

热带桉树人工林液流特征及其对环境因子的响应

王城城, 陈丽艳, 赵从举*

(海南师范大学 地理与环境科学学院, 海口 570100)

摘要:【目的】探明热带桉树蒸腾耗水时间变化规律及其与环境因子的关系。【方法】通过热扩散探针法(TDP)于2016年1—12月对海南省儋州林场桉树树干液流进行实时监测,并同步监测气象、土壤水分等相关环境因子。【结果】①雨季桉树液流瞬时变化特征多为“双峰”型曲线,旱季为“单峰”型,雨季液流到达峰值时间在11:00—11:30之间,峰值平均为 $8.68 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,并在15:00—15:30出现第2个液流峰值,平均峰值为 $8.16 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,旱季液流达到峰值时间在13:00—13:30之间,峰值平均为 $7.45 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$;②旱季和雨季桉树液流瞬时速率对相对湿度和大气温度的时滞均为30 min,对光合有效辐射的时滞均为-30 min;③日尺度上桉树平均液流速率为 $2.06 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,最大值出现在7月15日,为 $4.25 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$;最小值出现在11月25日,为 $0.14 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,太阳有效辐射(PAR)、大气温度(T_a)、饱和水汽压差(VPD)是影响桉树日均液流的主要环境因子,树木胸径大小与日均液流速率正相关;④桉树月均液流速率的变化特征为“单峰型”曲线,雨季液流速率均值为 $2.53 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,旱季为 $1.80 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,最大值出现于7月,为 $3.42 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,最小值在2月,为 $1.40 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,其中 PAR 、 T_a 、 VPD 是主要影响因子。【结论】热带桉树人工林液流存在明显昼夜与季节节律,不同观测尺度下影响桉树液流速率的主要环境因子均为 PAR 、 T_a 、 VPD 。

关键词:桉树; 液流; 气象因子; 土壤水分; 环境因子

中图分类号:S792.39

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20190080

王城城,陈丽艳,赵从举. 热带桉树人工林液流特征及其对环境因子的响应[J]. 灌溉排水学报,2018,37(7):69-75.

0 引言

水分作为半干旱半湿润地区植物生长发育的限制因子,对维持植物的生长发育具有重要意义,同时也是保持生态系统物种多样、结构和功能完整的重要保证^[1]。植物的蒸腾作用是土壤水分消耗的重要途径之一,研究表明,植物通过新陈代谢所消耗的水分在整个植株耗水量中的占比不足5%,但其蒸腾耗水量占整个植株耗水量的90%以上,树木99%以上的液流被用于植物蒸腾^[2]。因此,研究植物液流的变化规律及其对环境因子的响应是揭示植物生态水文过程的基础^[3-4]。

桉树(*Eucalyptus* spp.)原产于澳大利亚和印度尼西亚等国家^[5],是世界公认的三大速生人工林树种之一^[6]。我国自1890年开始引种,至今已有百余年的历史^[7]。海南中西部为我国热带半湿润、半干旱特殊生境区,也是重要的桉树浆纸林栽植区^[8]。桉树在海南的大面积种植,产生了巨大的经济效益,其蒸腾耗水及其产生的水生态问题备受关注。研究表明,桉树对地下水的抽取高于一般树种,会降低其流域产流量和地下水的补给量,破坏生态系统水量平衡^[9-10];但也有研究表明桉树不会对地下水产生负面影响^[11-12]。研究结果的差异可能源于研究的地域与生境不同。目前桉树蒸腾耗水的相关研究主要集中于我国南方亚热带湿润区^[13-15],而热带半湿润、半干旱区相关研究较少。

基于此,本研究采用热扩散探针法(TDP),于2016年1—12月在海南省儋州市儋州林场对不同胸径的桉树树干液流进行了连续监测,并同步监测了光合有效辐射、大气温度、相对湿度、0~60 cm平均土壤含水率等环境因子数据,拟解决以下问题:①不同时间尺度下桉树液流的变化特征存在什么差异? ②不同时间尺度

收稿日期:2019-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41361006);海南省普通高等学校创新科研课题(Hys2018-205)

