

热消散探针在粉单竹液流研究中的应用*

赵平** 梅婷婷 倪广艳 余孟好 曾小平

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要 通过对计算树干液流密度的 Granier 经验公式进行试验验证和校正, 比较不同长度的热消散探针(TDP)测量粉单竹液流的结果, 探讨 TDP 在粉单竹液流研究中的适用性, 并与邻近生长的常见树种荷木的液流日变化进行比较分析. 结果表明: 由于粉单竹的竹壁较薄、解剖结构异质性较高, 10 mm 探针可能低估粉单竹的液流密度, 8 和 5 mm 探针监测的液流密度值较准确. 粉单竹液流密度平均值和日变化格局的偏度均大于荷木, 而夜间荷木的液流活动比粉单竹活跃, 说明粉单竹的夜间补水不如荷木. 以 TDP 探针研究竹子的液流是可行的, 但应用于不同竹种之前, 必须对 Granier 经验公式进行有效的验证和校正.

关键词 粉单竹 树干液流 热消散探针 Granier 经验公式

文章编号 1001-9332(2012)04-0979-06 **中图分类号** Q984.11 **文献标识码** A

Application of thermal dissipation probe in the study of *Bambusa chungii* sap flow. ZHAO Ping, MEI Ting-ting, NI Guang-yan, YU Meng-hao, ZENG Xiao-ping (South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(4): 979-984.

Abstract: Based on the validation of Granier's empirical formula for calculating tree stem sap flux density, a comparative study was conducted on the measurement of *Bambusa chungii* sap flow by using different lengths of thermal dissipation probe (TDP), aimed to approach the applicability of TDP in measuring the sap flow of *B. chungii*. The difference in the daily change of the sap flow between *B. chungii* and nearby growing *Schima superba* was also analyzed. Because of the thinner bamboo wall and the heterogeneous anatomy, the sap flux density of *B. chungii* measured by 10 mm long probe could be underestimated, but that measured by 8 and 5 mm long probes could be relatively accurate. The comparison of the sap flow between *B. chungii* and nearby growing *S. superba* revealed that both the mean sap flux density and its daily change pattern's skewness of *B. chungii* were higher than those of *S. superba*, but the nighttime sap flow of *B. chungii* was less than that of *S. superba*, indicating that the water recharge of *B. chungii* during nighttime was less active than that of *S. superba*. It was suggested that using TDP to investigate the sap flow of bamboo would be feasible, but careful calibration would be required before the TDP was put into application on different bamboo species.

Key words: *Bambusa chungii*; sap flow; thermal dissipation probe; Granier's empirical formula.

竹子的生长周期短、产量高,是我国建筑和造纸等行业的重要原材料^[1]. 世界森林面积逐步减少的同时,竹林面积却以每年3%的速度增加. 人们重视竹子栽培技术的研究,是由于竹子具有较高的经济价值,而有关竹子整株和林分蒸腾耗水的研究与其他树种相比则略显不足,重要原因是缺乏合适的研究方法. 目前仅有的几项研究报道是以热消散探针

(thermal dissipation probe, TDP)和茎干热平衡(stem heat balance, SHB)液流测定系统估测竹子整株的水分利用^[2-4], Dierick等^[3]利用同位素示踪研究了簕竹(*Bambusa blumeana*)储存水的特点, Komatsu等^[5]比较了毛竹(*Phyllostachys edulis*)林与针叶林的水分利用规律,表明以TDP技术研究竹子液流具有可行性,但存在一些急需解决的问题.

TDP液流测定系统的制作成本较低,操作简单,与之对应的计算液流密度的Granier经验公式适用于大多数树种^[6],因而被广泛应用于树木和林分蒸

* 国家自然科学基金项目(31170673, 30871998, 41030638)资助.

** 通讯作者. E-mail: zhaoping@scib.ac.cn

2011-08-30 收稿, 2012-01-11 接受.

