

# 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

赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

**摘要:**介绍了 Granier 热消散探针在树干液流测定中的工作原理, 并利用该系统长期监测广东鹤山马占相思林 14 株样树的液流密度, 分析了树木个体内和个体之间液流密度的差异、整树和林段水分利用的量化特征。由于树木边材结构以及周围微环境的差别, 树木内和个体间的液流密度差异非常明显, 变异系数的平均值分别为 15.51%–37.26%、37.46%–50.73%。尽管液流密度的差异较大, 但同一株树木不同方位的液流密度之间却呈现明显的线性相关 ( $p < 0.0001$ ), 这是重要的特征值, 使得只需测定某一方位的液流密度经尺度外推计算整树和林段蒸腾成为可能。树木液流对环境因子响应的变化规律取决于所参照的时间尺度, 日变化主要受光辐射、水汽压差等气候因子的控制, 而土壤水份对液流的季节变化影响较大。形态特征明显影响树木的液流, 高大树木由于边材较厚、树干粗壮和冠幅较宽而承载较多的辐射能量, 因而水分蒸腾较高。对树木液流密度在径向和方位上进行适当的整合, 可较准确地计算整树和林段蒸腾。由液流估测的马占相思整树和林段蒸腾的结果显示, 该群落的水分利用在时间和空间上均有明显的分化。

**关键词:** Granier 热消散探针; 液流密度; 马占相思林; 整树蒸腾; 林段蒸腾

中图分类号: Q948.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2005)06-0457-12

## Application of Granier's Sap Flow System in Water Use of *Acacia mangium* Forest

ZHAO Ping, RAO Xing-quan, MA Ling, CAI Xi-an, ZENG Xiao-ping

(South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650)

**Abstract:** In order to characterize the variance in sap flow within and between trees, and to quantify the water use of whole tree and of forest stand, Granier's thermal dissipation probes were applied to measure sap flux density ( $J_s$ ) in 14 sample trees in an *Acacia mangium* forest in Heshan Station, Guangdong. It showed that the differences of sap flux density recorded on a sunny day in July of 2004 were significant within tree (of different azimuthal sides) with coefficient of variability ranging from 15.51% to 37.26%, and among trees ranging from 37.46% to 50.73%. These variations were mainly attributed to the texture of sapwood and microclimate surrounding the point on trunk where the measurements were conducted. However, the sap flux density on different azimuthal sides showed significant linear correlation ( $p < 0.0001$ ), which provided a feature value for scaling up whole-tree transpiration from sap flux density measured on only one azimuthal side. The responses of tree sap flow to environmental factors were different and depended on the time scales. The daily sap flow was mainly controlled by climatic factors such as radiation and vapor pressure deficit, whereas the soil moisture had more influence of seasonal change on the sap flow. The morphological features of tree significantly affected sap flow. Taller trees

收稿日期: 2005-08-23 接受日期: 2005-11-03

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程项目 (KSCX2-SW-133, KZCX-SW-01-01B-05), 国家杰出青年科学基金项目 (B 类) (30428022), 国家自然科学基金面上项目 (30270239), 广东省自然科学基金面上项目 (031265), 华南植物园研究园知识创新基金项目 (2002-2110) 资助

with larger sapwood area and canopy size that were load with more radiation demonstrated higher whole-tree transpiration. A proper integration of both azimuthal and radial variations in sap flux density within a tree can be scaled for whole-tree transpiration, which can relatively accurately estimate stand transpiration. The estimation of *A. mangium* forest transpiration from sap flow showed obvious temporal and spatial differentiations of water use within the community.

**Key words:** Granier's thermal dissipation probe; Sap flux density; *Acacia mangium* forest; Whole-tree transpiration; Stand transpiration

水是影响植物生长和分布的重要生态因子, 估测植物的蒸腾速率有助于了解植物对周围环境水分的利用效率。由于乔木在群落中所处的优势地位, 乔木层的水分利用在时间或者空间上的变化, 都会明显影响森林生态系统的土壤含水量、地下水位、集水区的水量产出以及林冠与大气之间的物质和能量交换。对于大部分的阔叶林来说, 蒸腾是水分利用的主要部分。由于乔木的形态高大、森林的结构和环境异质性高、林地的地形复杂, 在自然条件下测定森林的蒸腾是异常困难的, 而应用于矮小植物(如农作物)群落蒸腾作用的测定技术(如气孔计)大多不适宜于森林。稳态气孔计是基于植物叶片气孔  $H_2O$  交换的原理而研制的, 能较精确地测定单片叶子的蒸腾速率, 这些测定值常被用来推算整株植物或者冠层的蒸腾。然而, 以此方法进行的尺度外推面临难以解决的困难, 因为森林中叶片蒸腾差异显著, 冠层内环境因子常处于连续变化的状态<sup>[1]</sup>。目前, 人们较多地采用以下几种方法测定森林冠层的水分通量: 水量平衡(water balance)法、水蒸汽通量(water vapor flux)法和树干液流(sap flow)法。水量平衡法把森林蒸腾当作从集水区总降雨量中减去雨水截流量、土壤储水量和地面径流量后的剩余项来处理, 由此得出的结果不确定性比较高, 因为以上几项的测定均容易出现误差, 往土壤下层渗流的水量也难以估计。水蒸汽通量的测定则采用涡度相关法(eddy covariance, 简称 EC 法)或波文比法(Bowen ratio), 但此方法存在难以克服的缺点: 由于水蒸气明显受风速和风向的影响<sup>[2-4]</sup>, 要准确地确定被观测通量的起点比较困难; EC法还要求平缓的地形, 加上设备比较昂贵, 限制了它在山地森林生态系统中的应用。在过去 10 多年间, Sap Flow 测定技术, 尤其是 Granier 测定系统, 被广泛应用到整树和森林蒸腾的研究领域<sup>[5-7]</sup>, 该方法可观测森林不同层次的蒸腾, 通过长期连续地监测树

木的液流, 能获取用于季节模型验证的连续数据集<sup>[8]</sup>。该技术通过测定整树的蒸腾为研究森林冠层与大气的水分交换通量提供了准确的方法<sup>[1,5,9]</sup>。

在自然环境条件下, 我们首次应用 Granier 树干液流测定系统长期观测南方丘陵地人工林先锋群落—马占相思林的树干液流密度, 计算马占相思的整树和林段蒸腾, 研究该林型水分利用的动态变化、森林冠层与大气之间的水分交换规律, 并以此作为观测手段, 长期监测森林生态系统对环境变化的响应。无论是造林绿化还是森林管理, 林业管理部门均需要通过研究和了解树种的水分利用效率来实现有效的生产和经营管理, 本研究为将来对马占相思林进行大面积的林分改造提供实验依据, 对地方林业的经营和管理具有重要的理论指导意义和应用价值。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验地生态条件

