

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201411007

周翠鸣, 黄玉清, 顾大形, 等. 尾巨桉液流特征分析 [J]. 广西植物, 2016, 36(7):776-782

ZHOU CM, HUANG YQ, GU DX, et al. Analysis on sap flow characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* [J]. Guihaia, 2016, 36(7):776-782

尾巨桉液流特征分析

周翠鸣¹, 黄玉清^{1*}, 顾大形¹, 赵平², 张德楠¹, 姚月锋¹

(1. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区 广西植物研究所, 中国科学院

广西 桂林 541006; 2. 中国科学院 华南植物园, 广州 510650)

摘要: 目前尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)在南部大面积种植,尤其是在广西,其水分利用效率对森林可持续发展和水资源管理的影响越来越受到关注,因此了解其水分利用特征具有一定的意义。该文通过Granier热扩散探针法(TDP)对广西黄冕国有林场4~5年生尾巨桉人工林液流密度(SFD)的年变化规律、不同个体变化及其与环境因子的关系进行了研究。结果表明:尾巨桉年平均日液流密度为830.1 L·m⁻²·d⁻¹;从尾巨桉日液流密度的年变化来看,最大值不超过2 000 L·m⁻²·d⁻¹,与相似研究比较,该研究得到的结果偏低。不同直径尾巨桉SFD具有相似的变化趋势,胸径相近其液流密度也大致相同,但胸径相差很大时,其液流密度相差也大,相差最大可达1 300 L·m⁻²·d⁻¹,这主要与不同生长状况的植物根系从土壤吸收水分能力不同有关。相关研究表明光合有效辐射和水汽压亏缺是树木冠层蒸腾的主要动力,该研究也发现树干液流密度与水汽压亏缺(VPD)、光合有效辐射(PAR)在年变化上有很好的同步性,主要表现出夏秋季节较高、春冬季节较低的现象。SFD与PAR的关系比较显著,与VPD、空气温度(AT)、土壤温度(ST)有一定的关系,但与空气相对湿度(RH)和土壤湿度(SM)没有呈现规律。环境因子和植物生物学特征是树干液流密度主要的影响因素,进一步探讨尾巨桉如何响应这些因子的变化显得尤为重要。

关键词: 尾巨桉, 热扩散技术, 液流密度, 环境因子

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)07-0776-07

Analysis on sap flow characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

ZHOU Cui-Ming¹, HUANG Yu-Qing^{1*}, GU Da-Xing¹, ZHAO Ping², ZHANG De-Nan¹, YAO Yue-Feng¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Large number of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations have been planted in the southern area of China, especially in Guangxi Zhuang Autonomous Region in the recent years. The influence of water use efficiency in sustainable forest development and water resources management has been receiving increasing attention. Therefore, under-

收稿日期: 2014-11-06 修回日期: 2015-03-19

基金项目: 广西自然科学基金(桂科基 11199001, 1123014, 2010GXNSFD169007, 桂科重 1222005, 1347001); 国家自然科学基金(31360202, 41030638); 广东省自然科学基金面上项目(S2012020010933) [Supported by Natural Science Foundation of Guangxi (11199001, 1123014, 2010GXNSFD169007, 1222005, 1347001); National Natural Science Foundation of China (31360202, 41030638); Natural Science Foundation of Guangdong (S2012020010933)].

作者简介: 周翠鸣(1986-), 女, 广西桂林人, 硕士, 研习员, 主要从事生态学植物水分利用的研究, (E-mail) zhoucuiming@163.com。

