

外来引种树种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异^{*}

孙振伟^{1,2} 赵平^{1**} 牛俊峰¹ 倪广艳¹ 朱丽薇¹ 高建国¹ 赵秀华^{1,2}
张振振^{1,2} 周娟^{1,2}

(¹中国科学院华南植物园, 广州 510650; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为明确华南地区大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)和柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)水分利用特征的季节动态变化,利用 Granier 热消散探针针对广东地区两种引进乔木的树干液流进行了连续的长期监测,并同步监测了样树周围的环境因子。结果表明:2种乔木的液流在任何季节都表现出明显的昼夜变化规律,大叶相思的液流峰值和均值都显著高于柠檬桉;液流与环境因子之间的时滞关系因树种和季节的差异而有所不同;光合有效辐射、水汽压亏缺、空气湿度、气温均与液流速率显著相关,冬季光合有效辐射为主导因子,夏季水汽压亏缺为主导因子;比较径级相同、边材面积相似的大叶相思和柠檬桉发现,前者的日蒸腾耗水量显著大于后者,大叶相思蒸腾耗水的季节差异要比柠檬桉更加显著;研究还发现,柠檬桉的边材厚度随年龄的增长而下降;从蒸腾耗水能力的差异可以看出,20世纪80年代中期种植的柠檬桉显然比同龄大叶相思衰退更快。

关键词 大叶相思;柠檬桉;树干液流;环境因子;蒸腾耗水量

中图分类号 Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)10-2588-08

Seasonal variations of sap flow and transpiration water consumption of introduced tree species *Acacia auriculaeformis* and *Eucalyptus citriodora*. SUN Zhen-wei^{1,2}, ZHAO Ping^{1**}, NIU Jun-feng¹, NI Guang-yan¹, ZHU Li-wei¹, GAO Jian-guo¹, ZHAO Xiu-hua^{1,2}, ZHANG Zhen-zhen^{1,2}, ZHOU Juan^{1,2} (¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(10): 2588–2595.

Abstract: By the method of Granier's thermal dissipation probe, the sap flow density of two exotic tree species (*Acacia auriculaeformis* and *Eucalyptus citriodora*) in South China was continuously measured in 2013, and the environmental factors including photosynthetically active radiation (*PAR*), soil water content (*SWC*), air temperature (*T*) and air relative humidity (*RH*) were measured simultaneously, aiming to characterize the seasonal variations of water use in the two tree species. Obvious diurnal variation patterns of sap flow for both species were observed in any season, yet the average and maximum flow rates were consistently higher in *A. auriculaeformis* than in *E. citriodora*. Cross-correlation analysis showed that the time lag was correlated with tree species and seasons, and sap flow rates were significantly correlated with *PAR*, *T*, *RH* and water vapor pressure deficit (*VPD*). *PAR* and *VPD* were the dominant factors in winter and summer, respectively. With similar sapwood area and diameter in breast height, water consumption of *A. auriculaeformis* was significantly higher than that of *E. citriodora*. Seasonal variation of transpiration in *A. auriculaeformis* was more significant than that in *E. citriodora*. Sapwood depth in *E. citriodora* decreased rapidly with age, which resulted in its lower transpiration rate. Thus,

^{*} 国家自然科学基金项目(41030638、41275169、31170673)和广东省自然科学基金项目(S2012020010933)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: zhaoping@scib.ac.cn

收稿日期: 2014-03-25 接受日期: 2014-06-26

the trees of *E. citriodora* planted in the mid-1980s senesced earlier than their peers of *A. auriculaeformis*.

Key words: *Acacia auriculaeformis*; *Eucalyptus citriodora*; sap flow; environmental factors; transpiration water consumption.

保护生态环境和构建城市绿地系统是目前社会发展的两大重要内容,而外来树种的引进则是推进中国绿化事业发展的重要条件(李叶等,2010)。许多引进植物由于具备生长迅速及适应性强的特点而被广泛种植,并对一些地区的生态恢复起到了积极的推动作用(彭舜磊等,2012)。大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)是一种常绿乔木,原产于澳大利亚、巴布亚新几内亚及印度尼西亚,由于具有适应性强、速生丰产、固氮能力强等特点,该乔木被认为是在我国北回归线以南地区具有广阔发展前景的荒山造林、园林绿化及环境保护树种,自20世纪60年代初以来,我国华南地区进行了大面积人工种植的大叶相思林(张卫华等,2012)。柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)也是原产于澳大利亚,由于其生长迅速且适应能力强,世界许多国家和地区相继引种(陈婷婷等,2012)。我国从澳洲引入柠檬桉已有百余年的历史,在华南地区大面积推广,并且形成了规模庞大的桉树林场(尹光彩等,2003)。这些外来引进植物的高生产力意味着高的耗水需求,水分成了限制其立地生长的主要因子之一,大面积种植必然会改变区域的水文景观,使人们对由此引发的水量平衡问题产生担忧。因此,了解引进植物对水分的利用特点,对于引进植物的迁地保护和水资源管理具有重要意义。对于速生期桉树与其他树种之间蒸腾耗水的比较,一些学者(陈金梅等,2013)已经进行了研究,但是对于生长衰退期桉树与其他树种耗水量比较的研究还不多见。本研究选取了20世纪80年代中期种植的大叶相思和柠檬桉,旨在探明该年龄段两树种的蒸腾耗水情况。

