设定采集参数,间隔时间为10 min(图1)。

2.2 数据采集与处理

自2014年6月9日起,每周定期对仪器进行维护,并把DL2e茎流与环境因子数据下载到计算机;并利用Dynamax Inc(USA)公司提供的数据处理软件、SPSS软件和Excel软件对观测结果进行处理与



图1 试验场地布设与包裹式茎流仪安装(左下)

Fig.1 Experiment site and installation for Dynagage sap flow(at the lower left)

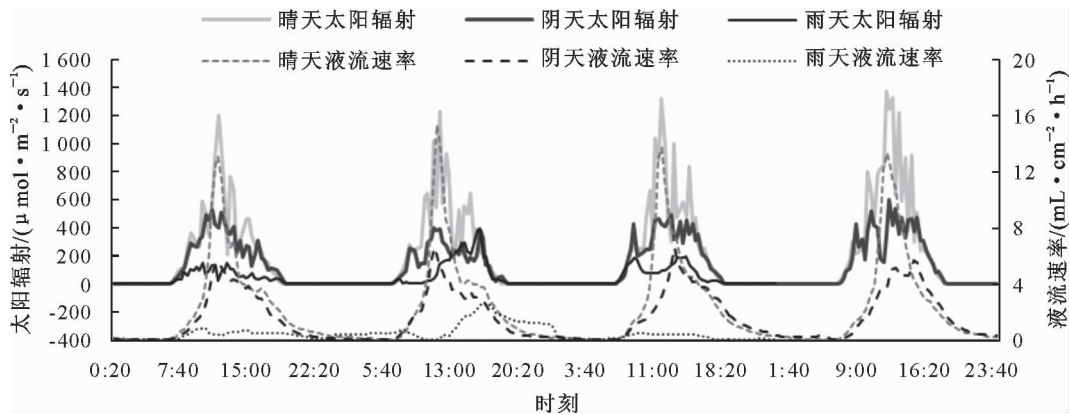
分析。每 10 min 采集 1 次数据,处理时每 20 min 平均 1 次;10、40、60 cm 土壤水分取平均值。运用 SPSS 对茎流速率与环境因子进行相关分析;并建立 3 种天气条件下茎流速率与主要环境因子间的回归

方程,揭示各环境因子对茎流速率变化的影响与贡献。

3 结果与分析

3.1 环境因子的变化

晴天(9 月 23—26 日)白天太阳辐射波动范围为 0~1 369.2 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2)。9 月 26 日 12:00 左右,太阳辐射达 1 369.2 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,为这段时间的最大值。阴天(8 月 22—23 日、9 月 20—21 日)太阳辐射波动范围为 0~596.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值出现于 9 月 21 日 12:20;雨天(6 月 11 日、6 月 22 日和 9 月 7 日)的波动幅度最小,最大值为 395.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,出现的时间最晚,一直推迟到 16:00,这主要与不同天气条件下云层对太阳辐射的削弱作用有关。3 种天气条件下白天太阳辐射极值出现的时间、大小与天气状况有关,而日出前和日落后的太阳辐射均为 0。



注:晴天 4 d,自左至右分别为 2014 年 9 月 23 日、24 日、25 日和 26 日;阴天 4 d,自左至右分别为 8 月 22 日、23 日、9 月 20 日、21 日;雨天 3 d,自左至右分别 6 月 11 日、6 月 22 日和 9 月 7 日。图 3、图 4、图 5 同。

图2 不同天气条件下太阳辐射与茎流速率的日变化

Fig.2 Diurnal variation of solar radiation and sap flow rate under different weather conditions

不同气象条件下温度的变化有所差异,但温度的日变化规律总体呈单峰曲线(图 3)。晴天的晚间气温维持在较低水平,3:20—6:20 最低,6:30 后开始升高,日出后气温随着太阳辐射的增强而逐渐上升,午后达到最高值,随着太阳辐射的减弱而逐渐下降,到傍晚下降到最低,但仍高于最低气温值。晴天最高气温出现在 9 月 26 日(30.71℃)14:00 左右,最低出现于 9 月 23 日(19.94℃)6:00 左右。阴天的昼夜温差变化较小,波动幅度<10℃(21.3~30.42℃);雨天温差变化最小,又因云层对大气的保温作用较强,因此夜间气温仍维持在较高水平,最低温 22.77℃,高于晴天和阴天。