腾研究. 但 TDP 技术存在不容忽视的缺陷, Goulden 和 Field^[7] 认为, 实测的蒸腾量与探针输出信号之间的关系因树种而异; Taneda 和 Sperry^[8] 获得的适合橡树 (*Quercus gambelii*) 和北美大齿槭 (*Acer grandidentatum*) 的液流计算公式与 Granier 原始公式差别明显; Steppea 等^[9] 分析了热脉冲 (heat pulse velocity, HPV)、TDP 和热量场变形 (heat field deformation, HFD) 3 种液流测定方法, 认为 TDP 的精度相对较低; Bush 等^[10] 对 6 个树种的 Granier 公式进行验证试验, 发现其中 4 个环孔材树种的公式参数都有所不同. 这些研究显示, 以 Granier 公式计算部分树种的液流密度值低于实际值, 尤其是环孔材树种, 由于早、晚材的导管大小不一, 不同区域的导水效率差异较大, 沿探针的液流不均匀分布引起测读值偏低. Clearwater 等^[11] 认为, 只要知道探针覆盖的低液流或无液流区域的长度, 即可建立校正的 Granier 公式, 获得较准确的液流密度值, 他们建议选择较短的 TDP 探针研究材质异质性高的树种, 以避免因液流分布不均引起测读误差, Kume 等^[4] 用 10 mm 探针观测毛竹液流也认为应尝试更短的探针. Smith 和 Allen^[12] 认为, Granier 推导的液流密度公式欠缺完善的物理基础, 在新树种上的应用需进行校正.

竹子属单子叶植物, 竹壁维管束在基本组织中的分布不均匀, TDP 技术在竹子上的应用同样面临水分传输的非均匀性而导致测定不准确的问题. 由于竹子的水力结构特殊, 水分利用规律有别于双子叶木本植物, 开展这方面的研究不仅可以加深人们对单子叶树木独特水分利用方式的认知, 也可为林区水文管理提供科学参考. 为验证 TDP 技术在竹子液流研究中的适用性、提供竹子水分蒸腾研究的技术支持, 本文开展华南地区常见的粉单竹 (*Bambusa chungii*) 液流测定的验证试验, 建立适合粉单竹的液流计算公式, 在此基础上, 比较分析不同长度 TDP 探针观测粉单竹液流的差异和邻近生长的常见本地树种荷木的液流特征.

1 材料与方法

1.1 Granier 公式的验证

选择生长于中国科学院华南植物园科研区一丛生粉单竹, 砍取胸径 7.9 cm、壁厚 1.1 cm 的竹株, 截取含 3 个竹节的竹段, 用 20 mmol · L⁻¹ KCl 溶液浸泡的纱布包裹两端^[9,11], 外包保鲜膜以防止过快失水, 迅速带回试验室, 用钢锯切取长约 40 cm 的竹段. 将竹段固定于试验支架上 (图 1), 用橡胶封堵竹

段上下两端的竹腔, 防止下竹节水分从竹腔内壁渗入竹壁和上竹节溢出的水分流入竹腔, 用橡胶软管套紧竹段的两端, 钢桎扎紧防止渗水. 以输液管连接下竹节的橡胶软管和输液瓶, 另以进气管将输液瓶与气罐相连, 通过调节气体流量改变输液瓶内的压力, 由此调节流经竹壁液流速率. 用脱脂棉收集上竹节截面处溢出的水分并称量, 吸水前后的质量差即为单位时间内的总液流量, 结合竹壁的横截面积求算液流密度 (g · m⁻² · s⁻¹). 同时, 在竹段上安装一对 5 mm TDP 探针, 上下探针分别安装在相邻节间的竹壁上 (相隔约 10 cm), 竹节的隔离作用可避免上探针产生的热量在竹腔空气中传导影响下探针周围的温度. 以直流供电板给上探针供应 130 mA 的电流, 加热丝产生的热量为 0.061 J · s⁻¹. 比较两种方法获取的液流密度值, 验证 Granier 经验公式.

