

# 五针热脉冲探头在测定树干液流中的应用

杜梦鸽<sup>1</sup> 王胜<sup>2</sup> 樊军<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 准确测量树干液流对研究树木耗水特性、植物生理和生态水文效应等具有重要意义。本文选用一种新型五针热脉冲多功能数字探头(PHPP), 运用热脉冲理论, 测量小叶杨树干液流, 并与热扩散探针(TDP)进行对比分析, 探究五针热脉冲探头测量树干液流的适用性和准确性。结果表明: 五针热脉冲探头能够准确揭示小叶杨树干液流昼夜变化规律, 并且与热扩散探针测量结果呈显著的线性相关关系,  $R^2$ 达到0.90, 均方根误差为2.75, 平均相对误差为11%。PHPP探头能较为精确地识别低液流和逆液流, 可以快速准确地拟合热参数, 直接测得树干液流速率, 应用潜力较大。

**关键词** 五针热脉冲数字探头(PHPP); 树干液流; 热扩散探针(TDP); 干旱地区

**Application of the penta-needle heat pulse probes to determine the stem sap flow.** DU Mengge<sup>1</sup>, WANG Sheng<sup>2</sup>, FANG Jun<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** It is very important to measure sap flow accurately for investigating water consumption characteristics of trees, plant physiology and eco-hydrology. A new multifunctional digital penta-needle heat pulse probes (PHPP) was selected in this study, which was used to measure the sap flow of the *Lobular poplar*, in order to test the applicability and reliability of the new penta-needle heat pulse sensors in the measurement of sap flow in comparison with the thermal diffusion method (TDP). The results showed that PHPP can accurately obtain the diurnal variation of the sap flow of the *Lobular poplar* and the results had statistically significant linear correlation with TDP, with  $R^2$  being 0.90, root mean square error 2.75 and mean relative error 11%. PHPP could accurately identify low and reverse sap flow, with the thermal parameters being fitted quickly and accurately. It was a promising method to measure sap flow.

**Key words:** penta-needle heat pulse probe (PHPP); sap flow; thermal diffusion probe (TDP); arid region.

准确测量林木蒸腾是森林水文和森林生态等许多学科的研究重点,也是贯穿整个森林生态和森林培育等研究的基础<sup>[1]</sup>。高达98%的树干液流最终通过树冠蒸腾的方式散失到大气,因此可以通过测量树干液流来确定树冠蒸腾耗水量<sup>[2]</sup>。树干液流可通过多种方法测定,如染色法<sup>[3-4]</sup>、同位素示踪法<sup>[5]</sup>、热脉冲法、热扩散法<sup>[6]</sup>、热平衡法<sup>[7]</sup>、核磁共振图像

扫描<sup>[8]</sup>等。其中,热脉冲法是对径向插入树干边材的线性热源施加短时热脉冲,测量加热前后热源周围温度变化获取树干液流。热脉冲技术由Huber<sup>[9]</sup>最先提出,后由Marshall<sup>[10]</sup>、Swanson等<sup>[11]</sup>、Edwards等<sup>[12]</sup>改进完善。Marshall<sup>[10]</sup>系统地提出了热对流扩散方程以及温度场分布解析方程,Burgess等<sup>[13]</sup>利用上下对称探针增温之比计算液流,Cohen等<sup>[14]</sup>仅通过测量位于线性热源上方一定距离的温度探针升温最大所需时间获得液流密度,Masmoudi等<sup>[15]</sup>采取循环加热的方式用单针探头实现了液流密度测量。

本文由国家自然科学基金项目(41571224, 41571130082)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41571224, 41571130082).

2017-04-18 Received, 2017-05-25 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