为了能够准确地揭示植物的水分利用特征,国内外许多植物生理学家提出了多种测量方法,其中热消散探针法(thermal dissipation probe, TDP)由于能够在保持植物自然生长状态不变的条件下,连续动态监测树干液流而被众多的学者广泛采用(Granier & Loustau, 1994; Du *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012)。本研究利用TDP技术对广东地区大叶相思和柠檬桉的树干液流进行连续测定,并同步监测光合有效辐射(PAR)、气温(*T*)、空气相对湿度

(RH)、土壤含水量(SWC)等环境因子,探讨2种乔木的液流变化规律、树种间差异及其对环境因子的响应,以期为森林经营与优化管理以及营林树种的选择提供基于树木的水分利用特征的观测实验依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究样地与样树

试验样地位于广州市中国科学院华南植物园小青山地带性植被生态系统观测场。该试验样地处于典型的亚热带海洋性季风气候区,全年太阳辐射强烈,高温多雨。年降雨量1600~1800 mm,但降雨分配不均(图1),4—9月为雨季,降雨量占全年的80%以上。年均气温22.4℃,平均最高气温出现在7月(28.9℃),平均最低气温出现在1月(13.9℃)。土壤为中壤土,pH值约为4,表土有机质含量1.52%~2.82%。雨热同季的特点使该地区植被具有较高的生产力。

观测实验在实验区内于20世纪80年代中期种植的大叶相思人工林和柠檬桉人工林进行,分别选择具有代表性的、长势良好的大叶相思和柠檬桉各3棵作为测定树干液流的样树(表1)。

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流的测定 应用Granier热消散探针,对样树进行长期的连续监测。为避免太阳光直射引

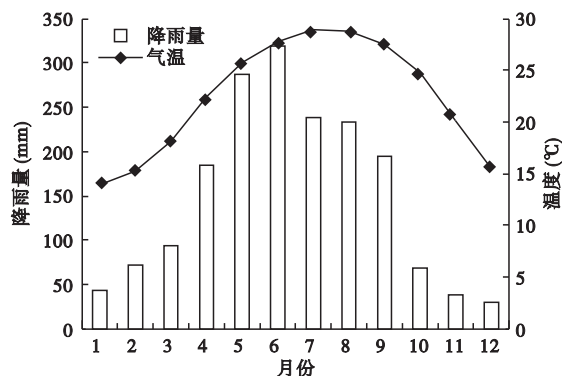


图1 试验区月平均气温和降雨量(1981—2010)

Fig.1 Averaged monthly air temperature and rainfall in experimental site (1981–2010)

表 1 样树基本特征
Table 1 Features of sampling trees

树种	树号	树高 (m)	胸径 (cm)	冠层厚度 (m)	冠层投影 面积(m ²)	边材面积 (cm ²)
大叶相思	1	15.3	18.7	4.0	8.9	85.6
	2	20.0	26.7	4.5	14.9	141.2
	3	23.0	37.4	5.9	45.1	226.9
柠檬桉	1	14.5	12.7	4.7	3.0	36.2
	2	21.1	22.0	7.4	5.9	101.9
	3	25.1	32.2	10.6	806.0	208.7

起测量误差,将探针安装在树干北面胸高处(1.3 m),一对探针垂直插入树木边材深度 20 mm,两探针之间的距离约 10 cm,上探针加热丝供应恒定 120 mA 的直流电,下探针作为参考不加热。用数据采集仪(DL2e)自动记录两探针的温度差信号,每隔 30 s 测读 1 次,每 10 min 进行一次平均并储存。液流密度由 Granier 建立的经验公式求出:

$$J_s = 199 \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

式中, J_s 为瞬时液流密度($\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔT_m 为上下探针的昼夜最大温差, ΔT 为瞬时温差(Granier, 1987)。借助美国杜克大学(Duke University)环境学院 Yavor 博士开发的 Baseliner 3.0 软件,将从数据采集仪直接卸载的原始电压数据转换成连续的液流密度值。