野外观测在中国科学院鹤山丘陵综合试验站进行, 该站位于广东省中部的鹤山市境内, 东经  $112^{\circ}53'15''$ — $112^{\circ}54'00''$ , 北纬  $22^{\circ}40'07''$ — $22^{\circ}41'07''$ ; 年平均气温  $21.7^{\circ}C$ , 平均最低气温出现在 1 月份, 7 月份的平均气温最高; 全年雨水充沛, 年降雨量  $1700\text{ mm}$ , 气候湿润, 但降雨分配不均, 有旱、湿季之分, 11—1 月份(如果没有台风, 有时从 10 月开始)为短暂的轻微干旱期, 但并不威胁植物的生长。其它月份皆有较大的降雨。全年太阳辐射强烈, 年平均太阳辐射量为  $4.35 \times 10^5\text{ J cm}^{-2}$ 。

### 1.2 Granier's Sap Flow 测定系统及其工作原理

法国学者 Granier 在 20 世纪 80 年代后期发明了一种测定 Sap Flow 的新方法, 即热消散探针法(thermal dissipation probe, TDP)或恒定热流传感

器法 (constant-heat flow sensors)。该方法的数据采集具有准确和稳定的特点,且可以连续不间断地读取数据,因而数据具有系统性<sup>[5]</sup>。该测定系统由一对长 20 mm 含铜镍合金热电藕的圆柱形热消散探针 (又称 Granier 径向型探针) 组成,安装时将探针上下相隔 10–15 cm 插入树木的边材中,上方探针外缠绕电阻丝,供以直流电进行加热,下方的探针不加热,保持与周围边材组织的温度相同,两探针的温差变化反映树木的液流密度 (sap flux density)。Granier 建立了反映两者关系的标准方程:

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

其中  $J_s$  为瞬时液流密度 ( $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $\Delta T_m$  为昼夜最大温差,  $\Delta T$  是瞬时温差,此公式适合任何树种<sup>[5,10]</sup>。本研究借助由美国 Duke University 环境与地球科学学院 Yavor Parashkevov 博士开发研制的 Baseliner3.0 计算机软件,将从数据采集仪直接卸载的原始电压数据转换成连续性的液流密度值。由于 Granier 径向型探针的制作成本较其他系统 (如热脉冲探针) 低,为大量设置取样点提供了可能,有利于提高测量精度和对数据进行数理统计分析的置信度。

### 1.3 测定系统的安装

如图 1 所示<sup>[11]</sup>,于树干的胸高处 (削除树皮),将套入铝管的一对 Granier 探针插入边材 (铝管的

作用在于保护探针、均匀探针接受来自边材组织的热量、减少温度的波动) (图版 I:1),用 4 芯屏蔽电缆的一对电源线将探针的加热电阻丝与直流电源连接,由可调式电源板供应恒定电流 (约 0.12 mA),另一对信号线将探针的信号线与 Delta-T 2e 型数据采集仪的信号通道相连接,数据采集仪自动记录两探针之间温度差的微伏电压 (mV) 信号。通过计算机程序设定测定频度:每 30 s 测读一次,每 10 min 进行平均并储存数据。我们在鹤山站一片马占相思林地内选择了 14 株样树安装 Granier 测定系统,其中 1 到 4 号树分别在树干的东、南、西、北四个方位安装探针 (图 2),5 号树在南、北两方位安装探针,6–14 号树木只在北方位安装探针。探针安装完毕以后,用塑料盖保护以防止探针的机械损伤 (图版 I:3)。由于 Granier 探针对温度的变化异常敏感,外部需用太阳膜包裹 (图版 I:4),减少热辐射对测定区域以及探针的干扰,同时在一定程度上起到防止雨水浸入的作用,保护测定结果免受影响。

### 1.4 树形特征的测定

(1) 用 PM-5/1520P 型测高尺测量样树的高度,用普通皮尺测量树木胸径,根据株行距和邻株的实际距离,结合目测方法确定树冠的垂直投影面积。(2) 用美国 CID 公司生产的 CID-110 型数字植物冠层分析仪测定林段叶面积指数。(3) 边材面积的测定:边材面积是进行尺度转换和扩展的关键因

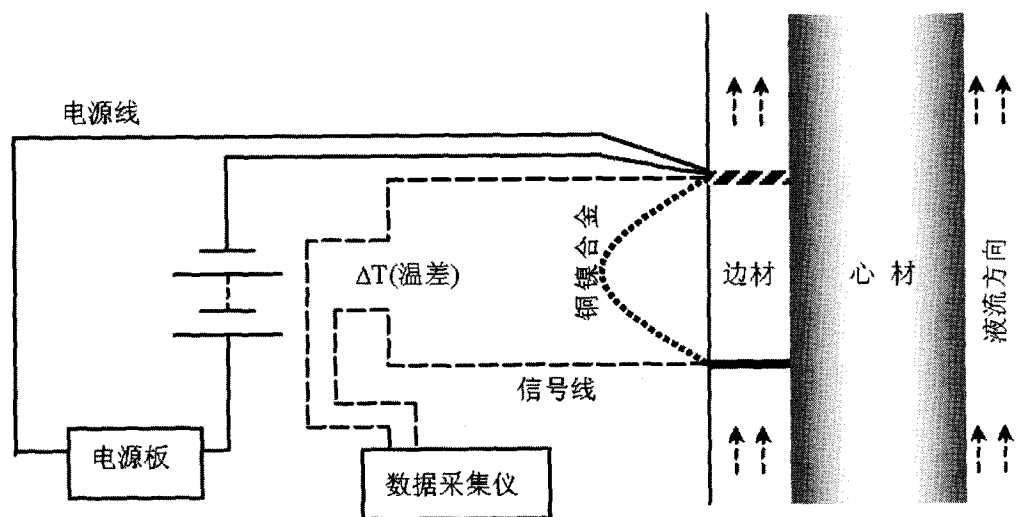


图 1 Granier 热消散探针测定树干液流的安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the installation for sap flow measurement using Granier-type sensors

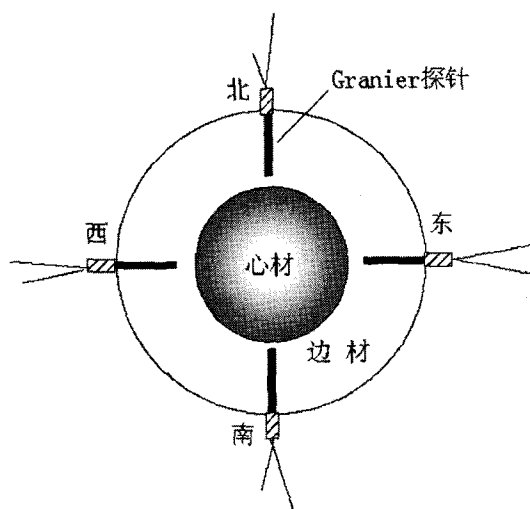


图 2 Granier 探针在树木不同方位安装的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the installation of Granier-type sensors on different azimuthal sides