1.2 TDP 探针在不同液流强度区域长度参数的确定

Clearwater 等^[11] 认为, 如果 TDP 探针接触的部分区域导水效率较低或不导水, 液流测定值会小于实际液流值, 为此, 改进的 Granier 公式如下:

$$\Delta T_{sw} = (\Delta T - b\Delta T_m) / \alpha \tag{1}$$

式中: ΔT_{sw} 为上下探针周围有液流活动的那部分导水组织的温差; ΔT_m 为上下探针周围没有液流活动

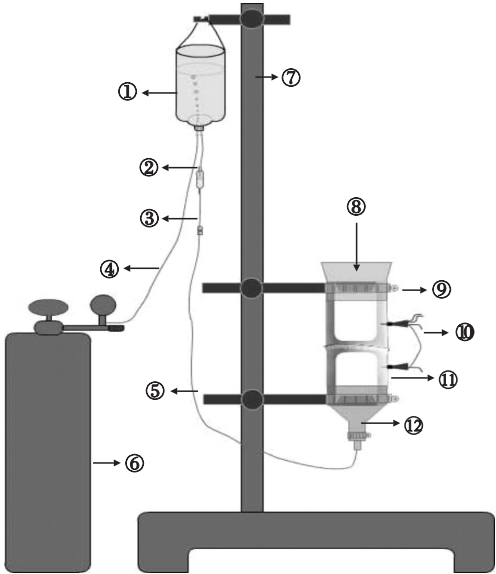


图 1 竹段液流验证试验装置图
Fig. 1 Experimental setup for sap flow verification of bamboo section.

- ①500 mL 玻璃瓶 500 mL glass bottle; ②滴斗 Dropping funnel; ③流量微调器 Flow adjuster; ④橡胶软管 Rubber hose; ⑤塑料管 Plastic tube; ⑥氮气罐 Nitrogen tank; ⑦支架 Bracket; ⑧橡胶塞 Rubber stopper; ⑨钢桎 Steel utensil; ⑩TDP 探针 Thermal dissipation probe; ⑪竹段 Bamboo section; ⑫橡胶管接口 Rubber hose connector.

的那部分组织的温差,相当于液流为 0 时的最大温差; ΔT 为实测温差,相当于探针的平均温差; a 为与有液流活动导水组织接触的那部分探针的长度; b 为与无液流或液流活动较弱的组织接触的那部分探针的长度. 根据式(1)获得计算 K 值的公式^[7,13]:

$$K = \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{sw}} - 1 = \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T - b\Delta T_m} \tag{2}$$

许多研究认为,用传统方法获取的液流密度值(F_a)与 TDP 方法获得的液流密度值(F_d)呈线性关系^[6,14],若知道 F_a ,则可通过下式反推求算 b 值:

$$F_a = nF_d \Rightarrow \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T - b\Delta T_m} = n^\beta \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \tag{3}$$

式中: n 为系数.

1.3 粉单竹和荷木树干液流观测系统的安装和监测

本试验选择 1 年生以上的粉单竹,竹秆颜色偏深绿但不泛黄,无虫蛀,胸径在 6.5 ~ 8 cm. 荷木林样地位于距粉单竹样地直线距离约 800 m 的华南植物园园艺区小青山地带性植被生态系统观测场,是 20 世纪 80 年代种植的人工纯林,冠层郁闭,立地条件见文献[15–16]. 两试验地位置相近,气候、环境和土壤条件相同. 选择粉单竹和荷木各 15 株(表 1),安装树干液流测定系统.

荷木样树的液流测定系统安装的具体方法和步骤见文献[15–16],连接探针的数据采集仪的测读频度设为 30 s,每 10 min 进行平均并存储.