作者简介:王城城(1993-),男。硕士研究生,主要从事植物生态水文相关研究。E-mail: 274554877@qq.com

通信作者:赵从举(1968-),男。教授,主要从事土壤环境生态相关研究。E-mail: congjuzh@hainnu.edu.cn

下桉树液流的变化与哪些环境因子有关? ③如何构建热带桉树人工林液流速率与环境因子关系模型? 研究结果将为热带半干旱半湿润地区桉树人工林生态管理提供一定数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于海南省儋州市西北部(109°20'3"E, 19°43'3"N);属于热带季风气候区,多年平均气温为23.8℃,年均降水量800~1 200 mm,年蒸发量为1 200~2 500 mm,≥10℃的年积温为8 400~8 900℃;干湿季分明,5—10月为雨季,降雨量占全年降雨量70%~90%,台风频繁,11月—次年4月为旱季,干旱少雨;地形为台地平原,平均海拔33 m,地势较为平坦;缺少地表径流,多季节性干旱;土壤主要为砂质砖红壤,土壤肥力较低。林场桉树林连片分布,主要栽种尾叶桉(*Eucalyptus urophylla* S. T. Black)、细叶桉(*Eucalyptus tereticornis* Smith)、赤桉(*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.)等品种,林下植被稀疏。

1.2 试验材料与样地选择

按照空间相邻,地表性质相似的原则,于2016年1—12月在海南儋州林场建立一块40 m×30 m的长方形样地,并对样方进行围栏围封,避免其他因素的扰动。样方内总调查桉树105株,平均胸径为9.35 cm,平均树高12.2 m,株行距为1.5 m×3.0 m。按2 cm为一个径阶单位,在样地中选取处于生长期,长势良好、树干通直、无病虫害、人为影响因素小的5株桉树作为标准木;其中8.0 cm径阶植株较少,标准木为1株,10.0 cm、12.0 cm径阶标准版均为2株(表1)。样本的胸径范围7.52~12.80 cm,覆盖林场样地中78.1%的桉树植株的胸径范围,基本可以代表研究区桉树总体样本数据。

表1 桉树标准木特征统计表

样木序号	树龄/a	胸径/cm	径级/cm
1	6	9.52	10.0
2	6	12.80	12.0
3	6	9.62	10.0
4	6	7.52	8.0
5	6	12.29	12.0

1.3 液流仪的安装与液流的测定

在标准木胸径高1.3 m处安装热扩散探针式液流测定系统(Dynamax Inc, USA)对单木树干液流进行连续监测。首先使用罗盘确认5株标准木的正北方位,在树干的正北方使用小刀将树干外部的死皮去除,并避免损伤树干的韧皮部;使用质量浓度为10%的次氯酸钠(NaClO)溶液清洗钻头后对树干钻孔,并确保钻孔方向与树干保持垂直;然后使用游标卡尺测定安装区直径,用蒸馏水冲洗,避免木屑堵塞;接着在套管内涂上一层G4硅胶(用于增强导热性);接着将4根探针小心插入安装套管,并确保到达植物导水的木质部;最后用泡沫与胶带固定传感器,在最外层裹上涂有反光材料(PVC)的防护罩,并用胶带固定,封口处用玻璃胶涂抹,以避免雨水、太阳辐射等外界因素对传感器的干扰。传感器安装好后通12 V直流电,并与液流数据采集器相连。数据采集时间间隔为10 min,每周定期下载数据。

1.4 环境因子测定

在距离桉树人工林50 m处布设小型气候观测塔,连续监测林冠层附近的光合有效辐射 PAR (Photosynthetically active radiation)、大气温度 T_a (Air temperature)、相对湿度 R_h (Relative humidity);0~60 cm平均土壤含水率 SWC (Soil water content)由林间布设的TDR采集。饱和水汽压亏损 VPD (Vapor pressure deficit)由大气温度(T_a)和相对湿度(R_h)计算获得,数据采集间隔为10 min,计算式为^[16]:

$$VPD = 0.611e^{\frac{17.502T_a}{T_a + 240.97}}(1 - R_h) \quad (1)$$

1.5 桉树液流速率测定

利用Dynamax Inc(USA)公司提供的数据处理软件对液流数据进行处理,液流速率计算式为:

$$S = 42.84\left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231}, \quad (2)$$

