应 用 生 态 学 报 2015 年 8 月 第 26 卷 第 8 期
Chinese Journal of Applied Ecology, Aug. 2015, **26**(8): 2244-2252

热脉冲技术 3 种方法组合在测量树干液流中的应用*

王 胜[1,2] 樊 军[1,3**]
([1]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; [2]中国科学院大学, 北京 100049; [3]西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘 要 利用树干液流方法获取树木蒸腾特征对理解树木水分生理、森林生态和森林系统水分交换具有重要意义.利用广泛应用于土壤热参数和土壤蒸发测量的三针热脉冲探头,基于热比率法(HRM)、最大温度法(T-Max)和单针热脉冲法(SHPP)同时实现了旱柳液流密度的测定,并与热扩散探针(TDP)测量结果进行对比分析.结果表明: 三针热脉冲探头安装约 5 周后进入稳定测量阶段,3 种方法初期测量结果比稳定测量阶段高 135%~220%,HRM、T-Max 和 SHPP 法与 TDP 测量结果具有显著的线性相关性,R^2 分别为 0.93、0.73 和 0.91,SHPP 与 HRM 法测定结果的 R^2 达到 0.94.HRM 在低速和逆向液流时测量具有较高的精度;SHPP 探头配置简单、测量精度高,但无法甄别液流方向,是测定液流非常有前途的方法;T-Max 测量液流误差较大,无法测量<5 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 的液流,不建议单独用于液流测量,但其能够准确测定树干热扩散系数,并可用于其他方法液流计算.建议根据试验目的,选取不同方法或者几种方法组合进行树干液流测量.

关键词 树干液流; 热比率法(HRM); 最大温度法(T-Max); 单针热脉冲法(SHPP); 旱柳
文章编号 1001-9332(2015)08-2244-09 **中图分类号** S715.4, S718.4-33 **文献标识码** A

Application of three heat pulse technique-based methods to determine the stem sap flow.

WANG Sheng[1,2], FAN Jun[1,3] ([1]*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*; [2]*University of China Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; [3]*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(8): 2244-2252.

Abstract: It is of critical importance to acquire tree transpiration characters through sap flow methodology to understand tree water physiology, forest ecology and ecosystem water exchange. Tri-probe heat pulse sensors, which are widely utilized in soil thermal parameters and soil evaporation measurement, were applied to implement *Salix matsudana* sap flow density (V_s) measurements via heat-ratio method (HRM), T-Max method (T-Max) and single-probe heat pulse probe (SHPP) method, and comparative analysis was conducted with additional Grainer's thermal diffusion probes (TDP) measured results. The results showed that, it took about five weeks to reach a stable measurement stage after TPHP installation, V_s measured with three methods in the early stage after installation was 135%-220% higher than V_s in the stable measurement stage, and V_s estimated via HRM, T-Max and SHPP methods were significantly linearly correlated with V_s estimated via TDP method, with R^2 of 0.93, 0.73 and 0.91, respectively, and R^2 for V_s measured by SHPP and HRM reached 0.94. HRM had relatively higher precision in measuring low rates and reverse sap flow. SHPP method seemed to be very promising to measure sap flow for configuration simplicity and high measuring accuracy, whereas it couldn't distinguish directions of flow. T-Max method had relatively higher error in sap flow measurement, and it couldn't measure sap flow below 5 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$, thus this method could not be used alone, however it could measure thermal diffusivity for calculating sap flow when other methods were imposed. It was recommended to choose a proper method or a combination of several methods to measure stem sap flow, based on specific research purpose.

Key words: sap flow; heat-ratio method (HRM); T-Max method (T-Max); single-probe heat pulse method (SHPP); *Salix matsudana*.

* 国家自然科学基金项目(41271239,51239009)和中国科学院"西部行动计划"项目(KZCX2-XB3-13)资助.
** 通讯作者. E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn
2014-10-08 收稿,2015-03-26 接受.

树木整株蒸腾耗水量的测定历来是生理生态学家、林学家、农艺学家、水文学家和微气候学家等共同关注的问题，这一问题既是树木水分生理的核心，也是贯穿整个森林生态和森林培育等研究的基础[1].树木根系吸收的土壤液态水，由茎疏导组织向上运输在木质部形成上升液流，液流运达冠层，经由气孔蒸腾转化为气态水扩散至大气，因此可以用测定树干液流的方法估计整株蒸腾量.早期树干液流速率的测定是通过染料法[2-3]实现的，但该法必须破坏性地切断树干来确定染料上升的距离.Huber[4]首次提出用热来标记植物组织液流，由于其非破坏性和便于长期自动监测的特点，许多基于热动力学原理的方法相继产生.总体而言，热动力学方法按照加热方式可以分为热脉冲法和持续加热法.热脉冲法是向径向插入树干边材的线性热源施加短时热脉冲，通过测量加热前后热源周围温度差异计算液流密度.Marshall[5]系统地提出了热对流-扩散方程以及温度场分布解析解，给相继提出的补偿热脉冲法(CHRM)、最大温度法(T-Max)和热比率法(HRM)提供了理论基础.补偿热脉冲法利用与线性热源上下非对称排列的两个温度探针达到相同温度的时间来计算液流密度.为解决无法测量低速和逆向液流的缺陷，Burgess 等[6]使用上下对称分布的温度探针利用上下探针增温之比计算液流并命名为热比率法，但其无法测量高于 45 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 的液流.Cohen等[7]运用 Marshall[5]的解析解提出，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(t_M)即可获得液流密度，该方法被称为最大温度法.持续加热的方法主要有热扩散法(TDP)、热场变形法(HFD)和热平衡法(HBM)等，其中，Grainer[8]提出的热扩散法(TDP)因配置简单、结果可靠，成为目前应用最广泛的方法[9-10].前期研究利用 Grainer 探针测量旱柳树干液流，发现在未遭受严重干旱胁迫的情况下，Grainer 探针所测树干液流与潜在蒸散、水汽压亏缺等具有极高的相关性[11].Lu 等[9]综述了 TDP 法测量木质部液流的进展，充分展示了它的可靠性及其缺点.近年来，Mahjoub 等[12]提出了一种介于热脉冲与持续加热之间的方法，采取循环加热的方式用单针探头实现了液流密度测量，该方法被称为瞬态热扩散法(TTD)，因其配置极为简单、操作便捷，引起了许多学者的兴趣[13-15].

