不同长度热消散探针测定粉单竹(*Bambusa chungii*)液流的差异分析和原位验证*

赵　平** 　梅婷婷　朱丽薇　牛俊峰　倪广艳
(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘　要　由于竹壁较薄,测定液流时安装常规长度(20 mm)的TDP探针易穿破竹壁。与木材的热传导不同,暴露于竹腔内的部分上探针的热量以辐射形式消散,加之竹壁水分传导分子的分布不均匀,导致液流密度的测定值不准确。因此,不少学者主张选用较短的探针,然而,对于改短探针的应用缺乏必要的户外原位验证。本文分析自制的5、8和10 mm的TDP探针原位测定粉单竹液流的适用性和理论依据。结果表明:新建立的液流密度公式与Granier原始经验公式的参数α值的差异较大,主要原因是竹腔的储热效应导致上探针周围温度偏高,竹秆水分含量较低,热消散系数(h_0)较小,上探针周围的热量囤积致使上下探针的温差较大;此外,探针的安装方式也影响液流密度的测定结果,是导致相同长度探针测定粉单竹液流密度值明显差别的重要因子。本文通过分析探针周围介质的h_0的变化,较合理地解释了这些差异的原因。

关键词　粉单竹; 热消散探针; 液流密度、热消散系数

中图分类号　Q14　**文献标识码**　A　**文章编号**　1000-4890(2014)5-1420-09

Difference of measured sap flows of *Bambusa chungii* using thermal dissipation probes at different lengths and their *in situ* validation. ZHAO Ping**, MEI Ting-ting, ZHU Li-wei, NIU Jun-feng, NI Guang-yan (*South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1420-1428.

Abstract: Thin bamboo wall may easily be penetrated through when installing the common type TDP sensor of 20 mm long for sap flow measurement. Differing with the case of thermal conduction in wood, the part of the upper probe penetrating into the bamboo cavity dissipates heat in a way of radiation. Hence, the dissipation, together with those unevenly distributed water-conducting units within the bamboo wall, may result in measurement inaccuracy of sap flux density and shorter probes have been recommended in general. However, lacking of *in situ* validation of shorter probes limits their applications for accurate sap flow measurements. In this study, sap flow of *Bambusa chungii* was simultaneously monitored using self-made 5, 8 and 10 mm long TDPs in the field for testing their applicability as well as providing technical supports after theoretical analyses. Experimental results indicated that the difference between the fitted equation for calculating sap flux density that was established for *B. chungii* and the empirical one that was originally proposed by Granier was mainly due to the significant deviation of the parameter α. Such a discrepancy may be preliminarily resulted from the heat accumulating effect in the bamboo cavity that causes higher temperature in the area around the upper probe as well as the lower thermal diffusion coefficient (h_0) of bamboo wall that, with a low water content, may also hoard heat and thus generate larger temperature difference between upper and lower probes. In addition, the way to insert probes into the bamboo wall also affected the measurement and might be another important factor leading to significant variation in monitored sap flux density of *B. chungii* even with TDPs at the same length. Further analyses on h_0 of surrounding media of TDP provided reasonable explanation for these discrepancies.

Key words: *Bambusa chungii*; thermal dissipation probe; sap flux density; thermal diffusion coefficient.

*国家自然科学基金项目(31170673、41030638和41275169)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: 2013-10-04　　接受日期: 2014-01-12

日益增长的人类活动导致森林面积锐减的同时,竹林却以每年3%的速度增加,由于竹子生长周期短、产量高,大规模种植可一定程度缓解木材供需的矛盾(江泽慧,2002;Bosire *et al.*,2007)。竹子通过根鞭的横向生长繁衍新竹,形成的根系网络具有良好的固持水土作用(谢锦忠等,2000;陈双林等,2004;孔维健等,2010a,2010b),此外,竹林的碳汇潜力巨大(周国模等,2004;陈先刚等,2008;王兵等,2008;徐小静等,2009),毛竹林年固碳量(5.09 $t \cdot hm^{-2}$)分别是杉木林和热带雨林的1.46和1.33倍(周国模,2006)。高生长量必然以高耗水为代价,竹林蒸腾可占降雨量的50%,与桉树的耗水相当。研究发现,温带地区的毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林年蒸腾约为567 mm,高于当地的针叶林,比年降水高12%(Komatsu *et al.*,2010),突显竹林对区域水文循环的影响。由于根系浅,竹子不会大量吸取地下水而导致水源枯竭,有学者提倡以竹子代替桉树,减少对水文环境的压力(中国林业科学院,2007;Oballa *et al.*,2010)。

目前,热消散探针(thermal dissipation probe,TDP)是研究竹子水分蒸腾的主流技术,尽管已被证明测定竹子蒸腾的可行性(Zachary *et al.*,2009;Dierick *et al.*,2010;Kume *et al.*,2010;赵平等,2012),但在应用上存在不容忽视的缺陷:由于竹壁薄,广泛使用的常规长度(20 mm)TDP探针在安装时容易打穿竹壁,暴露在竹腔内的部分上探针以辐射形式散热(与竹壁的热传导方式不同),加之竹壁薄壁组织内的水分传导分子维管束的分布不均匀,造成测定值不准确。为此,不少学者主张选用较短探针以避免由于液流不均引起的误差(Clearwater *et al.*,1999)。无独有偶,Kume等(2010)发现10 mm探针监测毛竹液流密度时低估了实际值,建议尝试使用更短的探针。但是,对于改短探针的使用应进行必要的验证,即使基于室内离体实验建立的液流密度公式(赵平等,2012),亦须进行户外的原位验证才有效。至今,已有的研究对改短的不同长度探针的比较研究及其在竹子液流监测的适用性均缺少原位验证,测定竹子乃至竹林的蒸腾耗水存在明显的不确定性。鉴于此,本文以自制的5、8和10 mm的TDP探针,分析原位测定粉单竹液流的适用性和理论依据,探讨不同安装方法的存在问题,为开展竹子水分利用研究提供可靠的理论和技术支持。