2010 年 7 月开始粉单竹液流的观测试验,根据竹壁厚度,分别将 10、8 和 5 mm 的 TDP 探针安装在竹株北方位胸高处的竹壁上,每种探针各安装 5 株;其中 8 和 5 mm 探针垂直插入竹壁,先用直径 3 mm 的钻头打一个 1 mm 深的浅孔(以避开无水分传输活性的薄层竹青),然后用直径 2.5 mm 钻头钻取深度与探针长度一致的小孔,插入套有铝管保护的探针;上下探针安装在相邻的节间,分隔它们的竹节可防上探针的热量在竹腔内传导而影响下探针. 鉴于粉单竹竹壁一般在 9 ~ 12 mm,安装 10 mm 探针容易将竹壁打穿,上探针的热量会以辐射形式损失,引起液流密度的测读误差,我们参考陆平等^[13]的方法,将 10 mm 探针斜向 45° 插入竹壁,垂直深度约 8 mm. 3 组探针的上探针加热丝连接的供电电缆串联到同一组电路,分 5 组并联,电流在每组探针均匀分配,保证探针周围单位面积的热量相等. 以自制的恒流供电板为上探针供应 130 mA 的电流,3 个不同长度(10、8 和 5 mm)的上方探针分别产生 0.127、

表 1 粉单竹和荷木样树胸径
Table 1 Diameter at breast height (cm) of experimental sample trees of *Bambusa chungii* and *Schima superba*

树号 Tree number	荷木 <i>Schima superba</i>	粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>	树号 Tree number	荷木 <i>Schima superba</i>	粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>
1	15.9	7.2	9	9.2	7.2
2	20.6	7.0	10	27.4	7.3
3	14.8	6.5	11	14.7	7.7
4	25.1	8.0	12	6.6	6.7
5	25.6	7.6	13	9.4	6.7
6	9.5	7.3	14	16.6	7.4
7	19.5	7.4	15	7.4	6.8
8	10.2	7.1			

0.096 和 0.061 J · s⁻¹ 的热量. 粉单竹和荷木的液流测读频度同步,具体方法与步骤参见文献[16].

2 结果与分析

2.1 粉单竹的竹壁解剖结构特点

与所有单子叶植物一样,粉单竹无次生生长,竹壁导管的大小从竹黄到竹青逐渐变小. 由于维管束互相分离,缺少像双子叶植物那样的维管射线系统,水分的横向运输难以进行. 染色试验证明,粉单竹进行水分传输的导管集中分布在竹壁内侧,横切面不同方向上的导管数、上色导管数的分布以及导水效率均明显不同,各方向的输水效率差异明显^[17].

2.2 粉单竹 Granier 液流公式的建立和校正

国内外对竹子液流的研究至今仅有 4 例报道. Kume 等^[4]比较了切割吸水法和 TDP 获得的蒸腾值,发现前一种方法获得的蒸腾量是 TDP 方法的 1.35 倍;Dierick 等^[3]利用热平衡(SHB,包裹式探针)和 TDP 技术监测籼竹液流并进行了对比,TDP 测定的液流密度值比 SHB 低估了 8%. 有学者认为,不同树种由于导管分布的不同,导致热量传导存在差异,TDP 在应用于新的树种时,需对 Granier 经验公式进行验证^[13]. 为此,通过调节气瓶气体输出的流量来改变压力(图 1),从而获得流经竹段的不同液流速率,建立适用于粉单竹的 K 值与液流密度(F_d)的关系式,结果显示,液流密度和 K 值呈幂函数关系,相关系数较高($R^2=0.979$)(图 2),说明热消散液流测定方法可以较好地监测竹子的液流变化. 将回归公式进行变换,获得适用于粉单竹液流密度计算的经验公式:

$$F_d = \left(\frac{1}{0.0018}K\right)^{\frac{1}{0.6419}} \tag{4}$$

上式中的 0.0018 和 0.6419 与 Granier 原始公

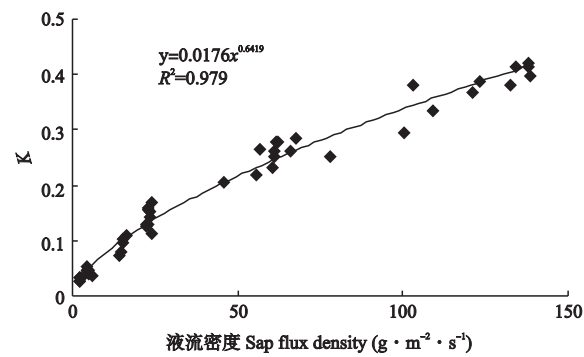


图2 液流密度和K值的关系
Fig. 2 Relationship between sap flux density and K.

式 $F_d = (\frac{1}{\alpha} K)^{\frac{1}{\beta}}$ 中的 α 和 β 值 (分别为 0.0206 和 0.8124) 有明显不同^[7]. 如果采用 Granier 原始公式直接计算粉单竹液流密度值 (F_d), 结果必然偏低. 本文用经过修正的 Granier 公式计算的粉单竹液流密度是原始公式计算的 2.84 倍, 主要误差来源是 α 值被明显低估.

越来越多的试验数据显示, Granier 原始公式可能低估了树木的实际液流密度值^[4-5,8-12], 尤其是环孔材树木液流测定值的偏低程度大于散孔材树木^[11-12]. 由于以往其他学者的验证试验均未考虑木材横截面液流分布不均的情况, 结果的可信度不高. 本研究考虑了液流在竹壁横截面上分布不均的情况, 并引入了一个重要参数即导水效率^[17], 故此次校正公式计算的粉单竹液流密度较可靠.

2.3 不同长度探针监测粉单竹液流的比较

理论上, 探针长度的变化不会对液流密度公式的计算产生影响, 但公式中的参数与探针周围多孔结构的材质相关, 如导管的大小、密度和分布的均匀度等. 因此, 本文用经过校正适用于粉单竹的 Granier 公式计算不同长度探针测定的液流密度, 并比较它们的平均值 (图 3), 结果表明, 粉单竹液流的日变化呈单峰格局, 不同长度探针测定的结果差异明显, 其中, 8 mm 探针测定的液流密度值 ($103 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 最大, 10 mm 探针 ($59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 最小. 对每株样竹的单位竹壁面积日总蒸腾量进行方差分析, 3 种探针之间的差异极显著 ($P = 0.003$), Duncan 检验结果表明, 5 mm 探针与 10 和 8 mm 探针之间的差异均不显著, 而后 2 种探针之间的差异显著.

为选择合适长度的 TDP 探针长期观测粉单竹液流, 比较分析了 10、8 和 5 mm 探针在粉单竹的应用, 尽管获得的液流密度值差别比较明显 (图 3), 但仅从这些数据无法判断是探针长度还是液流特性的

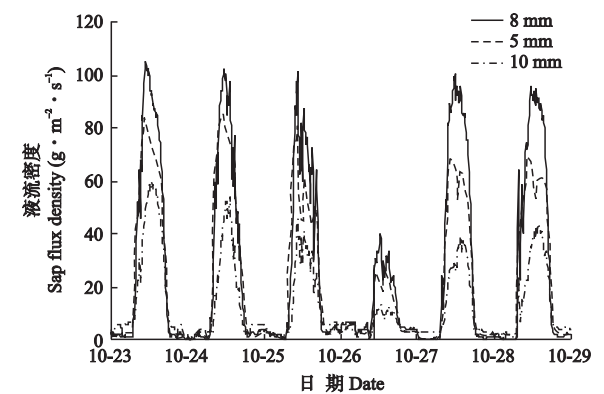


图3 3种长度探针监测的粉单竹平均液流密度的比较
Fig. 3 Comparison of mean sap flux density monitored by 3 different length probes.