相邻探针等间距排列的三针热脉冲探头目前广泛应用于土壤热参数和土壤内部蒸发等[16-18]的动态监测，而在树干液流测量方面鲜有应用.探索三针热脉冲技术在树干液流中的应用，实现土壤蒸发和树干液流的同步测定对林地耗水研究具有重要意义.另外，目前国内液流测定应用较广泛的是热扩散法和补偿热脉冲法，随着研究内容的深入和水平的提升，更多技术方法应该得到重视以满足多样化的研究需求.为此，本文选择旱柳作为试验树种，使用三针热脉冲探头技术，利用热比率法、最大温度法以及受瞬态热扩散法(TTD)[12]以及本研究提出的单针热脉冲法(SHPP)同时测定液流密度，并与热扩散法测量结果进行比较，对不同测量方法进行评估，期望给液流测定提供更多的方法选择和参考.

1　材料与方法

1.1　测量原理

1.1.1 热比率法(HRM)　热源与边材的热量交换既包含通过木质部导管发生的热传导，又包含通过液流发生的热对流.Marshall[5]提出了基于热传导-对流原理的热流方程，并给出解析解，即释放短时热脉冲后 t(s)时刻距离线性热源 $r=\sqrt{x^2+y^2}$ 处的增温值 ΔT(℃)：

$$\Delta T=\frac{Q}{4\pi kt}\exp\left[-\frac{(x-V_h t)^2+y^2}{4kt}\right] \tag{1}$$

式中：Q 为热源线性功率($W \cdot m^{-1}$)；k 为边材热扩散系数($m^2 \cdot s^{-1}$)；V_h为热脉冲速率($m \cdot s^{-1}$)；x 和 y 分别是某点与热源的轴向和切向距离(m).热比率法(HRM)通过测量与线性热源上下等间距 x 处的升温之比($\Delta T_U/\Delta T_L$)得到热脉冲速率 V_h，再求得液流密度 V_s($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$).$V_h$理论公式为：

$$V_h=\frac{k}{x}\ln(\Delta T_U/\Delta T_L) \tag{2}$$

探针间距误差对液流密度测量影响很大，实际操作中必须给予考虑.在 HRM 法中上下探针和加热针的校正间距(x_U 和 x_L，m)是在零液流条件($\Delta T_U/\Delta T_L$最小)时原位测量得到的.首先假定 x_L 为正确的 x 值(本研究中 $x=0.006$ m)，用式(3)求得校正 x_U；再假定 x_U 为正确的 x 值，求得校正 x_L.因无法确定间距误差产生于哪一端，将得到的两组(x_U，x_L)分别带入式(4)取平均值，即为待求热脉冲速率 V_h，再通过式(5)进行伤流校正.

$$x_L=\sqrt{4kt\ln(\Delta T_U/\Delta T_L)+x_U} \tag{3}$$

$$V_h=\frac{4kt\ln(\Delta T_U/\Delta T_L)+(x_U^2-x_L^2)}{2t(x_U-x_L)} \tag{4}$$

$$V_c=BV_h \tag{5}$$

1.1.2 最大温度法(T-Max) Cohen 等[7]利用解析解(1)提出了一种改进的热脉冲法,即最大温度法,该法通过测量位于线性热源上方 x_U 某处的单根温度探头升温最大的时刻 t_M(s)计算热脉冲速率 V_h,再用式(8)进行伤流校正.

$$V_h=\sqrt{x_U{}^2-4kt_M}/t_M \tag{6}$$

唯一需要确定的参数热扩散率 k 在零液流条件下由下式获得:

$$k=x_U{}^2/(4t_M) \tag{7}$$

$$V_c=aV_h+b \tag{8}$$

当获得了校正热脉冲速率 V_c 后,最终通过式(9)求得液流密度 V_s:

$$V_s=\frac{V_c\rho_b(c_w+m_cc_s)}{\rho_sc_s} \tag{9}$$

式中:ρ_b 为边材干密度(kg · m^{-3});ρ_s 为液流的密度(kg · m^{-3});m_c 为边材质量含水量;c_s 为液流比热容(J · kg^{-1} · ℃$^{-1}$);c_w 为木基质比热容(J · kg^{-1} · ℃$^{-1}$).详细参数求算方法参考文献[7].