1.2.2 边材面积的确定 计算基于树干液流密度测定值的整树耗水或者整树蒸腾,需要获取树干液流流经的有效边材面积。为避免对样树树木的伤害,于样地外围附近选取 21 棵大叶相思和 25 棵柠檬桉,在树干胸高处(1.3 m)用生长锥钻取木栓,测量边材厚度,建立边材面积与胸径的关系式:

大叶相思: $y = 1.3900x^{1.4068}$ ($R^2 = 0.975$, $n = 21$)
柠檬桉: $y = 0.3032x^{1.8820}$ ($R^2 = 0.971$, $n = 25$)

结合表 1 样树的树形特征,利用以上关系式求出样树的边材面积。

1.2.3 环境因子的测定 在实验样地附近(直线距离约 70 m)的一片荷木(*Schima superba*)人工林内建有实验观测铁塔(18 m),在塔顶将空气温湿度传感器(HMP35E,芬兰 Vaisala 公司)和光合有效辐射传感器(Li-Cor Quantum Sensor,美国 Li-Cor 公司)安装冠层上方的空旷处,在土壤深处(30 cm)埋设土壤水分传感器(SM200-05,英国 Delta-T 公司)3 套,利用另一台数据采集仪(DL2e)记录环境监测数据,冠层光合有效辐射(PAR)、空气相对湿度(RH)、气

温(T)和土壤含水量(SWC)的观测频度与液流测定一致,同样是每 30 s 测读 1 次,每 10 min 进行平均并存储数据。

水汽压亏缺(VPD)是综合表达气温(T)和相对湿度(RH)协同作用的指标,采用下式计算:

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

式中,常数 a、b、c 分别为 0.611 kPa、17.50 和 240.97 °C(Campbell & Norman,1998)。

本文运用统计分析软件 SPSS 19.0 对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 液流密度的日变化和季节变化

根据全年的气候格局(图 1)可知,实验地所处地区具有明显的四季之分。一年中均温最高的连续 3 个月份(6—8 月)为夏季,而一年中均温最低的连续 3 个月份(12 月—翌年 2 月)为冬季,另外 2 个季度 3—5 月和 9—11 月则分别为春季和秋季。降雨量呈现出夏季>春季>秋季>冬季的特点。为清晰明了地观察两树种的液流密度变化特征,从能够代表一年中 4 个季节的典型月份(冬季 1 月、春季 4 月、夏季 7 月和秋季 10 月)的监测数据中分别选取连续 4 d 的数据进行作图分析(图 2)。

由图 2 可知:在监测阶段的任何季节里,2 树种的树干液流均表现出较明显的昼夜变化规律,即呈现出“昼高夜低”的单峰曲线。液流密度在白天的变化非常显著,主要集中在 8:00—21:00,13:00 左右达到峰值,之后开始降落。21:00 之后液流变得十分微弱,持续到凌晨基本停止,从凌晨到早晨 6:00 之前的一段时间液流几乎为零。

通过分别计算 2 树种代表不同季节的典型月份 4 个晴天的液流数据可知,大叶相思和柠檬桉在各个季节典型月份的最大值分别呈现春季>夏季>冬季>秋季和春季>夏季>秋季>冬季的特点(表 2)。大叶相思树干液流均值在 4 个季节中为春季最大秋季最小,分别为 23.27 和 14.07 $\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而柠檬桉在 4 个季节的液流均值则为夏季最大冬季最小,分别为 8.35 和 5.81 $\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比大叶相思和柠檬桉发现,在任何一个季节,大叶相思液流的平均值和最大值都显著高于柠檬桉,大叶相思的液流峰值是柠檬桉的 1.79~3.31 倍,大叶相思的液流均值是柠檬桉的 1.82~3.25 倍。