*通讯作者: 黄玉清, 博士, 研究员, 主要从事植物生态学与生态系统生态学研究, (E-mail) hyqcoco@gxib.cn。

standing the water use characteristics is important. The Granier thermal dissipation probe method (TDP) is commonly used to monitor tree trunk flow. The sap flow density (*SFD*) was monitored in four years *E. urophylla* × *E. grandis* plantation for one and a half years by Granier TDP at Guangxi Huangmian forest. The change in regularity of *SFD*, the *SFD* in trees of different diameters at breast height and the relationship between the *SFD* and the environmental factors were studied. The results showed that average daily *SFD* was $830.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, and the maximum value did not exceed $2\ 000 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, when compared with similar studies, these results were relatively low. Because tree trunk was the main part of the plant for water transport, it was necessary to analyze the tree trunk sap flow density (*SFD*) change at about different diameters at breast height of *E. urophylla* × *E. grandis*. There was a positive correlation between *SFD* and diameter. The *SFD* was similar when the DBH (diameter at breast height) were in the same diameter class. The *SFD* varied from tree to tree with different values of maximum and minimum *SFD* ($1\ 300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ at most). This was mainly caused by the different water absorbing capacities of trees. Many studies showed that photosynthetic active radiation and vapor pressure deficit (*VPD*) were the main factors of tree canopy transpiration. The *SFD* and *VPD*, photosynthetic active radiation (*PAR*) displayed similar trend over the study period and exhibited a unimodal curve. The value of *SFD* was higher in summer and fall, and lower in spring and winter. The relation between *SFD* and *PAR* showed significant difference, and there was relation between *SFD* and *VPD* to some extent, *SFD* and air temperature (*AT*) and *SFD* and soil temperature (*ST*). But the relation between *SFD* and air relative humidity (*RH*), *SFD* and soil moisture (*SM*) were not clear. These results showed that there were different patterns about the effects of different environmental factors on the sap flow density, but further experimental verification is needed how to further explore the *E. urophylla* × *E. grandis* respond to the environmental changes.

Key words: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, thermal dissipation probe, sap flow density, environmental factors

近年来为了满足经济快速发展对木材的需求,桉树作为一种速生丰产木材在全国特别是在华南地区大面积种植(祁述雄,2002)。这对缓解华南地区的木材短缺发挥着重要的作用,然而桉树人工林生态问题一直受到社会的普遍关注,尤其桉树的水分利用问题是人们争论和关注的焦点(白嘉雨和甘四湖,1996)。桉树对水分和养分利用率很高,在建立桉树生态林方面存在其可能性和可行性(杨民胜等,2006;于福科等,2009;Forrester et al, 2010)。但从另一个角度来讲,桉树人工林经常被认为大量耗水及破坏当地生态环境,大面积种植桉树势必会对当地水文过程以及生态环境造成负面的影响。目前,水资源短缺已成为突出的环境问题,如何权衡人工林种植与水资源的关系是亟待解决的问题,树木的蒸腾耗水量是人工林树种选择的重要参数(Poore & Fries, 1985;Calder,1992;Dye, 1996)。

目前研究蒸腾作用的技术很多,其中热技术根据不同原理及适用范围可分为热脉冲法、热平衡法、热扩散法(Swanson, 1994)。热扩散法(thermal dissipation probe method, TDP)在研究植物水分利用方面有其自身的优点,目前越来越多地被利用于研究树木的水分利用(Granier et al, 1992, 1996a;Lostau et al, 1996;赵平等,2005),该方法的基本理论是植

物根系吸收的水分仅少部分用于自身结构组成,而大部分通过蒸腾散失到大气中(Schulze et al, 1987),所测定的通过树干木质部液流量,经转化求算等同于冠层蒸腾量(Kozłowski et al, 1996)。因此,本研究利用TDP对尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)的树干液流进行监测,分析尾巨桉个体和总体的树干液流特征及其与周围环境因子的关系,探讨不同个体尾巨桉间的液流规律及其年际变化特征,旨在为桉树水资源利用研究提供基础数据,为进一步桉树人工造林耗水的估算和水资源管理提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 实验样地

野外观测地位于鹿寨县的广西黄冕林场波寨分场,地理坐标为 $24^{\circ}48' \text{ N}$, $109^{\circ}53' \text{ E}$,海拔为300~350 m,林地土壤主要是砂页岩发育而成的红壤。年均气温 19° C ,年均降雨量 $1\ 750\sim 2\ 000 \text{ mm}$,降雨量集中在4~8月;年均蒸发量 $1\ 426\sim 1\ 650 \text{ mm}$ 。

样地位于东向坡地的尾巨桉人工纯林,林龄为4~5 a。所选样地面积为 400 m^2 ($20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$),样地内共有尾巨桉55株,平均胸径为9.60 cm,林分种

植密度为 $1\ 375\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在样地内选取生长状况良好的 15 棵尾巨桉作为观测样树。

1.2 实验方法

1.2.1 样树树形特征的测定 边材厚度(T_s)的测定方法参见周翠鸣等(2015)试验材料的相关内容,测定边材厚度,建立胸径与边材厚度的关系式(Schäfer et al, 2000)。

$$T_s = a(DBH)^b \quad (1)$$

式中, a, b 分别为通过非线性回归分析得出的系数,本研究中 $a = 0.6473, b = 0.8107$ 。通过这个关系式可以计算得到本实验样树的边材厚度。