1.1.3 热扩散法(TDP) 热扩散探针(TDP)测量原理为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(ΔT_i,℃)与液流密度 V_s 有关.Grainer[8]定义了无量纲指数 K_i,并建立液流密度与 K_i 的关系:

$$K_i=(\Delta T_{max}-\Delta T_i)/\Delta T_i \tag{10}$$

$$V_s=0.0119K_i^{1.231} \tag{11}$$

式中:ΔT_{max} 为零液流条件下的温差值.

1.1.4 单针热脉冲法(SHPP) Mahjoub 等[12]在稳态热扩散法的基础上开发出仅用单根探针测定液流密度的瞬态热扩散法.探针内置电阻丝和温度传感器,一个测量周期分为加热阶段和散热阶段,加热阶段在电阻丝两端施加持续约 10 min 的恒定电压,边材介质和探针逐步升温至热动平衡状态,散热阶段切断电热丝两端电压停止加热,使边材介质和探针散热降温回落至环境温度.温度升降快慢与液流密度有关,对于处于散热阶段中的任意时刻 t_i(s),定义一个液流指数 $I(t_i)$:

$$I(t_i)=\frac{1}{t_i}\ln\frac{T_0-T_w}{T_{t_i}-T_w} \tag{12}$$

式中:T_0 为加热阶段结束时的探针温度(℃);T_w 为散热阶段结束时的探针温度(℃).液流密度 V_s 与指数 $I(t_i)$ 的关系为:

$$V_s=mI(t_i)+n \tag{13}$$

式中:m 和 n 是经试验校正得到的与 t_i 有关的系数.通过分析 Mahjoub 等[12]的理论推导过程发现,并不需要经过单针热扩散探针长时间加热达到热动平衡状态,利用包含线性热源和热敏电阻的单针热脉冲探针即可完成测量,热脉冲停止后的加热针在散热阶段温度回落快慢与液流密度有关,式(12)和(13)依旧适用,此时重新定义 T_0 为脉冲停止时加热探针的温度(℃),T_w 为脉冲释放前加热针所测环境温度(℃),T_{t_i} 为散热阶段 t_i 时刻加热针温度(℃),m 和 n 是与 t_i 及边材损伤程度有关的校正参数.

1.2 试验设置

试验区位于陕西省榆林市神木县六道沟小流域,处于黄土高原水蚀风蚀交错带,是典型的生态脆弱区,属中温带半干旱气候,多年平均降水量 437 mm.试验样地位于一片风沙土旱柳林,旱柳(*Salix matsudana*)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.试验选取 3 株旱柳作为待试样木,树龄为 30 年左右,基本参数见表 1.

试验所用三针热脉冲探头由 3 根相互平行的直径 1.3 mm、长 40 mm 的不锈钢针管构成,相邻针管间距均为 6 mm.每根针管内距针尖 10 mm 处均内置热敏电阻元件用于温度测量(分辨率 0.02 ℃),位于中间的针管还内置电热丝(约 25 Ω),构成线性热源,钢针内部空隙用高导热率的环氧树脂填充.

2014 年 5 月上旬在待试旱柳树干离地面高约 1 m 处刮除探头待安装处的树表糙皮,通过钻孔模片用 1.2 mm 钻头电钻沿轴线方向垂直钻出 3 个深度 18 mm 相邻间距 6 mm 小孔,将三针热脉冲探头插入钻孔,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,用隔热锡箔片包裹中间加热针露出部分防止露出部分线性热源通过空气给上下探针二次加热,整个探头用隔热锡箔片包裹防止探头遭受雨淋或阳光直射,三针热脉冲探头安装完成.

表 1 待试样木主要参数

Table 1 Main parameters of sample trees

树木编号 Tree No.	胸径 DBH (cm)	边材厚度 Sapwood depth (cm)	边材面积 Sapwood area (cm^2)	株高 Plant height (m)	冠幅 Canopy size (m×m)
1	13.4	1.43	46.7	4.1	2.1×2.4
2	13.1	1.39	43.9	4.4	2.5×2.6
3	14.6	1.55	57.7	4.6	4.2×4.5

探头通过线缆连接至数据采集器 CR23XTD (Campbell, Logan, UT, USA) 和加热电路，自动控制热脉冲的释放、数据采集和记录.试验每 30 min 进行一次测量，每次测量持续 180 s，每间隔 1 s 采集一次上下针和加热针温度，在 t = 10 s 时给加热丝两端施加 8 V 持续 5 s 的直流电压，产生持续 5 s 的热脉冲.在待试旱柳的三针热脉冲探头安置上部约 10 cm 处同时安置热扩散式茎流计(TDP)，具体配置和安装见前期研究[11]，和三针热脉冲探头同步测量液流密度.试验持续至 8 月中旬，结束后将三针热脉冲探头取出，测量因为探针的插入和加热而产生的机械损伤尺寸.6 月中旬在旱柳林选取相同规格和长势的旱柳，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.按照 HRM、T-Max、SHPP 和 TDP 法分别计算液流密度.

2　结果与分析

2.1　三针热脉冲探头温度变化特征及其与液流密度的关系

经由径向插入树干边材的线性热源产生的短时脉冲热在热对流-扩散作用下在边材中进行热传输，并引起边材热源周围温度场的动态变化.加热针温度随着热脉冲的释放而急剧升高，加热停止温度即开始回落，最大增温 21～27 ℃，单个探头在测量期间最大增温值较为稳定，变异系数不超过 1.8%.温度下降时段分为两个阶段，脉冲停止 10 s 内温度快速下降阶段和 10 s 后缓慢回落至边材环境温度的慢速下降阶段.距离线性热源上部 0.6 cm 处的边材受热脉冲的影响而产生最大 0.4～0.7 ℃的增温量，另一侧对称位置最大增温为 0.15～0.40 ℃.

