

马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系

马玲^{1,2}, 赵平^{1*}, 饶兴权¹, 蔡锡安¹, 曾小平¹, 陆平³

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. CSIRO Plant Industry, Darwin Laboratory, PMB44, Winnellie, Darwin NT 0822, Australia)

摘要:运用 Granier 热消散式探针法对华南丘陵退化荒坡植被恢复先锋树种马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度进行长期连续观测,并对其周围环境因子如空气温度、空气相对湿度、土壤相对湿度、光合有效辐射和总辐射进行同步观测。通过分析发现马占相思边材厚度与胸径存在显著线性相关关系;马占相思树干液流密度最大值与边材面积具显著相关关系;马占相思树干东、南、西、北4个方位测得的液流密度具显著差异,且各方位相互之间均有显著相关关系;马占相思树干液流每天到达峰值与光合有效辐射和水蒸气压亏缺到达峰值存在一定的时滞,这两个时滞与树高无关,个体间时滞差异在湿季较小,干季较大;干季液流平均值和最大值具显著差异,湿季蒸腾水量大于相同时间内干季蒸腾水量;液流的变化与空气温度、空气相对湿度、光合有效辐射、总辐射、水蒸气压亏缺等环境因子的变化具显著相关关系,按相关程度排序为:光合有效辐射>总辐射>水蒸气压亏缺>空气相对湿度>空气温度。

关键词:Granier 热扩散式探针法;马占相思;树干液流;时滞;环境因子

文章编号:1000-0933(2005)09-2145-07 **中图分类号:**Q948.11, S718 **文献标识码:**A

Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium*

MA Ling^{1,2}, ZHAO Ping^{1*}, RAO Xing-Quan¹, CAI Xi-An¹, ZENG Xiao-Ping¹, LU Ping³ (1. South China Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. CSIRO Plant Industry, PMB44, Darwin NT 0822, Australia). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2145~2151.

Abstract: *Acacia mangium* is one of the pioneer tree species of re-vegetation in degraded hilly lands in South China. Whole-tree sap flow in an *A. mangium* forest was measured continuously on 14 trees using Granier's thermal dissipation probe method over a period of four months. Environmental factors including air temperature, air relative humidity, soil relative humidity, photosynthetically active radiation (PAR) and global radiation were measured simultaneously with sap flow. Sapwood depth was highly correlated with tree diameter at breast height. Maximum values of sap flux density of each trees had marked linear correlations with sapwood area. Within one tree there were marked differences in sap flux density at four orientations on the trunk and sap flux density on one side was found to be highly correlated with the others. Even when the sap flux density in any one orientations for five trees was combined, there were still good correlations between the four orientations. Time lag between sap flow and PAR as well as vapor pressure deficit (VPD) in both a wet month (September) and a dry month (December) are discussed. PAR exhibited diurnal peak values earlier than sap flow by 40~50min (Sep.) to 100~150 (Dec.) but VPD lagged behind sap flow by 10~60 (Dec.) to 90~110min (Sep.). Differences in time lags among individuals were not obvious in the wet month but significant in the dry month. Mean values and maximum values of sap flow as well as the total

基金项目:国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(30428022);国家自然科学基金面上资助项目(30270239);广东省自然科学基金面上资助项目(031265);中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX-SW-01-01B-05);华南植物园知识创新基金资助项目(2002-2110)

收稿日期:2004-10-05; **修订日期:**2005-04-11

作者简介:马玲(1979~),女,内蒙古五原县人,博士生,主要从事植物生理生态学研究. E-mail: maling@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhaoping@scbg.ac.cn

Foundation item: Supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 30428022, 30270239); Provincial Nature Science Foundation of Guangdong (No. 031265); Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX-SW-01-01B-05); Knowledge Innovation Program of South China Institute of Botany (Project No. 2002-2110)

Received date: 2004-10-05; **Accepted date:** 2005-04-11

Biography: MA Ling, Ph. D. candidate, mainly engaged in plant physio-ecology. E-mail: maling@scbg.ac.cn

sap flow in the wet month (Sep.) were significantly higher than in the dry month (Dec.). There were marked correlations between sap flow and ambient environmental factors (air temperature, air-relative humidity, PAR, radiation and VPD), the sequence of correlated degree was: PAR>radiation>VPD>air relative humidity>air temperature.

