

Granier 树干液流测定系统在树木蒸腾研究中常见问题的解决方案

蔡锡安¹, 赵平^{1*}, 陆平², 曾小平¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. EWL Sciences, PO Box 39443, Winnellie, NT 0821, Australia)

摘要: Granier 树干液流测定系统基于电热平衡原理可精确、灵敏和连续地测定树干液流。然而在实际安装、测量和维护过程中的很多细节问题会直接影响数据的可靠性。对多年来在野外实际应用 Granier 测定系统过程中遇到的问题和解决方案进行阐述, 重点介绍 Granier 树干液流测定系统的组成、工作原理及探针安装和维护过程中需要注意的事项, 为其他使用者提供参考和帮助。

关键词: Granier 树干液流测定系统; 树木蒸腾; 维护和安装

中图分类号: Q94-336

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)03-0326-09

Solutions to Common Problems for Measurement of Tree Transpiration using Granier's Sap Flow System

CAI Xi-an¹, ZHAO Ping^{1*}, LU Ping², ZENG Xiao-ping¹

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. EWL Sciences, PO Box 39443, Winnellie, NT 0821, Australia)

Abstract: Granier's sap flow system is a precise, sensitive and continuous thermal-electric measurement based on heat balance principle. However, any problem in the installation, measurement and maintenance could have direct impact on the data accuracy and reliability. Basing on many years' experiential field work, in this paper, we introduce the principle and composition of the Granier's sap flow measurement system, and focus on discussing the most common problems encountered in the installation and maintenance, hence to assist other users to apply the Granier's sap flow system successfully.

Key words: Granier's sap flow system; Tree transpiration; Installation and maintenance

水是影响植物生长和分布的重要生态因子, 植物的水分运输和耗水特性反映了植物对环境水分的适应, 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。森林蒸腾耗水量十分巨大, 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^[1]。在自然条件下测定高大乔木的蒸腾是异常困难的, 关于蒸腾耗水的测定方法很多^[1-4], 上世纪 80 年代中

期, 法国学者 Granier 发明了能准确测定树干液流的热消散探针并得到广泛的应用。热消散探针是 Granier 在热脉冲液流测定技术的基础上利用双热电偶检测热耗散的原理发明的。应用 Granier 树干液流测定系统结合对被测部位的边材横截面积, 可以方便地求得树木的液流量, 较准确地测定树木的整树蒸腾, 可以避免热脉冲方法应用中精度不易控制的缺陷^[5-6]。也可以避免叶室法和离体称重法在非真实环境下测定结果与真值的偏差, 减小取样和尺度扩展到森林群体过程中所造成的误差, 并根

收稿日期: 2009-06-11 接受日期: 2009-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(30770328, 30871998); 广东省自然科学基金面上项目(07006917); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-133); 中国科学院华南植物园科研启动基金项目(200708)资助

* 通讯作者 Corresponding author, email: zhaoping@scbg.ac.cn

据经验公式和模型实现由单木耗水到森林群体蒸腾耗水的尺度转换^[7-8]。该方法通过长期连续地监测树木木质部的液流,可获得用于季节模型验证的连续数据集,还可得到森林不同层次的蒸腾,为研究森林冠层与大气的水分交换通量提供了准确的数据^[1,9]。Granier 树干液流测定系统具有构成简单、精度高、易重复、制作成本低和不受地形限制等优点,国内外许多学者利用此技术对林木水分传输问题进行了大量的研究,并由单一树种到多种种的复杂森林群落,在空间和时间上对树木边材液流随不同树干高度、不同边材深度、不同径级的变化规律以及边材液流的年度、季节、日周期变化等问题进行了探索^[1-2,6,10-18]。随着 Granier 树干液流测定技术的日渐成熟,已成为测定树木整树水分蒸腾的主要手段,并广泛应用于树木生理学和森林生态学等领域的研究。

目前市场上有多种商业型的 Granier 径向型探针出售,虽然商家都称他们的探针是符合 Granier 经验公式,但很少涉及安装和维护过程中出现有关问题以及这些问题对实验数据的影响。基于国内应用 Granier 树干液流测定系统的科研工作者不断增加^[6,18-21],我们对多年来应用 Granier 树干液流测定系统所遇到的问题和经验进行阐述,为应用者提供帮助和参考。