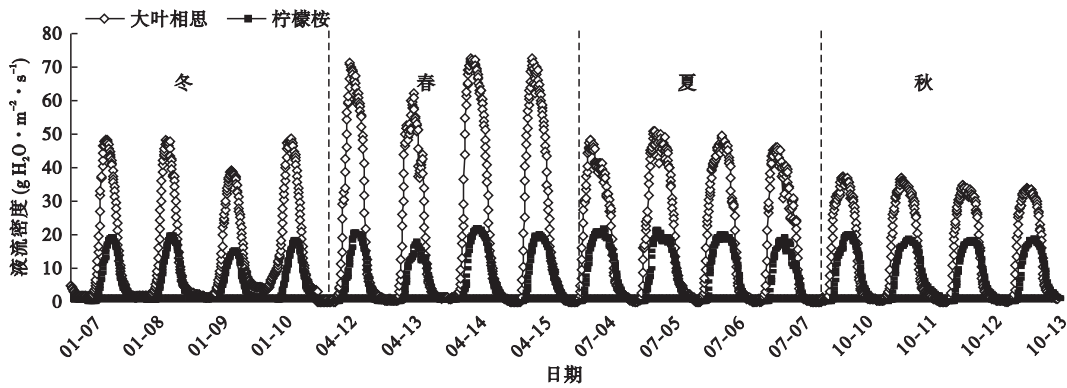


图 2 2013 年两树种树干液流不同季节的日变化
Fig. 2 Diurnal variation of stem sap flux density in two tree species in different seasons in 2013

表 2 两树种树干液流密度 ($\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 均值和峰值的四季变化

树种	冬季		春季		夏季		秋季	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
大叶相思	14.85 ± 4.64	48.54 ± 15.95	23.27 ± 4.92	72.65 ± 26.34	19.76 ± 2.09	51.04 ± 18.79	14.07 ± 1.64	37.28 ± 14.34
柠檬桉	5.81 ± 1.99	20.19 ± 6.34	7.03 ± 1.73	22.35 ± 7.72	8.38 ± 1.30	22.28 ± 8.03	7.85 ± 0.84	20.52 ± 7.36

2.2 不同季节的时滞特征

辐射和水汽压亏缺是调节叶片气孔变化、驱动树木蒸腾变化的重要因子,在一年 4 个季节的典型月份中,光合有效辐射和水汽压亏缺均有明显的昼夜变化(图 3)。对大叶相思及柠檬桉的液流与光合

有效辐射及水汽压亏缺数据分别进行逐步错位分析,当 R^2 值最大时,其时间差即为时滞。结果表明,光合有效辐射在任何一个季节的典型月份里都先于大叶相思和柠檬桉的液流达到峰值,其时差在春、夏、秋、冬分别为 40、40、20、70 min 和 70、70、90、100 min。

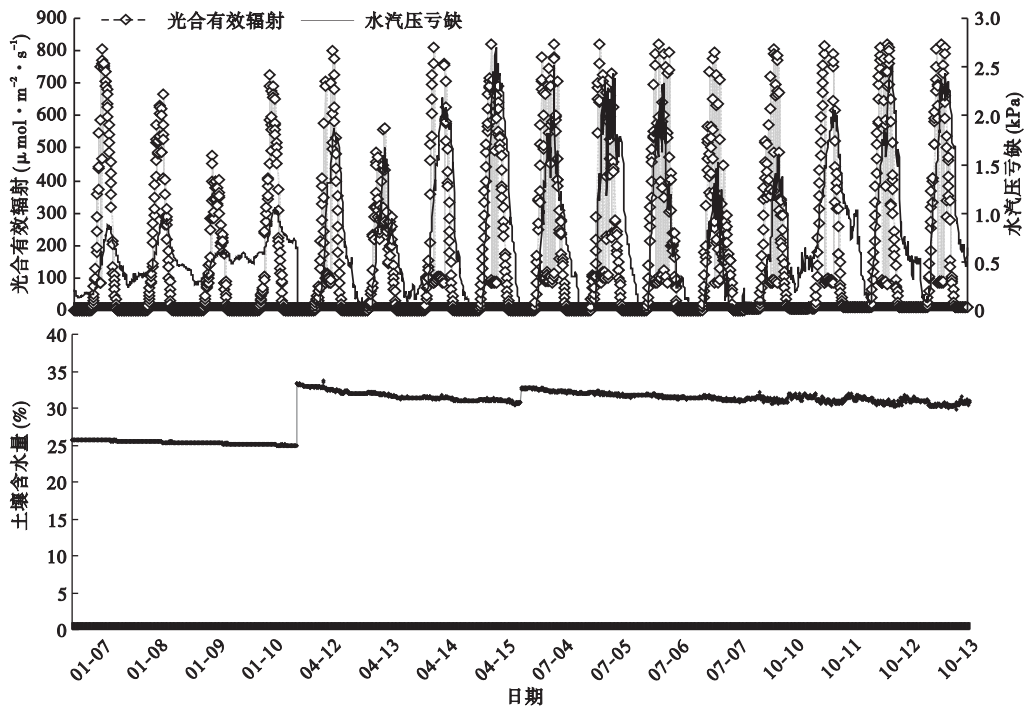


图 3 试验区不同季节环境因子的变化
Fig. 3 Diurnal variation of environmental factors in experimental site in different seasons