子, 如何测量边材厚度并没有一个统一的方法, 而是因不同的树种而异<sup>[12,13]</sup>。于树干的胸高位置(去树皮), 将林业用的生长锥打孔器钻取直径为 5 mm、深度为胸径的 1/2 的木栓, 由于马占相思的边材与心材的颜色区别明显, 目测可直接判断木栓两区域的分界线(图版 1:2), 确定边材的厚度后计算边材面积( $A_s$ ):

$$A_s = \pi(r - r_b)^2 - \pi(r - r_b - r_s)^2$$

公式简化后:

$$A_s = \pi(2r - 2r_b - r_s) * r_s = \pi(DBH - 2r_b - r_s) * r_s$$

其中  $DBH$  为胸径,  $r$  是树干半径 ( $DBH/2$ ),  $r_b$  为树皮厚度,  $r_s$  为边材厚度。

为避免伤害样树而影响 Sap Flow 的测定, 我们不对样树钻取木栓, 而是在样地旁边另选择 24 株树木, 测定每株树木边材面积, 建立边材面积与胸径的关系式:

$$A_s = k(DBH)^b$$

其中  $k$  和  $b$  是通过非线性回归分析得出的系数, 本研究的分析结果分别为: 0.1930 和 1.1844, 以此关系式计算 14 株样树的边材面积。

### 1.5 环境因子的测定

分别采用电热调节式温度传感器(自制)、HMP45A 型空气湿度传感器和 LI-COR 光合有效辐射传感器, 测定马占相思林冠层上方的气温 ( $T$ ,

$^{\circ}C$ )、空气湿度 ( $RH$ , %) 和光合有效辐射 ( $PAR$ ,  $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ ); 采用 ML 2x 型土壤含水量传感器监测林内土壤 (30 cm 处) 的含水量 ( $\theta$ ,  $m^3 m^{-3}$ )。所有环境因子传感器均与 Delta-T 2e 型数据采集仪连接, 测定频度与树干液流的测定相同。空气水汽压差 ( $D$ , kPa) 由气温和湿度经下式求出:

$$D = a e^{\left(\frac{bT}{T+c}\right)} (1 - RH)$$

其中常数  $a, b, c$  分别为 0.611 kPa、17.502、240.97  $^{\circ}C$ <sup>[14]</sup>。

## 2 结果和讨论

### 2.1 树干不同方位以及不同树木个体之间的液流密度变化和差异

应用 Granier 探针研究树木液流的大小和变化, 是通过测定树干木质部水分活跃组织(即边材)的液流密度来实现的。不同树种的木质结构差异较大(如散孔材和环孔材等), 水分的传输导度必然有差别而影响树木液流的测定结果。对于相同种类的树木, 由于生长过程中所处的环境不同, 不同个体、或者同一个体的不同方位, 其边材的发育受水分、光照以及营养条件的影响, 在结构和质地上也会不同程度地存在差别, 即使差别较小, 由于所处的微环境不同, 如不同的方位、林内的空气湿度、林内风向与风速、接受太阳辐射的强弱等, 均会引起液流密度的差异<sup>[6]</sup>。高大树木的边材较厚, 木质的异质性比较明显, 会对计算树木的整树蒸腾时进行尺度转换带来困难<sup>[15]</sup>, 相对而言, 矮小的树木, 由于树干较小, 边材的匀质性较好, 这种差异相对较小<sup>[16]</sup>。

图 3 所显示的是马占相思林观测样地 3 号样树东、南、西、北 4 个方位的液流密度在 7 月 1 日的日变化, 从图中可看出, 树木液流的日变化反映了周围环境因子(左上小插图)的变化动态, 早上太阳刚出来不久, 各个方位的液流密度均同时迅速上升, 10:00 时至 11:00 时之间达到最高值, 下午较迟时分(16:00 时左右)液流开始下降。图 3 还显示, 不同方位的液流密度差异比较明显, 我们分析 1-5 号样树不同方位液流密度的变化特征, 发现液流密度的差异与树木大小无关, 而且与方位也不呈现规律性。我们还分析了一天不同时刻液流密度的变异系数 (coefficient of variability), 结果表明(表 1),

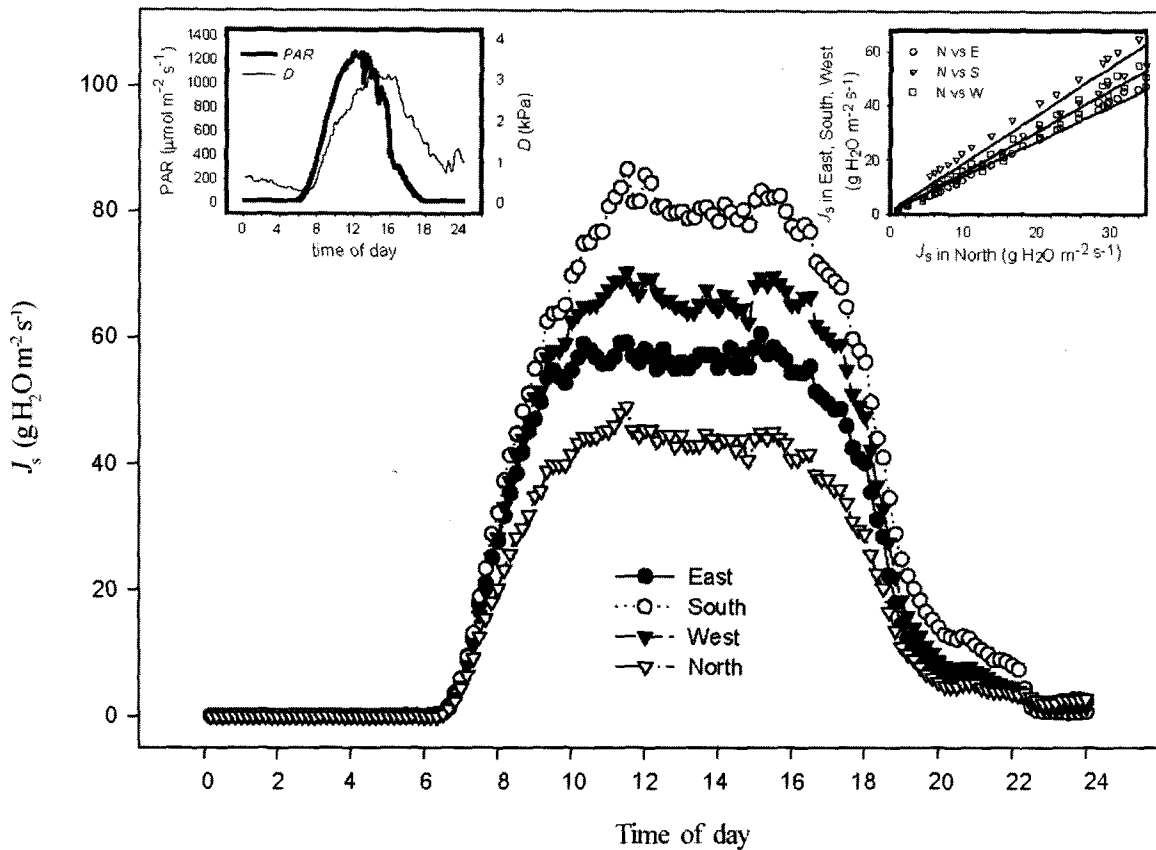


图3 3号样树不同方位液流密度( $J_s$ )、光合有效辐射( $PAR$ )、水汽压差( $D$ )的日变化(2004年7月1日)及北方位液流密度与东、南、西方位液流密度的线性关系