热脉冲用于确定热参数和水通量的技术是基于向插入介质中的线性热源施加短时热脉冲,通过测量加热前后热源周围特定位置温度变化获取水通量参数。Campbell 等<sup>[16]</sup>设计了一种双针热脉冲探头,由一个加热器针和一个温度针组成测量土壤水通量密度,随后 Basinger 等<sup>[17]</sup>、Ham 等<sup>[18]</sup>对该设计的工作程序和介质校准进行了改进。Kluitenberg 等<sup>[19]</sup>和 Ochsner 等<sup>[20]</sup>研制了三针热脉冲探头(THPP),由两个温度探针(即下游和上游)测定土壤中的单向水通量。Vandegheuchte 等<sup>[21]</sup>探讨了三针热脉冲探头在树干液流测量中的应用。王胜等<sup>[22]</sup>基于热比率法、最大温度法、单针热脉冲法同时实现旱柳(*Salix matsudana*)液流密度测定。最近, Yang 等<sup>[23]</sup>开发了一种五针热脉冲数字探头(PHPP),该五针热脉冲探头采用中央加热针和 4 个温度针正交排列,可以进行多孔介质平面内任意方向水通量密度测量并且利用温度变化进行多参数同时计算,能够快速准确地确定物质热容量、热扩散系数、导热系数和含水率。目前,五针热脉冲探头仅验证了土壤热参数和土壤水通量密度的动态监测方面的应用<sup>[23-24]</sup>,而在树干液流测量方面则鲜有应用。探索五针热脉冲技术在树干液流中的应用,与土壤热参数估计和水通量密度监测结合起来,实现土面蒸发和树木蒸腾的同步测定,对林地耗水研究具有重要意义。为此,本文选择小叶杨(*Populus simonii*)作为试验树种,应用五针热脉冲数字探头测定树干液流,并与应用广泛的热扩散探针方法对比,探究五针热脉冲数字探头测定树干液流的可行性和可靠性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设置

试验区位于陕西省榆林市神木县六道沟小流域(38°46′—38°51′ N、110°21′—110°23′ E),海拔为 1094~1274 m。该区处于黄土高原水蚀风蚀交错区,是典型的生态脆弱区。属中温带半干旱气候,年均气温为 8.4 °C,  $\geq 10$  °C 活动积温为 3248.0 °C,年总太阳辐射量为 5922 MJ·m<sup>-2</sup>,多年平均降水量 437 mm。试验样地位于淤地坝内一片小叶杨林,小叶杨是当地常见的乡土树种,边材厚度较薄且径向分布较为均匀。鉴于样树之间长势差异显著和供试探头数量限制,本试验选取 1 株树龄为 30 年左右、胸径为 29.2 cm、边材面积为 108.7 cm<sup>2</sup>长势较好的小叶杨为待试样木。因树干不同朝向液流也有差异,试验将两种探头均安装到一颗树,每种探头 3 个重复,分

别将五针热脉冲探头(PHPP)和热扩散探针(TDP)安装在树高 1 m 处和树高 1.5 m 处,随机排布于树干周围 3 个方向,进行同时监测。

2016 年 8 月上旬将五针热脉冲探头和热扩散探针安装于树干,之后在插入钢针部位用中性硅胶密封,防止病菌和雨水侵入结合部位。试验选用 CR1000 数据采集器控制 TDP 探针加热热量、加热时长,每 60 s 获取 1 次数据并记录每 30 min 的平均值。PHPP 探头每 30 min 进行一次测量,数据也存储于 CR1000。试验持续至 10 月中旬,结束后将五针热脉冲探头和热扩散探针取出,测量因热脉冲探头的插入和加热而产生的机械损伤尺寸。试验在 9 月上旬选取相同规格和长势的小叶杨,采集边材样本用排水法测量边材密度,用烘干法测质量含水量,用于边材热扩散系数和液流密度计算。

### 1.2 五针热脉冲探头构造

试验所用五针热脉冲探头有 5 根不锈钢针,包含 1 根直径为 2.1 mm 的中央加热针和 4 根直径为 1.27 mm 的温度探针(图 1)。加热针长 28 mm,温度针长 16 mm,两者相距 6.5 mm。加热针是双环漆包镍铬电阻丝,有恒定电阻(531  $\Omega \cdot m^{-1}$ ),采用导热环氧树脂固定在不锈钢毛细管中。每个温度探针包含一个热敏电阻,用高导热率的环氧树脂填充固定在不锈钢毛细管末端。4 个探针在距离加热探针相等的径向正交布置,每对温度针( $S_1$ 与 $S_3$ , $S_2$ 与 $S_4$ )提供一个下游和一个上游测量值。

### 1.3 测量原理

在树干介质中既包含通过木质部发生的热传导,又包含通过液流发生的热扩散。假设在一个二维

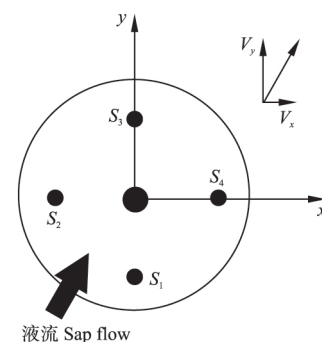


图 1 五针热脉冲数字探头(PHPP)示意图

Fig.1 Schematic illustration of the PHPP.