式中: S 为树干中液流通量密度($\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$); ΔT 为加热探针与数据传感探针之间的温度差值($^{\circ}\text{C}$); $\Delta T_{\max}$ 为空气湿度达到100%,且时长达48 h时算得的最大温度差 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 。

1.6 数据分析与处理

液流与环境因子数据由仪器自动记录,自2016年1月起,每周定期对实验仪器进行维护与数据下载;利用Dynamax Inc(USA)公司提供的数据处理软件进行数据预处理,使用SPSS 23.0软件进行数据的统计与分

析,采用Excel 2010作图。桉树瞬时液流对环境因子的时滞性采用错位回归方法,当 R^2 值最大时所对应的时刻即为桉树对相关环境因子的最佳时滞。

2 结果与分析

2.1 桉树液流速率瞬时变化特征

由图1可知,桉树瞬时液流存在明显的昼夜节律与季节变化规律,日间液流速率较大,夜间液流微弱但不为0;雨季液流变化特征趋近于“双峰”型趋势,且存在“光合午休”现象,而旱季为“单峰”型。雨季桉树液流启动时间与到达峰值时间更早,液流峰值更大,峰值维持时间更长。雨季液流启动时间在07:00—07:30之间,液流峰值到达时间在11:00—11:30之间,最大值平均为8.68 mL/(cm²·h),到达峰值后,出现“光合午休”现象,持续时间约为2~3 h;13:00—14:00之间出现谷值,最低值平均为7.57 mL/(cm²·h),并在15:00—15:30出现第2个峰值,但低于第1个峰值,最大值平均是8.16 mL/(cm²·h),23:00—0:00达到最低值,最低值平均为0.13 mL/(cm²·h),液流基本停止。旱季桉树液流启动时间约为08:00—08:30,到达峰值时间为13:00—13:30之间,最大值平均为7.45 mL/(cm²·h),液流速率抵达峰值后开始下降,至23:00—0:00之间达到最小值,最小值平均为0.45 mL/(cm²·h)。

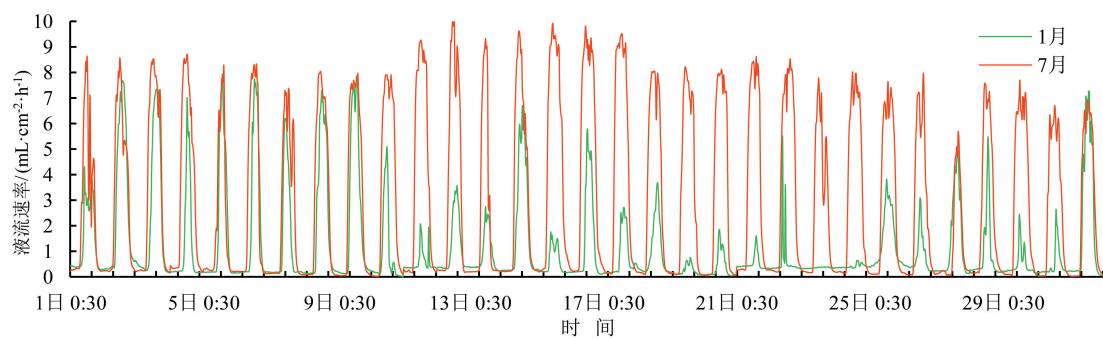


图1 不同季节桉树液流瞬时速率日变化

2.2 桉树瞬时液流对环境因子的时滞性分析

植物会因环境因子的改变产生生理应激,通过调节自身生理活动来适应环境,植物的这种生理调节功能并不与外界环境因子变化同步,存在一定的时滞性。为探讨 PAR 、 T_a 、 R_h 与桉树瞬时液流之间的时滞,本研究选取1月与7月连续31 d桉树瞬时液流与环境因子数据,进行时滞(-2~+2) h的错位回归分析(表2、表3)。结果表明,不同季节桉树瞬时液流对 PAR 均为-30 min,对 T_a 和 R_h 的时滞均为+30 min。

表2 旱季桉树瞬时液流与气象因子之间的时滞相关性系数

时间/min	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120
$PAR/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.285	0.379	0.438	0.477	0.464	0.370	0.269	0.168	0.082
$T_a/^\circ\text{C}$	0.136	0.234	0.343	0.445	0.528	0.560	0.537	0.471	0.374
$R_h/\%$	0.121	0.243	0.391	0.540	0.672	0.721	0.691	0.596	0.456