个体差异所引起, 因为本试验将不同长度探针安装在不同的竹子个体, 无法比较它们之间的差别. 以往的对比试验一般将探针安装在同一棵树上, 前提是同一棵树不同方向和高度的液流相同. 但粉单竹的竹材不同方向导水效率差异较大^[17], 即使在同一方向上安装两对以上的探针, 下方一对探针产生的热量可能会被液流传送到上方, 影响上方另一对探针的准确度. 因此, 本文结合偏度分析方法, 对不同长度探针监测粉单竹液流的差异做进一步分析.

8 mm 探针监测的粉单竹个体液流格局的偏度较 10 和 5 mm 探针的小 (表 2), 梅婷婷等^[15]认为, 偏度和日蒸腾量呈负相关, 说明 8 mm 探针测定的粉单竹蒸腾较 10 和 5 mm 探针大, 这与图 3 的观测结果相符. 10 和 5 mm 探针获取的液流格局的偏度较接近, 理论上二者监测的日蒸腾量应该相似. 图 3 中 5 mm 探针测得的液流密度却高于 10 mm 探针, 可能是 5 mm 探针未能完全涵盖靠近内壁密度较低的导管, 而蒸腾量是平均液流密度与探针涵盖的圆周面积之积, 所以 5 mm 探针监测的蒸腾量比 8 mm

表2 不同长度探针监测粉单竹和荷木液流的偏度
Table 2 Skewness values of sap flow density of *Bambusa chungii* and *Schima superba* monitored with different length probes

日期 Date	粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>			荷木 <i>Schima superba</i>
	10 mm	8 mm	5 mm	20 mm
2010-10-23	0.906	0.811	0.859	0.720
2010-10-24	1.271	1.004	1.145	0.695
2010-10-25	1.012	0.888	0.948	0.638
2010-10-26	0.840	1.131	1.203	0.700
2010-10-27	1.079	0.802	0.975	0.821
平均 Mean	1.022	0.927	1.026	0.715
变异系数 CV (%)	16.7	14.0	14.3	6.6

探针低,而与 10 mm 探针测得的结果较接近. 本研究选择液流偏度较接近的 5 号(10 mm)、7 号(8 mm)和 11 号(5 mm)样竹(液流偏度分别为 1.071、1.032、1.036)进行分析,7 号和 11 号样竹的平均液流密度(分别为 11.73 和 14.24 g · m⁻² · s⁻¹)较接近,5 号液流密度偏小(7.08 g · m⁻² · s⁻¹),8 和 5 mm 探针监测的液流比 10 mm 探针监测的液流大 65.7% ~ 101.1%.

Clearwater 等^[11]认为,用短探针监测横截面液流分布不均匀的树种比长探针更准确. 本试验中,5 mm 探针监测的液流比 10 mm 探针监测的液流准确,因为 10 mm 探针有一部分与不导水分的竹材组织相接触,但可以用 Clearwater 等^[11]的公式计算出 10 mm 探针的准确液流值. 由于 5 和 10 mm 探针监测的液流格局偏度非常接近,推测其液流值也应该相似,因此,采用 5 mm 探针监测的液流值代替 10 mm 探针的理论液流值,建立 10 和 5 mm 探针监测的液流值之间的函数关系式:

$$F_5 = 1.5841F_{10} \quad (R^2 = 0.849) \tag{5}$$

将式(5)代入式(3)后反推求算 *b*,即 10 mm 探针与无液流或液流活动较弱的导水组织接触的那部分长度. 由图 4 可以看出,液流越大,*b* 值越大,但不管液流峰值大小,*b* 的峰值几乎相等,约为 0.25. 由于探针外面的铝管具有良好的导热效果,在液流较微弱的时候可以很好地均衡热量;当液流速率增大,铝管上的热量来不及平衡而导致与探针接触有和没有液流部分的热量分布不同,计算的 *b* 值逐渐增加. 因此,当液流最大时得到的 *b* 值就是探针与无液流那部分竹壁组织接触的长度. 结果显示,10 mm 探针可能有 25% 的长度与无液流的组织接触. 由于粉单竹壁较薄,10 mm 长探针是斜向 45° 插入竹壁,与竹壁外部(靠近竹青的部分)接触较多,由于竹壁外部是低液流密度区,测定值被低估. 相比较而言,较短的 5 mm 探针所获得的液流值较符合实际. 但结合