1.2.2 树干液流的测定 根据 2012 年 6 月样地样方里基本特征调查结果,按实际分布状况从中随机选取 15 株样树,采用 Granier 针法测定样树液流密度,该方法具有准确、稳定和连续不间断的特点(Granier 1987; Granier et al, 1992)。具体方法见蔡锡安等(2010)、王华等(2007)、赵平等(2005)。温差变化反映树木的液流密度(sap flux density, SFD), Granier(1987)建立了反映二者关系的经验公式。

$$J_s = 119 \times [(\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T]^{1.231} \quad (2)$$

式中, J_s 为瞬时液流密度($\text{gH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔT_m 为昼夜最大温差, ΔT 为瞬时温差。

探针外用塑料盖保护以防止机械损伤,并用太阳膜包裹,减少热辐射和雨水浸入的干扰(赵平等, 2005)。借助 Baseline 3.0 软件,将从数据采集仪直接下载的原始电压数据转换成连续性的液流密度值(赵平等, 2005)。

1.2.3 环境因子的观测 林内建有可供长期生态定位研究的观测塔(24 m),在塔顶安装光合有效辐射传感器(LI-COR, USA)和空气温湿度传感器(RHT2nl-02, Delta-T Devices Ltd, UK)。同时,在土壤 30 cm 处理设土壤温湿度传感器(SM300, Delta-T Devices Ltd, UK) 3 套,使用 Delta-T 数据采集仪采集数据,其读数频率与液流值同步(周翠鸣等, 2011, 2012)。

采用水汽压亏缺(VPD , kPa)反映空气温度(AT , $^{\circ}\text{C}$)和空气相对湿度(RH , %)的协同作用。

$$VPD = ae^{\left(\frac{bT}{T+c}\right)} (1 - RH) \quad (3)$$

式中,常数 a, b, c 分别为 $0.611\ \text{kPa}, 17.502$ 和 $240.97\ ^{\circ}\text{C}$ (Campbell & Norman, 1998)。

1.2.4 统计分析 采用 Excel 进行数据分析及作图。从样树平均液流密度长时间尺度上分析液流特征变

化,以及不同个体之间的液流密度差别,通过曲线参数估计法分析树干液流密度与各环境因子之间的回归关系。

2 结果与分析

2.1 实验的可行性

通过公式(1)可计算样地内 15 棵样树的边材厚度(表 1)。

表 1 尾巨桉形态特征

Table 1 Morphological characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

树号 Tree Number	胸径 Diameter at breast height (cm)		边材厚度 Sapwood thickness (cm)	
	2012 年 6 月 June 2012	2013 年 7 月 July 2013	2012 年 6 月 June 2012	2013 年 7 月 July 2013
	1	8.70	10.85	3.74
2	10.60	12.90	4.39	5.15
3	10.39	12.20	4.32	4.92
4	8.06	9.00	3.51	3.84
5	10.63	12.86	4.40	5.13
6	10.12	12.00	4.23	4.85
7	8.89	10.50	3.81	4.35
8	9.43	11.50	3.99	4.69
9	9.14	10.80	3.89	4.46
10	8.37	9.78	3.62	4.11
11	8.50	9.30	3.67	3.95
12	9.92	11.22	4.16	4.60
13	8.25	10.30	3.58	4.29
14	14.11	14.20	5.53	5.56
15	16.06	17.70	6.15	6.65

大部分乔木树干包括边材和心材两部分。边材主要起传输水分和营养元素的作用,而心材是内部不具传输功能的死细胞(王兴昌等, 2008)。从表 1 可以得出,本研究的样树边材厚度均超过实验需要的 2 cm,所以避免了探针被插入心材的可能。

2.2 尾巨桉日液流密度年变化特征

从图 1 可以看出,2012 年与 2013 年的液流密度相差并不大,且有一样的季节变化规律,都表现出夏秋季节高,春冬季节低,大小基本维持在同一个水平,说明尾巨桉边材最外面 2 cm 的液流密度比较稳