加热针和上下针增温曲线与液流密度密切相关(图 1).当液流密度越大时，由于较强的热对流作用使上部针升温越高，更快达到最大值，随后降温也更快；而下部针增温幅度更小，降温更慢.试验显示，在热脉冲释放后 60～100 s 内，上下部探针升温之比的指数 $F(t)$ 随时间变动十分微弱，斜率均<0.01，液流密度越大，$F(t)$ 越大，当 $V_{s\,TDP}$ = 0 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 时，$F(t)$ 接近于 0(图 2A)，因此，选取热脉冲释放后 60～100 s $F(t)$ 的均值用于液流的计算.上部探针达到最高温度所需时间 t_M 为 48～94 s，t_M 随液流密度的升高而缩短(图 2B).加热探针停止加热 50 s 后，$I(t)$ 在不同液流密度下具有稳定而持续的差异(图 2C)，与液流密度具有极好的线性相关性(表2)，在

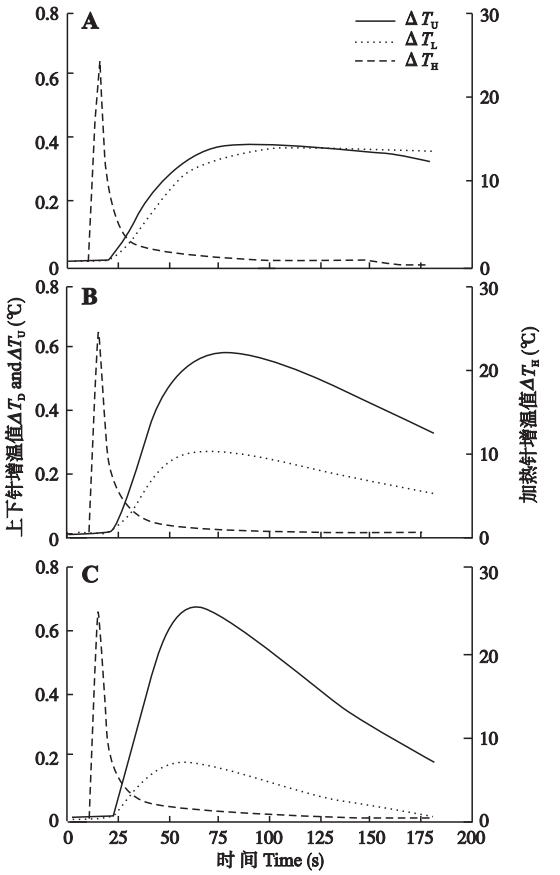


图 1　测量周期内不同液流密度下三针热脉冲探头上(ΔT_U)、下(ΔT_L)部针和加热针(ΔT_H)温差动态

Fig.1　Temperature difference dynamic of upper (ΔT_U), lower (ΔT_L) and heating (ΔT_H) probes under different sap flux densities in a measurement period.

A: $V_{s\,TDP}$ = 0 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$; B: $V_{s\,TDP}$ = 15 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$; C: $V_{s\,TDP}$ = 30 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$. 下同 The same below.

停止加热 60 s 时两者的相关程度达到最高(R^2 = 0.91)，因此选择热脉冲停止 60 s 时刻用于液流计算.

表 2　液流指数 $I(t)$ 与液流密度(V_s)的线性相关性分析 [$V_s = mI(t) + n$]

Table 2　Linear correlation analysis between flux index $I(t)$ and sap flux density V_s [$V_s = mI(t) + n$]

冷却阶段历时 Time of cooling period (s)	拟合参数 Fitted parameter		R^2
	m	n	
20	8483.4	−1018.4	0.677
30	5885.1	−536.8	0.864
40	4525.3	−337.0	0.896
50	3884.2	−246.1	0.908
60	3514.4	−194.5	0.912
70	3311.3	−163.1	0.907
80	3167.7	−140.8	0.901
90	3073.9	−124.7	0.889
100	3009.6	−112.4	0.876

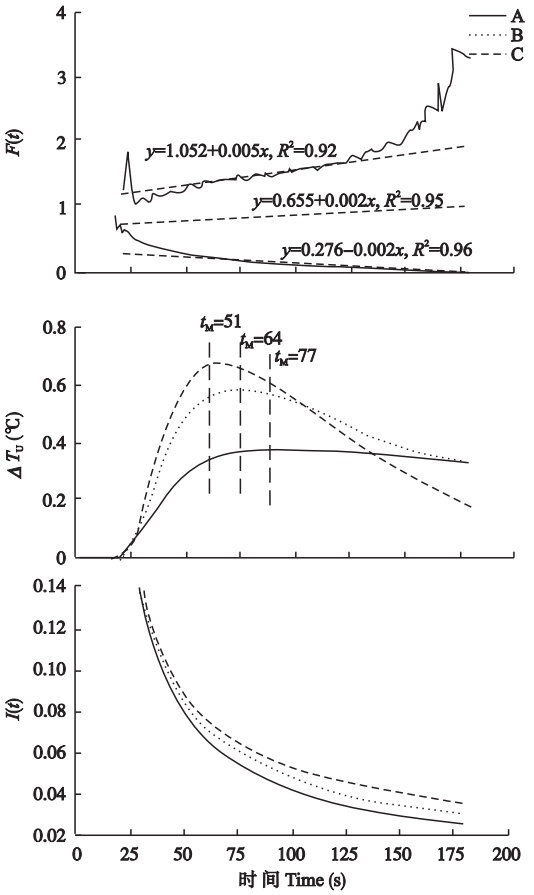


图 2 不同液流密度(V_s)上下探针增温之比的指数 $F(t)$、下部针增温值 ΔT_U 和液流指数 $I(t)$ 的动态变化

Fig.2 Dynamic of upper and lower needles heat ratio exponential $F(t)$, lower needle temperature increase ΔT_U and flux index $I(t)$ under different sap flux densities (V_s).