在冬夏两季,水汽压亏缺达到峰值的时间比大叶相思液流要晚 40 min,而在春秋季节,这个时差则为 90~100 min。水汽压亏缺和柠檬桉的液流在冬夏两季不存在时滞现象,在春秋两季则晚于液流达到峰值,时滞分别为 50 和 20 min。

2.3 2 种树木液流对环境因子响应的季节动态

在监测阶段的任何季节里,光合有效辐射和水汽压亏缺的日变化与 2 树种的液流密度日变化一致,均表现出较明显的昼夜变化规律;而土壤含水量在各个季节的日变化均极其不显著(图 2、图 3)。

进一步分析液流的变化和土壤含水量的相关关系发现,土壤含水量与 2 外来树种的液流密度的相关关系均不显著。将大叶相思和柠檬桉的液流数据和同步监测的气象数据进行 Pearson 相关性分析(表 3),结果发现:大叶相思和柠檬桉的液流对气象因子的响应随季节的变化而变化。在春夏两季,2 树种的液流均与水汽压亏缺的相关性最强。在冬季,影响 2 树种液流的主导气象因子是光合有效辐射。而在秋季,起主导作用的气象因子则分别为光合有效辐射和水汽压亏缺。在各个季节,空气温度和相对湿度对 2 树种液流的影响均小于水汽压亏缺和光合有效辐射。

为了更好地揭示各气象因子对树干液流活动的综合影响,采用多元线性逐步回归的方法,建立大叶相思和柠檬桉液流速率与各气象因子的多元线性回

归方程(表 4)。其中,液流密度为因变量,气温、相对湿度和光合有效辐射为自变量(因水汽压亏缺是气温和相对湿度共同作用的结果,故不参与建模)。多元回归方程方差分析结果显示,模型的显著性均小于 0.01,说明因变量与自变量间存在较强的线性相关关系。大叶相思和柠檬桉在冬春夏秋 4 个季节的 R^2 值分别为 0.829、0.830、0.776、0.735 和 0.779、0.830、0.842、0.881,说明方程均能较好地揭示液流速率和气象因子的变化规律。

2.4 2 树种的蒸腾耗水量

比较两树种蒸腾耗水量发现,桉树的蒸腾耗水量显著小于大叶相思(图 4)。计算一年四季中典型月份(1 月、4 月、7 月和 10 月)4 个晴天的日平均蒸腾耗水量(kg)得知,大叶相思耗水量分别为 20.11、31.06、27.50 和 17.05 kg,变异系数为 27%;柠檬桉耗水量分别为 6.12、6.77、7.85 和 7.64 kg,变异系数为 11%。大叶相思蒸腾耗水量最大和最小的月份分别出现在春季的 4 月和秋季的 10 月,而柠檬桉的则分别出现在夏季的 7 月和冬季的 1 月。柠檬桉日蒸腾耗水量最小月(1 月)比日蒸腾耗水最大月(7 月)下降了 22%,而大叶相思日蒸腾耗水量最小月(10 月)则比日蒸腾耗水量最大月(4 月)下降了 45%。通过 t 检验分析得知,大叶相思和柠檬桉之间的蒸腾耗水量季节差异显著。

表 3 不同季节树干液流速率与环境因子的偏相关分析
Table 3 Partial correlations between sap flow and environmental factors in different seasons

控制变量	分析变量	大叶相思				柠檬桉			
		冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季
RH PAR	T	0.062 **	0.509 **	-0.140 **	0.582 **	0.429 **	0.058	-0.207 **	0.339 **
PAR T	RH	-0.161 **	-0.479 **	-0.516 **	-0.115	-0.476 **	-0.614 **	-0.555 **	0.045
PAR	VPD	0.602 **	0.867 **	0.832 **	0.863 **	0.688 **	0.747 **	0.693 **	0.565 **
T RH	PAR	0.645 **	0.308 **	0.452 **	0.415 **	0.767 **	0.547 **	0.497 **	0.630 **

** $P<0.01$ 。

表 4 不同季节树干液流速率(y)与环境因子(x)的回归方程
Table 4 Multivariable regression equations of sap flow velocity (y) and environmental factors (x) in different seasons