Fig. 3 Diurnal variations of sap flux density ( $J_s$ ) of tree No. 3 on different azimuthal sides, photosynthetically active radiation ( $PAR$ ), and vapor pressure deficit ( $D$ ) on July 1, 2004 and the linear relationships between  $J_s$  on the north side and  $J_s$  on the east, south and the west sides

表1 马占相思液流密度在不同方位以及不同个体之间的差异分析

Table 1 The coefficient of variability(CV) of sap flux density in tree with different azimuthal sides and among individual trees of *Acacia mangium*

时间 Time	树内不同方位之间 In tree with different sides										树木个体之间 Among trees	
	1号树Tree 1		2号树Tree 2		3号树Tree 3		4号树Tree 4		5号树Tree 5		Among trees	
	CV%	n	CV%	n	CV%	n	CV%	n	CV%	n	CV%	n
8:00	50.09	4	31.18	4	17.57	4	28.38	4	36.57	2	50.73	14
10:00	36.30	4	30.94	4	13.62	4	37.37	4	28.12	2	43.43	14
12:00	36.09	4	32.58	4	12.68	4	39.78	4	27.03	2	42.59	14
14:00	36.94	4	25.53	4	14.06	4	26.09	4	19.46	2	37.89	14
16:00	36.35	4	28.32	4	10.96	4	10.34	4	34.17	2	37.46	14
18:00	27.77	4	35.06	4	24.16	4	10.79	4	51.11	2	45.18	14
Average	37.26		30.60		15.51		25.46		32.74		42.88	

无论哪个时刻,1至5号样树不同方位液流密度变异系数均比较大,平均值从15.51%到37.26%。我们对14棵样树北方位的液流密度的变异系数也进行了分析,结果显示个体之间的差异也是非常大的

(37.46%–50.73%)。变异系数的分析结果反映出树木边材结构的差异较大,同时说明了马占相思林内不同空间位置,小气候条件的异质性较高,意味着以少数样树的液流密度值反映整个林段所有个体

以及所有方位的液流特征是有较大差距的,对如何计算整树蒸腾和林段蒸腾提出了难题,因此,取样设置成为尺度转换中成为非常重要的一环<sup>[2]</sup>,许多学者也十分强调,在计算整树的蒸腾时特别要考虑边材内液流变异特征这一重要因素<sup>[7]</sup>。尽管不同方位之间的液流存在较明显的差异,但相互之间却呈现极显著的线性相关 ( $p < 0.0001$ ) (图 3 右上小插图),这为计算整树蒸腾提供了重要的特征值,因为这涉及到既要考虑不同方位液流的差异,同时又要考虑安装探针时节约成本的问题,尤其是要进行大面积的森林树干液流的测定时,我们可以利用样树不同方位液流密度的线性关系,在实际的操作中,只需测定树木某一方位的液流密度,即可获得整树

的平均值。由于树干北方位不容易受太阳辐射的直接照射,探针周围的微环境比较稳定,因而通常只在树木的北方位安装探针。第 3.3 节将详细讨论如何利用这种线性关系求算整树的蒸腾。

## 2.2 液流的季节性变化

正如图 3 所显示的,树木液流的日变化主要受气候条件影响,但在较长的时间尺度上(如季节),液流的变化很大程度是受土壤的水分条件和树木本身的根系所控制<sup>[10]</sup>。1、4、7、10 月份是华南地区一年中在气候上有代表性的月份,图 4 分别显示 14 株被观测样树的液流密度、环境因子当月 30 d 平均值的日变化,以及该月份的土壤平均含水量。从图中