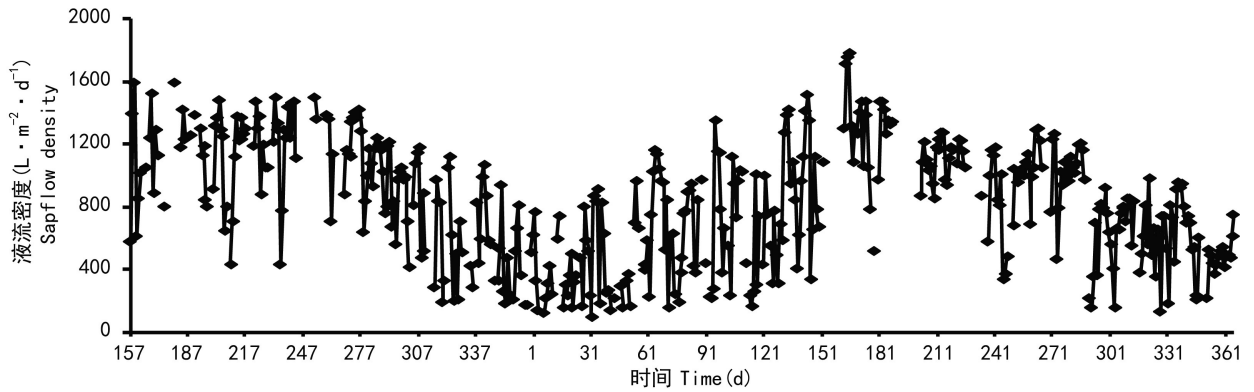


图 1 尾巨桉全年日液流密度变化

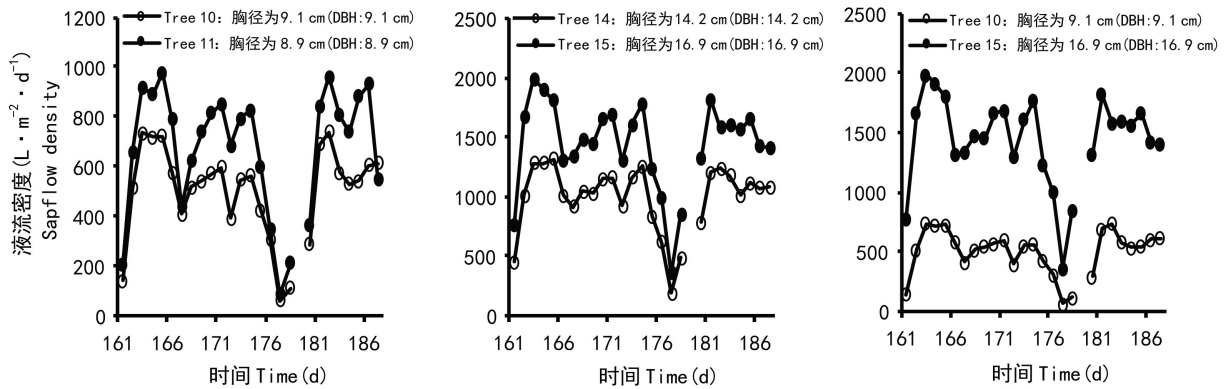
Fig. 1 Sapflow density changes of *E. urophylla* × *E. grandis* throughout the year

图 2 不同胸径尾巨桉液流密度的变化特征

Fig. 2 Sapflow density changing characteristics of *E. urophylla* × *E. grandis* of different diameters at breast height

定。从图 1 可以看出,本研究中尾巨桉最大值没有超过 $2000 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,通过计算得到日液流密度平均值为 $830 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.3 不同胸径尾巨桉日液流密度的变化特征

根据 2013 年 6 月对样树胸径的调查,分别选择其中生长较旺盛的 14 号、15 号样树和生长较弱的 10 号、11 号样树进行比较,选择 2013 年 6 月 10 日至 7 月 6 日的数据进行分析。从图 2 可以看出,树木胸径相差不大时(如 10 号与 11 号样树相差 0.2 cm;14 号与 15 号样树相差 2.7 cm),日平均液流密度很接近,而当胸径相差很大时(如 10 号与 15 号样树相差 7.8 cm),日平均液流密度也相差显著。虽然胸径大小对树干液流密度有一定的影响,但是不同胸径日平均液流密度变化规律是一致的。

2.4 SFD 与 PAR 和 VPD 的关系

从图 3 可以发现,尾巨桉日液流密度和 PAR、

VPD 在大时间尺度上有比较好的同步性,都呈现出夏秋季节较高,春冬季节较低,一整年呈现出单峰变化规律,三者 在时间上表现出来吻合的变化规律,也正说明了 PAR 和 VPD 是植物光合作用和水分利用的主要影响因子,植物早晨光合作用和水分流动主要是受光合有效辐射和周围环境水汽压亏缺的影响,才会逐渐打开气孔,随后树干液流慢慢开始,周而复始形成了这种固定的同步性模式。Oren & Pataki (2001) 通过研究也发现,太阳辐射和水汽压亏缺是树木冠层蒸腾的主要动力,对树干液流的影响呈正效应。