注 以上数据均在 $P<0.01$ 水平上显著相关;“-”表示0时刻之前,“+”表示0时刻之后。

表3 雨季桉树瞬时液流与气象因子之间的时滞相关性系数

时间/min	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120
$PAR/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.177**	0.251**	0.294**	0.329**	0.300**	0.164**	0.082**	0.028**	0.001
$T_a/^\circ\text{C}$	0.008*	0.083**	0.234**	0.431**	0.630**	0.676**	0.597**	0.450**	0.289**
$R_h/\%$	0.002**	0.025**	0.075**	0.146**	0.223**	0.255**	0.254**	0.225**	0.179**

注 *表示该值在0.05水平上显著相关。**表示该值在0.01水平上显著相关。“-”表示0时刻之前,“+”表示0时刻之后。

2.3 桉树液流速率日变化特征及其对环境因子响应

植物的生物学结构决定植株蒸腾耗水的潜在能力,土壤供水水平决定植株蒸腾耗水的总体水平,而气象因素决定植株蒸腾耗水的瞬间变动^[17],因此不同时间尺度植物的蒸腾耗水特征存在显著差异。分析桉树日均液流(图2)发现,整个观测期内桉树液流速率日均值为2.06 mL/(cm²·h);最小值出现在11月25日,最大值出现在7月15日,日均值波动范围为0.14~4.25 mL/(cm²·h),且雨季日均液流速率(2.53 mL/(cm²·h))高于旱季(1.80 mL/(cm²·h)),但旱季桉树日均液流标准差为1.36,高于雨季(0.95)。

对桉树日均液流速率与气象因子进行相关性分析可知(表4),观测期桉树日均液流速率与 T_a 、 PAR 、 VPD 之间极显著正相关($P<0.01$),与 R_h 和 0~60 cm 平均 SWC 极显著负相关($P<0.01$),根据相关系数大小排序为: $PAR>T_a>VPD>R_h>SWC$ 。故整个生长期影响桉树日均液流速率大小的主要环境因子为 PAR 、 T_a 和 VPD 。

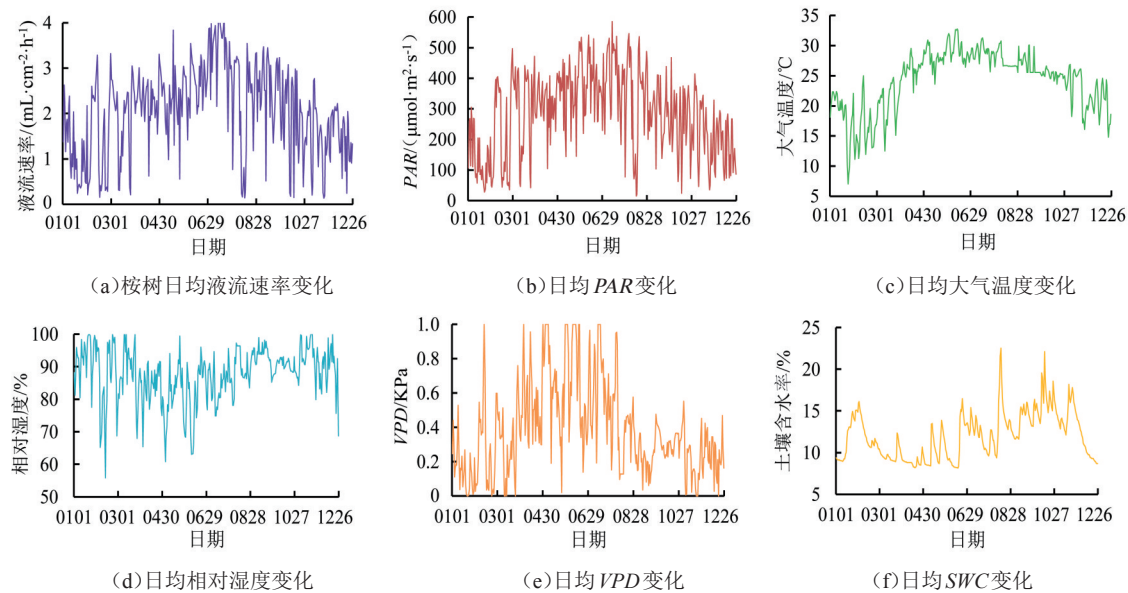


图2 观测期桉树日均液流与环境因子随时间的变化

表4 桉树日均液流速率与环境因子间的相关性系数($n=366$)