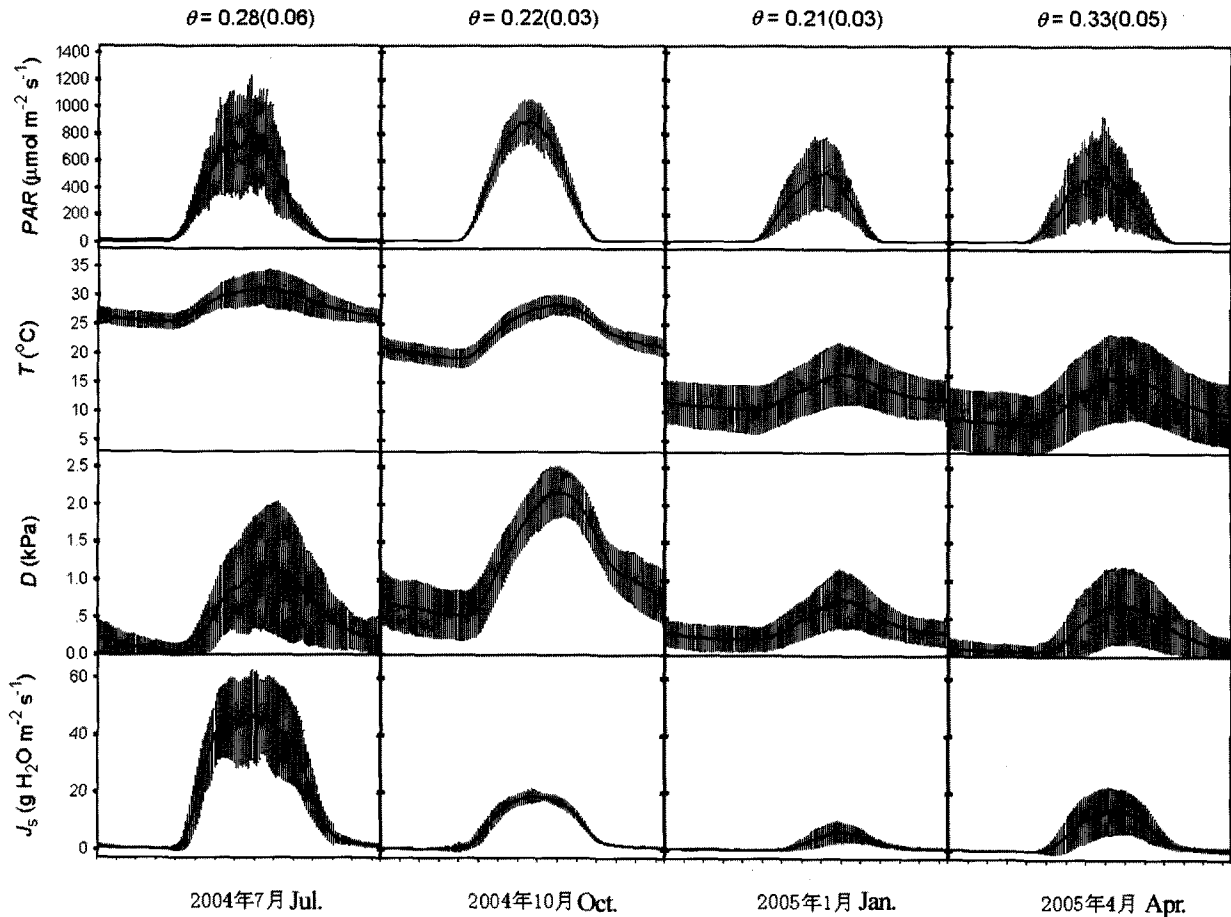


图 4 不同季节马占相思平均液流密度 ( $J_s$ )、冠层上方的光合有效辐射 ( $PAR$ )、气温 ( $T$ )、水汽压差 ( $D$ ) 的日变化  
Fig. 4 Daily variations of mean sap flux density ( $J_s$ ) of all examined *A. mangium* sample trees, photosynthetically active radiation ( $PAR$ ), air temperature ( $T$ ), vapor pressure deficit ( $D$ ) in different seasons

图内的垂直线为标准差;  $\theta$  值是土壤含水量月平均值, 括号内为标准差。Vertical bars within the graphics are standard deviation,  $\theta$  values are monthly mean values of soil moisture with standard deviation in parentheses.

可见,4个月的气候和土壤水分条件差别较大。7月份,光照条件较好,平均气温较高,土壤水分供应充足,树木的液流活动非常活跃,液流密度平均值比较高。10月,虽然光照和温度条件较好,但此时已经逐渐进入旱季,雨水较少造成土壤含水量偏低(根据鹤山站的气象记录,2004年9月上旬以后一直没有降雨),由于气温依然比较高,所以,该月份的平均水汽压差( $D$ )却是最高。不少学者的研究发现,当 $D$ 值偏高时,植物的气孔导度会大幅下降,因而会限制蒸腾,所以液流密度比7月明显降低,中午时分的平均最大值只有7月份的一半左右。1月是整年平均温度最低的月份,水热条件较差,平均光合有效辐射较低,液流活动处于较低的水平,液流密度最大平均值不到7月份的10%。4月,虽然温度已经回升、土壤水分含量较高,但是,该月份降雨次数多,降雨时间较长,作为液流活动的重要环境驱动因子的空气水汽压差较低,整体的液流水平也比较低。从分析结果可看出,与光照和空气水分条件不同,土壤水份是调节液流季节变化的重要因子,Granier曾报道过欧洲花旗杉(*Pseudotsuga menziesii*)在土壤水分含量下降30%时,树木的蒸腾出现明显的下降<sup>[5]</sup>,不利于树木的生长,而温度则在日变化和季节变化都起到较明显的作用。从液流大小差异的变化幅度来看,光照和温度条件较接近的7月和10月,液流密度的平均差异却有明显的不同,7月较大,10月较小,很显然土壤水分起到很重要的作用,可认为土壤水分下降缩小了不同树木之间液流密度的差别<sup>[18]</sup>。

### 2.3 整树液流的整合:由探针至整树

由探针获得的液流密度所反映的是树木某一个方位和边材某一深度的液流特征,如何通过有效和严谨的方法将液流密度整合到整树,最终计算整树蒸腾,并能避免或者减少树木液流的差异在计算过程中产生的误差,是非常关键的。树木液流密度的可能性差异主要有两类,一是不同方位的差异,另一类是径向差异,这是由探针至整树整合过程需要克服的两个容易引起计算误差的重要因素。

#### 2.3.1 径向整合

在边材(由外往里)不同深度,水分传输功能的大小可能存在差异。有些学者发现,一些树种的边材液流速率存在径向变化,即边材的液流密度由

外侧向里(往心材方向)出现下降、或者上升、或者不规则变化,变化的幅度以及规律性也有差异<sup>[7,12,16,19,21]</sup>,而其他一些学者在其研究的树种中,并没有发现液流密度的径向变化<sup>[4,22]</sup>。

对于边材传输导度没有径向变化的树种,即边材的结构和水分传输特性是均匀的,那么整树的蒸腾( $E$ )(乔木从土壤吸收的水分,绝大部分通过树干输送到树冠,从那里向大气蒸腾,在此我们把整树的总液流看作是整树蒸腾),则可直接由最外则的探针测出的液流密度( $J_s$ )乘以边材面积( $A_s$ )求出:

$$E=J_s \cdot A_s$$

如果边材水分传输导度具有径向变化的特征,则需要测定不同边材深度的液流密度,求出不同深度的总液流,然后进行累加才能获得整树的蒸腾<sup>[11]</sup>:

$$E = \sum J_{s_i} \cdot A_{s_i} \\ = J_{s_1} \cdot A_{s_{0-20}} + J_{s_2} \cdot A_{s_{20-40}} + \dots + J_{s_i} \cdot A_{s_{(n+20)-(m+20)}}$$

公式中, $A_{s_{0-20}}$ 是边材最外侧0-20mm(Granier探针长度为20mm)的面积, $J_{s_1}$ 为该处对应的液流密度, $A_{s_{20-40}}$ 是边材20-40mm之间的面积, $J_{s_2}$ 则是该处对应的液流密度,如此类推。该公式的运用在实际操作中仍然比较复杂,我们可通过缩短探针间隔的方式,获得相邻探针更短距离的液流密度变化值,如第2深度可以是设为25至45mm,第3个深度为30至50mm,如此类推,或者更短,由此而获得随边材径向变化的近似连续变化的液流密度值,然后建立以下拟合曲线的公式<sup>[17]</sup>:

$$E = \int_0^r J_s \cdot \pi \cdot d(r_s)^2$$

公式中 $r_s$ 为边材厚度。

本研究通过实际的观测发现,马占相思的边材厚度一般在1.5-3.0cm之间(版图右上),超过3.0cm的个体较少,本项研究所采用的Granier热消散探针长20mm,所测出的液流密度是线平均值,因此,我们认为,探针基本上能整合马占相思液流密度随边材厚度变化而可能出现的变异,测定值反映的是边材平均液流密度。