3 种天气条件下大气湿度的变化幅度差异较大,其中晴天变化最大(51.66%~98.28%),阴天天次

之(54.55%~98.05%)雨天最小(70.53%~98.84%),空气相对湿度与温度的变化呈相反趋势(图 3、图 4)。

3.2 桉树树干液流的日动态

以连续 4 个晴天(2014 年 9 月 23 日—9 月 26 日)、4 个阴天(8 月 22—23 日、9 月 20—21 日)和 3 个雨天(6 月 11 日、6 月 22 日、9 月 7 日)为例,比较晴天、阴天、雨天等典型天气条件下幼龄桉树茎流速率日变化(图 5)。晴天树干液流日变化呈单峰曲线,昼夜变化幅度较大;树干液流速率从 6:30 左右启动,7:00 开始迅速上升,连续 4 d 中,到达峰值的时间在 11:20—12:00 之间,最大值分别为 13.087、15.288、13.719、13.351 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为 13.861 $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,之后液流速率开始下降;晚上仍有微弱

的液流,1;20—6;20 液流速率最低,为 0 或接近 0;日平均液流速率为 $2.349 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

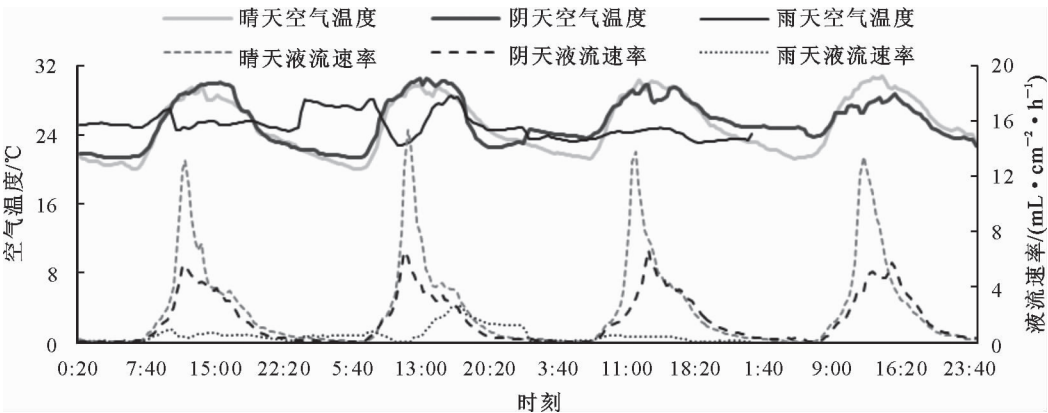


图 3 不同天气条件下空气温度与茎流速率的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of air temperature and sap flow rate in different weather conditions

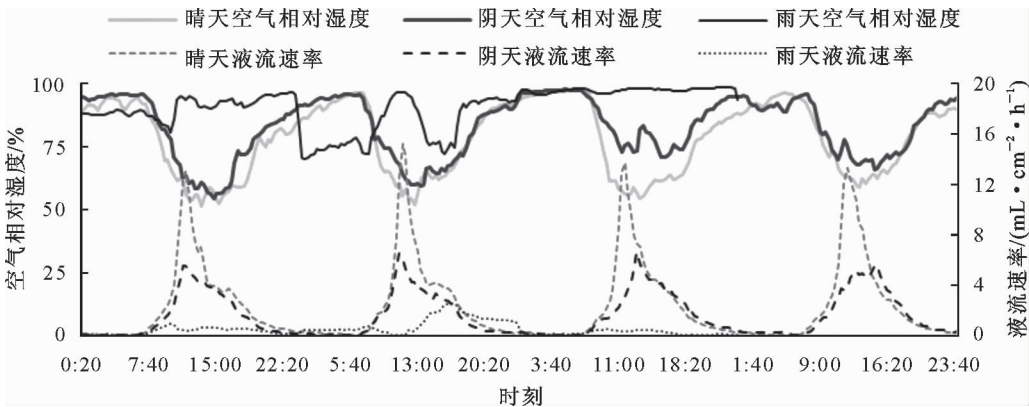


图 4 不同天气条件下空气相对湿度与茎流速率的日变化

Fig. 4 Diurnal variation of relative humidity and sap flow rate in different weather conditions