Key words: Granier's thermal dissipation probe method; *Acacia mangium*; sap flow; time lag; environmental factors

由于乔木体形较大,要准确测定整树的蒸腾作用具有一定困难。多年来,各国学者一直在探索一种准确且经济的测定方法,测定的对象包括了单叶^[1]、树冠^[2]、树干^[3,4]和根系^[6],其中,利用热电转换原理测定树干液流密度进而推算整树的蒸腾的方法被认为是目前测定乔木蒸腾作用最准确的方法^[6,7],因为植物根系吸收的水分约 95% 通过蒸腾作用散发到大气中,仅极少部分被植物体吸收^[8]。热消散式探针法是 Granier 于 1985 年和 1987 年为乔木树种设计的^[9,10],与热脉冲法相比较,其最大的优点是测量结果为沿探针长度上的平均值,即是线测量^[11~13];而热脉冲法的测量是某一点的值,即点测量。由于导管结构的异质性和木质部气穴现象导致点测量存在较大误差,且点测量在液流较小时精确度降低,因此近年来国际上已广泛运用热消散式探针法来进行乔木蒸腾作用的测定^[12],而我国目前运用热消散式探针法研究蒸腾作用的学者还寥寥可数^[14~16]。

马占相思 *A. mangium* 是 1979 年从澳大利亚引进的乔木树种,前期生长迅速,常被用作植被恢复的先锋树种。对于马占相思的蒸腾作用已有不少研究^[1,17,18],但对处于生长衰退期的马占相思林的整树水分利用特征的深入研究迄今还未见报道。本文利用 Granier 热消散式探针法这一先进的测定方法研究处于生长衰退期的马占相思树干液流的一些特征,并对其与环境因子包括空气温度(以下简称温度)、空气相对湿度、光合有效辐射、总辐射、水蒸气压欠缺等的关系作了分析,阐述了马占相思蒸腾作用的特征,并揭示了其对环境因子变化的响应规律,旨在为研究亚热带植被恢复过程中人工林的水分利用提供理论和方法依据。

1 材料和方法

1.1 试验地基本情况

试验地选址于中国科学院鹤山丘陵综合试验站(北纬 22°40', 东经 112°54'), 该站属典型的南亚热带丘陵山地,地带性土壤为砖红壤性红壤,气候温暖多雨,全年无霜,年平均日照时数 1 797.8h,年平均气温 21.7℃,年平均降雨量约 2 000mm,但分布不均,有明显的干湿季,每年的降雨多集中在 5~9 月份,在 10~12 月份降雨量较少,出现短暂的干旱^[18]。试验地位于鹤山丘陵-坡地,坡向向东,海拔约 80m,为纯马占相思林,种植结构为 3m×3m,树龄 18a,生长趋于衰退,每年 12 月至翌年 2 月有大量落叶。

1.2 树干液流测定装置的安装和测定

于 2003 年 8 月选取生长状况良好,胸径具代表性(范围 0.134~0.375m)的 14 棵马占相思作为采用 Granier^[9,10]方法测量树干液流的样树,在树干的东、南、西、北 4 个方位胸高处(1.3m 高处)钻取两个相距约 10~15cm,皮下深 2cm、直径 2mm 的小洞,然后将直径约 2mm 的铝管插入,并把涂有良好导热性能的硅润滑油的上下探针分别轻轻插入铝管(其中 4 棵在树干东南西北 4 个方位都安装探针,一棵在南北两方位安装探针,其余 9 棵只在北方位安装探针)。

所用探针是赵平研究员依据 Granier^[9]探针原理在美国 Duke university 自制。上探针外缠加热电阻丝持续恒定加热,下探针作为参照不加热。将两探针的铜镍合金线相接,加热的电阻丝外接恒定直流电(电流强度=0.12A)。两探针间的温差电势用数据自动采集仪(Delta-T data logger, Delta-T, UK)自动记录(每 30s 测读 1 次,每 10min 进行平均并储存数据)。记录的温差电势数据根据 Granier^[4]的液流密度经验公式:

$$F_d = 119 \times 10^{-6} \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

式中, ΔT_m 为昼夜最大温差; ΔT 为瞬时温差; F_d 为瞬时液流密度($\text{gH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)转换为液流密度值。

1.3 边材面积的确定

边材面积是计算液流及蒸腾的关键参数。在实际操作中,无法直接测定边材面积,只能通过测定边材厚度来求算边材面积,而测定边材厚度需在树干上用生长锥钻较大的洞,为避免对样树造成伤害,在样地内随机选取 24 棵生长状况良好的马占相思(不包括待测树干液流的样树),用生长锥测定其胸高处边材厚度,量取其胸围($Cir.$),并转换为胸径($DBH = Cir/\pi$),同时测定树皮厚度,然后由边材厚度求算边材面积。