1　材料与方法

1.1　样地介绍和样竹特征

粉单竹液流监测实验样地位于中国科学院华南植物园科研区内,地处广州市东北部(23°10′N,113°21′N),海拔41.40 m,属典型南亚热带海洋性季风气候,全年有干湿季之分。年平均气温21.8 ℃,平均最低和最高气温分别在1月(9.8 ℃)和7月(32.7 ℃);年均降雨量1700 mm;年均太阳辐射 4.35×10^5 $J \cdot cm^{-2}$,7月平均日照时数最长(7.1 h),3月最短(2.4 h)。该地区雨热同期,植被生产力较高。实验地的立地条件中等,粉单竹为多年生丛生竹,本实验的竹丛共有386株立竹,平均胸径7 cm、壁厚8 mm、竹龄2.5年,整丛冠幅316.8 m^2。所选样竹形态特征见表1。

1.2　TDP探针热电偶的标定

为计算液流测定系统上下探针热电偶输出电压所反映的温差值,需对本实验采用的探针进行标定:在室内条件下将2探针串联形成闭合回路,上下探针分别插入恒温水浴箱和0 ℃的冰水中,从零度开始,以1 ℃为间隔梯度调节恒温水浴箱中的温度,此温度值即为上下探针的温差,同时记录Delta-T数据采集仪(DL2e,英国产)读取的对应电压值。以温度值为 X 轴,输出电压值为 Y 轴,绘制散点图和电压-温度曲线,拟合方程。

1.3　粉单竹的液流监测

由于粉单竹的竹壁较薄,不适宜安装常规长度

表1　粉单竹样竹的形态特征
Table 1　Culm morphology of *Bambusa chungii*

样竹	胸径(cm)	年龄(a)	壁厚(cm)
1	6.7	4	0.60
2	7.1	6	0.55
3	6.5	2	0.70
4	8.0	4	0.70
5	7.5	3	0.70
6	7.3	5	0.65
7	7.4	7	0.75
8	7.2	6	0.80
9	7.4	5	0.80
10	7.2	3	0.65
11	7.8	4	0.95
12	6.9	4	0.90
13	6.7	3	0.80
14	7.5	2	0.70
15	7.1	2	0.80

(20 mm)的 TDP 探针。本实验根据表 1 样竹的平均壁厚,自制了长度分别为 5、8 和 10 mm 的 TDP 探针,并以自制的电源板向上探针供应 130 mA 的电流,采用美国 Omega 公司生产的镍合金加热丝(TFCC-005-500,0.12 mm),5、8 和 10 mm 探针的加热丝电阻 1.9、2.4 和 2.7Ω,分别产生 0.061、0.096 和 0.127 W 的热量。用 Delta-T 数据采集仪记录液流密度值,测读频度设定为 30 s,每 10 min 进行平均并存储。

1.4 不同长度探针监测液流差异的实验方法

虽然不同长度探针的供电功率以及探针与木材接触的表面积不同,但这些物理参数在 Granier 经验公式的推导过程中均已被消除,液流密度变化只与 *K* 值相关。所以,理论上不同长度探针的液流密度公式没有差别。为比较不同长度探针在液流监测中可能出现的差异,本实验将每种长度的探针分别安装在 5 株独立的粉单竹上。由于不同长度探针加热丝的电阻值不同,为使每组探针分配的电流相等,保证上探针单位面积上产生的热量一致,将 5、8 和 10 mm 的 TDP 探针加热线电缆相串联,分 5 组并联。实验于 2010 年 7 月进行,在粉单竹胸高处的北向将 5 mm 探针垂直竹壁方向插入,8 和 10 mm 探针则水平方向斜向 45°插入竹壁(避免探针过长而部分裸露在竹腔内);上下探针以竹节相隔,防止上探针的热量通过竹腔散热影响下探针。考虑到竹腔空气散热与一般双子叶树木的木材导热不同,会引起 TDP 在竹子和双子叶树木的测定值存在差异,以 10 mm 探针同时监测位于实验竹丛旁的玉兰树(*Magnolia denudata*)的树干液流,以作对照,玉兰树为散孔材,导水性随机而较为均一(蔡锡安等,2012)。

1.5 相同竹子不同高度液流密度的自然差异和探针的校正

由于竹子直径较小,进行不同长度探针的比较需在竹杆的上下位(相距约 10 cm)安装探针,以避免上探针产生热量的相互干扰,而不同高度的液流密度差异可能掩盖了不同长度探针之间的差异。为此,另选择 2 个样竹,分别安装 5 和 8 mm、5 和 10 mm 探针,同时以另外选择另外两个样竹,在竹杆上下位置安装相同长度(8 和 10 mm)的探针,以上下位液流密度的比值校正 1.4 节实验获得的下位探针的液流密度值,消除二者的差别。以校正后 8 和 10 mm 探针监测的液流密度值与 5 mm 探针测定值进行比较。