$S_1 \sim S_4$ : 温度针的位置 Location of the heater needle and four thermistors;  $x, y$ : 平面内温度探针与加热针之间的空间距离(m) The distance between the heater needle and four thermistors within the plane;  $V_x, V_y$ :  $x$  和  $y$  方向的热脉冲速度分量 The components of the heat flow velocity in  $x$  and  $y$  directions ( $m \cdot s^{-1}$ ).

平面内同时发生热传导和热扩散,且热传导占主导地位,则水在不可压缩的多孔介质中可用此热对流扩散方程进行分析:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - V_x \frac{\partial T}{\partial x} - V_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1)$$

式中:  $T$  为温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t$  为时间;  $k$  为边材热扩散系数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $x, y$  为平面内温度探针离加热针之间的空间距离 ( $\text{m}$ );  $V_x, V_y$  分别是  $x$  和  $y$  方向的热脉冲速度分量 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

五针热脉冲探头的热参数拟合是基于一个无限大的线性热源脉冲注入无限均匀介质中, Yang 等<sup>[23]</sup> 给出了温度场分布解析方程:

$$T(x, y, t) = \begin{cases} \frac{q'}{4\pi\lambda} \int_0^t s^{-1} \exp \left[ -\frac{(x - V_x s)^2 + (y - V_y s)^2}{4ks} \right] ds & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{q'}{4\pi\lambda} \int_{t-t_0}^t s^{-1} \exp \left[ -\frac{(x - V_x s)^2 + (y - V_y s)^2}{4ks} \right] ds & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q'$  是热源线性功率 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\lambda$  是热导率 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $t_0$  是热脉冲持续时长 ( $\text{s}$ ).

探头的核心部件是一个 16 位微控制器,内部有一个 12 通道的 12 位 A/D 转换器,外部则有一个 24 位的模数转换器.微控制器通过连接加热丝,释放持续 8 s 的热脉冲,脉冲停止后每个温度探针测量周期为 120 s.微控制器通过式 (2) 的温度升高数据来执行  $k, \lambda, V_x, V_y$  4 个参数的拟合,使用行业标准的 SDI-12 来管理微控制器与外部数据采集器之间的数据交换.

利用式 (2) 中 4 个温度探针的温度变化值,通过 INV-WATFLX 程序控制,运用最小二乘法,反解  $k, \lambda, V_x, V_y$  4 个参数. INV-WATFLX 是将五针热脉冲探头测定的导热率和热扩散系数进行拟合的计算程序,可提供两种计算方法: 1) 通过 4 个温度探针的温度变化值来计算  $k, \lambda, V_x, V_y$  4 个参数; 2) 通过周期温度数据来逆向拟合热参数.参数拟合是由雅可比矩阵计算目标函数,然后由高斯-牛顿方程解决参数估计的问题,最后通过参数的误差估计和置信区间来判断参数是否合理,并对之进行优化. INV-WATFLX 主要有 2 个输出文件,其一是优化的参数值,利用高斯-牛顿方程迭代控制方差在 95% 置信区间内;另一个是每个温度探针的温度上升值和相对误差. INV-WATFLX 的优点是简化测量控制过程,减少和

优化数据的参数估计<sup>[24]</sup>.

#### 1.4 探针间距标定

加热针与每个温度探针之间的有效距离是使用热脉冲方法准确确定热参数的关键,因此需要进行校准<sup>[25-26]</sup>.五针热脉冲探头的原位间距校准根据下式利用脉冲释放后 120 s 周期内温度上升值来确定:

$$T(r, t) = \begin{cases} \frac{q'}{4\pi k C} \int_0^t s^{-1} \exp \left[ -\frac{r^2}{4ks} \right] ds & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{q'}{4\pi k C} \int_{t-t_0}^t s^{-1} \exp \left[ -\frac{r^2}{4ks} \right] ds & t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