伤口大小是运用热脉冲技术最重要的误差来源,本试验中伤口直径均约 0.2 cm,采用表 3 中的方案进行伤流校正,其中 HRM 法采用 Burgess 等[6]提出的校正方案,因缺乏所用规格探头的 T-Max 和 SHPP 校正方案,因此试验依据 TDP 测量结果给出相应的校正参数.

2.2 树干液流不同方法测量结果的比较

运用 TDP 法和基于热脉冲技术的 3 种方法分别计算液流密度,结果显示:在 TDP 探针插入初期,液流密度测量值最高达 60 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$,在 1 周内逐步下降至最高值 28 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$,随后进入稳定测量阶段,初期测量结果比稳定测量阶段高约 120%.基于热脉冲技术的 3 种方法均需要约 5 周进入稳定测量阶段,初期测量结果比稳定测量阶段高 135%~220%.试验站自动气象站的气象资料显示(数据未列出),期间影响液流的太阳辐射和水汽亏缺值等没有大幅波动,因而探针安装初期液流测定值的变化主要来源于与探针接触部位机械损伤和热损伤的逐步平衡和稳定的过程,而非液流本身.稳定测量阶段,6 月中旬至 8 月中旬,TDP 法平均液流密度为 7.03 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$,HRM 法平均液流密度为 4.34 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$,仅为 TDP 法测量结果的 61%;而依据 TDP 法确定校正系数的 T-Max 法和 SHPP 法测量结果与 TDP 法相近(表**4**).

选取 7 月 16—30 日的测量结果绘制液流密度日动态曲线(图 3),结果显示,4 种方法所测液流密度日动态均为单峰曲线,10:00—14:00 最高,4:00—6:00最低.尽管 4 种方法液流密度变化基本一致,但在测量细节方面的表现并不一致.T-Max 法能反映液流密度整体变化趋势和日动态,但无论在低液流的夜间还是高液流的白天,测量结果均非常紊乱,尤其在低液流时测量结果变异很大,还出现许多因测量失败(当 $t_M > t_{M_0}$ 时)而产生的间断点.HRM 和 SHPP 法相对 TDP 法在高液流的午间常有小幅波动,而 TDP 法则呈现出锐利的"峰",而在低液流的夜间 HRM 法能获得更稳定精确的结果.对比不同方法测量结果显示(图 4),HRM 和 SHPP 法与 TDP 法测量结果之间具有良好的线性相关性,R^2 分别为 0.93 和 0.91.尽管 T-Max 与 TDP 法的结果呈现出正的相关性,但 R^2 仅为 0.73,当 TDP 法测定的 $V_s < 5$ $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 时,T-Max 法无法反映液流密度变化.

表 3 试验 HRM、T-Max 和 SHPP 法计算液流采用的校正系数[6]

Table 3 Calibration coefficients applied to sap flux density measurement by HRM, T-Max and SHPP methods[6]

方法 Method	校正系数 [$V_c = aV_h + b$, $V_c = BV_h$, 或 $V_s = mI(60) + n$]				
	B	*a*	*b*	*m*	*n*
HRM	1.8905	–	–	–	–
T-Max	–	3.093	2.0201	–	–
SHPP	–	–	–	3514.4	−194.5

表 4 3 株旱柳平均液流密度及平均日液流量

Table 4 Average sap flux density (V_s) and daily sap volume (M) of three *Salix matsudana* trees (mean±SD)

方法 Method	液流密度 V_s ($cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$)	液流量 M ($L \cdot d^{-1}$)
HRM	4.34±0.20	5.15±0.90
T-Max	7.39±0.64	8.81±1.82
SHPP	7.21±0.37	8.55±1.51
TDP	7.03±0.63	8.37±1.80