1.4 环境因子的测定

环境因子监测传感器包括 ML 2x 型土壤湿度(SRH)传感器、电热调节式空气温度(Temp.)传感器、HMP45A 型空气相对湿度(ARH)传感器、Li-Cor 光合有效辐射(PAR)传感器、总辐射(Rad.)传感器,除土壤湿度传感器安装在马占相思样地并与树干液流数据采集仪相接外,其他环境因子监测传感器均安装在距样地 50m 处的气象站空旷地,与另一 Delta-T 数据自动采集仪相连,同样是每 30s 测读 1 次,每 10min 进行平均并存储数据,两台数据采集仪时间设定为同步。

为综合表达温度与空气相对湿度的协同效应,采用水蒸气压亏缺(VPD)这一指标,运用以下公式计算水蒸气压亏缺^[19]:

$$e_s(T) = a \times \exp\left(\frac{bT}{T+c}\right)$$

(1)

$$VPD = e_s(T) - e_a = e_s(T)(1 - h_r)$$

(2)

式中, $e_s(T)$ 代表 T 温度下的饱和水蒸气压, a 、 b 、 c 为参数,分别取值为:0.611kPa、17.502、240.97℃, T 为温度, e_a 为周围气体的水蒸气压, h_r 为相对湿度, D_o 为水蒸气压亏缺。

本文运用统计分析软件 SPSS11.0(SPSS,US)对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 马占相思边材厚度与胸径的相关关系

图1显示马占相思边材厚度与胸径具显著的线性相关关系。

对图1中的回归关系的残差进行分析并绘制散点图(见图2),残差分布于零线上下,服从正态分布 $N(0,0.22^2)$,并有96%落在 $\pm 2\sigma$ 范围内,说明回归方程对数据的拟合较好。因此,可通过测定胸径的值及其与边材厚度的相关关系计算马占相思的边材厚度。通过量取胸围来计算边材厚度和边材面积如下:

$$y = 0.07243C/\pi + 0.564$$

(3)

$$As = yC - 2\pi By - \pi y^2$$

(4)

式中, y 代表边材厚度、 B 代表树皮厚度、 C 代表胸围, As 代表边材面积。

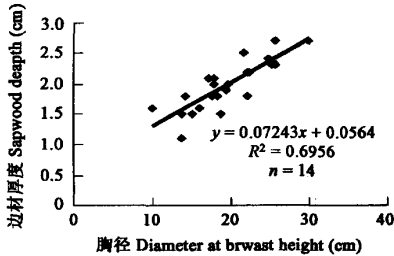


图1 马占相思边材厚度与胸径的相关关系

Fig. 1 The correlation between sap wood depth and diameter at breast height of *A. mangium*

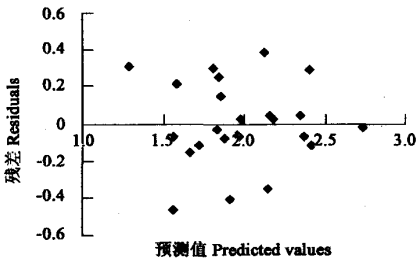


图2 残差散点图

Fig. 2 Scatter plot of residuals of the correlation shown in Fig. 1

2.2 液流密度与边材面积的关系

选取14棵样树北方位探针于2003年9月21日00:00至9月30日22:00期间的液流密度数据,取每棵树的液流密度最大值与边材面积进行回归分析,结果见图3,液流密度最大值与边材面积的相关关系的判定系数 $R^2=0.323$,相关显著性概率为0.034,小于0.05,表明在0.05置信水平上液流密度最大值与边材面积具显著相关关系。

2.3 树干不同方位的液流密度分析

选取5棵样树(其中4棵在东南西北各方位均安装了探针,另外一棵只在南北方位安装了探针)2003年9月21日0:00至9月30日22:00的液流密度数据,同时分别将5棵样树同一方位的液流密度数据合并,以北方位的液流密度作为自变量(x),东、南、西方位的液流密度分别作为因变量(y)进行回归分析,分析过程中发现东、南、西、各方位的液流密度与北方位液流密度的回归关系用线性、二次方程、三次方程都可以表达,且相关性均非常显著,其中三次方程拟合的最好,因此本文用三次方程来表达各方位的相关关系,见表1。回归分析得:对于各个方位液流密度无显著性差异的零假设来说,显著性概率均为0.000,回归方程中, $R^2\geq 0.967$, F 检验值的显著性概率均为0.000,说明回归方程有意义。将5棵样树同一方位的液流密度合并后,各个方位的液流密度仍存在显著相关关系, $R^2\geq 0.886$, $F=0.000$,说明运用这一总结得出的方程可以较为准确的通过北方位液流密度计算同一棵树东、南、西各方位的液流密度。图4绘出了树干