在零液流状况时 ( $V_x = V_y = 0$ ), 方程中温度探针距加热针的距离  $x, y$  可以用  $r$  代替 ( $x^2 + y^2 = r^2$ ). 导热率 ( $\lambda$ ) 可用热扩散系数  $k$  和  $C$  代替, 方程 (2) 可写为 (3).

$$\lambda = kC \quad (4)$$

本试验采用饱和砂土对探针间距进行标定,首先根据下式确定  $C$ , 然后确定探针有效距离.

$$C = \rho_s C_s + \theta C_w \quad (5)$$

式中:  $C_w$  为水的比热容 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\rho_s$  为砂土容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $C_s$  为砂土比热容 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\theta$  为含水量.

#### 1.5 液流计算

五针热脉冲探头: 本试验采用 Burgess 等<sup>[13]</sup> 的校正方案对五针热脉冲探头进行伤流校正, 根据加热针直径 2.1 mm、针间距 6.5 mm、伤流校正系数  $B$  为 1.9572, 通过下式校正液流.

$$V_h = B V_x \quad (6)$$

当获得液流校正过的  $V_h$  后, 进行零液流标定. 树木生长季夜间往往存在一定速率的液流, 但液流通常在树木秋季落叶以后停止. 因此, 本试验选取小叶杨落叶后一段时间的测量值作为零液流, 对获取的 3 个五针热脉冲探头测量值  $V_h$  进行校正得到  $V_b$ , 然后再根据下式计算液流密度.

$$V_s = V_b \frac{\rho_b C}{\rho_w C_w} \quad (7)$$

式中:  $V_s$  为液流密度 ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\rho_w$  为水的密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\rho_b$  为树干密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

热扩散探针: 将内置电热丝和温度传感器的探针插入具有水分传导功能的树干边材中, 给电热丝施加恒定电压持续供热, 当最终达到热动平衡状态即稳态时, 加热探针和位于其正下方的参考温度探

针之间的温差 ( $\Delta T_i$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) 与液流密度  $V_s$  有关. Grain-er<sup>[6]</sup> 定义了无量纲指数  $K_i$ , 并建立液流密度与  $K_i$  的关系.

$$K_i = \frac{(\Delta T_{\max} - \Delta T_i)}{\Delta T_i} \quad (8)$$

$$V_s = 0.0119K_i^{1.231} \quad (9)$$

式中:  $\Delta T_{\max}$  为零液流条件下的温差值 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 本试验中仪器每隔 7 d 于 2:00—5:00 (假设液流为零) 测量最大温差.

## 1.6 数据处理

采用 Excel 2010 对数据进行统计分析, 用 Pearson 法对两种不同方法测量液流密度进行相关分析, 利用 Origin 2016 软件作图, 图表中数据为测量重复的算术平均值.

## 2 结果与分析

### 2.1 五针热脉冲探头和热扩散探针测量液流密度的动态

运用热脉冲法和热扩散法分别计算液流密度, 选取 3 个探头平均值绘制液流密度动态曲线. 结果显示, 两种方法测量液流密度总体变化趋势基本一致. 8 月 23—25 日, 由于降雨原因出现零液流或低液流现象. 两种方法所测液流密度日变化总体为单峰曲线, 10:00—16:00 之间液流较高, 4:00—6:00 之间液流较低. 五针热脉冲探头测定平均液流密度为  $5.90 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 热扩散探针测定平均液流密度为  $5.72 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 五针热脉冲探头与热扩散探针测量值相当 (图 2). 有研究指出, 由于五针热脉冲数字探头的测量范围较为广泛 ( $10 \sim 7000 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 同时又能够甄别液流方向, 在低速和逆向液流测量方面都有很好的应用潜力<sup>[23]</sup>. 热扩散探针所需功率较小, 对树干机械损伤较小, 能够测量树干液流, 但是在测量低液流时结果较为紊乱且不能甄别液流方向<sup>[6]</sup>. 与 TDP 相比, PHPP 在日间高液流时有较大波动, 在部分晴朗天数内液流日变化呈现 M 型曲线: 11:00—13:00 出现一个较小峰值, 13:00—14:00 明显降低, 14:00—16:00 又出现较大峰值, 说明 PHPP 能够准确识别高液流. 对于两种方法在低液流时, PHPP 可以监测到液流在夜间的递减过程, 而 TDP 所测量的低液流接近于零或无变化规律, PHPP 在干旱半干旱地区树木耗水研究方面具有较大潜力, 在低液流段用 PHPP 还可以观察到液流有负值, 可能出现了逆流现象. 已有研究证明, 热脉冲探头也可以测量土壤蒸发, Wang 等<sup>[27]</sup> 认为, 热脉冲法和蒸渗