2 结果与分析

2.1 Granier 液流密度原始公式的室内离体验证

根据热平衡原理,TDP 上探针加热丝产生的热量一部分被液流带走(对流),另一部分以热传导的方式散失。热传导系数(h_0)的大小与介质有关,如干木材和气体的 h_0 较小,金属的 h_0 则较大,水的 h_0 是空气的 23 倍多,树干的含水率较高,h_0 相对较大。当液流为零时($F_d=0$),热量以热传导的形式散失,当有液流经过上探针表面,热量则同时以对流和传导 2 种形式散失,其速度即为热交换系数(h),h 同时受 h_0 和液流速率的影响,h 与 h_0 不同,即使在同一个介质 h 也不是恒定的,并随着液流速率的增加而增加,液流速率越大,h_0 对 h 的影响越小。Granier 以下式描述 h、h_0 和 F_d 的关系:

$$h=h_0(1+\alpha F_d{}^{\beta}) \tag{1}$$

式中,h 和 h_0 的单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$,$F_d$ 为液流密度($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),$\alpha$ 和β为无量纲系数。

h_0是指以物体 2 个平行的相对面之间的距离为单位,温度差恒定为 1 ℃时,单位时间内通过单位面积的热量。热量被液流带走的速率则可定义为:单位时间内流经单位面积的单位水柱引起每 kg 水的温度上升 1℃所需要的热量,它与水的热容和液流速率有关。因此将公式(1)修改为:

$$h=h_0+ c \cdot F_d{}^{\beta} \tag{2}$$

c 为水的热容($J \cdot kg^{-1} \cdot ℃^{-1}$),根据热量守恒定律:

$$h\times s\times(T-T_f)=R\times I^2 \tag{3}$$

$$h_0\times s\times(T_{max}-T_f)=R\times I^2 \tag{4}$$

式中,s 为探针面积(m^2),T 和 T_{max} 分别为有和无液流情况下上探针温度(℃),T_f为下探针温度(℃),R 为上探针加热电阻丝的电阻值(Ω),I 为电流值(mA)。经进一步的推导和转换,得出目前普遍使用的 Granier 液流密度经验公式:

$$F_d=\left(\frac{1}{\alpha}\times K\right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{5}$$

此前,作者采用离体方法建立粉单竹的液流密度公式(赵平等,2012),但 α 和 β 值分别是 Granier 原始公式的 4.55 和 1.27 倍,其他学者研究针叶树和阔叶树获得的 α 和 β 值分别是原始值的 1~488 和 0.83~1.53 倍(表 2),之所以有这么大的偏差,主因是α值偏低(Taneda *et al.*,2008;Bush *et al.*,

表2　不同离体实验的液流密度校正公式及其参数值

Table 2　Verified formula of sap flux density and related parameters from different excised experiments

树种	原公式	统一单位($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)的公式	原 α 值的倍数	原 β 值的倍数	来源
粉单竹(*Bambusa chungii*)	$F_d=541\times k^{1.558}$($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	$F_d=0.541\times k^{1.558}$	4.5	1.27	本文
美国栎树(*Quercus gambelii*)	$F_d=5.79\times 10^{-3}\times k^{1.38}$($m \cdot s^{-1}$)	$F_d=5.79\times k^{1.38}$	48.7	1.12	Taneda *et al.*,2008
北美大齿槭(*Acer grandidentatum*)	$F_d=0.55\times 10^{-3}\times k^{1.02}$($m \cdot s^{-1}$)	$F_d=0.55\times k^{1.02}$	2.8	0.83	Taneda *et al.*,2008
美国栎树(*Quercus gambelii*)	$F_d=5.81\times k^{1.88}$($g \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$)	$F_d=58.1\times k^{1.88}$	488	1.53	Bush *et al.*,2010
三刺皂荚(*Gleditsia triacanthos*)	$F_d=3.07\times k^{1.40}$($g \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$)	$F_d=30.7\times k^{1.40}$	258	1.14	Bush *et al.*,2010
狭叶沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)	$F_d=0.93\times k^{1.65}$($g \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$)	$F_d=9.3\times k^{1.65}$	78	1.34	Bush *et al.*,2010
槐树(*Sophora japonica*)	$F_d=1.19\times k^{1.24}$($g \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$)	$F_d=11.9\times k^{1.24}$	100	1	Bush *et al.*,2010
弗氏黑杨(*Populus fremontii*)	同 Granier 公式	$F_d=0.119\times k^{1.23}$	1	1	Bush *et al.*,2010
欧洲椴(*Tilia cordata*)	同 Granier 公式	$F_d=0.119\times k^{1.23}$	1	1	Bush *et al.*,2010
毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)	$F_{d-up}=1.35\times F_{d-TDP}$	$F_d=0.161\times k^{1.23}$	1.35	1	Kume *et al.*,2010
簕竹(*Bambusa blumeana*)	$F_{d-SHB}=1.15\times F_{d-TDP}$	$F_d=0.137\times k^{1.23}$	1.15	1	Dierick *et al.*,2010
美國山毛櫸(*Fagus grandifolia*)	$F_{d-gravimetric}=2.507\times F_{d-TDP}$	$F_d=0.298\times k^{1.23}$	2.51	1	Steppe *et al.*,2010

2010;Steppe *et al.*,2010)。需要指出的是,以上结果均出自室内离体木段或者竹段的实验,未能反映自然条件下植物根压和蒸腾拉力的实际情况。Bush 等(2010)发现,模拟蒸腾拉力施加不同的压力会导致公式中参数值的明显变化,并随压力的增加而增大;但是,他们测试环孔材树木获得的参数值过大,α值是原始值的488倍,与其他学者的结果相差100倍(表2),作者推测可能是单位换算中出错或者计算环孔材导水面积出现的误差所致。