2.5 日液流密度与各环境因子的关系

不同胸径的树干液流密度有一定的差别,说明密度大小在一定程度上受到树木的生物学结构影响,但是这并不是唯一的原因,同时还会受到其他因子的制约。生物学结构决定树体水分利用的潜在能

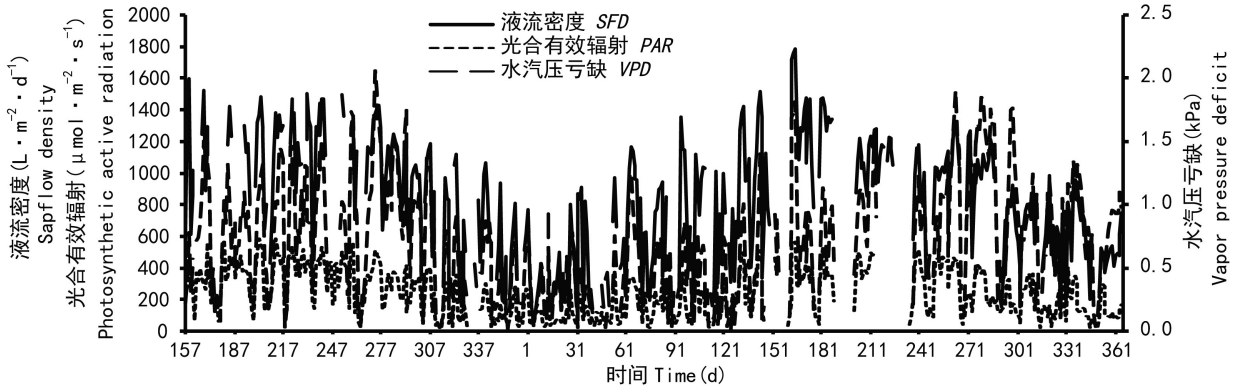


图3 液流密度与光合有效辐射、水汽压亏缺的年变化规律

Fig. 3 Annual changing rule of SFD and PAR, VPD

力,而环境因子决定了液流的瞬时变化(张宁南等, 2003)。从图4可以看出, *SFD* 与 *PAR* 关系比较明显,与 *VPD*、*AT*、*ST* 有一定的关系,而与 *RH* 和 *SM* 没有呈现规律。结果说明液流大小主要还是受光照大小的影响,同时也受到周围水汽压亏缺的制约,而水汽压亏缺是空气温度和空气相对湿度的综合反应。同时也发现, *PAR* 和 *VPD* 对 *SFD* 的影响是刚开始变化幅度比较大,慢慢变得平缓,而 *AT* 和 *ST* 对 *SFD* 的影响则刚好相反,是开始比较平稳,当温度达到 25 °C 以上时, *SFD* 变化程度加大,因此,说明不同环境因子对 *SFD* 存在不同的影响模式。

3 讨论与结论

从尾巨桉一年半液流监测结果来看,发现 2012 年 6 月至 2013 年 12 月间并没有大的变化,呈现出比较稳定的趋势,说明随着时间的变化,液流密度受到生理结构影响的同时,可能也在一定程度上受到周围环境的制约,两者共同制约了液流密度的大小。本实验中尾巨桉日液流密度最大值没有超过 2 000 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,日平均值为 830 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,比张宁南等(2007)对雷州半岛纪家尾叶桉人工林得出的日均液流密度 1 839 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 要低很多,可能是由于实验样地所处地理位置的不同,本实验样地处于土层较薄的山地,而张宁南等(2007)实验样地所处位置土壤层深厚,属热带海洋性气候,光照、水分和土壤都相对比较丰富,更有利于桉树的生长;所使用样树树种虽然都是桉树,但是具体品种不一样,本实验所使用的尾巨桉与张宁南等(2007)使用的尾叶

桉在结构上会有差别,因此也会出现结果差异性,进行实验的时间段不一样,本实验是整年日均值,而张宁南等(2007)是在蒸腾较大的月份进行实验。这些只是推测存在差异性的原因,而具体原因需要更进一步的研究去探讨。