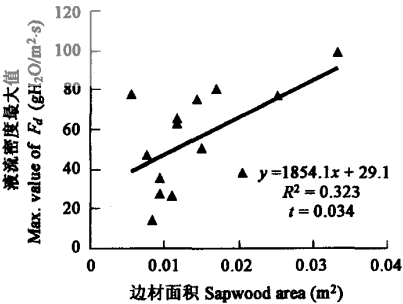


图3 液流密度最大值与边材面积的相关关系

Fig. 3 Correlation between maximum value of F_d and sapwood area

明运用这一总结得出的方程可以较为准确的通过北方位液流密度计算同一棵树东、南、西各方位的液流密度。图4绘出了树干

东、南、西、北方位液流密度相关关系的散点图及 3 次方回归曲线,可以直观的看出各方位液流的相关关系。

2.4 干湿季液流比较

首先,准确计算液流:

$$F_i = F_d \times A_i$$
 (5)

式中, F_i 为液流, F_d 为液流密度, A_i 为边材面积。

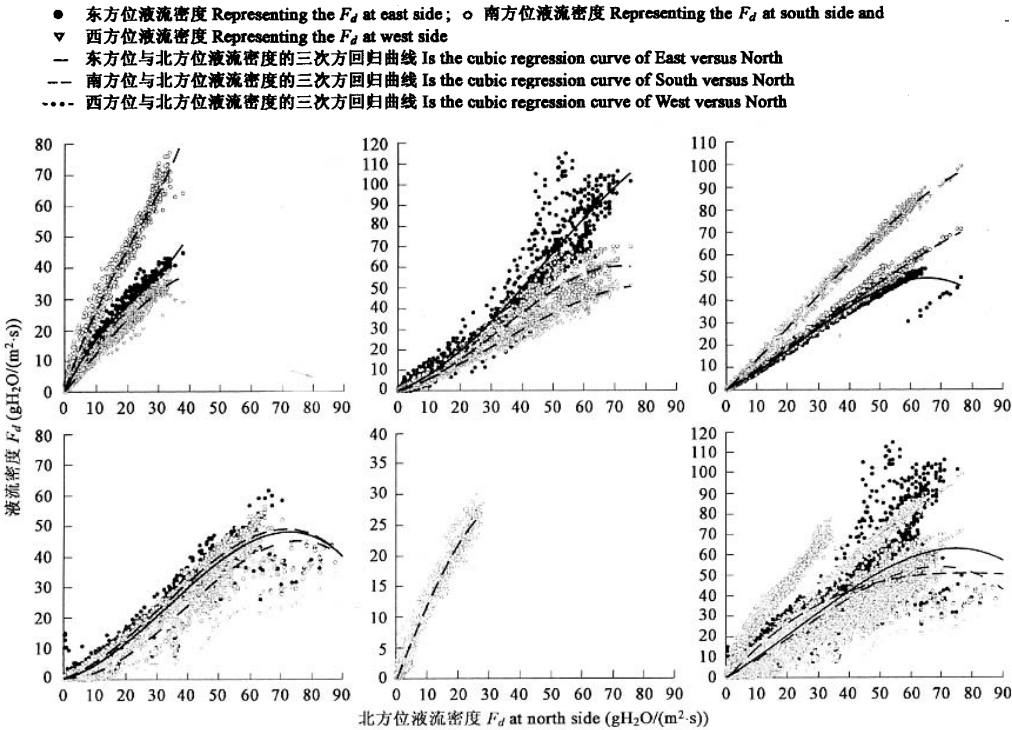


图 4 各方位液流密度相关关系

Fig. 4 The correlations among the F_d at four orientations on trunk

表 1 马占相思各方位液流密度相关性分析

Table 1 Relativities among F_d at four orientations of *Acacia mangium*

对应关系 Corresponding relation	显著性概率 Sig.	R^2	回归方程 Regression equation	F 值显著性概率 Sig. F
No. 1 东↔北 East↔North	0.000	0.994	$y=0.0008x^3-0.0541x^2+2.1589x$	0.000
No. 1 南↔北 South↔North	0.000	0.995	$y=0.0009x^3-0.0606x^2+3.1382x$	0.000
No. 1 西↔北 West↔North	0.000	0.991	$y=0.0002x^3-0.001x^2+1.2554x$	0.000
No. 2 东↔北 East↔North	0.000	0.970	$y=-0.0002x^3+0.024x^2+0.5652x$	0.000
No. 2 南↔北 South↔North	0.000	0.981	$y=-0.0003x^3+0.0252x^2+0.3587x$	0.000
No. 2 西↔北 West↔North	0.000	0.993	$y=-0.0001x^3+0.0115x^2+0.4715x$	0.000
No. 3 东↔北 East↔North	0.000	0.997	$y=-0.0002x^3+0.0141x^2+0.6735x$	0.000
No. 3 南↔北 South↔North	0.000	0.997	$y=-0.00004x^3+0.004x^2+0.8615x$	0.000
No. 3 西↔北 West↔North	0.000	0.999	$y=-0.00001x^3+0.0073x^2+1.266x$	0.000
No. 4 东↔北 East↔North	0.000	0.978	$y=-0.0002x^3+0.0171x^2+0.4037x$	0.000
No. 4 南↔北 South↔North	0.000	0.979	$y=-0.0002x^3+0.019x^2+0.2956x$	0.000
No. 4 西↔北 West↔North	0.000	0.967	$y=-0.0002x^3+0.023x^2+0.0098x$	0.000
No. 5 南↔北 South↔North	0.000	0.984	$y=-0.0008x^3+0.0196x^2+1.0172x$	0.000