2.2　不同长度 TDP 探针原位监测粉单竹液流密度的比较

2.2.1　相同竹子不同长度探针的比较　图1是5与8 mm、5与10 mm 探针监测粉单竹液流密度的比较,5 mm 探针监测的液流密度<10 mm 但>8 mm 探针。另外,样竹 B1 和 B2 两组探针(8 mm *vs.* 5 mm探针)监测的液流密度值落在同一条直线上,B4 和 B5 两组探针(10 mm *vs.* 5 mm 探针)监测的液流密度值落在另一条直线上,说明不同长度探针监测粉单竹的液流密度有明显差异,但这种差异与探针长度的相关性并不明显,因为相比较的探针分别位于竹杆的上下位,不同高度的液流密度差异可能掩盖了不同长度探针之间的差异。因此,需要在相同液流密度水平上分析不同长度探针监测液流密度值差异的原因,以排除误差。

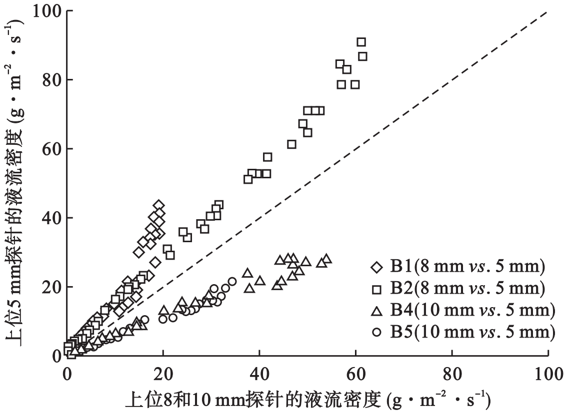

图1　8与5 mm、10与5 mm 探针监测粉单竹液流密度的比值

Fig. 1　Ratio of sap flux density of 8 mm *vs.* 5 mm and 10 mm *vs.* 5 mm probes in *Bambusa chungii*

B1、B2、B4 和 B5 分别是4个不同测试样竹,下同。

2.2.2　相同竹子不同高度液流密度的自然差异和探针的校正　于竹杆的上下位置安装相同长度的探针,以上下位液流密度的比值(表3)校正 **2.2.1** 节实验获得的下位探针的液流密度值,消除二者的差别。图2为校正后8和10 mm 探针监测的液流密度值与5 mm 探针测定值的比较,结果显示,B4 和 B5 的比值均比 B1 和 B2 的小,意味着液流密度测定值随探针长度而增加的。根据 Granier 液流密度公式的原理,探针长度对液流密度的计算应该没有影响,但是 Granier(1987)指出,当上探针供应的热量不同时,液流密度公式中的 α 值会有变化,本实验对不同长度探针供给的电流是一致的(130 mA),液流密度差异应该是由于探针长度不同产生的热量大小不一所导致。

表3　相同样竹上下位液流密度值的关系

Table 3　Relationships of sap flux density between upper and lower positions of same culms

样竹号	上下位液流密度比	R^2	*n*
B1	$F_{up} : F_{down} = 2.44$	0.92	415
B2	$F_{up} : F_{down} = 1.51$	0.98	847
B4	$F_{up} : F_{down} = 0.98$	0.98	648
B5	$F_{up} : F_{down} = 1.24$	0.97	271

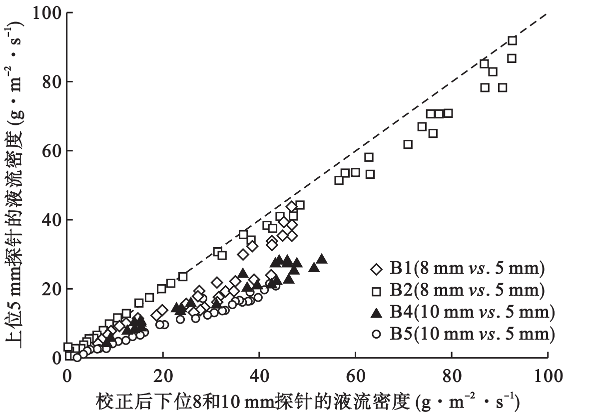

图2 上位5 mm探针监测液流密度与校正后下位8和10 mm探针监测液流密度的关系

Fig.2 Relationships between the sap flux density of *Bambusa chungii* monitored by 5 mm probes at the higher position and the calibrated ones monitored by 8 mm and 10 mm probes at the lower position

2.2.3 不同长度探针监测玉兰树干液流密度值的比较 由于粉单竹的壁较薄,垂直方向插入8和10 mm探针容易被打穿,分析**2.2.1**和**2.2.2**节中液流密度差异的原因存在不确定性,为此,选择实验竹丛附近的一颗玉兰树,垂直树干方向插入不同长度探针,并以**2.2.2**节的相同方法消除上下位液流密度的自然差异(图3),分析粉单竹不同长度探针监测液流的差异的原因。结果显示,校正前玉兰树干上位8和10 mm探针监测的液流密度均大于下位5 mm探针(图3a),消除上下位液流自然差异后,上下位探针监测的液流比值均落在1∶1参考线周围(图3b)。可见,排除上下位自然液流密度的误差,可对不同长度探针监测液流进行可靠性的比较。

2.2.4 不同长度探针监测粉单竹和玉兰树液流密度差异的比较 差异显著性检验显示,不同长度探针监测粉单竹的液流密度差异极显著,5与10 mm探针监测玉兰树的液流密度差异显著,而与8 mm探针的监测结果差异不显著,说明不同长度探针本身存在差异,但在粉单竹和玉兰树的表现并不一致,玉兰树不同长度探针之间的差异小于粉单竹(表4)。由于8和10 mm探针是斜向45°插入竹壁,相当于将测定值浓缩cos45°倍,测定值是实际的$\sqrt{2}$倍。在消除上下位自然液流密度误差后,将8和10 mm探针的测定值除以$\sqrt{2}$,并与5 mm探针的进行比较(图4),二者仍有显著差异($P<0.0001$)。对此,分析不同长度探针的液流密度比和相应的最大输出电压比,二者呈现正相关趋势(图5),表明,不同探针