#### 2.3.2 不同方位的整合

不少学者认为,由于树木不同方位液流密度的

差异较大,为准确测定树木的蒸腾,树木周围应该尽可能多地重复安装探针<sup>[6,17]</sup>,然而这样需要耗费大量探针,对于胸径较小的树木,安装探针过多,相邻的加热探针会产生相互影响而导致测定结果异常。正如 3.1 节所提到,尽管不同方位的液流密度差异明显,但不同方位之间的液流密度呈现非常显著的线性相关,因此我们可以利用这一特征值,计算整树的蒸腾( $E$ ):

$$E = \sum (J_{si}^E + J_{si}^S + J_{si}^W + J_{si}^N) * \frac{A_{si}}{4}$$

$J_{si}^E$ ,  $J_{si}^S$ ,  $J_{si}^W$  和  $J_{si}^N$  分别代表东、南、西、北四个方位的液流密度值,通过测定样树的不同方位的  $J_s$ , 求出东、南、西三个方位的液流密度值与北方的液流密度值的平均比率  $R$ , 则:

$$E = \sum (R^E + R^S + R^W + 1) * J_{si}^N * \frac{A_{si}}{4}$$

$R^E$ ,  $R^S$  和  $R^W$  分别是东、南、西方位的液流密度值与北方方位的液流密度值的平均比率。如果  $R$  值与树木的胸径 ( $DBH$ ) 的关系不是随机的,而是呈现有规律的格型,那么还需要建立  $R$  值与  $DBH$  的函数关系式:  $R=f(DBH)$ , 则:

$$E = \sum [f^E(DBH) + f^S(DBH) + f^W(DBH) + 1] * J_{si}^N * \frac{A_{si}}{4}$$

应用以上的公式,我们计算了几株马占相思样树的整树蒸腾(图 5),图 5 反映的是不同大小个体的整树蒸腾日变化,较小的 5 号和 11 号树最大蒸腾速率较低,分别只有 8 号和 3 号树的约二分之一和三分之一,我们结合表 2 的树形特征,分析个体之间的差异,发现冠幅是影响个体蒸腾差异的主要形态特征,因为冠幅大,承载的光辐射较大,因此用于蒸腾的能量多,蒸腾较高。对于个体较矮小的树木,有限的光辐射是其液流较低的主要原因<sup>[5,23]</sup>。Hunt 和 Beadle 认为胸径解释了桉树 98% 的边材面

表 2 被测样树的树形特征

Table 2 Features of examined sample trees

树号 Tree No.	胸高直径 DBH(m)	树高 Height (m)	树冠投影面积 Canopy size (m <sup>2</sup> )
3	0.32	22.8	160.97
5	0.18	15.6	32.23
8	0.23	19.5	34.21
11	0.20	19.5	18.37

积的差异,认为是由整树推算林段蒸腾最合适的参数<sup>[23]</sup>。我们从每株树木的平均日蒸腾量(3、5、8 和 11 号树分别为 43.75 kg、13.76 kg、30.64 kg、9.56 kg)可看出,尽管林地条件相同,它们的差别却非常显著。整树蒸腾量的差异反映了树木个体对林段水分利用的贡献不同,决定了树木个体在群落中的功能地位<sup>[5,17,23]</sup>。

## 2.4 由整树至林段的尺度转换

对林段的水分利用进行量化可为森林管理、造林树种的选择提供重要参考,虽然树干液流测定系统能准确地测定树木的液流,然而以生物统计学的方法,从个体到林段进行蒸腾的尺度扩展,问题也是很明显的<sup>[23]</sup>。正如 3.1 节所提到的,为节省成本往往只在树木的某一方位安装探针,即使如此,如果对一片面积较大的森林而言,也很难做到所有树木都安装探针,这不仅是探针成本的问题,用于记录探针所传递测定信号的数据采集仪,其信号通道也是有限的。因此,必须寻求一种通过计算有限样树的整树蒸腾,经尺度外推而计算林段的蒸腾( $E_{stand}$ )的方法。对于由单一树种组成的森林(如本研究的马占相思林),计算林段的蒸腾相对来说比较直接而简单,一旦确定树边材面积和树形大小的关系,以及平均木液流密度与树形和边材厚度的关系,即可实现林段水分利用的尺度转换。

由于不同胸径树木的液流密度和整树蒸腾均有差别,以样树的简单平均值推算林段蒸腾必然会产生很大的误差,因此需要知道森林的群落结构特征的信息。为此,我们按胸径大小对树木进行分布频度的分析,将树木个体按胸径大小划分几个等级,取每个径级内的样树液流密度平均值( $\bar{J}_{si}$ ),并将该径级的所有树木的边材面积( $A_{si}$ )进行累加,由此可以计算该径级树木的总蒸腾( $E_i$ ):

$$E_i = \bar{J}_{si} * A_{si}$$

林段的总蒸腾( $E_{stand}$ )则由各径级的总蒸腾相加求出:

$$E_{stand} = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \bar{J}_{si} * A_{si}$$

这里  $E_{stand}$  所表示的是单位时间内所有树木的水分蒸腾,并没有真正反映出群落的结构特征(如叶面积、地面积或者基面积)与水分利用的关系。如果要了解森林对土壤水分的利用,以及土壤所能承