1 Granier 树干液流测定系统的组成

Lu 等^[22]曾对 Granier 树干液流测定系统探针的工作原理作过介绍,本文主要对该系统的重要组成部分:电源、传感器以及数据采集器作详细介绍。

Granier 径向型探针由一对热电偶针组成,纵向安装于树干上,上方探针外缠绕加热丝,称为加热探针(上探针),下面的探针称为参比探针(下探针),图 1 显示了系统的组成和电路连接。

电源部分主要为加热探针和数据采集器提供稳定的电源,供电电路为恒流直流电路,标准的恒定热消散功率为 0.2 W。为了减少成本和提高电源使用效率,一般采用 3 个加热探针组成串联电路,共用一组恒流直流供应电路。

Granier 径向型探针目前在国际市场上有多种类型^[22],原型 Granier 径向型探针由针头、加热电阻丝和 T 型热电偶组成。不锈钢针头为空心,长 21 mm,T 型热电偶在针头空腔内的中间点,热电偶与针头内壁是绝缘的。下探针结构与上探针相似。针头外缠绕加热线,加热线缠绕长度精确到 20.0 mm。对加热线的缠绕精度要求很高,其精度直接影响热量平衡计算的准确性。上下两探针热电偶的铜镍合金末端相连接,铜线末端连接到数据采集仪,以记录两个热电偶的温度差 ΔT (图 1)。

数据采集部分主要由数据采集仪和电脑组成,数据采集仪厂商一般都配有程序,利用该程序可直接与电脑通讯,对参数进行设定和调试,以及数据的上传和下载。

Granier 树干液流测定系统的工作原理是测定上下探针间的温度差 ΔT ,要使 ΔT 具有生理生态学的意义,必须确保 ΔT 维持在适当的范围,并与树干液流密度保持恒定的关系,为此,测定系统只给上探针加热,而下探针不加热,加热功率为一恒定值。当树干没有液流活动时(如夜间),加热探针

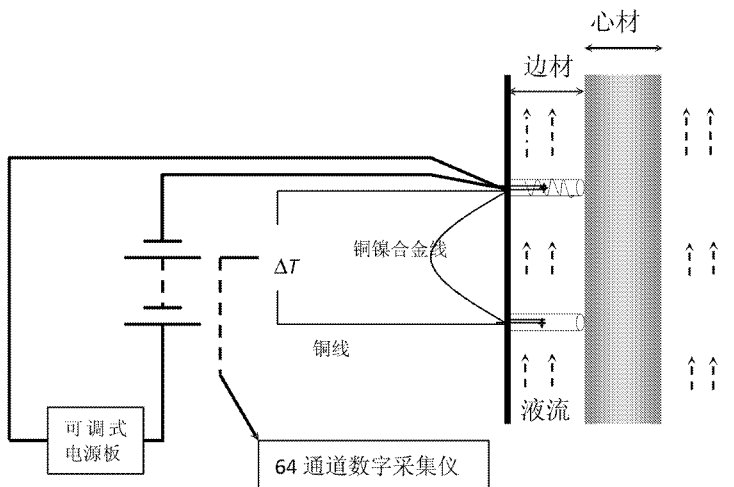


图 1 Granier 测定系统的组成和电路连接^[1]

Fig.1 Circuit connection and composition of the Granier sap flow system^[1]

加热的能量在理想状态下全部被树干吸收,这时上下探针间形成最大温差 $\Delta T_{(0)}$;当树干有液流活动时,由于液流带走部分热量,上下探针间的温差减小,这时的温差称为 $\Delta T_{(w)}$ 。Granier 对此进行了验证:当给上探针适当的持续恒定功率时(0.2 W),这个温差 $\Delta T_{(w)}$ 与树干液流密度有很好的相关性,且与树的种类无关联,Granier 据此建立了温差与树干液流密度相关联的经验公式^[23]:

$$J_s = 119 \times 10^{-6} \times \left[\frac{\Delta T_{(0)}}{\Delta T_{(w)}} - 1 \right]^{1.23}$$

其中 J_s 是树干液流密度($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); $\Delta T_{(0)}$ 树干液流密度为零时的温差; $\Delta T_{(w)}$ 有树干液流活动时的温差。

单位时间树干液流量 $F(\text{m}^3 \text{s}^{-1})$ 可由公式 $F = J_s \times S_A$ 求算,其中 S_A 为树干边材面积。