Comb. 东↔北 East↔North	0.000	0.915	$y=-0.0001x^3+0.0103x^2+0.8758x$	0.000
Comb. 南↔北 South↔North	0.000	0.898	$y=-0.0113x^2+1.5017x$	0.000
Comb. 西↔北 West↔North	0.000	0.886	$y=-0.0002x^3+0.0119x^2+0.7665x$	0.000

* No. 代表树号 representing tree number, Comb. 代表合并后的数据 representing combined data

对于东南西北方位均装了探针的样树:

$$F_s = (F_{de} + F_{ds} + F_{dw} + F_{dn}) \times A_s / 4$$

(6)

式中, F_{de} 、 F_{ds} 、 F_{dw} 、 F_{dn} 分别为东、南、西、北方位的液流密度。

对于在南北方位装了探针的样树,根据表 3 中 Comb. 东↔北和 Comb. 西↔北及公式(6)得:

$$F_s = (-0.0003 \times F_{dn}^3 + 0.0222 \times F_{dn}^2 + 2.6423 \times F_{dn} + F_{ds}) \times A_s / 4$$

(7)

对于只在北方位装了探针的样树:

$$F_s = (-0.0003 \times F_{dn}^3 + 0.0109 \times F_{dn}^2 + 3.1494 \times F_{dn}) \times A_s / 4$$

(8)

取 10 棵样树 2003 年 9 月 21 日 00:00 至 9 月 30 日 22:00 和 2003 年 12 月 21 日 00:00 至 12 月 30 日 22:00 的液流数据进行分析比较,见表 2。分别对湿季和干季的液流平均值和最大值进行非参数相关样本检验,得湿季液流平均值和最大值均大于干季,差异显著性概率分别为 0.005 和 0.022,均小于 0.05,说明液流平均值和最大值在湿季均显著大于干季。

为表达液流在时间上的累积效应,采用蒸腾水量这一指标,运用公式:

$$W = \overline{F_s} \times T$$

(9)

式中, W 代表蒸腾水量, $\overline{F_s}$ 代表液流平均值, T 代表时间(s)。由表 2 可见,相同时间内湿季蒸腾量大于干季蒸腾量。

2.5 树干液流与环境因子间的时滞效应

要分析树干液流对环境因子变化的响应规律,必须先了解可能存在的时滞效应。选取 10 棵样树(与 2.4 中相同)2003 年 9 月 21 日 0:00 至 9 月 30 日 22:00(湿季)和 2003 年 12 月 21 日 0:00 至 12 月 30 日 22:00(干季)的液流和光合有效辐射及水蒸气压亏缺数据,将液流值与光合有效辐射和水蒸气压亏缺值分别进行逐行错位对应分析, R^2 值最大时的时间差即为时滞。结果发现,任一天内光合有效辐射先于液流达到峰值,9 月时滞 在 40~50min 范围内,12 月时滞 在 100~150min 范围内;水蒸气压亏缺落后于液流达到峰值,9 月时滞 在 90~110min 范围内,12 月时滞 在 10~60min 范围内,而光合有效辐射和水蒸气压亏缺间的时滞较为稳定,在 9 月是 150min,在 12 月是 160min。此外,树干液流与环境因子间的时滞在湿季个体间差异较小,干季则差异较大。