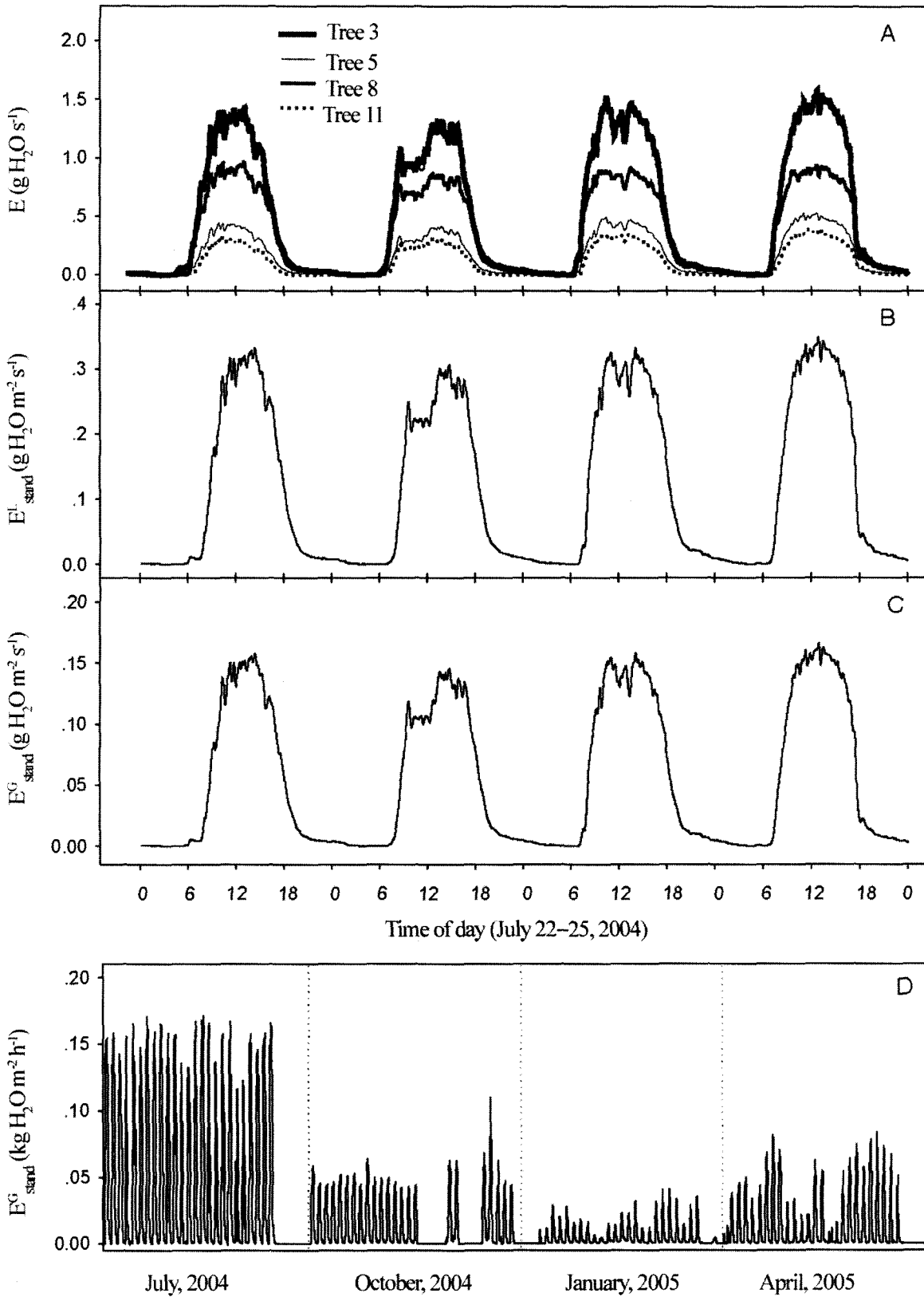


图 5 马占相思的整树蒸腾 (A) 日变化、林段蒸腾的日变化 (B、C) 和季节变化 (D, 空白间断处为仪器故障或停电造成的数据缺失)

Fig. 5 Daily courses of whole-tree transpiration (A) and stand transpiration (B, C), and seasonal change of stand transpiration (D, missing data were caused by equipment or power failure) in *A. mangium*

受的林段蒸腾,则需以单位冠层投影面积的林段蒸腾 ( $E_{\text{stand}}^G$ ) 来表示 (图 5C, D):

$$E_{\text{stand}}^G = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{J}_{si} * A_{si}}{A_G}$$

或者以单位基面积的林段总蒸腾 ( $E_{\text{stand}}^B$ ) 表示:

$$E_{\text{stand}}^B = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{J}_{si} * A_{si}}{A_B}$$

其中,  $A_G$  是森林冠层地面投影面积,  $A_B$  是林段所有树木的总基面积 (basal area, 这里指胸高处树干横截面积之和)。

为了反映森林冠层与大气水分交换通量的特征和规律,即冠层的水分蒸腾,则需通过测定森林冠层的总叶面积 ( $A_L$ ), 计算单位冠层叶面积的蒸腾量。

$$LAI = \frac{A_L}{A_G}$$

$LAI$  是森林叶面积指数, 实际上也可以应用目前广泛使用的冠层分析仪直接测定。那么冠层单位叶面积的林段蒸腾 ( $E_{\text{stand}}^L$ ) (图 5B) 则为:

$$E_{\text{stand}}^L = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{J}_{si} * A_{si}}{A_L} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{J}_{si} * A_{si}}{LAI * A_G}$$

综观以上林段蒸腾的几种表达方式,我们认为  $E_{\text{stand}}^L$  更便于反映群落不同层次对水分利用功能的空间分布特征。树干液流测定方法的特点之一就是能测定和区分森林不同层次的水分蒸腾,能比较清楚地描述群落水分循环的空间分配,尤其是当林下植物对系统的水分利用的贡献较大时,  $E_{\text{stand}}^L$  的使用意义更大<sup>[24]</sup>。此外,如果要估测冠层的平均气孔导度,那么  $E_{\text{stand}}^L$  是最关键的、必不可少的参数。

应用以上的公式,我们计算了马占相思林的林段蒸腾,图 5D 分别是 2004 年 7 月、10 月和 2005 年 1 月和 4 月林段蒸腾的整月变化过程。不同月份林段的蒸腾强度与图 4 中的平均液流密度是一致的,7 月的林段蒸腾最高,平均最高蒸腾速率接近  $0.15 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 1 月份最低,平均最高蒸腾速率不到  $0.05 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 这与土壤水分含量较低、温度偏低,不利于水分活动有密切的关系。马占相思林段蒸腾的季节变化差异较大,反映了该地区气候和水分供应 (降雨和土壤水分) 的不均匀性。

### 3 结论

研究结果显示 Granier's Sap Flow 测定系统是分析树内和树木个体之间液流差异的有效工具,通过尺度转换,可获得较准确的整树蒸腾和林段蒸腾。由于树木具有较高的液流异质性,Granier 测定值如果能结合合适的尺度扩展方法,会避免较多的误差,较好地整合树木的水分利用。运用树干液流测定技术估测整树或者林段的蒸腾,产生的误差的大小取决于代表性样树的选择,对于异质性较低的森林,5-10 株样树已经具有较好的代表性<sup>[4]</sup>。通过整树整合方法, Sap Flow 测定技术还可以观测林段不同个体、不同径级树木以及层次对整个群落水分利用的贡献。整树蒸腾的差异 (贡献) 以及林段蒸腾的季节性变化表明,尽管马占相思林的种类组成单一,但群落的水分利用功能在时间和空间上显示明显的异质性。

### 参考文献

- [1] Köstner B M M, Schulze E D, Kelliher F M, et al. Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements [J]. *Oecologia*, 1992, 91:350-359.
- [2] Granier A, Biron P, Köstner B, et al. Comparison of xylem sap flow and water vapor flux at stand level and derivation of canopy conductance for Scots pine [J]. *Theor Appl Climatol*, 1996, 53: 115-122.
- [3] Granier A, Bréda N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements [J]. *Ann Sci For*, 1996, 53:537-546.
- [4] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. *Agri For Meteorol*, 1996, 78:19-29.
- [5] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement [J]. *Tree Physiol*, 1987, 3:309-320.
- [6] Lu P, Muller W, Chacko E K. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions [J]. *Tree Physiol*, 2000, 20:683-692.
- [7] Oren R, Phillips N, Ewers B E, et al. Sap-flux-scaled transpiration response to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest [J]. *Tree Physiol*, 1999, 19: 337-347.
- [8] Granier A, Loustau D. Measuring and modeling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data [J]. *Agri For Meteorol*,