树种	季节	回归方程	R^2	df	P
大叶相思	冬季	$y=14.853+1.649x_1-0.408x_2+0.473x_3$	0.829	575	0.000
	春季	$y=94.804-0.962x_2+0.049x_3$	0.830	575	0.000
	夏季	$y=289.720-4.063x_1-1.568x_2+0.037x_3$	0.776	575	0.000
	秋季	$y=-67.948+2.643x_1+0.029x_3$	0.735	575	0.000
柠檬桉	冬季	$y=-5.689+0.721x_1-0.003x_2+0.008x_3$	0.779	575	0.000
	春季	$y=0.919+0.582x_1-0.124x_2+0.005x_3$	0.830	575	0.000
	夏季	$y=12.698+0.593x_1-0.310x_2+0.007x_3$	0.842	575	0.001
	秋季	$y=-27.731+1.175x_1-0.036x_2+0.003x_3$	0.881	575	0.006

x_1 : 温度; x_2 : 湿度; x_3 : 光合有效辐射。

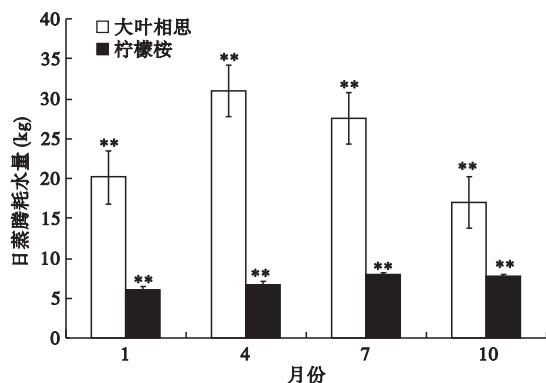


图4 两种树种不同季节日平均蒸腾量

Fig. 4 Average daily water consumption by transpiration of two species in different seasons

* * $P < 0.01$ 。

3 讨论

大叶相思和柠檬桉的树干液流无论是在哪个季节都表现出明显的昼夜变化规律,白天液流速率变化显著,夜晚也存在微弱的液流。原因可能是白天两种乔木蒸腾失水过多,造成树木体内的水分亏缺,因而树木要通过根压作用继续吸水,以维持自身正常的生理需求,所以夜晚树木通过根压吸收的水分对于植物体内水分的补充具有重要意义。大叶相思和柠檬桉的液流峰值均呈现明显的季节变化规律,一般来说春夏两季的液流较高,这主要是实验地所处的广州地区干湿季明显,春、夏季(3—8月)降雨量达到1355.4 mm,占年总降雨量的75%,而且湿季温度相对较高,光合有效辐射相对较为强烈,雨热同季的气候特点使得树木在雨季有较大的耗水需要,并获得较大的生产力。分析春季与夏季典型月份的环境因子,发现夏季温度较高而其他环境因子差异不显著。大叶相思在春季的液流峰值和均值却显著大于夏季,这可能是因为该树种在春季嫩芽新叶生长旺盛而导致了更强烈的耗水需求。

以液流反映的树木蒸腾往往滞后于树冠的实际蒸腾,即树干液流的时滞现象(王华等,2009)。基于树干液流计算冠层气孔导度和冠层蒸腾等生理学参数及其对环境的响应时,往往需要考虑时滞效应,否则会产生误差。一些学者发现,水汽压亏缺(VPD)和光合有效辐射(PAR)与树干液流之间时滞关系显著(马玲等,2005;黄德卫等,2012)。本研究发现,无论是干季还是湿季,大叶相思树干液流都滞后于PAR提前于VPD,且时滞效应季节差异显著,这与王华等(2008)的研究结果一致。对柠檬桉

的研究发现,无论是哪个季节,树干液流均滞后于PAR,但柠檬桉的液流与VPD在冬夏两季不存在时滞,这与王小菲等(2013)的研究结果又略有不同。可见,树干液流与环境因子之间的时滞因树种而异,这可能与树木的冠层结构、木质部结构和根部吸水能力等有关。因此,关于2种乔木的时滞特征还需更深入的研究。