2.6 液流与环境因子的关系

为直观表达液流与环境因子的变化特征,绘出 2003 年 9 月 21 日 0:00 至 9 月 30 日 22:00 样树 No.1 的液流和土壤相对湿度、光合有效辐射、总辐射、空气温度、水蒸气压亏缺等各个环境因子变化曲线图,见图 5(以下均不考虑时滞效应)。

由图 5(b)可见,土壤相对湿度的日变化极不显著,适宜于月变化或季节变化分析。因此本文在此不进行过多阐述。

进一步分析液流的变化与各环境因子的变化的相关关系,考虑到各环境因子间存在着相关关系,因此取任一环境因子(而控制其它独立环境因子)与液流进行偏相关分析,由表 3 可见,液流与空气相对湿度、空气温度、光合有效辐射、总辐射、水蒸气压亏缺的偏相关系数 r 分别为 -0.5442、0.4413、0.8514、0.8314、0.7900, $r_{0.05} = 0.124$,偏相关系数的显著性概率均为 0.000,说明液流的变化与各环境因子的变化均显著相关,各环境因子都对液流有较大影响,根据偏相关系数绝对值的大小可知各环境因子作用大小依次为:光合有效辐射>总辐射>水蒸气压亏缺>空气相对湿度>空气温度。

为揭示环境因子对液流的综合影响,采用逐步剔除法进行多元回归分析。因为光合有效辐射和总辐射是同一因子(辐射)的不同表达方式,因此这里只取光合有效辐射建立模型;水蒸气压亏缺是温度和湿度的共同作用,也不参与模型的建立。将液流作为因变量,温度、湿度、光合有效辐射作为自变量进行分析,发现没有变量被剔除,即空气温度、空气相对湿度、光合有效辐射全部参与模型的建立。方差分析结果显示模型的显著性概率为 0.000,说明因变量与自变量间存在着较强的线性相关关系。得回归方程:

表 2 干湿季液流比较 (gH₂O/s)

Table 2 Comperation of Fs between wet month and dry month

树号 Tree number	9 月(湿) September(wet)			12 月(干) December(dry)		
	平均值 Mean values	最大值 Max. values	蒸腾水量 Total transpi.	平均值 Mean values	最大值 Mmax. values	蒸腾水量 Total transpi.
No.1	0.272	0.988	233.454	0.156	0.942	133.435
No.2	0.293	1.051	251.227	0.167	0.797	142.841
No.3	0.527	1.866	451.141	0.271	1.454	232.043
No.4	0.558	1.906	478.362	0.343	1.913	293.892
No.7	0.085	0.272	73.163	0.037	0.199	31.883
No.8	0.200	0.551	171.066	0.106	0.492	90.871
No.9	0.139	0.485	119.109	0.074	0.468	63.262
No.10	0.276	0.722	236.440	0.089	0.556	76.482
No.12	0.145	0.494	124.512	0.065	0.496	55.998
No.13	0.079	0.232	67.333	0.053	0.232	45.547

表 3 液流变化与各环境因子变化的偏相关分析

Table 3 Analysis of partial correlations between sap flow and each ambient environmental factors

控制变量 Controlled variables	分析变量 Analyzed variables	液流 Sap flow velocity	
		偏相关系数 Partial correlation coefficient	Sig.
温度、光合有效辐射 Temp. and PAR	湿度 ARH	-0.5442	0.000
湿度、光合有效辐射 ARH and PAR	温度 Temp.	0.4413	0.000
温度、湿度 Temp. and ARH	光合有效辐射 PAR	0.8514	0.000
温度、湿度 Temp. and ARH	总辐射 Rad.	0.8314	0.000
光合有效辐射 PAR	水蒸气压亏缺 VPD	0.7900	0.000

$$V_s = 0.0274 \times T - 0.0082 \times H_a + 0.00057 \times R_p + 0.065 \tag{10}$$

公式(10)中, V_s 代表液流, T 、 H_a 、 R_p 分别代表空气温度、空气相对湿度和光合有效辐射.对回归系数进行检验,得各个自变量系数的显著性概率均为0.000,常数项显著性概率为0.272, $R^2=0.919$,可见回归方程能较好地揭示液流变化与各环境因子变化的相关规律.