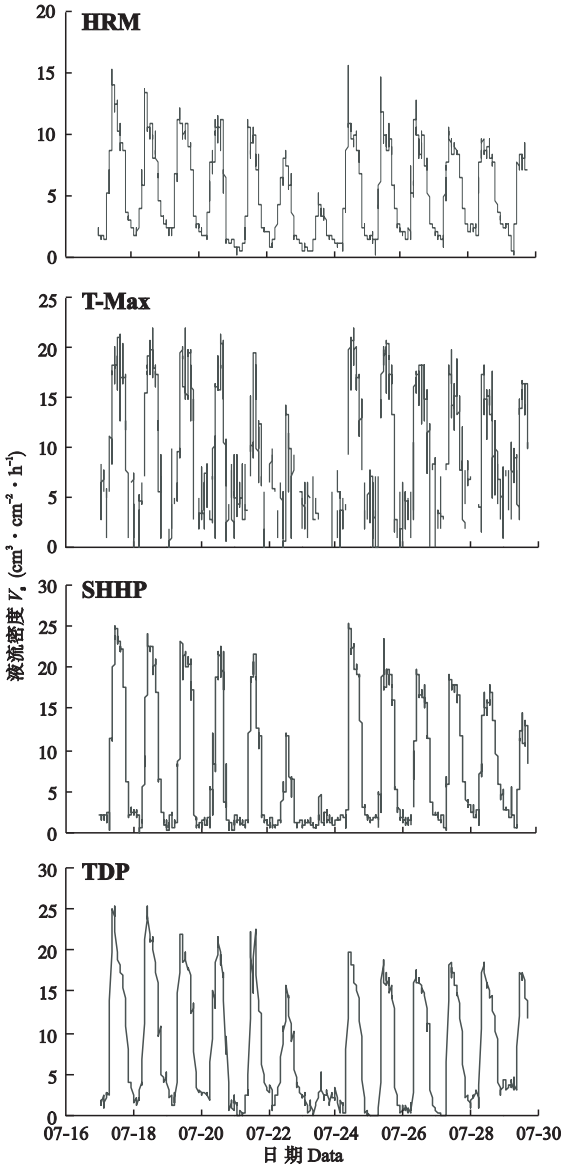


图 3　HRM、T-Max、SHPP 和 TDP 所测液流密度动态变化

Fig.3　Sap flux density dynamics measured with HRM, T-Max, SHPP and TDP methods.

3　讨　　论

3.1　液流密度测量误差分析

通过与 TDP 法对比测量，证明了基于热脉冲技术的 HRM、T-Max 和 SHPP 法在液流密度测定中的可行性，但同其他热动力学方法一样，技术方法本身以及测定值与真实值之间都存在一定误差.相比热扩散探针，热脉冲探针输入边材的热功率更高，从而导致树干边材更严重的热损伤和机械损伤，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[19].试验中热脉冲探针热量输入强度是热扩散探针的 10 倍，达 64 W · m^{-1}，产生的伤口直径达 2 mm.与绝大多数研究[20-21]做法一致，本研究采用 Burgess 等[6]的校正方案对 HRM 法进行伤流校正，鉴于 Burgess 方案对不同树种的适用性研究极少，建议在应用 HRM 法时按树种补充校正试验.本研究依据 TDP 法测量结果给出了 T-Max 和 SHPP 法对应的校正系数，虽然研究证实 Grainer 原始校正参数在诸多树种[22-23]和人工合成介质[24]中都具有良好的适用性，但因输入热功率、探针材质和探针与边材热接触等差异，测量值与真实值之间可能存在较大误差[25]，因此在具体研究中有必要开展基于离体组织和整株称量的校正试验.

零点液流的确定是准确获取液流密度的基础，试验中 TDP 和 HRM 法分别选取了稳定测量阶段 ΔT_{max} 和 $\Delta T_U/\Delta T_L$ 最小时作为零液流时刻，这些时刻均处于夜间.有研究指出，因植物新陈代谢引起的水分运动、持续干旱期间树木内部水分缓慢补充和因水汽压亏缺及高风速引起的冠层失水，生长季夜间往往存在一定速率的液流[9,20]，而液流通常在树木秋季落叶以后才停止.Lu 等[9]还指出，在不同的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、探针和植物组织热接触状况的变化而改变，这些因素都对获取准确液流密度带来潜在误差.T-Max 在液流非常低时，达到最大温差所需要的时间 t_M 不再随液流的减小而继续增加，因而零液流时 t_M 并非最大[26]，必须参考其他方法零液流时刻或切断液流路径来确定零液流 t_M 值.

热扩散系数 k 是许多热力学方法测定液流十分重要的参数，树干 k 常为 0.0014～0.0040 $cm^2 \cdot s^{-1}$，但在液流测定中却没有得到足够重视.目前，绝大多数研究把 k 设为定值 0.0025 $cm^2 \cdot s^{-1}$，或者由边材密度和含水率计算得出.本研究 HRM 按后者确定 k，这种做法存在两个问题：第一，含水率常常被曲解为自由水而忽略结合水，因此 k 可能产生超过 10% 的误差[27]；第二，树干并非各向同性，而是各向异性介质，因而轴向和切向 k 存在差异，热扩散-对流理论中 k 实质上指轴向的热扩散系数，通过边材密度和含水率计算出的 k 并不能准确表征轴向 k，可能导致液流测定误差[28].T-Max 通过零液流时加热针上方一定距离温度探针达到最大温差所需时间 t_M 直接获得轴向热扩散系数，且适当增加探针间距可以减少 k 测量误差[27].本研究通过边材密度和含水率计算出 k = 0.0019 $cm^2 \cdot s^{-1}$，通过 T-Max 法测得 k = 0.0017 $cm^2 \cdot s^{-1}$，尽管本次试验两者没有显现出