2 常见问题和解决方案

2.1 样树和数量的确定

基于个体树干液流测定值估算林分的蒸腾,需要根据树木种类、胸径、年龄、树木的健康状况、林分特征以及测量方法等来确定具体的样树和数量。样树树径范围应尽可能包含样地树木树径。Čermák等提出采用由选定的计量生物学参数(biometric parameter)计算样地所有树木的总体分位数(quantils of total)来确定样树和数量^[24]。其主要是根据林分树木个体的分布情况和仪器允许测量数量来确定安装探针的数量。设样地需安装 k 棵样树, k 的确定还应考虑统计精度的要求。把样地内所有树木个体根据计量生物学扩展参数(以基径面积为例) B_{tree} 由小到大进行排序,并对其基径面积逐步累加,同时计算样地的总基径面积 B_{stand} ,然后把 B_{stand} 划分为 k 等份,其值称为样树基径分数

$B_{\text{port}} = B_{\text{stand}}/k$, B_{port} 乘上因子 n ($n = 0.5, 1.5, 2.5, \dots, k-0.5$)后的值就是具体个体样树代表的分数值,这个分数值与基径面积 B_{tree} 逐步累加值比较,最接近的 B_{tree} 对应的个体就为确定的具体样树,如果确定的样树对应的胸径有多棵相同,任选其中一棵作为样树。Čermák建议在选定的样树中最少增加 1 棵小树,虽然这小树的实际蒸腾可以忽略不计,但它可以帮助确定“扩展曲线”(scaling curve)的非零端点的起点,同时可以克服平均木以下个体的过高估算和平均木以上的大树过低估算^[24]。如果多树种林还需根据每种占比例数来确定。研究表明优势树种可占总蒸腾量的三分之二,而中间树占四分之一,劣势树只占 5%~10%^[24]。Granier 等统计了不同林分的树种取样数和树干液流密度的变异系数(表 1),从表 1 中可看出,温带阔叶林和针叶林样树 5~8 棵的数量,其树干液流密度的变异系数在 9%~15%之间,而亚热带和热带雨林的变异系数则相对较大,在 40%~50%之间。此外,疏伐和水分胁迫也会改变样树之间液流密度的变异系数。研究表明对于单株树木来说其树干液流与气候因子(总辐射、水汽压亏缺等)间有良好的相关关系,而这种关系随着冠层结构和种类等的不同而改变^[25],通常温带树林安装的样树数量在 5~10 棵之间,通过合理控制取样质量,可较好地控制树干液流密度变异系数。研究表明南亚热带人工林 14 棵样树的树干液流密度变异系数最大也可达 43%^[1],因此,合理控制样树分布是至关重要的。

2.2 探针的安装

按照图 1 的示意,安装时预先把探针接触部分的树皮去掉,用电钻钻取直径 2.1 mm,深 20 mm 的圆孔。这个过程要注意去树皮面积尽量小,圆孔的

表 1 不同树种取样数和树干液流密度的变异系数^[1,25]

Table 1 Among-tree variability of sapflux densities^[1,25]

种类	样树数量	变异系数	变异系数
Species	Number	CV (%) ⁽¹⁾	CV (%) ⁽²⁾
岩生栎 <i>Quercus petraea</i>	8	11	37 ^(a)
长白松 <i>Pinus sylvestris</i>	5	9	
海岸松 <i>Pinus pinaster</i>	7	15	
欧洲云杉 <i>Picea abies</i>	8	13	50 ^(b)
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	14	43	
热带雨林 Tropical rainforest	8	40	

(1) 冠层郁闭、没有水分胁迫。Under optimal conditions and closed stand, no water stress;

(2) (a): 疏伐林 In thinned stand; (b): 水分胁迫下 Under water stress.