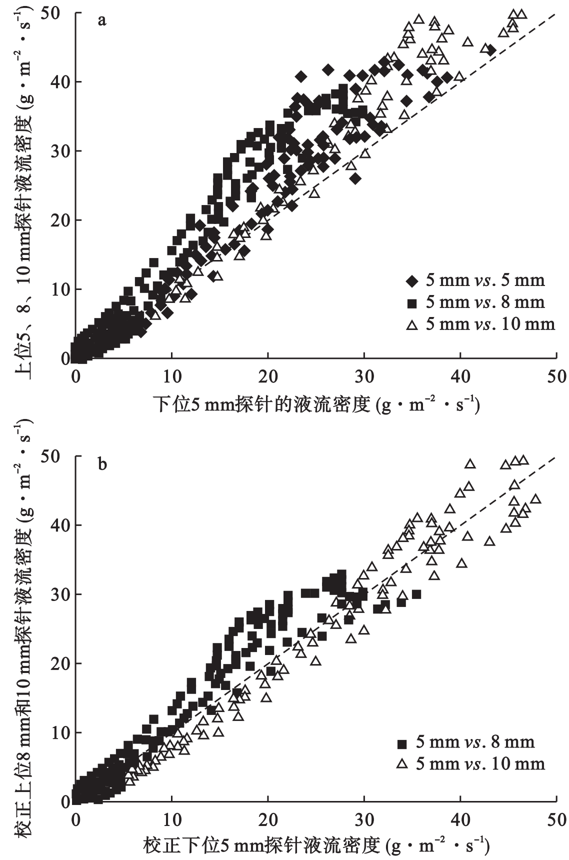

图3 玉兰树不同长度探针监测液流密度校正前(a)后(b)的比较

Fig.3 Comparison of sap flux density in *Magnolia denudate* monitored by probes of different lengths before (a) and after (b) calibration

表4 不同长度探针监测粉单竹和玉兰树液流密度的差异显著性检验

Table 4 Significance test of difference for sap flux density in *Bambusa chungii* and *Magnolia denudate* monitored by probes of different lengths

树种	编号	平均比值	差异显著性检验	n
粉单竹	1	$F_{8mm}:F_{5mm}=1.397$	<0.0001**	275
	2	$F_{8mm}:F_{5mm}=1.086$	<0.0001**	275
	3	$F_{10mm}:F_{5mm}=1.808$	<0.0001**	275
	4	$F_{10mm}:F_{5mm}=2.193$	<0.0001**	275
玉兰树	1	$F_{8mm}:F_{5mm}=1.138$	0.0536	270
	2	$F_{10mm}:F_{5mm}=0.979$	0.0275*	275

**为差异极显著,*为差异显著。

液流密度测定值与最大输出电压的变化有关。

从图6可以看出,探针输出的电压值随长度而增加。根据热电效应,热电偶输出的电压与两结点的温差呈正相关(图7),说明探针越长,上下探针之间的温差值越大。不难理解,由于供给的恒定电流一致(130 mA),探针越长,上探针加热电阻越大而

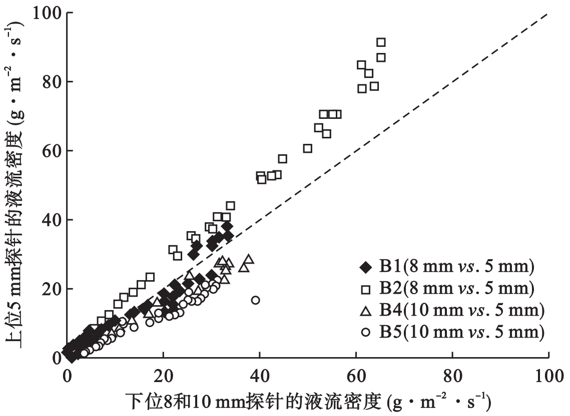

图 4　消除安装误差的不同长度探针测定粉单竹液流密度的比较

Fig. 4　Comparison of sap flux density monitored by different length probes after eliminating the difference caused by installation methods in *Bambusa chungii*

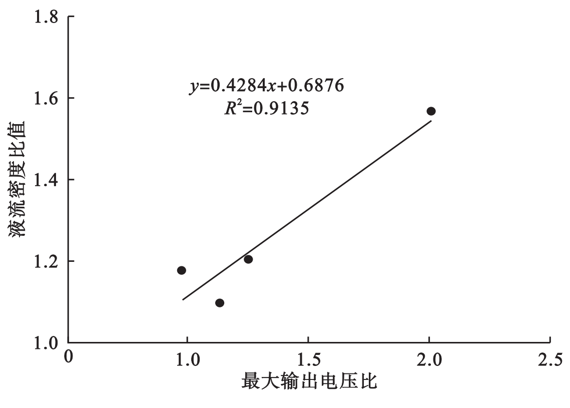

图 5　不同长度探针监测的液流密度比和相应的最大输出电压比的关系

Fig. 5　Relationship between the ratio of sap flow monitored by probes of different length and that of maximum output voltages