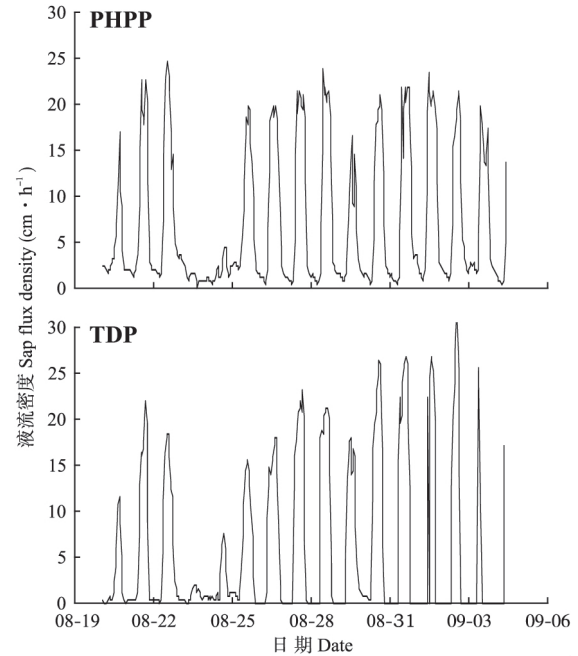


图 2 两种方法测量液流密度动态变化

Fig.2 Dynamics change of sap flux density measured by two methods.

仪法测量结果显著相关, 证明了热脉冲方法测量柳树林蒸散的可行性. Xiao 等<sup>[28]</sup> 研究了 11 针热脉冲在玉米冠层内的蒸散过程, 证明热脉冲能够测量自然干湿循环中的土壤蒸发, 因此可以利用多个 PHPP 探头同时测量土壤蒸发和树干液流, 研究林地耗水特征.

### 2.2 两种不同方法测量液流密度的相关性

运用热脉冲法和热扩散法分别计算液流密度, 结果显示用五针热脉冲数字探头和热扩散探针所测液流密度具有显著的线性相关性,  $R^2$  为 0.90, 均方根误差为 2.75, 平均相对误差为 11% (图 3). TDP 探头由于测量原理的限制, 最大温差易受到环境温度变化影响, 无法准确测量低液流<sup>[6]</sup>. PHPP 探头与热

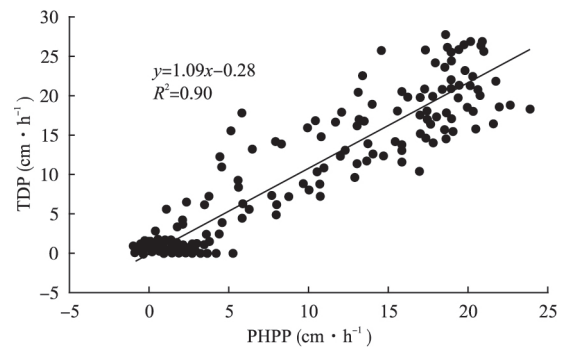


图 3 PHPP 与 TDP 液流密度的相关性

Fig.3 Correlations of sap flow density between PHPP and TDP.

比率<sup>[11, 23]</sup>法相似,采用等距离温度探头,在原理上PHPP应用4个方向整个周期温度-时间曲线反解热参数和液流,而热比率实质仅是上下两个方向的单点测量,大大增加了低液流测量的准确性.有研究通过对比热脉冲、热扩散、热平衡法测量树干液流,表明伤流校正后热脉冲法测量结果最为精确<sup>[29]</sup>.PHPP与TDP测量的液流密度总体相关性较好(图3)验证了五针热脉冲探头在测量树干液流的可行性.同时,PHPP探头测量系统简单便捷,加热、测量和计算过程由探头内部电路控制完成,直接以SDI-12的标准输出结果,探头至数据采集器通讯可以通过总线方式,而TDP或者是普通的三针热脉冲探头,均需要精确而复杂的数据测量与控制系统,每个探头需要并联到数据采集器,应用受制于探头数量及其与数据采集器的距离.