直径和深度尽量准确,为了便于安装可以钻取直径为 2.1~2.2 mm 的圆孔(孔径大小刚好紧抱铝管或铜管为好)。有些商品成品已经把铝管(或铜管)与探针粘合为一体,这时只要把铝/铜管涂少许导热硅胶插入已钻好的圆孔即可。如果探针与铝/铜管分离,则先安装铝/铜管,然后再把探针插入铝/铜管中,铝/铜管和探针都需要涂少许导热硅胶以加强导热性能,铝/铜管主要目的是加强均匀散热,同时起到保护探针的作用。

2.2.1 探针安装位置的确定

在安装探针之前必需测定树干的边材厚度,边材厚度与探针长度的关系一般有 3 种情况:相等、大于和小于。Lu^[22]和 Granier^[10,23]等对这 3 种情况的探针安装作了详细的分析,并提出了多种解决方案, Lu 还提出以点面修正因子的方法来确定液流的径向变化^[22,26]。本文需要特别强调的是当树干边材厚度小于探针长度时,探针所测量的温度已经包含了部分心材区域的温度,这时探针所测量的树干液流密度小于实际,计算树干液流量时应减去心材部分的热量消散。要在实际应用中避免这种情况的发生,可以如下处理:(1)样树边材厚不小于 2 cm;(2)探针安装时切向插入边材(与茎轴垂直),以确保探针只接触到有效的边材和探针接触的导管数量不变;(3)如果确实无法避免探针要插入到心材,也要使探针在心材的长度不应占探针总长度太大的比例,心材消散的热量只是小部分时计算树干液流量才有意义,具体的比例长度需通过实验来验证。Granier 径向型探针的主要局限性正是它无法在边材较小的植物中应用。Clearwater 推荐了一个可选的方法来计算有效边材部分的树干液流密度^[26]。如果探针的一部分被插入心材,而剩余的在边材,可以假定 $\Delta T_{(0)}$ 的测量是边材和心材的加权平均,边材部分探针的温差 $\Delta T_{\text{边材}}$ 可用下式计算: $\Delta T_{\text{边材}} = [\Delta T_{(0)} - b\Delta T_{(0)}] / a$, 这里 a 和 b 分别是探针在边材和心材的比例。尽管如此,我们认为该公式似乎只适合探针和较小心材部分接触的情况,而实际操作中,要尽量避免探针和较大心材部分接触。

上下探针间的安装要有一定的距离,但距离不一定很精确,约 10~15 cm 即可,距离太小,加热探针加热时会影响到下探针;距离太大,虽然干扰的机会变小,但更有可能受到环境温度梯度变化的影响,同样会导致测量的误差。因此应该保持距离尽可能短又不至于使下探针受到影响。可以通过给

上探针供电一段时间后停止供电,然后监测下探针的温度变化,以评估这种干扰的风险^[22]。

探针安装的高度则根据不同的研究目的来确定,一般上探针安装在胸高(1.3 m)位置,并根据胸高断面来计算树干液流量。需要注意的是不同高度的位置其树干液流密度是不同的。

由于森林生境的异质性和光照的差异,树木不同方位其树冠疏密程度不同,因此树干东西南北的朝向会出现不同的液流密度,这时安装探针就会有方位的问题。为了精确地计算林分的蒸腾量,最好在同一棵树的不同朝向都安装探针,但这势必增加工作量和成本,如果树干直径太小,不同方位的加热探针距离太近也会互相影响。针对这个问题,我们选择有代表性的 3~4 棵树,在树干东南西北 4 个方位均安装上探针,其它树则只在北向安装探针(北半球在北方,南半球在南方,避免太阳的直接辐射,减少外界环境因子的梯度变化对探针的影响)。根据这些树的测定值,回归统计东、南、西 3 个方位的树干液流密度与北向方位的相关系数,再根据这些相关系数来计算整棵树的平均液流密度^[1,16,27-28]。

2.2.2 导热硅胶的作用

由于 Granier 树干液流测定系统是热平衡系统,要求探针与树干接触良好,尽量减少非蒸腾热量损失。为了减少数据误差,提高测量的精度和热传导性,在树干和探针间需加涂导热硅胶,硅胶要适量(尽量的少)但要充分填满探针与铝管以及铝管与树干间的空隙,如果没有硅胶,探针和铝间或铝管与树干间会形成空气间隔,妨碍热量的正常消散,导致液流密度测定误差增大,甚至出现错误。但是,如果硅胶过多也会增加热量的非蒸腾散失。硅胶的另一目的是封闭树木安装探针的伤口以防止水分向外蒸发和病或虫的入侵。有些厂商产品可能用凡士林代替硅胶,虽然凡士林也能达到密封作用,但其导热效率没有硅胶高。我们建议采用不干导热硅胶(电脑 CPU 导热硅胶)。有些厂商产品还配有橡皮泥作为探针外部的密封和保护,这种做法并不可取,因为橡皮泥的主要成分是淀粉,如果没有加防腐剂会发霉,而且这种材料的导热性比空气高出 100~1000 倍,会增加探针的热量向外部散发,增加非蒸腾散失热量,带来更大的测定误差。