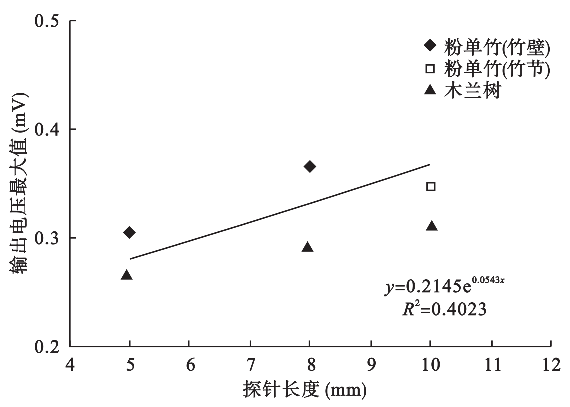

图 6　探针输出电压最大值与长度的关系

Fig. 6　Relationship between the maximum output voltage and the length of the probe

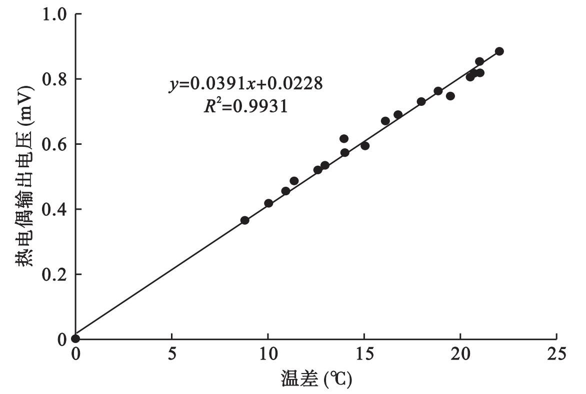

图 7　热电偶温差和输出电压的关系

Fig. 7　Relationship between temperature difference and output voltage of thermocouple

产生较多的热量,上下探针温差增加。然而,相同长度探针在粉单竹上输出的电压均大于玉兰树(图 6),原因可能是:(1) 竹腔的储热效应增加了上探针周围竹壁的温度,此外,通过建立 15 株样竹探针的最大温差(ΔT_{max})与 h_0 的关系,显示 h_0 随 ΔT_{max} 呈指数下降(图 8),由于竹子的 h_0 较小,热量囤积使上探针周围温度和热电偶输出电压均比木兰的高。(2) 粉单竹竹材和玉兰树木材的导管分布不同,粉单竹竹壁薄壁组织的维管束相互独立分离,而玉兰树结构相对较复杂,除了导管和周围的薄壁细胞外,还有执行横向运输水分的射线细胞。水是热的优良导体,玉兰树木材组织的水分横向运输分配优于粉单竹,前者的 h_0 较大,所以上下探针温差值较小。

较小的 h_0 是竹腔储热反馈所致还是竹材结构决定的呢?是两种因素共同还是单独导致粉单竹探针输出电压偏高呢?根据图 6,玉兰树探针最大输出电压值随长度而增加,由于探针安装在同一位置,

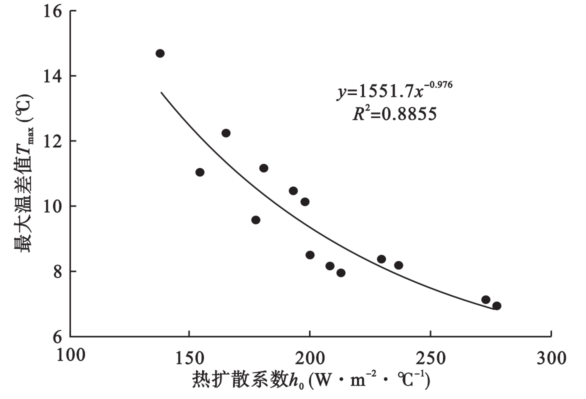

图 8　粉单竹液流特征最大温差值与竹壁热扩散系数的关系

Fig. 8　Relationship between the maximum temperature difference and thermal diffusion coefficient in *Bambusa chungii*

输出电压的差异可排除探针周围环境的原因,而且探针单位面积的供热是相同的,理想状态下,如果同一材质的热量扩散速率相同,不同长度探针周围的温度应该相同,如果探针周围有热量的囤积,探针周围温度上升。因此,竹腔储热导致粉单竹和玉兰热h_0的差异有一定的理论依据。通过比较粉单竹竹壁、竹节和玉兰树10 mm探针的最大输出电压值,可以看出,竹壁和竹节上探针的差别较大,可能是安装方法的不同所致。竹节和玉兰树的10 mm探针以及竹壁上和玉兰树的5 mm探针均以垂直方向安装,10 mm探针在竹节和玉兰上的输出电压差与5 mm探针在竹壁和玉兰上的输出电压差较接近(图6)。所以,木材结构上的差异也是导致粉单竹和玉兰树h_0差异的原因之一。理论上,竹腔储热效应较湿材的储热效应明显,10 mm探针在粉单竹和在玉兰树的电压差别应该较5 mm探针大,但是结果却相反,原因是竹节处一般比较薄,上探针产生的热量通过竹腔影响到下探针周围的温度,两探针温差减小。

2.2.5 不同安装方法对探针输出电压的影响 图6显示,水平斜向45°插入竹壁的10 mm探针最大输出电压远远大于垂直方向插入竹节相同长度的探针($\Delta V_{竹节-竹壁}$ = 0.1254 mV),而竹节和玉兰树的10 mm探针输出电压差值仅为0.037 mV;竹节与玉兰上的h_0值相差很小,但远大于竹壁的h_0(表5)。竹节与竹壁解剖结构的差异以及竹腔储热难以解释如此大的电压差,而插入竹壁和竹节的探针方向不同很可能是主要原因。将竹壁10 mm探针的最大输出电压(0.473 mV)以45°角度换算成垂直竹壁角度,得到的最大输出电压(0.335 mV)与竹节的(0.348)非常接近,说明相同长度探针的插入的方式不同导致粉单竹的液流密度测定值的差别。