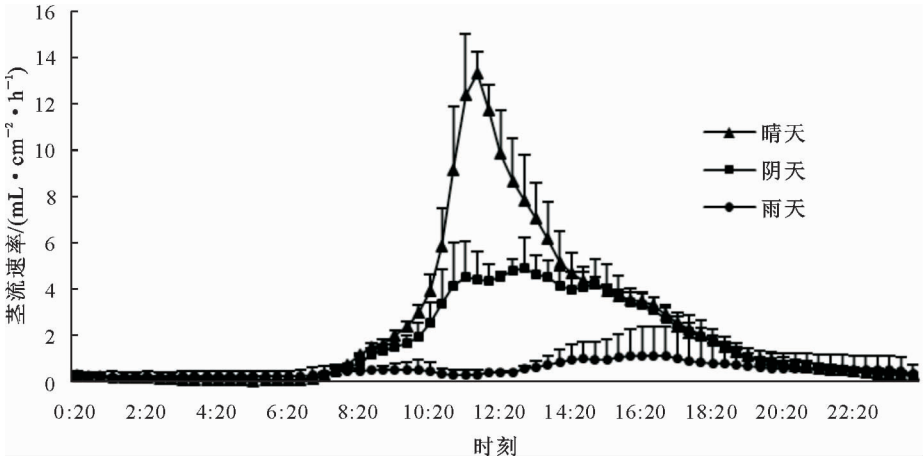


图 5 不同天气条件下桉树液流速率的日变化(误差线为标准差)

Fig. 5 Diurnal variation of *Eucalyptus* sap flow rate in different weather conditions(error bars are standard deviations)

阴天树干液流速率日变化呈多峰曲线,但昼夜变化幅度降低。白天呈现缓慢上升—平缓下降的特点,达到峰值的时间也不尽相同。8 月 22—23 日达到峰值的时间为 11:40、11:00,而 9 月 20—21 日分别为 13:00、15:00;树干液流速率最大峰值也较小,最大值分别为 5.546 、 6.542 、 $6.629 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

h^{-1} 和 $5.687 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为 $6.101 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;之后液流速率开始下降;日平均茎流速率为 $1.564 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

雨天树液茎流较小日变化规律不明显,峰值出现的时间不定,且峰值很小,6 月 11 日、6 月 22 日、9 月 7 日到达峰值的时间分别为 10:00、16:20、9:40,

峰值分别为 0.899、2.569 mL·cm⁻²·h⁻¹和 0.485 mL·cm⁻²·h⁻¹,平均为 1.318 mL·cm⁻²·h⁻¹;之后液流速率开始下降;日平均液流速率是 0.479 mL·cm⁻²·h⁻¹。

晴天、阴天、雨天树液茎流速率差异明显,晴天的日平均最大峰值、日均值分别是阴天的 2.27 倍、1.50 倍,是雨天的 10.52 倍、4.90 倍;3 种天气状况下,晚上液流速率都很微弱,为 0 或接近 0。

3.3 树干液流速率与环境因子的关系

桉树的蒸腾耗水除了受自身生物学特性影响外,还受到太阳辐射、空气湿度、空气温度、土壤水分等环境因子的影响。桉树树干液流速率与同步获取的太阳辐射、气温、湿度、土壤水分等环境因子数据进行相关分析,探讨各环境因子对液流速率的影响。结果表明,不同天气条件下液流速率的环境因子影

响程度与排序不同。
晴天的环境因子与幼龄桉树液流速率相关程度的大小顺序依次为太阳辐射、空气湿度、空气温度、土壤水分;阴天环境因子与液流速率的相关程度依次为空气温度、空气湿度、太阳辐射、土壤水分;雨天的环境因子与液流速率相关程度的大小顺序依次为空气温度、太阳辐射、空气湿度、土壤水分。晴天、阴天、雨天 3 种天气条件下液流速率与太阳辐射、相对湿度、空气温度呈极显著为相关关系($p<0.001$)。晴天的液流速率与土壤水分含量呈极显著负相关关系,而阴天、雨天的液流速率与土壤水分的相关关系不显著。这主要因雨季土壤水分充足,而晴天太阳辐射强,气温高,地表与植物蒸发蒸腾快,土壤水分下降变化较大所致。