植物生物学特征决定了植物树体水分利用的潜在能力,而树干是其水分运输的主要载体,根系从土壤吸收水分以后,通过树干边材中的导管运输到冠层各部位,树干中的导管大小必会影响水分的运输,不同胸径大小的树干结构也会不一样。通过同步比较不同胸径尾巨桉液流密度大小,发现胸径相近的树木液流密度相似,而当胸径相差比较大时,树木液流密度也相差很大,相差最大时达到了差值 1 300 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,这主要与植物生理结构有关,因为多数树种导管由内而外逐渐增大,导管直径逐渐增大(王华田, 2002),这样胸径大的树木液流就会相对较快,同时大树根系也比较发达,有利于从深层土壤吸收水分,尤其在缺少土壤水分,张宁南等(2007)通过对雷州半岛的尾叶桉液流密度监测也得出了相似结论。人工林树种组成单一、所处环境条件一致,可以通过选择测定不同径阶标准木液流密度进行推算整个林分平均液流密度(Mahmood et al, 2001)。

光合有效辐射、水汽压亏缺与树干液流之间相关显著,三者有相似的变化规律,如 Granier et al (1992, 1996)研究证实了液流对水汽压亏缺的敏感性;有学者发现木薯 (*Manihot esculenta*) 的液流与总辐射相关性极显著(Oguntunde, 2005);此外,Phillips et al(1999)对 10 个树种和 2 种藤本植物的研究也表明,液流密度的日变化主要受总辐射的影