2.2.3 防护罩的安装和密封

以电缆连接探针后,需加盖防护罩和防辐射膜^[1]。防护罩选用大于探针间距的硬塑料盖,防辐

射膜要求表面光滑不透明的反光绝缘材料(如银色反光膜),防辐射膜的长度至少要延伸出探针位置 20 cm 以外的地方。目的是减缓外界环境温度的剧烈变化和防止太阳直接照射,同时防止雨水的直接淋洒。防辐射膜安装固定好后,防护膜上部用玻璃胶紧密粘贴到树干上以防止树干径流对探针的冲刷。

2.2.4 电源电流强度的调整

加热探针由 12 V 可调恒流直流电源供电,电线最好用 4 芯的低阻值的屏蔽线,屏蔽线接地牢固。如果采用 3 组探针串联共用一组直流供应电源,则要选择加热丝的电阻值相等的加热探针,保证每组探针的功率相等,此时的电阻值应为缠绕探针加热丝的电阻值(电缆电阻值不计)。电流的大小要根据系统的电阻值来调整。Granier^[23]认为加热功率值 0.2 W 代表了探针灵敏度和加热的风险折中,其经验方程也取决于探针(具独特的物理特性,如几何形状或材料特性)有效热区的特性和加热使用的功率^[22-23]。因此,在系统安装过程中要严格按照要求进行操作。

2.3 非树干液流引起的温度梯度变化的问题

所有基于热平衡的测量方法对外部的热干扰非常敏感,非树干液流引起的温度梯度变化是野外最常见问题:如环境气温昼夜温差的变化、太阳直接辐射、空气和土壤的温差、树干的直径和种类等都会产生温度梯度。太阳直接照射树干的一侧温度高,越靠近地面的位置温度越高,树径较小往往也是温度较高,这些温度变化都会造成探针的信号输出增大而形成所谓的噪音(noisy)信号,而噪音信号的日变化格局往往是无规则。为解决这个问题,可在正式实验前对探针不加热的数据进行验证,日夜温差的变化小于 $\pm 5 \mu\text{V}$ 是可接受范围,如果变化值超过 $\pm 5 \mu\text{V}$ 范围,则可采用如下措施来减少温度梯度变化:如果树干液流没有明显的方位变化,则尽量把探针安装在荫蔽处方位;把遮光保护罩尽量延长到树干底部,但需注意太阳直接照射到保护罩或树干时也会直接导致温度梯度变化。另外也可再安装 2 个热电偶与上下探针组成矩形,4 个热电偶串联起来进行自动校正温差^[22]。Lu 等分析了环境温度梯度变化的问题,列举了几种常见的情况,同时分析液流的“晨峰”(Morning Peak)现象,指出其与上下探针间的热梯度变化或热量的累积

有关,并举例分析和说明^[22]。

2.4 零液流密度信号漂移的问题

在理想状态下,零液流密度信号 $[\Delta T_{(0)}]$ 是恒定的,但实际上 $[\Delta T_{(0)}]$ 常会发生连续几天的周期性变化,这种变化与树干(尤其是加热探针附近的)木质部的热传导特性相关。当木质部受伤会失水,与铝管间的热传导减少,从而导致 $\Delta T_{(0)}$ 明显变大,这种变化在 7~10 d 内就能发现,如果出现这种情况就应该更换位置重新安装探针。但有些树种由于缺水而使木质部含水量减少,导致 $\Delta T_{(0)}$ 变大,这种现象在所有探针上都能观察到,但缺水解除后 $\Delta T_{(0)}$ 会恢复,这种情况可以作为一种正常规律处理^[29]。经过长时间的使用后(4~12 个月),有些树干木质部开始出现坏死,探针的灵敏度会降低、液流密度值偏小、输出信号出现漂移,这时需要检查数据进行更正。为了保证数据的质量尽可能每个星期下载数据一次,并对数据质量进行检查。