环境因子	相对湿度/%	大气温度/℃	有效辐射/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水汽压亏损/kPa	土壤含水率/%
相关性系数	-0.391**	0.438**	0.610**	0.431**	-0.140**
显著性水平	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007

注 **表示该值在0.01水平上显著相关。

2.4 桉树日均液流速率对树形特征的响应

植物液流速率与树形特征存在一定关系。选取1月与7月不同径级大小标准木的液流数据进行分析(图3)。旱季各径级标准木日均液流速率由大到小排序为:1.45 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$) (12 cm)>1.10 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$) (10 cm)>0.76 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$) (8 cm);雨季各单木日均液流速率由大至小排序为:4.26 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$) (12 cm)>2.51 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$) (10 cm)>1.39 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$) (8 cm),旱季不同径级标准木日均液流速率差异较小,这可能与旱季平均液流速率较小有关,另外,桉树树形特征与其日均液流速率正相关。

2.5 桉树液流速率月变化特征及其对环境因子响应

月尺度下桉树液流走势呈“单峰”型曲线(图4),雨季液流均值为2.53 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$),旱季为1.80 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$),最大值出现在7月,最小值出现于2月,极值范围为1.40~3.42 mL/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$)。

对桉树月均液流速率与环境因子进行相关性分析表明(表5),月尺度下桉树液流与 T_a 、 PAR 极显著正相关($P<0.01$),与 VPD 显著正相关($P=0.013<0.05$),与 R_h 显著负相关($P=0.034<0.05$),而与 SWC 的相关性不显著。相关系数排序为 $PAR>T_a>VPD>R_h$ 。由此可知影响桉树月均液流的主要气象因子为 PAR 、 T_a 、 VPD 。

表5 观测期桉树月均液流与环境因子相关系数($n=12$)

环境因子	相对湿度/%	大气温度/℃	有效辐射/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水汽压亏损/kPa	SWC /%
相关性系数	-0.458	0.798**	0.829**	0.690*	-0.141
显著性水平	0.034	0.002	0.001	0.013	0.661