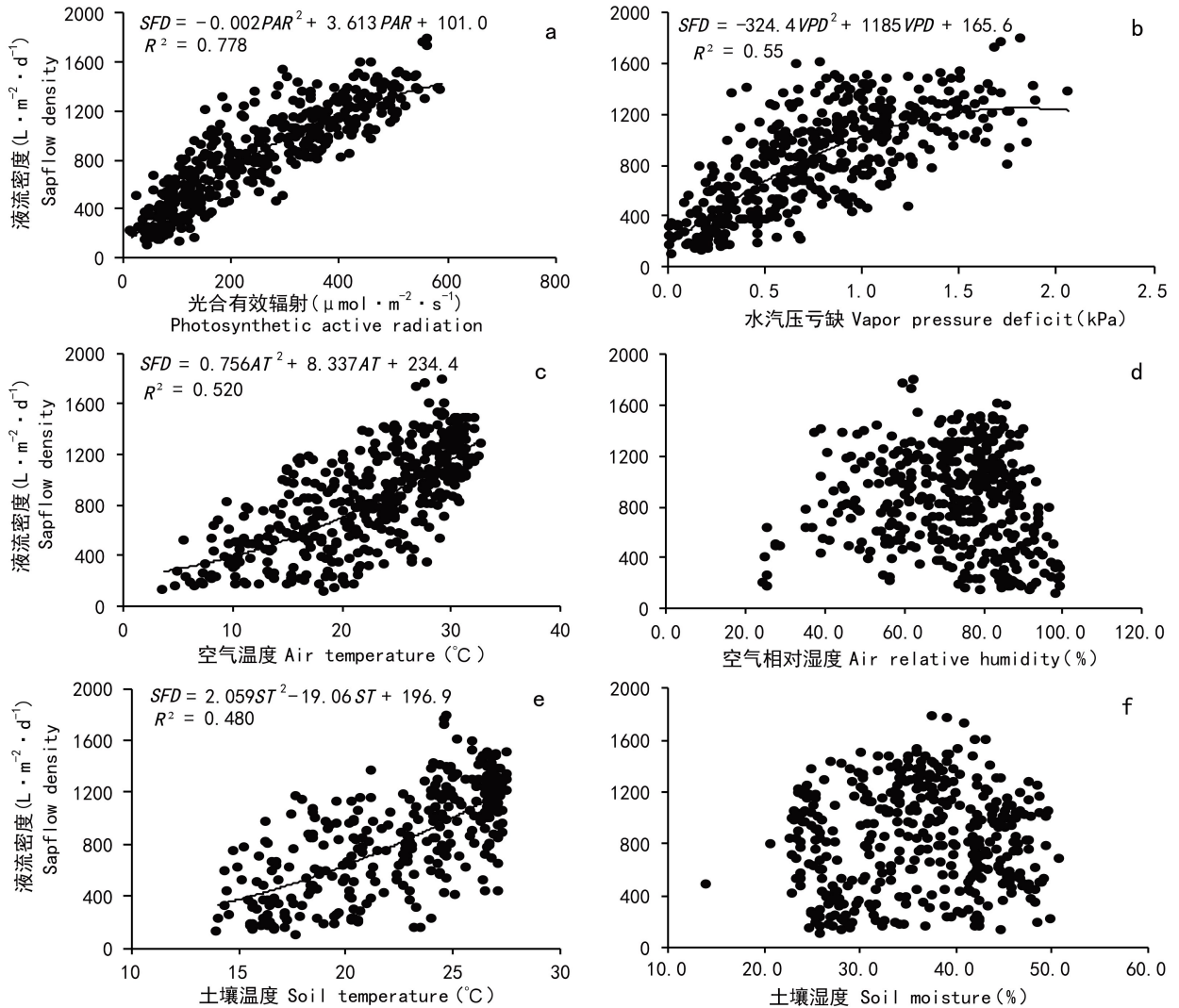


图 4 液流密度与各环境因子的关系

Fig. 4 Relationships between sap flow density and various environmental factors

响。通过对样地主要环境因子与 SFD 的分析发现, SFD 和 VPD 、 PAR 年变化有很好的同步性, 都呈现出夏秋季节较高, 春冬季节较低的规律。其他研究中对不同树种液流与环境因子关系的研究, 也发现 VPD 和 PAR 是液流的主要因子, 随着 PAR 和 VPD 的变化, 树干液流也会呈现明显的规律性变化(马玲等, 2005; 孙慧珍等, 2005)。

回归分析结果也证明了 SFD 和 VPD 、 PAR 的相关性比较高, 其次是 AT 、 ST 与 SFD 有一定的相关性, 而 RH 、 SM 与 SFD 相关性并不明显, 可能只是作为限制因子控制水分供应, 而不直接影响树木液流流动。 PAR 和 VPD , 以及 AT 和 ST 对 SFD 的影响存在不同模式, 刚开始影响程度大, 慢慢变得平缓, 表

明 SFD 对 PAR 和 VPD 表现更为敏感, 而 AT 和 ST 达到一定值后才会对 SFD 有比较明显的影响。通过分析液流密度与各环境因子的关系, 目前已经得到了一定的结论, 但只是证明了这些规律的存在, 为了更深入地探讨环境因子对液流的影响或者是液流是如何响应环境因子的变化, 是今后工作中着重研究的方向, 只有更好地了解这些机理, 才能为桉树人工林的建立提供可靠的理论依据。

参考文献:

- BAI JY, GAN SM, 1996. Social, economical and ecological significance of *Eucalyptus* plantation [J]. World For Res, 9(2): 63-68. [白嘉雨, 甘四明, 1996. 桉树人工林的社会、经济和生态问题 [J]. 世界林业研究, 9(2): 63-68.]