- 1994, 71:61-81.
- [9] Granier A, Bobay V, Gash J H C, et al. Vapor flux density and transpiration rate comparison in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes Forest [J]. *Agri For Meteorol*, 1990, 51:309-319.
- [10] Pataki D E, Oren R, Katul G, et al. Canopy conductance of *Pinus taeda*, *Liquidambar styraciflua* and *Quercus phellos* under varying atmospheric and soil water conditions [J]. *Tree Physiol*, 1998, 18: 307-315
- [11] Ma L (马玲), Zhao P (赵平), Rao X Q (饶兴权), et al. Main determination methods of tree transpiration [J]. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2005, 24(1):88-96.(in Chinese)
- [12] Phillips N, Oren R, Zimmermann R. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species [J]. *Plant Cell Environ*, 1996, 19:983-990.
- [13] Sandermann W, Hausen B, Simatupang M. Orientierende Versuche zur Differenzierung von Splint und Kern sowie zum Sichtbarmachen der Übergangszone von Fichte und anderen Nadelholzern [J]. *Holzforschung*, 1967, 21:349-354.
- [14] Campbell G S, Norman J M. *An Introduction to Environmental Biophysics* [M]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 36-51.
- [15] Granier A, Biron P, Bréda N, et al. Transpiration of trees and forest stands: short and long-term monitoring using sapflow methods [J]. *Glob Change Biol*, 1996, 2:265-274
- [16] Wullschlegel S D, King A W. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar tress [J]. *Tree Physiol*, 2000, 20:511-518.
- [17] Čermák J, Kučera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands [J]. *Trees*, 2004, 18:529-546.
- [18] Jiménez M S, Čermák J, Kucera J, et al. Laurel forest in Tenerife, Canary Islands: the annual course of sap flow in *Laurus* and stand [J]. *J Hydrol*, 1996, 183:307-321.
- [19] Čermák J, Cienciala E, Kučera J, et al. Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing [J]. *Tree Physiol*, 1992, 10:367-380.
- [20] Schäfer K V R, Oren R, Tenhunen J D. The effects of tree height on crown level stomatal conductance [J]. *Plant Cell Environ*, 2000, 23:365-375.
- [21] Jiménez M S, Nadezhdina N, Čermák J, et al. Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands [J]. *Tree Physiol*, 2000, 20:1149-1156.
- [22] Martin T A, Brown K J, Čermák J, et al. Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest [J]. *Can J For Res*, 1997, 27:797-808.
- [23] Hunt M A, Beadle C L. Whole-tree transpiration and water-use partitioning between *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in a short-rotation plantation in northeastern Tasmania [J]. *Tree Physiol*, 1998, 18: 557-563.
- [24] Meinzer F C, Goldstein G, Andrade J L. Regulation of water flux through tropical forest canopy trees: Do universal rules apply? [J]. *Tree Physiol*, 2001, 21:19-26.

## 图版说明

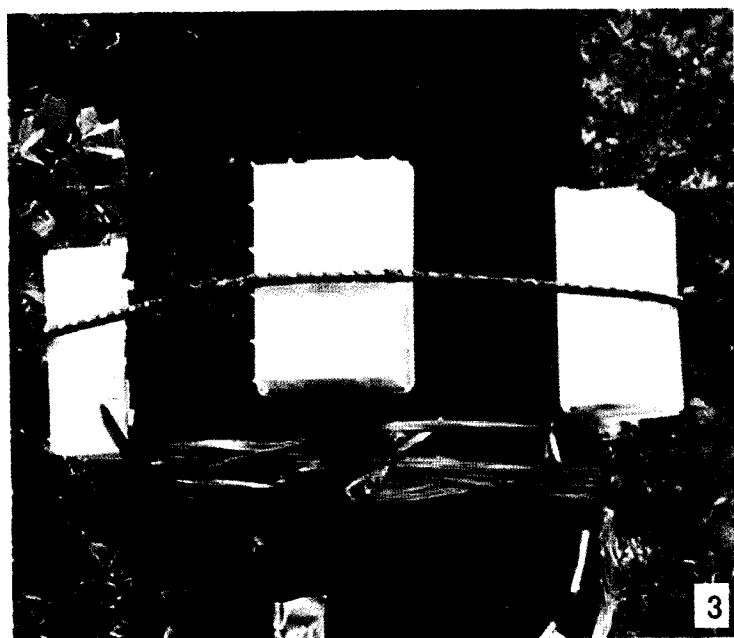
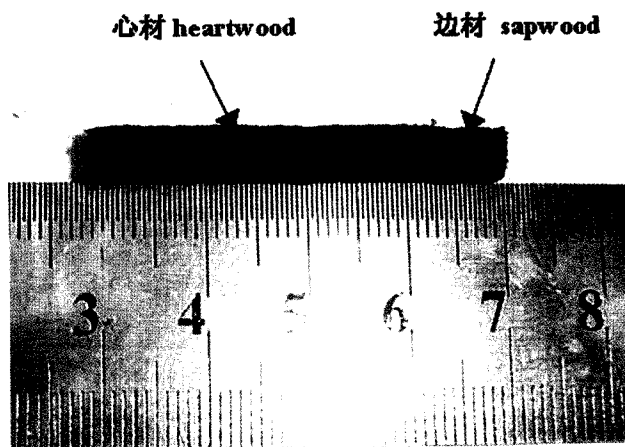
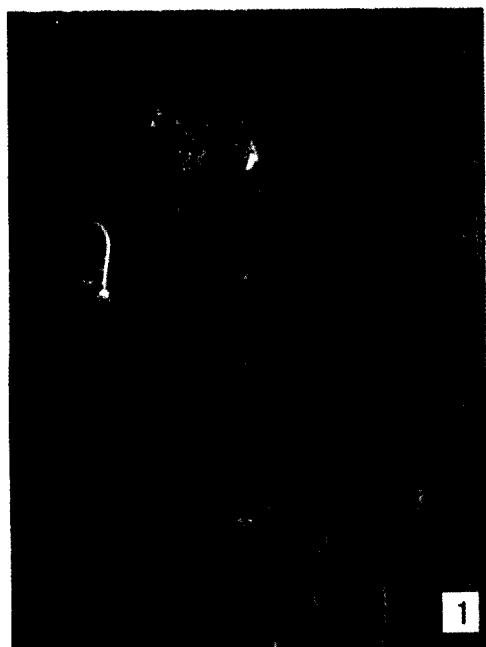
### 图版 I

1. 平行插入去树皮的树干边材内的一对 Granier 热消散探针, 并与四芯电缆连接;
2. 生长锥打孔器钻取的马占相思木栓示边材和心材区域;
3. 保护探针的塑料盖;
4. 太阳膜包裹 Granier 树干液流测定系统, 防止太阳辐射和雨水。

## Explanation of plate

### Plate I

1. A pair of Granier's thermal dissipation probes inserting into sapwood after removal of bark, and connecting with 4-core cable;
2. A wood core taken by increment borer showing the sapwood and the heartwood;
3. The Granier's probes covered with plastic boxes to protect against mechanical disturbance;
4. The measuring system wrapped with silver film to prevent sun light and rain.



赵平等: 图版 I

ZHAO Ping et al.: Plate I