树干液流速率除了与植物生长状况有关外,还受太阳辐射、水汽压亏缺、相对湿度、气温、土壤含水量等环境因子影响(Granier *et al.*, 1996; 吉春容等, 2013)。研究中未发现大叶相思和柠檬桉的树干液流与土壤含水量的相关关系,说明液流监测阶段不存在干旱对蒸腾的胁迫作用,这与许多学者的研究结果一致(张宁南等,2003;曹文强等,2004;马玲等, 2007;朱丽薇等,2010)。分析乔木树干液流与气象因子的偏相关关系,结果发现液流速率受气象因子的影响因季节而异。在夏季,大叶相思和柠檬桉的液流与光合有效辐射、水汽压亏缺呈正相关关系,与相对湿度、气温呈负相关关系,根据偏相关系数的绝对值大小可将相关性排序为:水汽压亏缺>相对湿度>光合有效辐射>气温。在冬季,2树种的液流与相对湿度呈负相关,与光合有效辐射、水汽压亏缺、气温呈正相关,相关关系排序为:光合有效辐射>水汽压亏缺>相对湿度>温度。在不同生长季节,对不同胸径类型树木起主要作用的环境因子也不尽相同,但是PAR和VPD是其中起主要作用的两个因子,这与王晶苑(2011)对浑善达克沙地榆树液流动态的研究结果一致,但与吴芳等(2010)对黄土高原半干旱区刺槐的研究结果略有差异。综合前人研究结果(马玲等,2005;吉容春等,2013;王文等,2013),发现影响液流变化的主导因子随树种、地域、季节的差异而有所不同;2树种液流的趋势性变化是气象因子共同作用的结果,与土壤含水量无关,表层土壤水分主要作为限制因子控制水分供应。

通过推算树木的蒸腾耗水量(赵平等,2006),可以比较同一生长环境中不同树种对水分吸收能力的差异,了解不同树种的耗水特征。王震洪等(1998)认为,桉树的大面积种植在给当地经济带来良好收益的同时,也对生态环境产生了不良的影响。在生长前期,由于具有生长速度快、光合及蒸腾作用强烈的特点,桉树需消耗大量的土壤水分,因此可能造成地下水位下降,产生一些生态水文问题(白嘉雨和甘四明,1996)。生长前期的桉树通常要比同

一环境下同龄的其他树种需要更多的水分,这也是桉树被称为“抽水机”的原因(尹光彩,2003)。许多学者发现,速生期的桉树具有较大的耗水需求,大面积的引种可能产生一系列的生态水文问题(白嘉雨和甘四明,1996;王震洪等,1998)。对比树龄近30年的大叶相思和柠檬桉蒸腾耗水特征发现,柠檬桉在各个季节的蒸腾耗水量均显著小于大叶相思。这一结果的出现可能是由两个方面的原因所致:一方面,桉树在生长过程中木质部结构发生了变化,对比不同年龄的桉树发现,桉树边材面积占整个横截面面积之比随年龄的增长而变小。5年生桉树心材几乎可能忽略不计,边材面积占到横截面面积的近100%(陈金梅等,2013);12年生桉树边材面积占横截面面积的比例约为74%(王小菲等,2013);本研究中,树龄近30年的桉树边材面积只占横截面面积的29%。另一方面,柠檬桉和大叶相思的液流格局随树龄的不同而变化。王小菲等(2013)在研究干热河谷造林树种时发现,12年生柠檬桉的液流大于同龄的大叶相思,而本研究中树龄近30年的柠檬桉平均液流密度显著小于同龄的大叶相思。Dunn(1993)研究发现,桉树单位边材面积的液流速率随着树龄的增大而减小。整树蒸腾由边材面积和液流速率共同决定(赵平等,2011),这也就导致了柠檬桉的蒸腾耗水量显著小于大叶相思。

大叶相思蒸腾耗水的季节差异要比柠檬桉更加显著。结合上述分析,2树种蒸腾耗水量的不同可能是导致这种差异的原因之一。柠檬桉的蒸腾耗水量较低,对土壤水分的要求也相对较低。相比柠檬桉,大叶相思对水分的需求量更大,当旱季降雨较少时,大叶相思对水分的利用更容易受到干旱的影响。另外,两树种的根系分布情况也有差异。相关研究显示:干热河谷10年生大叶相思的根系主要分布在0.4 m以上的土层,其中76.3%的根系分布在0~0.2 m的土层(高成杰等,2013);而海南地区3年生的桉树就已经有92.2%的根系伸入到了0~0.6 m的土层,其中有17.3%的根系分布在0.4~0.6 m的土层(王恩群等,2010)。由此可见,大叶相思根系的分布比桉树相对更浅,导致大叶相思的根部吸水在土壤水分不足的旱季更容易受到影响。

植物的蒸腾耗水主要受其自身生理特征和外部环境因子的影响。本研究对同一立地条件下,树龄近30年的柠檬桉和大叶相思的蒸腾耗水能力及其季节差异进行了比较和初步的分析。从蒸腾耗水能

力的差异可以看出,柠檬桉的衰退程度显然比大叶相思更快,明显的特征是柠檬桉的输水有效组织边材面积在变薄以及单位边材面积的液流速率在下降,这可以为柠檬桉人工林种植后期的林分改造提供参考。