- CAI XA, ZHAO P, LU P, et al, 2010. Solutions to common problems for measurement of tree transpiration using Granier's sap flow system [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 18(3): 326-334. [蔡锡安, 赵平, 陆平, 等, 2010. Granier 树干液流测定系统在树木蒸腾研究中常见问题的解决方案 [J]. 热带亚热带植物学报, 18(3): 326-334.]
- CALDER I, 1992. Water use of *Eucalypts*-a review [C] // Growth and water use of forest plantation. England, Chichester: John Wiley Sons: 167-179.
- CAMPBELL GS, NORMAN JM, 1998. An introduction to environmental biophysics [M]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag: 36-51, 221-246.
- DYE PJ, 1996. Climate, forest and stream flow relationships in South Africa afforested catchments [J]. *Commonw For Rev*, 75: 31-38.
- FORRESTER DI, THEIVEYANATHAN S, COLLOPY JJ, et al, 2010. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globules* and *Acacia mearnsii* plantation [J]. *For Ecol Manag*, 259: 1761-1770.
- GRANIER A, 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiol*, 3(4): 309-320.
- GRANIER A, HUC R, COLIN F, 1992. Transpiration and stomatal conductance of two rain forest species growing in plantations (*Simarouba amara* and *Goupia glabra*) in French Guyana [J]. *Ann For Sci*, 49: 17-24.
- GRANIER A, HUC R, BARIGAH ST, 1996a. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. *Agr For Meteorol*, 78: 19-29.
- GRANIER A, BIRON P, KÖSTNER B, et al. 1996b. Comparison of xylem sap flow and water vapor flux at stand level and derivation of canopy conductance for Scots pine [J]. *Theor Appl Climatol*, 53: 115-122.
- KOZLOWSKI TT, KRAMER PJ, PALLARDY SG, 1996. Physiology of woody plants [M]. US: Academic Press.
- LOSTAU D, BERBIGER P, ROUMAGNAC P, et al, 1996. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. Seasonal course of water flux through maritime pine [J]. *Oecologia*, 107: 33-42.
- MAHMOOD K, MORRIS J, COLLOPY J, et al, 2001. Groundwater uptake and sustainability of farm plantations on saline sites in Punjab Province, Pakistan [J]. *Agr Water Manag*, 48: 1-20.
- MA L, ZHAO P, RAO XQ, et al, 2005. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin*, 25(9): 2145-2151. [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 [J]. 生态学报, 25(9): 2145-2151.]
- OREN R, PATAKI DE, 2001. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests [J]. *Oecologia*, 127: 549-559.
- OGUNTUNDE PG, 2005. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand [J]. *Plant & Soil*, 278: 371-383.
- POORE MED, FRIES C, 1985. The ecological effects of *Eucalyptus* [A]. FAO Forestry Paper 59. Rome: FAO: 87.
- PHILLIPS N, OREN R, ZIMMERMANN R, et al, 1999. Temporal patterns of water flux in trees and lianas in a Panamanian moist forest [J]. *Trees*, 14: 116-123.
- QI SX, 2002. *Eucalyptus* in China [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House: 22. [祁述雄, 2002. 中国桉树 [M]. 第2版. 北京: 中国林业出版社: 22.]
- SCHÄFER KVR, OREN R, TENHUNEN JD, 2000. The effect of tree height on crown level stomatal conductance [J]. *Plant, Cell Environ*, 23:365-375.
- SCHULZE ED, ROBICHAUX RH, GRACE J, et al, 1987. Plant water balance [J]. *Biol Sci*, 37:30-37.
- SWANSON RH, 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees [J]. *Agr For Met*, 72:113-132.
- SUN HZ, SUN L, WANG CK, et al, 2005. Sap flow of the major tree species in the eastern mountainous region in northeast China [J]. *Sci Sil Sin*, 41(3): 36-42. [孙慧珍, 孙龙, 王传宽, 等, 2005. 东北东部山区主要树种树干液流研究 [J]. *Sci Sil Sin* (林业科学), 41(3): 36-42.]
- WANG XQ, WANG CK, ZHANG QZ, et al, 2008. Growth characteristics of heartwood and sapwood of the major tree species in northeastern China [J]. *Sci Sil Sin*, 44(5):102-108. [王兴昌, 王传宽, 张全智, 等, 2008. 东北主要树种心材与边材的生长特征 [J]. *林业科学*, 44(5):102-108.]
- WANG H, ZHAO P, WANG Q, et al, 2007. Characteristics of nighttime sap flow and water recharge in *Acacia mangium* trunk [J]. *Chin J Ecol*, 26(4): 476-482. [王华, 赵平, 王权, 等, 2007. 马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析 [J]. *生态学杂志*, 26(4): 476-482.]
- WANG HT, 2002. Studies on water consumption characteristics of the main tree species in the water protection forest area of Beijing [D]. Beijing: Beijing For Univ. [王华田, 2002. 北京市水源保护林区主要树种耗水性的研究 [D]. 北京: 北京林业大学.]
- YANG MS, WU ZH, CHENG SX, 2006. Ecological effect of *Eucalyptus* forest and its ecological forest management [J]. *Eucalypt Sci & Technol*, 23(1): 2-39. [杨民胜, 吴志华, 陈少雄, 2006. 桉树的生态效益及其生态林经营 [J]. *桉树科技*, 23(1): 2-39.]
- YU FK, HUANG XH, WANG KQ, et al, 2009. An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 17(2): 393-398. [于福科, 黄新会, 王克勤, 等, 2009. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 17(2): 393-398.]
- ZHANG NN, XU DP, JIM MORRIS, et al, 2003. Characteristics of sap flow in *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula [J]. *For Res*, 16(6): 661-667. [张宁南, 徐大平, JIM MORRIS, 等, 2003. 雷州半岛尾叶桉人工林树液流特征的研究 [J]. *林业科学研究*, 16(6): 661-667.]
- ZHANG NN, XU DP, JIM MORRIS, et al, 2007. Water consumption of *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula [J]. *For Res*, 20(1): 1-5. [张宁南, 徐大平, JIM MORRIS, 等, 2007. 雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究 [J]. *林业科学研究*, 20(1): 1-5.]
- ZHAO P, RAO XQ, MA L, et al, 2005. Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 13(6): 457-468. [赵平, 饶兴权, 马玲, 等, 2005. 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*, 13(6): 457-468.]