热量在竹材以平行和垂直竹壁两个方向传导,一般顺纹方向上的传导效率高于横纹方向(别列雷金,1958),因为顺纹方向的导管腔内含水率高,而水是热的优良导体,热导效率高,而横纹方向有细胞壁阻隔,细胞壁的木质纤维是热的不良导体,热导效率低。垂直竹壁方向插入的探针热量扩散主要是以顺纹方向为主,而斜向竹壁方向安装探针则增加横纹方向的热扩散,减少顺纹方向的热扩散,结果是上探针表面的热量囤积导致输出电压值偏大。以上分析较好的解释了斜向安装探针输出电压远大于垂直方向的原因。

表5 粉单竹和玉兰树的热扩散系数(h_0)

Table 5 Thermal diffusion coefficients (h_0) in *Bambusa chungii* and *Magnolia denudate*

编号	树种	探针长度 (mm)	安装位置/方向	h_0 (W·m^{-2}·℃$^{-1}$)
1	粉单竹	10	竹壁/斜向45°	181.11
2	粉单竹	10	竹壁/斜向45°	165.31
3	粉单竹	10	竹壁/斜向45°	137.67
4	粉单竹	10	竹壁/斜向45°	193.58
5	粉单竹	10	竹壁/斜向45°	198.29
6	粉单竹	8	竹壁/斜向45°	208.55
7	粉单竹	8	竹壁/斜向45°	212.41
8	粉单竹	8	竹壁/斜向45°	154.65
9	粉单竹	8	竹壁/斜向45°	177.37
10	粉单竹	8	竹壁/斜向45°	200.06
11	粉单竹	5	竹壁/垂直竹壁	230.79
12	粉单竹	5	竹壁/垂直竹壁	277.44
13	粉单竹	5	竹壁/垂直竹壁	273.56
14	粉单竹	5	竹壁/垂直竹壁	277.44
15	粉单竹	5	竹壁/垂直竹壁	237.81
16	粉单竹	10	竹结/垂直竹壁	226.38
17	粉单竹	10	竹结/垂直竹壁	242.56
18	玉兰树	10	胸高/垂直树干	234.19

3 讨论

3.1 Granier液流密度公式的存在问题和参数修正

本研究以校正5 mm探针为标准,比较不同长度探针监测液流密度的差别,测定值与实际值的误差随探针长度而增大,由于所建立的公式是以相同的参数为前提,液流密度的差别显然是k值的不同所致。5 mm探针的k值分别是8和10 mm探针的0.7667倍和0.5046倍,显然,不同长度探针的液流密度公式的参数需进行调整。

根据热电效应,热电偶的输出电压与2探针之间的温差有如下关系:

$$V=\varepsilon\times\Delta T \tag{6}$$

式中,V为输出电压(mV),ΔT为温差(℃),ε为热电系数(mV·℃$^{-1}$)。结合方程(4)和(6),可以得到:

$$\alpha=\frac{c\times s\times V_{\max}}{R\times I^2\times\varepsilon} \tag{7}$$

在已知电压值条件下,由公式(7)可求算不同探针长度的α理论值。本验证实验上探针的物理参数(表6)与公式(7)求算的α理论值与实际值非常接近(表7),说明修正的Granier液流密度公式是可靠的,理论上也进一步证明了液流密度公式并不是一个固定的经验公式,探针长度、上探针加热功率、树体水分含量、导管密度和分布等物理特性均会

表 6　上探针的物理参数
Table 6　Physical parameters for the upper sensor

探针长度(mm)	铝管表面积(m^2)	上探针供电功率(W)	最大输出电压(mV)
5	3.14×10^{-5}	0.06084	0.334

表 7　验证实验中建立的液流方程的理论和实际参数值
Table 7　Theoretical and experimental parameters for the sap flow formula of the calibration experiment

探针长度(mm)	h_0理论值	α理论值	α实际值
5	234.2471	0.01793	0.0176

引起公式中参数 α 和β的改变。如前所述,探针长度的增加导致 k 值增加,而 h_0 值的降低则起到了调节的作用。

3.2　不同长度探针监测液流于不同树种中的差异

采用5 mm探针监测粉单竹的液流密度值<10 mm但>8 mm探针的测定值,消除上下位置液流密度的差异后,测定结果随探针的长度而增加。差异显著性检验结果显示,粉单竹不同长度探针测定结果的差异极显著($P<0.0001$)。由于粉单竹竹壁水分传导结构的不均匀性,借助导水性比较均匀的散孔材的木兰树对不同长度探针进行矫正,在消除上下位液流密度的自然差异的条件下,校正前玉兰树干上位8和10 mm探针监测的液流密度均大于下位5 mm探针,而且上下位探针监测的液流密度比值均落在1∶1参考线周围,5和8 mm探针监测的液流差异不显著,5和10 mm探针监测的液流差异显著($P<0.05$),而且不同长度探针测定粉单竹和玉兰树的液流密度的差异存在不同。

3.3　探针周围介质的特性和探针安装方式对液流密度测定值的影响

本文比较了不同长度TDP的差异,发现不同探针的最大输出电压 V_{max} 和探针周围介质的 h_0 均不相同。Granier(1987)认为,上探针加热功率不同将导致 α 值有差别,但未指出是如何致使 α 值变化的;Lu等(2004)则认为,上探针热域值是直接原因,该观点和本文的观点较接近。因此,在使用不同长度探针之前都应该对原始公式进行校正(Granier, 1987;Lu *et al.*, 2004)。但是,迄今为止,很少有学者考虑不同长度探针本身的差异而导致该技术在应用上产生的误差,如James等(2002)采用10 mm探针,实验提供给上探针的0.15 W热量并没有依据。另外,诸多学者发现不同树种甚至不同个体的液流密度公式和原始公式不同,主要差别在于 α 值(Taneda *et al.*, 2008;Bush *et al.*, 2010;Steppe *et al.*, 2010),本文通过分析探针周围介质 h_o 的变化,一定程度上较为合理地解释这些差异的原因。