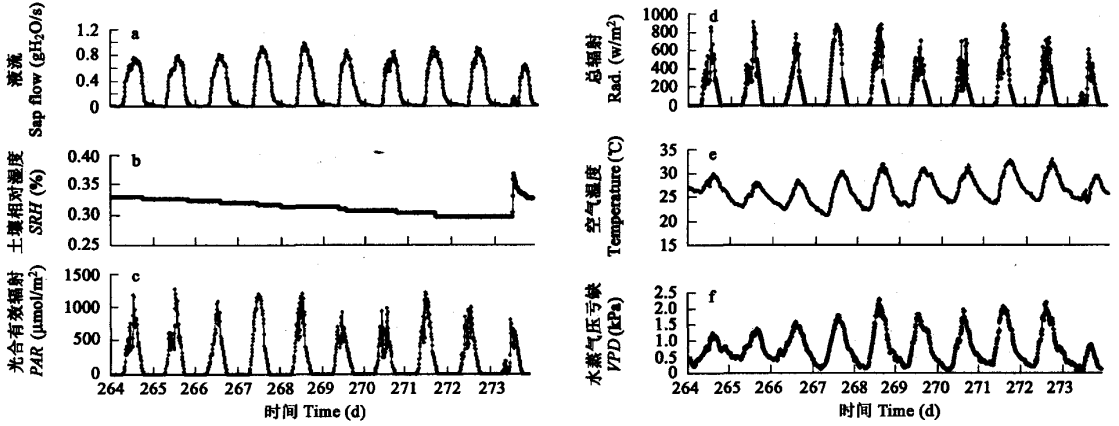


图5 液流与各个环境因子的变化曲线图

Fig. 5 Daily variation in sap flow and ambient environmental factors

a 液流日变化图 Sap flow; b 土壤湿度日变化图 Soil relative humidity; c 光合有效辐射日变化图 Photosynthetically active radiation; d 总辐射日变化图 Radiation; e 空气温度日变化图 Air temperature; f 水蒸气压亏缺日变化图 Vapor pressure deficit

3 讨论

马占相思树干液流密度最大值与边材面积在0.05置信水平上呈显著相关,这与Granier等^[20]在两个山毛榉(beech)林中观测的结果一致.这主要是因为边材面积大的树,其树体也较高大,常常占有林冠上层空间,因而其接受的太阳辐射等均要高于矮小树木,因而单位边材面积的液流也相应较大.在树冠层相对较开放的林中,这一关系可能并不明显^[20].Oren R等^[21]在研究落羽杉(*Taxodium distichum*)的液流时发现液流密度与胸径无相关关系.

马占相思树干东、南、西、北4个方位的液流密度具显著差异,且各方位间均有显著相关关系,这可能与树冠结构、树干结构、根的结构、光照等因素有关.陆平等^[22]曾对芒果树干液流进行了深入研究,发现芒果树干各方位液流也存在显著相关关系.将5棵树相同方位的液流密度合并后,各个方位仍有显著相关关系,这可能由于树干不同方位长期受光不同引起内部结构上的差异,而同一方位则具较大的一致性,因此水分运输特征相似.但这一观点有待考证.

马占相思树干液流每天到达峰值与光合有效辐射、水蒸气压亏缺到达峰值之间存在一定的时滞,这里所说的时滞由两部分组成:环境因子与冠层蒸腾间的时滞和冠层蒸腾与树干液流间的时滞.每天光合有效辐射先于液流密度达到峰值,且在湿季的时滞小于干季的时滞,可能是由于干季(12月份)气温较低,在一定程度上抑制了气孔的张开.水蒸气压亏缺则落后于液流密度达到峰值.为进一步分析冠层蒸腾对环境因子的响应规律,必须先确定冠层蒸腾与树干液流之间是否有时滞效应. Peramak等^[23]发现欧洲赤松(*Scots pine*)冠层蒸腾的变化与树干底部液流的时滞约为30min,Granier等^[20]则发现山毛榉(beech)在水分充足情况下冠层蒸腾与树干液流间几乎不存在时滞.分析了马占相思树干液流与环境因子在湿季(9月份)和干季(12月份)的时滞与树高(范围在12~22.8m)的相关性,发现无论在湿季还是干季,光合有效辐射、水蒸气压亏缺与胸高处树干液流的时滞均与树高无关,说明马占相思冠层蒸腾与树干液流间的时滞效应可忽略,即可用树干液流的变化规律来代表冠层蒸腾的变化规律.