注 *表示该值在0.05水平上显著相关。**表示该值在0.01水平上显著相关。

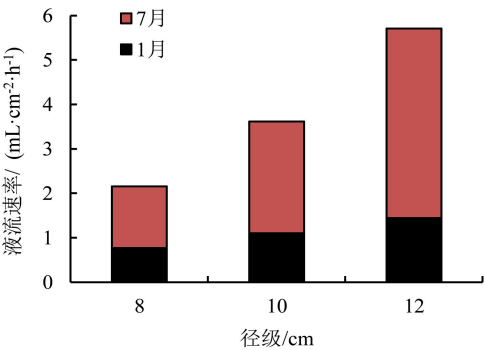


图3 不同径级桉树日均液流速率变化图

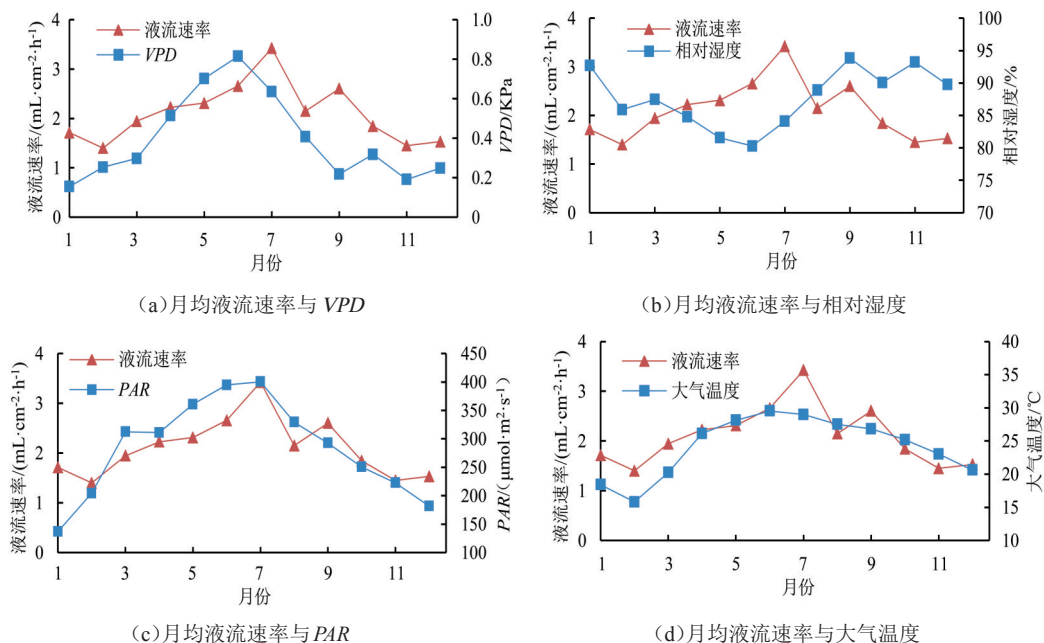


图4 观测期桉树月均液流与主要环境因子关系

2.6 桉树液流速率与环境因子关系模型

基于不同季节晴天(8 d)桉树分时液流速率与气象因子数据以及全年(366 d)桉树日均液流速率与环境因子数据,将 T_a 、 PAR 、 R_h 、 SWC 设为自变量(因共线性排除 VPD),液流速率设为因变量,通过线性逐步回归建立不同时段(旱季、雨季)液流速率与环境因子回归模型(表6);其中 S_d 与 S_w 分别为旱季与雨季桉树液流分时速率($\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$); S_a 是整个观测期桉树液流日均速率($\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$)。以上3个方程的拟合优度值(R^2)均达到了0.7以上,拟合效果良好,达到检验要求。旱季和雨季影响桉树液流的主要因子为 PAR 和 R_h ,与日尺度研究结果不符,这可能与模型所选取数据均来源于晴天有关。

表6 不同时段(旱季、雨季)液流速率与环境因子回归模型

季节	因变量	进入变量	移除变量	参数估计	偏 R^2	模型 R^2	P
旱季	S_d	方程截距		6.115			
		PAR		0.004	0.811	0.872	0.000
		R_h		-0.061	-0.494		0.000
			T_a	0.026	0.044		0.369
雨季	S_w	方程截距		11.312			
		PAR		0.004	0.753		0.000
		R_h		-0.111	-0.647	0.868	0.000
			T_a	0.169	0.142		0.093
全年	S_a	方程截距		0.55			
		PAR		0.005	0.712		0.000
		T_a		0.028	0.225	0.780	0.000
		R_h		-0.008	-0.107		0.042
			SWC	0.049	0.097		0.066

3 讨论

旱季桉树液流日变化特征呈“单峰”型曲线,而雨季为不规则“双峰”型曲线,与孙振伟等^[18]对广东柠檬桉液流速率研究、王志超等^[19]对雷州半岛尾叶桉液流速率研究结果不一致。这可能是因为广东与海南地区的气候存在差异。广东属于亚热带季风气候区,夏季日均温最大值为28.9℃^[18],而本研究靶区地属热带季风区,雨季日均温为27.8℃,最高可达32.8℃,午间瞬时 PAR 可达2400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,桉树受高温胁迫的影响进行“光合午休”,通过降低气孔导度与瞬时液流速率,避免较多的水分蒸散,以适应高温气候。而旱季因日均温较低(22.2℃),不存在高温胁迫,故没有“光合午休”。同时本研究发现雨季液流通量峰值出现时间分

别为11:00—11:30与15:00—15:30,且后者峰值低于前者,这可能与 PAR 日变化呈“单峰”型曲线有关,桉树液流瞬时速率与 PAR 极显著正相关($P<0.01$),而15:00—15:30时段 PAR 小于11:00—11:30。不同地域桉树液流变化特征存在差异,表明环境因子与植物的生理学结构的耦合作用具有多样性,并共同决定了植物液流的变化规律。