探针输出的电压值随长度而增加,由于热电偶输出的电压和两结点的温差呈正相关,而温差又与 h_0 呈反比,实验显示粉单竹和玉兰树探针温差值随 h_0 呈指数下降,由于竹腔的储热效应导致粉单竹上探针周围温度偏高,粉单竹竹秆水分含量较玉兰树干低,h_0 较小,竹壁的 h_0 较玉兰树的小,粉单竹上下探针的温差较大。但是,粉单竹竹节和玉兰树干的 h_0 值较接近,而竹节的 h_0 要远大于竹壁的 h_0。竹节和竹壁的解剖结构差异和竹腔储热的差异很难解释二者如此大的输出电压差,而探针在竹壁和竹节上安装方向的差异可能是最主要的原因。将竹壁上10 mm探针的最大输出电压以45°角度换算成垂直竹壁角度,得到的最大输出电压和竹节上的输出电压非常接近,说明是安装方法的不同导致了相同长度探针在粉单竹中表现的差异。

参考文献

蔡锡安, 赵　平, 曾小平, 等. 2012. 两种木兰科植物的树干液流特征及其与环境因子的关系. 生态学杂志, **31**(9): 2163-2169
陈双林, 萧江华, 薛建辉. 2004. 竹林水文生态效应研究综述. 林业科学研究, **17**(3): 399-404.
陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 2008. 过去50年中国竹林碳储量变化. 生态学报, **28**(11): 5218-5227.
江泽慧. 2002. 世界竹藤. 沈阳:辽宁科学技术出版社.
孔维健, 周本智, 安艳飞, 等. 2010a. 天然次生林和人工毛竹林水文生态特征比较. 水土保持研究, **17**(1): 113-139.
孔维健, 周本智, 安艳飞, 等. 2010b. 人工毛竹林水文生态功能的初步研究. 林业科学研究, **23**(5): 713-718.
王　兵, 魏文俊, 邢兆凯, 等. 2008. 中国竹林生态系统的碳储量. 生态环境, **17**(4): 1680-1684.
谢锦忠, 傅懋毅, 肖基浒, 等. 2000. 丛生竹林生态系统的水文效应研究. 竹子研究汇刊, **19**(4): 18-25.
徐小静, 朱向辉, 汪方德, 等. 2009. 毛竹等11种浙江省碳汇造林树种含碳率分析. 竹子研究汇刊, **28**(1): 21-24.
赵　平, 梅婷婷, 倪广艳, 等. 2012. 热消散探针在粉单竹液流研究中的应用. 应用生态学报, 23(4): 979-984.
中国林科院. 2007. 肯尼亚:竹子是否能取代耗水的植物. 世界竹藤通讯.
周国模, 姜培坤. 2004. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, **40**(6): 20-24.
周国模. 2006. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究(博士学位论文). 杭州:浙江大学.
别列雷金(章群和柳宜译). 1958. 简明木材学. 北京: 中国

林业出版社.

Bosire GO. 2007. Spectroscopic determination of heavy metal accumulation by bamboo species for phytoremediation of polluted riverine wetlands. MSc Thesis, Jomo Kenyatta University, Kenya.

Bush SE, Hultine KR, Sperry JS, *et al*. 2010. Calibration of thermal dissipation sapfiow probes for ring- and diffuse-porous trees. *Tree Physiology*, **30**: 1545-1554.

Clearwater MJ, Meinzer FC, Andrade JL, *et al*. 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, **19**: 681-687.

Dierick D, Hölscher D, Schwendenmann L. 2010. Water use characteristics of a bamboo species (*Bambusa blumeana*) in the Philippines. *Agricultural and Forest Meteorology*, **150**: 1568-1578.

Granier A. 1987. Evaluating of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, **3**: 309-320.

James SA, Clearwater MJ, Meinzer FC, *et al*. 2002. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiology*, **22**: 277-283.

Komatsu H, Onozawa Y, Kume T, *et al*. 2010. Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: Ⅱ. Comparison with coniferous forests. *Forest Ecology and Management*, **260**: 1295-1302.

Kume T, Onozawa Y, Komatsu H, *et al*. 2010. Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: (Ⅰ) Applicability of sap fiux measurements. *Forest Ecology and Management*, **260**: 1287-1294.

Lu P, Urban L, Zhao P. 2004. Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and Practice. *Acta Botanica Sinica*, **46**: 631-646.

Oballa PO, Konuche PKA, Muchiri MN, *et al*. 2010. Facts on growing and use of Eucalyptus in Kenya. Kenya Forestry Research Institute.

Steppe K, Pauw DJWD, Doody TM, *et al*. 2010. A comparison of sap fiux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, **150**: 1046-1056.

Taneda H, Sperry JS. 2008. A case-study of water transport in co-occurring ring-versus diffuse-porous trees: Contrasts in water-status, conducting capacity, cavitation and vessel refilling. *Tree Physiology*, **28**: 1641-1651.

Zachary M. 2009. Sap flow dynamics of a tropical, woody bamboo: Deductions of physiology and hydraulics within *Guadua angustifolia*. Graduate thesis, Washington University in St. Louis.

作者简介 赵 平,男,1963 年生,博士,研究员,主要从事植物生理生态学/生态系统生理学研究。E-mail: zhaoping@scib. ac. cn

责任编辑 王 伟