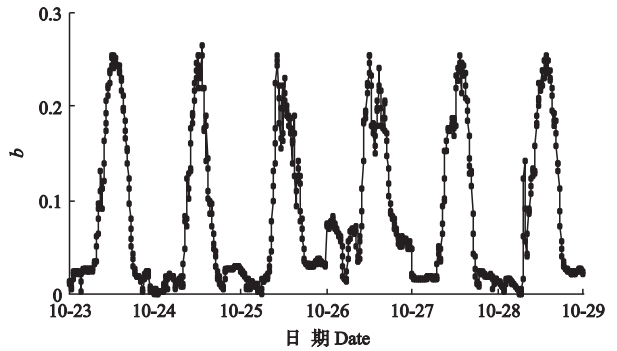


图 4 随时间变化的 *b* 值
Fig. 4 Change of *b* values with time.

安装探针的方法和对竹壁解剖结构的观察,估算的 *b* 值约为 1.5 mm,即仍有 0.5 ~ 1 mm 的误差得不到充分解释. 由此推测,Granier 公式并不是一个统一的公式,适合于不同树种甚至不同个体的 Granier 公式的参数均有变化,这是 10 mm 探针估算的 *b* 值不能得到充分解释的主要原因.

比较粉单竹与附近生长的荷木液流的偏度(表 2),后者较前者小,说明荷木液流应该大于粉单竹. 但是,荷木液流的平均观测值小于粉单竹(表 3). 由于荷木液流密度是采用 Granier 原始公式计算,推测荷木液流也可能被低估,意味着荷木边材的导管分布也可能是不均匀的.

2.4 粉单竹和荷木液流密度的日变化格局

粉单竹和荷木的液流密度日变化均为单峰型,到达峰值的时间没有明显差异,清晨液流的启动时间几乎相同,均在 6:50—7:00,但到达峰值后二者的变化趋势一致(图 5). 在夜间,荷木的液流活动较活跃,说明荷木存在较明显的夜间补水现象. Dierick 等^[3]比较了菲律宾丛生型簕竹与附近生长的当地树种的液流日变化格局,发现簕竹早上液流的起动比其他树种要迟,午间到达最大值后持续的时间较短并迅速回落,据此认为,竹子蒸腾对内部储存水的启用受到制约,并提出竹子内部储存水的水力功效

表 3 不同种类竹子与荷木的液流比较
Table 3 Comparison of sap flow of different bamboo species and *Schima superba*

树种 Tree species	TDP 探针长度 TDP length (mm)	液流密度峰值 Peak value of <i>F</i> _d (g · m ⁻² · s ⁻¹)	日平均蒸腾 Daily transpiration (mm)	月份 Month	来源 Source
粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>	10	57	3.86	10	本研究 This study
粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>	8	103	7.99	10	本研究 This study
粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>	5	85	6.77	10	本研究 This study
毛竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	10	65	≈2.70	10	Komatsu 等 ^[5]
簕竹 <i>Bambusa blumeana</i>	20	≈59	—	8	Dierick 等 ^[3]
荷木 <i>Schima superba</i>	20	50	3.36	10	本研究 This study

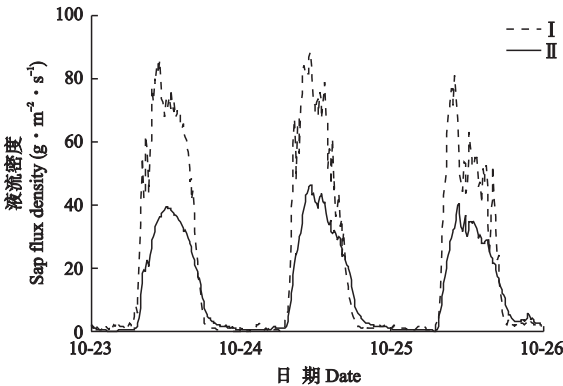


图5 粉单竹 (I) 和荷木 (II) 液流日变化格局的比较

Fig. 5 Comparison of daily patterns of *Bambusa chungii*'s (I) and *Schima superba*'s (II) sap flow.