参考文献

- 白嘉雨,甘四明. 1996. 桉树人工林的社会、经济和生态问题. 世界林业研究, **9**(2): 63–68.
- 曹文强,韩海荣,马钦彦,等. 2004. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究. 林业科学, **40**(2): 174–177.
- 陈金梅,李守中,林培治,等. 2013. 桉树与杉木树干液流特征对比研究. 福建林业科技, **40**(1): 6–11.
- 陈婷婷,黄炳生,周晓农,等. 2012. 柠檬桉叶挥发油化学成分气相色谱-质谱分析研究. 现代医药卫生, **28**(1): 3–5.
- 高成杰,唐国勇,李 昆,等. 2013. 干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征. 生态学报, **33**(6): 1964–1972.
- 黄德卫,张德强,周国逸,等. 2012. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系. 应用生态学报, **23**(5): 1159–1166.
- 吉春容,邹 陈,范子昂,等. 2013. 天山中段雪岭云杉树干液流变化及其与气象因子的关系. 干旱区资源与环境, **27**(12): 119–123.
- 李 叶,张川红,郑勇奇,等. 2010. 外来树种生态经济综合评价指标体系. 生态学杂志, **29**(5): 1039–1046.
- 马 玲,饶兴权,赵 平,等. 2007. 马占相思整树蒸腾的日变化和季节变化特征. 北京林业大学学报, **29**(1): 67–73.
- 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.
- 彭舜磊,王得祥,柴宗政. 2012. 外来树种华北落叶松引种对秦岭森林群落的影响. 生态学杂志, **31**(9): 2170–2176.
- 王恩群,余雪标,林培群. 2010. 超大宽行桉农间作模式下桉树人工林根系的研究. 广东农业科学, (3): 72–79.
- 王 华,欧阳志云,郑 华,等. 2009. 北京城区常见树种生长季树干液流的时滞特征. 应用生态学报, **20**(9): 2111–2117.
- 王 华,赵 平,蔡锡安,等. 2008. 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. 应用生态学报, **19**(2): 225–230.
- 王晶苑,蒋高明,刘美珍. 2011. 浑善达克沙地榆树干液流动态研究. 科技导报, **29**(25): 54–58.
- 王 文,朱 烨,诸葛绪霞,等. 2013. 尾巨桉树干液流特性及其影响因子分析. 水土保持通报, **33**(3): 159–164.
- 王小菲,孙永玉,李 昆,等. 2013. 干热河谷主要造林树种生长季树干液流的时滞特征. 江西农业大学学报, **35**(3): 462–467.

- 王震洪, 段昌群, 起联春, 等. 1998. 我国桉树林发展中的生态问题探讨. 生态学杂志, **17**(6): 64–68.
- 吴芳, 陈云明, 于占辉. 2010. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态. 植物生态学报, **34**(4): 469–476.
- 尹光彩, 周国逸, 王旭, 等. 2003. 应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究. 生态学报, **23**(10): 1984–1990.
- 张宁南, 徐大平, Morris J, 等. 2003. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究. 林业科学研究, **16**(6): 661–667.
- 张卫华, 张方秋, 王洪峰, 等. 2012. 大叶相思抗寒性选择研究. 广东林业科技, **28**(3): 32–36.
- 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 2006. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度. 植物生态学报, **30**(4): 655–665.
- 赵平, 邹绿柳, 饶兴权, 等. 2011. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化. 生态学报, **31**(20): 6038–6048.
- 朱丽薇, 赵平, 蔡锡安, 等. 2010. 荷木人工林蒸腾与冠层气孔导度特征及对环境因子的响应. 热带亚热带植物学报, **18**(6): 599–606.
- Campbell GS, Norman JM. 1998. An Introduction to Environmental Biophysics (2nd edition). New York: Springer-Verlag.
- Du S, Wang YL, Kume T, *et al.* 2011. Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**: 1–10.
- Dunn GM, Connor DJ. 1993. An analysis of sap flow in mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forests of different age. *Tree Physiology*, **13**: 321–336.
- Granier A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurement. *Tree Physiology*, **3**: 309–320.
- Granier A, Huc R, Barigah ST. 1996. Transpiration of natural forest and its dependence on climate factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, **78**: 19–29.
- Granier A, Loustau D. 1994. Measuring and modeling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **71**: 61–81.
- Wang H, Wang XK, Zhao P, *et al.* 2012. Transpiration rates of urban trees, *Aesculus chinensis*. *Journal of Environmental Sciences*, **24**: 1278–1287.

作者简介 孙振伟,男,1989年生,硕士研究生,主要从事植物生理生态学研究。E-mail: vvsunzhenwei@163.com
责任编辑 张敏