表 1 液流速率与各环境因子相关分析 ($N_{晴}=288, N_{阴}=288, N_{雨}=216$)
Table 1 Correlation analysis on sap flow rate and environmental factors ($N_{sunny}=288, N_{cloudy}=288, N_{rainy}=216$)

环境因子	晴天		阴天		雨天	
	相关系数	显著性水平	相关系数	显著性水平	相关系数	显著性水平
太阳辐射	0.891 **	0.000	0.829 **	0.000	0.469 **	0.000
空气温度	0.779 **	0.000	0.863 **	0.000	0.552 **	0.000
相对湿度	-0.784 **	0.000	-0.856 **	0.000	-0.418 **	0.000
土壤水分	-0.172 **	0.000	0.036	0.545	0.035	0.605

利用多元线性逐步回归方法分析太阳辐射、空气温度、湿度和土壤水分对茎流速率的影响。以回归系数显著性检验中各自变量的 F 统计量的相伴概率值 ≤ 0.05 和 ≥ 0.100 作为自变量入选和剔除临界值,将茎流速率作为因变量,太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、土壤水分作为自变量,建立 3 种天气条件下茎流速率与主要环境因子的多元线性回归模型。

晴天: $V_s=6.486+0.007PAR-0.07RH, R^2=0.842$

阴天: $V_s=5.739+0.004PAR-0.09RH+0.271SW, R^2=0.858$

雨天: $V_s=-10.153+0.242T+0.002PAR+0.398SW, R^2=0.507$

式中: V_s 代表茎流速率, PAR 、 RH 、 SW 、 T 分别代表太阳辐射、空气相对湿度、土壤水分、空气温度; R^2 为参与模型构建的自变量对茎流速率因变量变化的解释程度。经相关系数 F 检验和回归系数 t 检验,相伴概率 $p<0.001$,说明回归方程能较好地揭示茎流速率变化与各环境因子之间的关系。

标准回归系数表示参与构建模型的自变量对茎流速率的影响程度。晴天太阳辐射和空气相对湿度入选回归方程, PAR 和 RH 的回归系数分别为

0.670、-0.312,表明茎流速率与太阳辐射呈正相关,而与相对湿度呈负正相关,前者的影响更大;阴天太阳辐射、空气相对湿度、土壤水分入选方程, PAR 、 RH 和 SW 的回归系数分别为 0.385、-0.623、0.156,表明茎流速率与太阳辐射、土壤水分呈正相关,而与相对湿度呈负正相关,且相对湿度对茎流速率的影响更大;雨天太阳辐射、空气温度、土壤水分入选回归方程,回归系数分别为 0.326、0.619、0.340,表明树干液流速率与太阳辐射、空气温度、土壤水分呈正相关,且空气温度对雨天茎流速率的影响更大。

4 结论与讨论

幼龄桉树茎流速率具有“昼高夜低”的节律性。白天茎流速率高,变幅大;夜晚茎流速率小,变幅小。晴天,太阳辐射较强,且温度较高,幼年桉树植株茎流速率表现为单峰曲线,而阴天、雨天太阳辐射强度低,空气温度、湿度变幅小,液流速率表现为不典型单峰或多峰曲线。这与孙慧珍^[10]等的白桦树干液流、曹文强^[18]等的辽东栎树干液流、马长明^[19]等的核桃树干液流和凡超^[20]等的荔枝树干液流研究结论相一致。

幼龄桉树夜晚存在微弱茎流,夜晚茎流速率不

足日均值的 10%。白天蒸腾耗水较多,造成水分亏缺,晚上水分在根压的作用下以主动吸收方式进入植物体内,补充白天植物蒸腾丢失的大量水分,恢复植物体内的水分平衡^[21]。3 种天气状况下,幼龄桉树晚上均仍有微弱的液流存在。从相对量来看,夜晚茎流速率占日均茎流速率比例有所差异,其中雨天最多,为 1.77%~7.27%,阴天次之,为 0.10%~1.97%,晴天最小,为 0.11%~0.46%。因此,在测算人工林长期耗水/蒸发散时,天气条件与夜晚树液液流的影响不可忽略。