### 2.3 探头重现性及误差分析

3个探头在测量树干液流时具有一致的变化趋势(图4),且3个探头之间相关性较好,表明五针热脉冲探头测量结果有较好的重现性,能够很好地反映树木液流的昼夜变化过程.但是,因为3个探头安装在树干的不同方向,测量值之间存在差异,整个测量期间液流密度平均值分别为4.12、3.10和2.29  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ .本试验3个探头分别安装于树干胸径处的不同方向,分析五针热脉冲探头之间测量差异,可能会受到树木边材径向的不均匀性、木质部导管孔径大小的影响.树干液流在不同方位和不同高度都有差异<sup>[30]</sup>,树干边材区不同深度的位点之间的液流差别也很大,液流速度从形成层向内先增大后减小<sup>[31]</sup>.探针深度与被测部位接触的紧密度对液流速率也有较大影响.实际测量中需根据不同树种及不同径阶边材宽度的大小来确定探头规格和插入深度,减少安装操作不当对测定结果的影响.本试验由

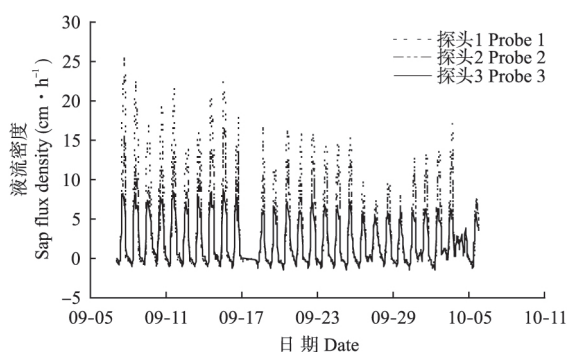


图4 3个五针热脉冲探头液流密度的动态变化

Fig.4 Sap flow density dynamics of three penta-needle heat pulse probes.

于五针热脉冲探头探针数目较多、探针较长,安装时容易出现插入深度不够、插弯等现象,对液流的测量造成影响.探针与树干边材接触的紧密程度也可能导致3个探头之间存在差异.

有研究表明,热脉冲的测定精确度依赖于探针之间间距<sup>[32]</sup>,探针有效间距的校正是减小测量误差的有效途径.因上下对称探头的错位,可导致液流密度结果偏低<sup>[33]</sup>.原位间距校准也可以减少因接触电阻和异性接触产生的影响<sup>[25]</sup>,因此准确获取有效间距对液流密度测量至关重要.本试验五针热脉冲探头安装前,在室内饱和砂土已知热容情况下根据式(4)对针间距进行了校准.

本研究利用五针热脉冲探头和2针热扩散探头同时测量树干液流,验证了测定树干液流的可行性,但同时五针热脉冲探头也如其他热动力学方法一样,会因加热对树体产生损伤而导致测量误差.与热扩散探针相比,五针热脉冲探头输入边材的热功率较高,从而导致树干边材有一定的热损伤和机械损伤.相关研究指出,机械损伤不但会干扰液流路径,而且在伤口处形成侵填体,阻塞液流通道,引起液流密度的低估<sup>[34]</sup>.已有研究表明,因加热功率引起的伤流液的校正对准确测量树干液流必不可少<sup>[35-36]</sup>.本试验热脉冲探头加热针的热量输出强度为80  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,产生的伤口直径约2.1 mm.对于树干液流的伤流校正,本试验选取Burgess等<sup>[13]</sup>的校正方案,根据加热针直径和针间距,计算相应的伤流液校正系数.尽管已有研究证实,原始校正参数在黑松<sup>[37]</sup>、香蕉<sup>[38]</sup>等树种和木屑压缩成的茎干<sup>[39]</sup>等人工合成介质中都具有良好的适用性.但由于输入热功率、探针材质和探针与边材接触等差异,使测量结果可能存在一定误差<sup>[40]</sup>.因此,有必要开展基于离体组织和整株称量的伤流校正试验.