液流与光合有效辐射、总辐射、空气温度、空气相对湿度、水蒸气压亏缺等环境因子具显著相关关系,按相关程度排序为:光合有效辐射>总辐射>水蒸气压亏缺>空气相对湿度>空气温度.李海涛^[8]等在运用热脉冲法研究暖温带棘皮桦和五角枫的树干液流时发现影响树干液流量最重要的环境因子是空气温度和空气相对湿度,至于环境因子对树干液流的影响是否在不同地区不同树种间有较大差异有待进一步深入研究.

References:

[1] Zeng X P, Zhao P, Peng S L. Study on the water ecology of artificial *Acacia mangium* forest in the Heshan hill region, Guangdong

- Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(1): 69~73.
- [2] Richard M P, Jonathan S P, Waddington J M, *et al.* Surface moisture and energy exchange from a restored peatland, Que'bec, Canada. *Journal of Hydrology*, 2004, **295**:198~210.
- [3] Li H T, Chen L Z. A study on the volume and velocity of stem-sapflow of *Betula dahurica* and *Acer mono* forests by the heat-pulse technique. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, **20**(1):1~5.
- [4] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, **3**:309~320.
- [5] Chen J Y, Liu C M, Wu K. Evapotranspiration of soil plant atmospheric continuum-asimulation study with lysimeter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1): 45~48.
- [6] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, 1998, **18**:499~512.
- [7] Cohen Y, Fuchs M, Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ.*, 1981, **4**: 391~397.
- [8] Kozlowski T T, Pallardy S G. *Physiology of woody plants*. US: Academic Press, 1996. 270~286.
- [9] Granier A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres*, 1985, **42**:193~200.
- [10] Granier A. Measure du flux de seve brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle method thermique. *Annales des Sciences Forestieres*, 1987, **44**:1~14.
- [11] Lu P. A direct method for estimating the average sap flux density using a modified Granier measuring system. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1997, **24**:701~705.
- [12] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) Method for Measuring Sap Flow in Trees: Theory and Practice. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **46** (6): 631~646.
- [13] Ma L, Zhao P, Rao X Q, *et al.* Main determination of tree transpiration. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(1):88~96.
- [14] Ma L Y, Wang H T. Spatial and chronic fluctuation of sapwood flow and its relevant variables of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(3): 23~27.
- [15] 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.
- [16] Sun H Z, Zhou X F, Zhao H X. A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(9):1387~1391.
- [17] Zhao P, Yu Z Y, Zeng X P. Water loss by transpiration through leaves of three species of *Acacia* on downland in Heshan, Guangdong Province. *Trop. Subtrop. For. Ecosys.*, 1990, **7**:12~16.
- [18] Sun G C, Wei C Z, Zhao P, *et al.* Photosynthesis and transpiration in leaves of some woody legume plants in the dry season. *Trop. Subtrop. For. Ecosys.*, 1990, **7**:60~68.
- [19] Campbell G S, Norman T M. A introduction to environmental biophysics (second edition). US: Springer-verlag press, 1998. 40~45.
- [20] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **100**: 291~308.
- [21] Oren R, Philips N, Ewers B E, *et al.* sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiology*, 1999, **19**:337~347.
- [22] Lu P, Muller W J, Chacko E. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 2000, **20**:683~692.
- [23] Peramaki M, Nikinmaa E, Sevanto S, *et al.* Tree stem diameter variations and transpiration in Scots pine: an analysis using a dynamic sapflow medol. *Tree Physiology*, 2001, **21**:889~897.

参考文献:

- [1] 曾小平, 赵平, 彭少麟. 鹤山人工马占相思林水分生态研究. *植物生态学报*, 2000, **24**(1):69~73.
- [3] 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):1~5.
- [5] 陈建耀, 刘昌明, 吴凯. 利用大型蒸渗仪模拟土壤-植物-大气连续体水分蒸散. *应用生态学报*, 1999, **10**(1):45~48.
- [13] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法. *生态学杂志*, 2005, **24**(1):88~96.
- [14] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因子研究. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(3): 23~27.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 赵平, 余作岳, 曾小平. 广东鹤山丘陵地三种相思树生长早期蒸腾失水初探. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1990, **7**:12~16.
- [18] 孙谷畴, 魏传钊, 赵平. 几种木本豆科植物旱季时的光合作用和蒸腾作用. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1990, **7**:60~68.