幼龄桉树晴天、阴天、雨天树液茎流速率依次降低,且差异明显;晴天的日平均最大峰值分别是阴天、雨天的 2.27 倍和 10.52 倍。2014 年 9 月 23 日—9 月 26 日晴天的幼龄桉树树液速率日均极大值为 13.861 mL·cm⁻²·h⁻¹,日均值为 2.349 mL·cm⁻²·h⁻¹。与张宁南^[22]2005 年 7 月 15 日—19 日在西江中游广东省高要市测定胸径 7.2 cm 的 6 a 生尾巨桉液流密度相比,液流密度平均日最大值(16.8 mL·cm⁻²·h⁻¹)和日均值(3.3 mL·cm⁻²·h⁻¹)基本相当或略低;但都显著低于雷州半岛 4 年生尾叶桉样地的茎流速率(7.66 mL·cm⁻²·h⁻¹)。表明不同地区桉树树液茎流速率存在较大差异,而海南西部降水较少,幼年林冠幅小可能是茎流速率小的重要原因。

幼龄桉树茎流速率与太阳辐射、空气温度、空气湿度等气象因子均具极显著的相关关系,而在土壤水分不对植物生长产生干旱胁迫的雨季,日茎流速率与土壤含水量之间关系不显著。与刘彩凤^[23]等对油松刺槐混交林蒸腾耗水的研究、马玲^[11]等对马占相思的研究以及凡超^[19]等对荔枝树干液流的研究相一致。雨季降水较多,土壤水分供应充分,日茎流速率对气象因子响应明显,而受土壤含水量影响较小。与张宁南^[24]等研究日茎流密度而与土壤水分含水量的相关不明显类似;旱季幼龄桉树日茎流速率对土壤水分的响应有待进一步研究,而李思静^[14]等认为当土壤水分降到对植物产生干旱胁迫的阈值时,日茎流速率动态与土壤水分呈极相关关系。

不同天气条件下,影响幼年桉树茎流速率的主要环境因子不同。晴天太阳辐射对茎流速率影响最大,阴天空气相对湿度对茎流速率影响较大,而雨天茎流速率则受空气温度影响较大。与殷秀辉^[25]等对晴天油松树干液流的研究以及郑睿^[26]等对阴天酿酒葡萄植株耗水研究结论相一致。

参考文献:

[1] 李林锋,刘新田. 干旱胁迫对桉树幼苗的生长和某些生理生

态特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2003, 19(1):14-17.
LI L F, LIU X T. Effect of soil water stress on the growth and eco-physiological characteristics of *Eucalyptus* seedling [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 19(1) : 14-17. (in Chinese)
[2] 白嘉雨,甘四明. 桉树人工林的社会、经济和生态问题[J]. 世界林业研究, 1996, 9(2):63-68.
BAI J Y, GAN S M. Social, economical and ecological significance of *Eucalyptus* plantation[J]. World Forestry Research, 1996, 9(2):63-68. (in Chinese)
[3] SHIVA S, BANDYOPADHYAY J. *Eucalyptus*——a disastrous tree for India[J]. Ecologist, 1983, 13(5):184-187.
[4] HINCKLEY T M, BROOKS J R, CERMAK J, *et al.* Water flux in a hybrid poplar stand[J]. Tree Physiology, 1994, 14 (7):1005-1018.
[5] CERMAK J, DEML M, PENKA M. A new method of sap flow rate determination in trees[J]. Biologia Plant, 1973, 15: 171-178.
[6] 赵平,饶兴权,马玲,等. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用[J]. 热带亚热带植物学报, 2005, 13(6):457-468.
ZHAO P, RAO X Q, MA L, *et al.* Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2005, 13(6):457-468. (in Chinese)
[7] 马玲,赵平,饶兴权,等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1):88-96.
MA L, ZHAO P, RAO X Q, *et al.* Main determination methods of tree transpiration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24 (1):88-96. (in Chinese)
[8] ZEPPEL M, CATRIONA M M, CHELCY R F, *et al.* The response of sap flow to pulses of rain in a temperate Australian woodland[J]. Plant and Soil, 2008, 305:121-130.
[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[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2):1-7.
MA L Y, WANG H T, LIN P. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(2):1-7. (in Chinese)
[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):1387-1391.
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):1387-1391. (in Chinese)
[11] 马玲,赵平,饶兴权,等. 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):2145-2151.
MA L, ZHAO P, RAO X Q, *et al.* Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9):2145-2151. (in Chinese)
[12] 岳广阳,赵哈林,张铜会,等. 不同天气条件下小叶锦鸡儿茎流及耗水特性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10) 2173-2178.
YUE G Y, ZHAO H L, ZHANG T H, *et al.* Characteristics of *Caragana microphylla* sap flow and water consumption under different weather conditions on Horqin sandy land of

Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10):2173-2178. (in Chinese)

[13] 高阳, 段爱旺, 邱新强, 等. 应用热平衡法测定玉米/大豆间作群体内作物的蒸腾量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5):1283-1288.

GAO Y, DUAN A W, QIU X Q, *et al.* Plant transpiration in a maize/soybean intercropping system measured with heat balance method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5):1283-1288. (in Chinese)

[14] 李思静, 查天山, 秦树高, 等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)茎流动态及其环境控制因子[J]. 生态学杂志, 2014, 33(1):112-118.

LI S J, CHA T S, QIN S G, *et al.* Temporal patterns and environmental controls of sap flow in *Artemisia ordosica*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1):112-118. (in Chinese)

[15] BETHENOD O, KATERJI N, GOUJET R, *et al.* Determination and validation of corn crop transpiration by sap flow measurement under field conditions[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2000, 67(3-4):p. 153-160.

[16] 尹光彩, 周国逸, 王旭, 等. 应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究[J]. 生态学报, 2013, 23(10):1984-1990.

YIN G C, ZHOU G Y, WANG X, *et al.* A study on sap flux density of two eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) plantations in south eastern China by heat-pulse method[J]. Acta Ecologica Sinica, 23(10):1984-1990. (in Chinese)

[17] 张宁南, 徐大平, Jim Morris, 等. 雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1):1-5.

ZHANG N N, XU D P, MORRIS J, *et al.* Water consumption of *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula[J]. Forest Research, 2007, 20(1):1-5. (in Chinese)

[18] 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. (in Chinese)

[19] 马长明, 刘广营, 张艳华, 等. 核桃树干液流特征研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(2):28-29.

MA C M, LIU G Y, ZHANG Y H, *et al.* Stock sap flow characters of *Juglans regia*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2):28-29. (in Chinese)

[20] 凡超, 邱燕萍, 李志强, 等. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2014, 34(9):2401-2410.

FAN C, QIU Y P, LI Z Q, *et al.* Relationships between stem sap flow rate of *Litchi* trees and meteorological parameters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9):2401-2410. (in Chinese)

[21] 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.

XU X Y, SUN B P, DING G D, *et al.* Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3):895-905. (in Chinese)

[22] 张宁南. 广东桉树人工林耗水量研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2010.

[23] 刘彩凤, 张志强, 郭军庭, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区油松刺槐混交林蒸腾耗水[J]. 中国水土保持科学, 2009, 8(5):42-48.

LIU C F, ZHANG Z Q, GUO J T, *et al.* Transpiration of a *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* mixed forest in Hilly-gully region of the Loess Plateau, West Shanxi Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 8(5):42-48. (in Chinese)

[24] 张宁南, 徐大平, Jim Morris, 等. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(6):661-667.

ZHANG N N, XU D P, MORRIS J, *et al.* Characteristics of sap flow in *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula[J]. Forest Research, 2003, 16(6):661-667. (in Chinese)

[25] 殷秀辉, 程飞, 张硕新. 油松树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5):24-29.

YIN X H, CHENG F, ZHANG S X. Variation of stem sap flow of *Pinus tabulaeformis* and its impact factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5):24-29. (in Chinese)

[26] 郑睿, 康绍忠, 佟玲, 等. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20):99-107.

ZHENG R, KANG S Z, TONG L, *et al.* Water consumption of wine grape under different weather conditions in desert oasis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20):99-107. (in Chinese)