桉树液流对环境因子的响应均存在时滞性。闫雪等^[20]对科尔沁沙丘-草甸过渡带的人工杨树林液流的研究指出人工杨树林树干液流对环境因子的响应也存在一定的时滞性,更广泛的研究表明^[21-23],同种植物对不同季节的环境因子的时滞不同。另有学者认为^[24]植物体内的蓄水量是导致植物对环境因子产生时滞性的原因。但Gonzalez-Benecke等^[25]认为树干液流与环境因子之间的滞后性并非完全由储存水引起,可能与水分在植物茎干中传输的实效性有关。本研究认为植物对外界环境因素的响应具有时滞性可用“反馈区间”假说解释。相关环境因子的量在反馈区间内的微小波动并不会引起植物瞬时液流速率发生改变,仅在环境因子变幅超出反馈区间时,才会引起植物产生应激行为来适应环境突变。

本研究中整个生长季桉树液流速率与 SWC 呈极显著负相关($P<0.01$),这主要因林场下垫面多凋落物覆盖,降低了地表水分蒸发速率,致旱季林场平均 SWC 达11.18%,仅较雨季低2.1%,故旱季林场基本不存在水分胁迫,且桉树根系大多分布在0~60 cm土层^[26],主要使用浅层土壤水^[27],晴天桉树液流速率较高,对土壤水的抽取较快,导致土壤含水率快速降低。但也有研究表明^[28],桉树树干液流与250 cm深度土壤水分相关性最高。本研究因设备条件限制,无法获取更深层土壤含水率,有关桉树液流与不同土层土壤水分之间的关系有待进一步深入研究。

4 结 论

1)桉树人工林液流瞬时变化特征存在明显的昼夜节律与季节变化规律,雨季液流变化特征主要为“双峰”型,旱季为“单峰”型,雨季液流启动时间与到达峰值时间更早,液流峰值更大,峰值持续时间时间更长。

2)桉树瞬时液流对环境因子的响应均存在时滞性,不同季节桉树液流瞬时速率对 R_h 和 T_a 的时滞均为30 min,对 PAR 的时滞均为-30 min。

3)桉树日均液流速率表现为雨季高于旱季,且雨季液流变幅较小,液流最大值出现于7月15日,最小值出现于11月25日。主要影响因子为 PAR 、 T_a 、 VPD ;桉树胸径大小与日均液流速率正相关。

4)桉树液流的月变化特征为“单峰”型曲线,最大值出现于7月,最小值出现于2月,且雨季液流月均值高于旱季。主要影响因子为 PAR 、 T_a 、 VPD ,其中与 PAR 、 T_a 之间极显著正相关,与 VPD 显著正相关。

参考文献:

- [1] 刘瑞香. 不同土壤水分条件对中国沙棘和俄罗斯沙棘的光合和蒸腾作用的影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2):163-169.
- [2] 张继澍. 植物生理学[M]. 西安:世界图书出版社, 1999.
- [3] 时荣超, 佟玲. 不同种植密度下制种玉米液流变化及其影响因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 1-8.
- [4] 李少宁, 陈波, 鲁绍伟, 等. 不同时间尺度下杨树人工林液流密度特征[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 121-125.
- [5] GRATTAPAGLIA Dario, VAILLANCOURT Rene E, SHEPHERD Merv, et al. Progress in Myrtaceae genetics and genomics:Eucalyptus as the pivotal genus[J]. Tree Genetics and Genomes, 2012, 8(3):463-508.
- [6] 王军, 廖庆生, 丁伟民, 等. 粤东地区速生桉树林与天然林枯枝落叶层无脊椎动物多样性比较[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 25-31.
- [7] 刘国粹, 杜阿朋, 赵知渊, 等. 雷州半岛尾叶桉人工林蒸腾耗水特征[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(6): 27-32.
- [8] 吴喆滢. 热带半湿润半干旱区桉树茎流特征及其与环境因子关系研究[D]. 海口:海南师范大学, 2015.
- [9] DYE Peter, VERSFELD Dirk. Managing the hydrological impacts of South African plantation forests: an overview[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 251(1/2): 121-128.
- [10] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1 429-1 445.
- [11] SOARES J V, ALMEIDA A C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2001, 253(1/4):135-147.
- [12] 张宁南, 徐大平, Morris J, 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.
- [13] 周翠鸣, 顾大彤, 赵平, 等. 液流径向变化对尾巨桉单株日蒸腾量估算的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2 445-2 451.
- [14] 华雷, 何茜, 李吉跃, 等. 桉树无性系和华南乡土树种秋枫苗木耗水特性的比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1 639-1 644.
- [15] 孙振伟, 赵平, 牛俊峰, 等. 外来引种种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2 588-2 595.
- [16] CAMPBELL G S, NORMAN J M. An introduction to environmental biophysics[M]. New York: Springer Verlag, 1998.
- [17] 高岩, 刘静, 张汝民, 等. 应用热脉冲技术对小美旱杨耗水量的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2001(1): 44-48.
- [18] 孙振伟, 赵平, 牛俊峰, 等. 外来引种种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2 588-2 595.