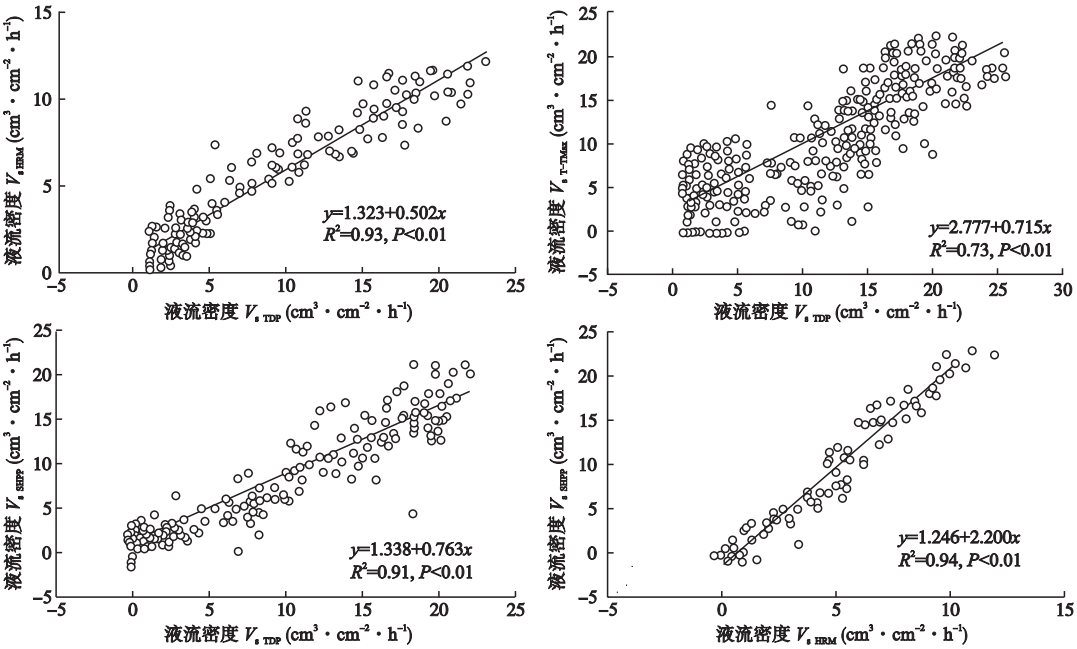


图 4 不同方法液流密度 V_s 测量结果对比

Fig.4 Comparison of sap flux density V_s measured by different methods.

下角标字母代表相应的液流测定方法 Subscript letters presented relevant sap flow measuring methods.

显著差异,但相比设定值或者计算值,T-Max 法直接获得了准确的测量值.

除此之外,环境温度梯度、探针接触状况[29]、测温元件精度等对热脉冲法测量结果有较大影响.因为热脉冲引起线性热源周围探针的最大温差往往都不到 1 ℃,温度测量精确、稳定和尽可能小的外界环境干扰有助于提高液流测量准确性,本研究午间高液流时热脉冲技术测量结果有小幅波动,可能是环境温度梯度引起的.Vergeynst 等[10,30]研究指出,边材含水量的动态变化也将引起液流密度估计误差.

3.2 液流密度测量方法评价

热动力学方法依据热量传输原理,利用探针间或探针自身的温差来反映树干边材液流密度变化,因操作简便、对树体破坏性小以及易于长期自动观测等优势,被称为最美妙的测量液流速度的方法[31-32].热脉冲技术采用周期性短时加热方式,利用短暂热脉冲释放引起的探针间温度变化差异与液流密度的关系获取液流密度.相比热扩散探针,热脉冲技术需要更强的热量输入功率,引起树干边材更严重的机械损伤,试验显示探针安装后需要约 5 周进入稳定测量状态,而热扩散探针仅需 1 周左右.

由于 HRM 法在低速和逆向液流中的良好适用性,使其在旱区林木耗水、根部液流、夜间树木水分生理[20]等研究方面具有巨大潜力;但缺点也十分明显,即无法测量高于 45 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 的液流[6],当液流达到一定程度时,探针温差不再随液流密度的增加而增加,高液流时午间常常呈现“M”型曲线,本研究并未观测到明显的“M”型,这是由于试验区域水分缺乏旱柳液流较低,我们观测的最高值仅为 28 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$;鉴于 Burgess 等[6]的伤流校正方案并没有在不同树种中得到广泛验证,建议后续对不同树种开展校正研究,还建议利用 T-Max 法测得 k 用于液流密度计算,以期获得更准确的测量结果.T-Max 的提出要早于 HRM,但因测量精度差、不适于低于 5~10 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ 液流测定[33],到目前为止鲜有 T-Max 在实际运用方面的文献报道,因此不建议单独使用 T-Max 用于液流密度的测定;而它有一个长期被忽略的优势,即可以准确测定树干轴向热扩散系数 k,因此利用 T-Max 测定 k 并同时采用其他液流测定方法对降低误差有重要意义,建议后续研究探讨不同探针间距对 k 测定的影响,从而确定最佳的探针间距.单针热脉冲法(SHPP)是本研究在 Mahjoub 等[12]的瞬态热扩散法(TTD)基础上提出的,试验证明具有较高的液流密度测量精度,它仅需单根热脉冲探针,相比多针探头,试验设备简单、安装简便,还能减少多针设备探针间距产生的潜在误差;而相比 TTD 技术一次完整测量需要 30 min 或更长时间,SHPP 仅需约 3 min,极大减少因气象因子短时改变引起的误差;缺陷是单针探针无法甄别液流方向,无法测量逆向液流.当然,目前针对

SHPP 技术的研究尚不完善，后续研究建议着眼于探求合适的脉冲热量输入功率、SHPP 适用的液流密度测量范围和提出恰当的伤流校正方案.