尽管 $\Delta T_{(0)}$ 理论上定义为 $u=0$ 时的 ΔT (通常发生在黎明前),但许多情况会影响零流量的发生。如我们发现马占相思(*Acacia mangium*) 夜间有明显的液流活动,这主要是由植物体的贮水的变化引起的(图 2)^[9,18,30]。另外,晚间用于补充植物组织生长的水分运动(生殖生长或营养体生长),长期干旱期间树木内部的水分储存的缓慢恢复^[22],高的水汽压亏缺和高的风速导致的冠层水分损失^[30]等都会产生夜间液流。夜间水分流动将会低估 $\Delta T_{(0)}$ 。Granier、Lu 等分析了夜间液流引起信号漂移的问题及解决方案^[22,25]。

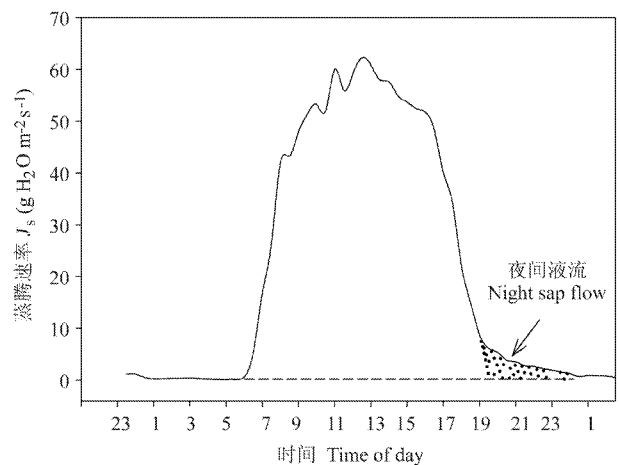


图 2 马占相思夜间液流

Fig. 2 Night sap flow of *A. mangium*

3 日常维护案例分析

图3是我们用3个(1~3号)探针(2.0 cm型)对荷木测量的电压值和光合有效辐射值,2008年2月24~26日的光合有效辐射不是典型的日变化格局,说明是以阴雨天气为主,日间光合有效辐射变化幅度较大(光照和阴雨相间出现),而在对应时间段内的3棵树干液流探针所测得的数据也不是典型的日变化格局,有时出现无序的变化趋势,并且3组探针都出现相似的规律,探针输出的电压值基本上与光合有效辐射的电压值变化趋势相对应。27和28日为晴天,光合有效辐射出现了典型的日变化格局,而对应的3组树干液流探针所测得的数据也出现了典型的日变化格局,说明探针工作正常,原来无序的电压值变化趋势是由于阴雨天气因素引起。因此,在上述情况下,如果现场通过数据采集仪控制面板(或电脑)查看探针输出电压值是在正常的范围内,但日变化周期不一定是典型的格局,这时不需要对探针作任何维护,待天气晴朗时

再查看其日变化格局情况。

如果数据通道瞬时值是很大的正值或负值(如285 mV或-291 mV),且上探针加热线的电流正常,可判定是由热电偶出现问题而导致的,或者是上探针或者是下探针的热电偶出现故障或损坏,处理方法是先更换下探针,看是否恢复正常,如果不能正常工作则可判断为上探针的热电偶出现故障。如果加热探针的电流不正常,用万用表则很容易找出电路故障的加热线探针,更换加热探针即可。如果探针运行一段较长时间后,发现电压信号值呈增加或递减的趋势,在排除天气和电路电流的因素后,考虑是否探针安装位置出现异常情况,例如探针部分外露、安装部位的木质部坏死、加热探针周围有蚂蚁或其他小昆虫集结、探针位置进水等,这时应根据实际情况采取相应的措施。探针输出的电压值下降多数是由于外界因素引起额外的热量散失增加而引起的,只要根据实际情况一一加以排除,问题一般可迎刃而解。