- [19] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 等. 雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林蒸腾耗水规律研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1-8.
- [20] 闫雪, 刘廷玺, 吕扬, 等. 科尔沁沙丘-草甸过渡带人工杨树林蒸腾耗水特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1 571-1 579.
- [21] 王华, 欧阳志云, 郑华, 等. 北京城区常见树种生长季树干液流的时滞特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2 111-2 117.
- [22] 王华, 赵平, 蔡锡安, 等. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 225-230.
- [23] 赵春彦, 司建华, 鱼腾飞, 等. 胡杨树树干液流进程与太阳辐射的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 99-104.
- [24] CHUANG Y L, OREN R, BERTOZZI A L, et al. The porous media model for the hydraulic system of a conifer tree: Linking sap flux data to transpiration rate[J]. Ecological Modelling, 2006, 191(3/4):447-468.
- [25] GONZALEZ-BENECKE C A, MARTIN T A, CROPPER W P. Whole-tree water relations of co-occurring mature *Pinus palustris* and *Pinus elliotti* var. *elliotti* [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(3): 509-523.
- [26] 王恩群, 余雪标, 林培群, 等. 超大宽行桉农间作模式下桉树人工林根系的研究[J]. 广东农业科学, 2010, 37(3): 72-75, 79.
- [27] 刘挺, 贺宇欣, 刘超, 等. 桉树水分利用原理研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 18-22.
- [28] 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.

Sap Flow in Tropical *Eucalyptus* Plantation and Its Response to Environmental Changes

WANG Chengcheng, CHEN Liyan, ZHAO Congju*

(College of Geography and Environmental Science, Hainan Normal University, Haikou 570100, China)

Abstract: 【Objective】 Transpiration is controlled by many biotic and abiotic factors and in this paper, we studied the sap flow in tropical eucalyptus under different environments. 【Method】 The experiment was conducted from January to December in 2016, and the sap flow in the eucalyptus was measured with the thermal dissipation probe under changing environment which was monitored synchronously by a small meteorological station at the Danzhou Forest Farm in Hainan province. 【Result】 ①Temporal change of the sap flow velocity had two peaks in wet season and one peak in dry season. In wet season, the first peak 8.68 mL/(cm²·h) occurred between 11:00 to 11:30 am followed by the second peak 8.68 mL/(cm²·h) occurring between 15:00~15:30. The mean of the peaks in dry season was 7.45 mL/(cm²·h). ②The instantaneous sap flow rate lagged behind the R_h and T_a by 30 min, and the PAR by -30 min, in all seasons. ③The mean daily sap flow velocity was 2.06 mL/(cm²·h), and the maximum sap flow velocity was 4.25 mL/(cm²·h) occurring in 15th July, and the minimum was 0.14 mL/(cm²·h) occurring in 25 th November. The photosynthetically active radiation (PAR), atmospheric temperature (T_a), vapor pressure deficit (VPD) were the main factors affecting sap flow velocity. The diameter of the tree at the breast height was positively related to daily sap flow velocity. ④The monthly average sap flow velocity had a single peak, with its average in wet and dry seasons being 2.53 mL/(cm²·h) and 1.80 mL/(cm²·h) respectively. The maximum monthly average sap flow velocity was 3.42 mL/(cm²·h) occurring in July, and the minimum was 1.80 mL/(cm²·h) occurring in February, both affected mostly by PAR , T_a and VPD . 【Conclusion】 The sap flow rate in tropical eucalyptus showed seasonal and diurnal period, and its daily and monthly average was affected mostly by PAR , T_a , and VPD .

Key words: eucalyptus; sap flow; meteorological factors; soil water content; environmental factors

责任编辑:白芳芳