零点液流的确定是准确获取液流密度的基础.有研究指出,因植物夜间蒸腾较小可以近似为零液流<sup>[6]</sup>,TDP就是基于这样的假设进行零液流校正.也有研究指出,由于植物新陈代谢引起的水分运动或持续干旱期间树木内部水分缓慢补充,生长季夜间往往存在一定速率的液流,而液流通常在树木秋季落叶以后才停止<sup>[35]</sup>.在不同生长阶段确定零液流的特征值并不固定,会随着边材含水量动态变化、探针和植物组织接触状况的变化而改变<sup>[41]</sup>.本研究选取小叶杨落叶之后的测量值作为零液流对热脉冲方法获取的数据进行校正也可能产生误差,如何准确确定零液流还需进一步研究.

影响树干液流密度测量精度的因素有很多,如气象因子的快速变化、环境温度梯度、树干径向差异、探针接触状况<sup>[42]</sup>、测温元件精度等也对热脉冲法测量结果有影响,因此对于液流密度的测量误差估计还需进一步研究。

### 3 结 论

PHPP 和 TDP 液流密度测量结果达到极显著水平,  $R^2$  达到 0.90, 五针热脉冲探头能够准确获得小叶杨树干的液流昼夜变化规律。PHPP 在高液流、低液流和逆流方面都有优势。同时, PHPP 能快速准确地拟合相关参数, 并通过误差估计对参数进行优化, 探头直接输出热参数和液流速率, 测量结果较为精确。由于该探头可以用于土壤蒸发测量, 在林地耗水研究方面的应用潜力巨大。

### 参考文献

- [1] Wang H-T (王华田), Ma L-Y (马履一). Measurement of whole tree water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP). *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **22**(6): 661-667 (in Chinese)
- [2] Kramer PJ, Boyer JS. *Water Relations of Plants and Soils*. London: Academic Press, 1995
- [3] Kramer PJ. Sap pressure and exudation. *American Journal of Botany*, 1940, **27**: 929-931
- [4] Canny MJ. Flow and transport in plants. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1977, **9**: 275-296
- [5] Heine RW, Farr DJ. Comparison of heat-pulse and radioisotope tracer methods for determining sap-flow velocity in stem segments of poplar. *Journal of Experimental Botany*, 1973, **24**: 649-654
- [6] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems. *Annals of Forest Science*, 1985, **42**: 193-200
- [7] Trcala M, Cermák J. A new heat balance equation for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **102**: 532-538
- [8] Kuroda K, Kanbara Y, Inoue T, et al. Magnetic resonance micro-imaging of xylem sap distribution and necrotic lesions in tree stems. *IAWA Journal*, 2006, **27**: 3-17
- [9] Huber B. Observation and measurements of sap flow in plant. *Reports of German Botanical Society*, 1932, **50**: 89-109
- [10] Marshall DC. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 1958, **33**: 385-396
- [11] Swanson RH, Whiffeld DWA. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany*, 1981, **32**: 221-239
- [12] Edwards WRN, Jarvis PG. A method for measuring radial differences in water content of intact tree stems by attenuation of gamma radiation. *Plant, Cell and Environment*, 1983, **6**: 255-260
- [13] Burgess SS, Adams MA, Turner NC, et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 2001, **21**: 589-598
- [14] Cohen Y, Fuchs M, Green GC. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 1981, **4**: 391-397
- [15] Masmoudi MM, Mahjoub I, Lhomme JP, et al. Sap flow measurement by a single thermal dissipation probe: Exploring the transient regime. *Annals of Forest Science*, 2009, **66**: 1-7
- [16] Campbell GS, Calissendorff C, Williams JH. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**: 291-293
- [17] Basinger JM, Kluitenberg GJ, Ham JM, et al. Laboratory evaluation of the dual-probe heat-pulse method for measuring soil water content. *Vadose Zone Journal*, 2003, **2**: 389-399
- [18] Ham JM, Benson EJ. On the construction and calibration of dual-probe heat capacity sensors. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**: 1185-1190
- [19] Kluitenberg GJ, Ochsner TE, Horton R. Improved analysis of heat pulse signals for soil water flux determination. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**: 53-55
- [20] Ochsner TE, Horton R, Kluitenberg GJ, et al. Evaluation of the heat pulse ratio method for measuring soil water flux. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**: 757-765
- [21] Vandegehuchte MW, Steppe K. A triple-probe heat-pulse method for measurement of thermal diffusivity in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **160**: 90-99
- [22] Wang S (王胜), Fan J (樊军). Application of three heat pulse technique-based methods to determine the stem sap flow. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(8): 2244-2230 (in Chinese)
- [23] Yang C, Sakai M, Jones SB. Inverse method for simultaneous determination of soil water flux density and thermal properties with a Penta-needle heat pulse probe. *Transport in Porous Media*, 2010, **49**: 5851-5864
- [24] Yang C, Jones SB. INV-WATFLX, a code for simultaneous estimation of soil properties and planar vector water flux from fully or partly functioning needles of a Penta-needle heat-pulse probe. *Computers & Geosciences*, 2009, **35**: 2250-2258
- [25] Kluitenberg GJ, Kamai T, Vrugt JA, et al. Effect of probe deflection on dual-probe heat-pulse thermal conductivity measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, **74**: 1537-1540
- [26] Ballester C, Castel J, Testi L, et al. Can heat-pulse sap flow measurements be used as continuous water stress