4 结　论

三针热脉冲探头能够运用热比率法（HRM）、最大温度法（T-Max）和单针热脉冲法（SHPP）3 种方法同时实现液流密度的测定.HRM 和 SHPP 与热扩散法（TDP）液流密度测量结果相关性较好，R^2 分别达到 0.93 和 0.91；T-Max 与 TDP 液流测量结果相关性较差，R^2 仅为 0.73.三针热脉冲探头插入树干边材完成安装后，经历约 5 周树干液流进入稳定测量阶段，安装初期 3 种方法测得液流密度比稳定测量时高 135%~220%.HRM 能够准确测定低速和逆向液流，十分适合于旱树木水分生理、根部液流特征和夜间树木水分生理研究；T-Max 液流测量误差较大，不建议单独用于液流密度测定，但其能准确直接测定热扩散系数，建议用其他方法计算液流密度；SHPP 技术探针配置简单、测量精度高，缺点是无法甄别液流方向.可以根据试验目的不同，选取不同方法或者几种方法组合进行树干液流测量.

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 Phytoecologica Sinica*（植物生态学报），2002，**22**（6）：661-667（in Chinese）

[2] Kramer PJ. Sap pressure and exudation. *American Journal of Botany*，1940，**27**：929-931

[3] Canny M. Flow and transport in plants. *Annual Review of Fluid Mechanics*，1977，**9**：275-296

[4] Huber B. Observation and measurement of vegetable sap flow. *Reports of German Botanical Society*，1932，**50**：89-109

[5] Marshall D. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*，1958，**33**：385

[6] 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

[7] Cohen Y，Fuchs M，Green GC. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant，Cell & Environment*，1981，**4**：391-397

[8] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems. *Annals of Forest Science*，1985，**42**：193-200

[9] 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

[10] Vergeynst LL，Vandegehuchte MW，Mcguire MA，*et al*. Changes in stem water content influence sap flux density measurements with thermal dissipation probes. *Trees*，2014，**28**：949-955

[11] Peng X-P（彭小平），Fan J（樊　军），Mi M-X（米美霞），*et al*. Sap flow dynamic changes of *Salix matsudana* in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*（林业科学），2013，**49**（9）：38-45（in Chinese）

[12] Mahjoub I，Masmoudi MM，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

[13] Ayutthaya SIN，Do F，Pannengpetch K，*et al*. Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement：Multi-species calibration and field evaluation. *Tree Physiology*，2010，**30**：139-148

[14] Ayutthaya SIN，Do FC. Rubber trees affected by necrotic tapping panel dryness exhibit poor transpiration regulation under atmospheric drought. *Advanced Materials Research*，2014，**844**：3-6

[15] Do FC，Isarangkool NA，Rocheteau A. Transient thermal dissipation method for xylem sap flow measurement：Implementation with a single probe. *Tree Physiology*，2011，**31**：369-380

[16] Ren T，Noborio K，Horton R. Measuring soil water content，electrical conductivity，and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Science Society of America Journal*，1999，**63**：450-457

[17] 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

[18] Wang S（王　铄），Wang Q-J（王全九），Fan J（樊军），*et al*. Soil thermal properties determination and prediction model comparison. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*（农业工程学报），2012，**28**（5）：78-84（in Chinese）

[19] 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

[20] 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 ameriflux sites in California. *Tree Physiology*，2007，**27**：597-610

[21] Vandegehuchte M，Burgess SS，Downey A，*et al*. Stem temperature influence on heat pulse sap flux density measurements. *Acta Horticulturae*，2013，**991**：85-92

[22] 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

[23] Liu H-J（刘海军），Huang G-H（黄冠华）. 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)
[24] Do F, Rocheteau A. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. Ⅱ. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, 2002, **22**: 649-654
[25] 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 *Platycladus orientalis*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(6): 1944-1951 (in Chinese)
[26] Green S, Clothier B, Jardine B. Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal*, 2003, **95**: 1371-1379
[27] Vandegehuchte MW, Steppe K. Improving sap flux density measurements by correctly determining thermal diffusivity, differentiating between bound and unbound water. *Tree Physiology*, 2012, **32**: 930-942
[28] Vandegehuchte MW, Steppe K. Use of the correct heat conduction-convection equation as basis for heat-pulse sap flow methods in anisotropic wood. *Journal of Experimental Botany*, 2012, **63**: 2833-2839
[29] Reyes-Acosta L, Vandegehuchte MW, Steppe K, *et al*. Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Ⅱ. Laboratory validation. *Tree Physiology*, 2012, **32**: 913-929
[30] Vergeynst L. Changes in Temperature and Stem Water Content Evoke Erroneous Sap Flux Density Estimates with Thermal Dissipation Probes. Master Thesis. Belgium: University of Gent, 2011
[31] Fan C (凡 超), Qiu Y-P (邱燕萍), Li Z-Q (李志强), *et al*. Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(9): 2401-2410 (in Chinese)
[32] Liu Q-X (刘庆新), Meng P (孟 平), Zhang Z-Q (李志强), *et al*. Potential errors in measuring tree transpiration based on thermal dissipation method. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(12): 3343-3350 (in Chinese)
[33] Green S, Clothier B, Perie E. A re-analysis of heat pulse theory across a wide range of sap flows. *Acta Horticulturae*, 2009: 95-104

作者简介 王 胜,男,1987 年生,硕士研究生. 主要从事土壤环境物理研究. E-mail: 200404280@163.com

责任编辑 杨 弘