较弱的观点. 同为丛生型的粉单竹与荷木的液流日变化则没有如此明显的差异(图5), Dierick 等^[3]的观点无法对此进行合理解释. 由于竹子种群内个体之间的地下茎相连, 水分可在个体之间进行再分配, 水势较低的竹株可从邻株获取部分的水分补充, 笔者认为, 竹子不一定优先利用自身的储存水, 夜间水分补充的主要方式有别于一般的树种, 可能是通过地下茎利用异株可供利用的水分.

3 结 论

通过比较试验, 获得了适合研究粉单竹的 Granier 液流公式, 在此基础上, 结合液流格局的偏度值和反推 Clearwater 校正公式, 分析了 10、8 和 5 mm TDP 探针在粉单竹液流研究中的适用性. 结果表明, 10 mm 探针低估了粉单竹的实际液流密度值, 约有 2.5 mm 长度的探针处在低或无液流区域, 8 和 5 mm 探针监测的液流接近真实值. 由于竹子结构的特殊性和较薄的竹壁, 建议使用较短的 TDP 探针监测竹子液流, 但 Granier 公式在不同竹种甚至不同个体中的适用性仍需进一步验证. 粉单竹和荷木液流平均强度和日变化格局近似, 粉单竹夜间液流较微弱, 而荷木夜间液流较活跃. 粉单竹液流格局偏度值大于荷木, 预示粉单竹总液流应该小于荷木, 这与实际结果不一致, 可能是 Granier 原始公式计算的荷木液流被低估. 因此今后有必要进一步对荷木液流的计算公式进行验证.

参考文献

[1] He Y (贺 勇), Ge Z-Y (戈振扬). Material properties of bamboo and its application research progress. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), 2009, **36**(2): 135-139 (in Chinese)

[2] Hou X-J (侯小金), Xie J-Z (谢锦忠), Geriletu (格日勒图), et al. *Phyllostachys pubescens* sap flow and its

relationships with environmental factors, *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2010, **29**(7): 1263-1269 (in Chinese)

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

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

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

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

[7] Goulden ML, Field CB. Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: Ventilated-chamber, sap-flow and Penman-Monteith measurements on evergreen oaks. *Functional Ecology*, 1994, **8**: 125-135

[8] Taneda H, Sperry JS. 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*, 2008, **28**: 1641-1651

[9] Steppea K, De Pauw DJW, Doody TM, 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

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

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

[12] Smith DM, Allen SJ. Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 1996, **47**: 1833-1844

[13] Lu P (陆 平), Urban L, Zhao P (赵 平). Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and Practice. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2004, **46**(6): 631-646 (in Chinese)

[14] Lu P, Woo KC, Liu ZT. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**: 1771-1779

[15] Mei T-T (梅婷婷), Zhao P (赵 平), Wang Q (王权), et al. Effects of tree diameter at breast height and soil moisture on transpiration of *Schima superba* based on sap flow pattern and normalization. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2457-2464 (in Chinese)

[16] Mei T-T (梅婷婷), Wang C-K (王传宽), Zhao P (赵 平), et al. Dynamics of trunk sap flux density of *Schima superba*. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(1): 40-47 (in Chinese)

[17] Zhao P (赵 平), Mei T-T (梅婷婷), Ni G-Y (倪广艳), et al. Application of thermal dissipation sap flow measuring system in investigating bamboo transpiration: Problems and solutions. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2012, **31**(1): 187-193 (in Chinese)

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

责任编辑 李凤琴