- indicators of citrus trees? *Irrigation Science*, 2013, **31**: 1053–1063
- [27] Wang S, Fan J, Wang Q. Determining evapotranspiration of a Chinese willow stand with three-needle heat-pulse probes. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, **79**: 1545–1555
- [28] Xiao X, Horton R, Sauer TJ, et al. Cumulative soil water evaporation as a function of depth and time. *Vadose Zone Journal*, 2011, **10**: 1016–1022
- [29] Kathy S, Dirkjw DP, Tanyam D, et al. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**: 1046–1056
- [30] Shinohara Y, Tsuruta K, Ogura A, et al. Azimuthal and radial variations in sap flux density and effects on stand-scale transpiration estimates in a Japanese cedar forest. *Tree Physiology*, 2013, **33**: 550–558
- [31] Poyatos R, Cermák J, Llorens P. Variation in the radial patterns of sap flux density in pubescent oak (*Quercus-pubescentis*) and its implications for tree and stand transpiration measurements. *Tree Physiology*, 2007, **27**: 537–548
- [32] Ren R, Liu G, Wen M, et al. The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and *in situ*, probe spacing correction methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **232**: 176–185
- [33] Knight JH, Kluitenberg GJ, Kamai T, et al. Semianalytical solution for dual-probe heat-pulse applications that accounts for probe radius and heat capacity. *Vadose Zone Journal*, 2012, **11**: 460
- [34] Barker M, Becker P. Sap flow rate and sap nutrient content of a tropical rain forest canopy species, *Dryobalanops aromatica*, in Brunei. *Selbyana*, 1995, **16**: 201–211
- [35] Fisher JB, Baldocchi DD, Misson L, et al. What the towers don't see at night: Nocturnal sap flow in trees and shrubs at two ameri flux sites in California. *Tree Physiology*, 2007, **27**: 597–610
- [36] Vandegehuchte M, Burgess SS, Downey A, et al. Stem temperature influence on heat pulse sap flux density measurements. *Acta Horticulturae*, 2013, **991**: 85–92
- [37] Herbst M, Rosier PT, Morecroft MD, et al. Comparative measurements of transpiration and canopy conductance in two mixed deciduous woodlands differing in structure and species composition. *Tree Physiology*, 2008, **28**: 959–970
- [38] Liu H-J (刘海军), Cohen S, Tanny J, et al. Transpiration of banana plant measured by Granier method. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(1): 35–40 (in Chinese)
- [39] Do F, Rocheteau A. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, 2002, **22**: 649–654
- [40] Liu Q-X (刘庆新), Meng P (孟平), Zhang J-S (张劲松), et al. Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platyclusus orientalis*. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2013, **33**(6): 1944–1951 (in Chinese)
- [41] 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**: 631–646
- [42] Reyes-Acosta JL, Vandegehuchte MW, Steppe K, et al. Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements, Part 2: Laboratory validation. *Tree Physiology*, 2012, **32**: 913–929

作者简介 杜梦鸽,男,1993年生,硕士研究生.主要从事土壤环境物理研究. E-mail: 18003714203@163.com

责任编辑 杨弘

杜梦鸽,王胜,樊军. 五针热脉冲探头在测定树干液流中的应用. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2438–2444

Du M-G, Wang S, Fan J. Application of the penta-needle heat pulse probes to determine the stem sap flow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(8): 2438–2444 (in Chinese)