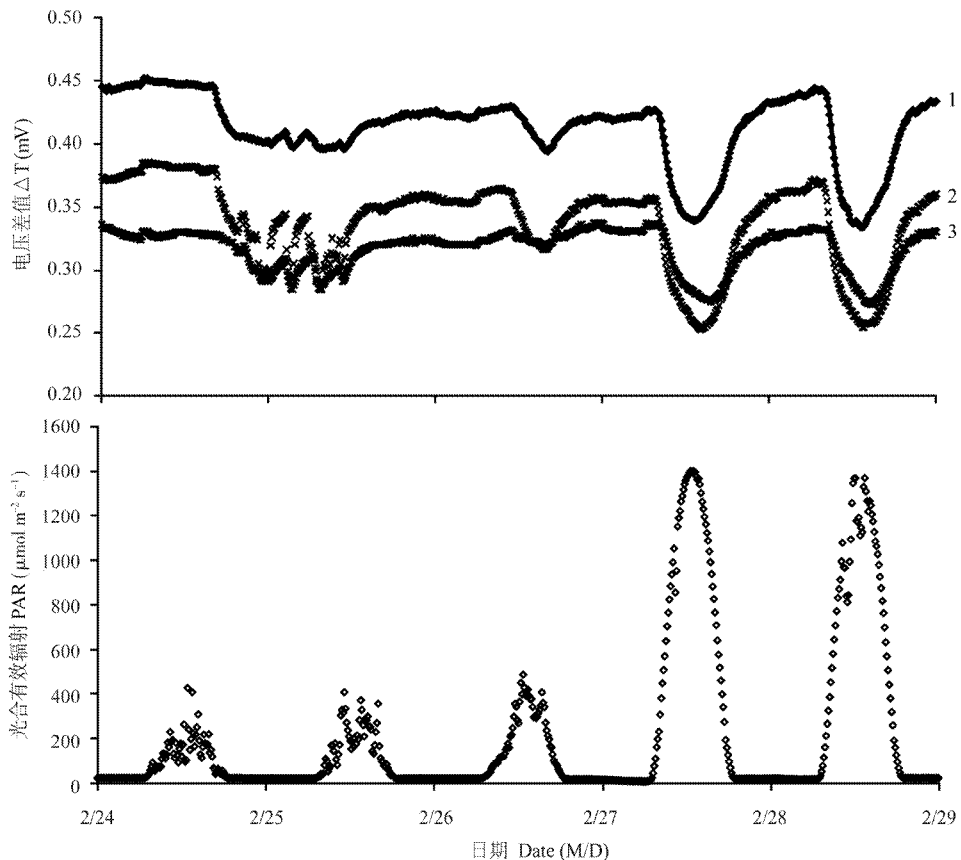


图3 荷木树干液流测定探针(3个)和光合有效辐射日变化(2008年2月24~29日)

Fig. 3 Diurnal variations of voltage (ΔT) from 3 probes on *Schima superba* and photosynthetically active radiation (PAR) from February 24th to 29th, 2008

由图 4 可看出另外 4 个(4~7 号)探针在 2007 年 12 月份中下旬观测值的日变化,其中 4、5 号探针的日变化基本上与光合有效辐射相对应,25 到 29 日都为较典型的日变化格局。但 6、7 号探针的日变化格局却出现了明显的差异,特别是 7 号探针,变化趋势与光合有效辐射并不对应,通过检查探针的安装位置发现部分边材已经坏死,由于坏死的边材没输导水分的能力,因而探针输出电压值呈无规律变化,这时需要更换位置重新安装探针。6 号探针虽然不象 7 号探针那样无规律性,但它的昼夜电压差值变化不明显,检查发现其上探针有部分已露出外面,导致其数值出现偏小,重新装好探针后其数值恢复正常。

4 结语

树干液流测定系统是分析林分和树木个体之间液流差异的有效工具。应用树干液流测定技术

不仅可以测定树木的整树蒸腾,也提供了分析树木蒸腾个体间差异的准确方法,借助该技术能实现林木蒸腾和冠层平均气孔导度的测定,拓展了研究森林水分利用过程的时空尺度,是开展冠层与大气的水分交换的长期性研究和监测环境变化的准确和有效的实验生态学方法^[9]。

我国北方水资源严重不足,南方也存在季节性干旱问题。随着城市化的快速发展和城市绿化水平的不断提高,每年园林绿地的养护需要消耗大量水资源。利用 Granier 树干液流测定系统可以准确地测定树木的耗水量和树木的耗水规律,通过建立单株耗水模型可以方便地预测树木耗水量,实现园林绿地水分的科学管理。同时可为选择低耗水树种、合理的林分结构配置提供理论和技术支持。此外,随着全球气候变暖,不同地区的降水格局将会发生变化,森林生态系统的水分利用和水量平衡研究越来越重要,我们相信整树树干液流测定将对森

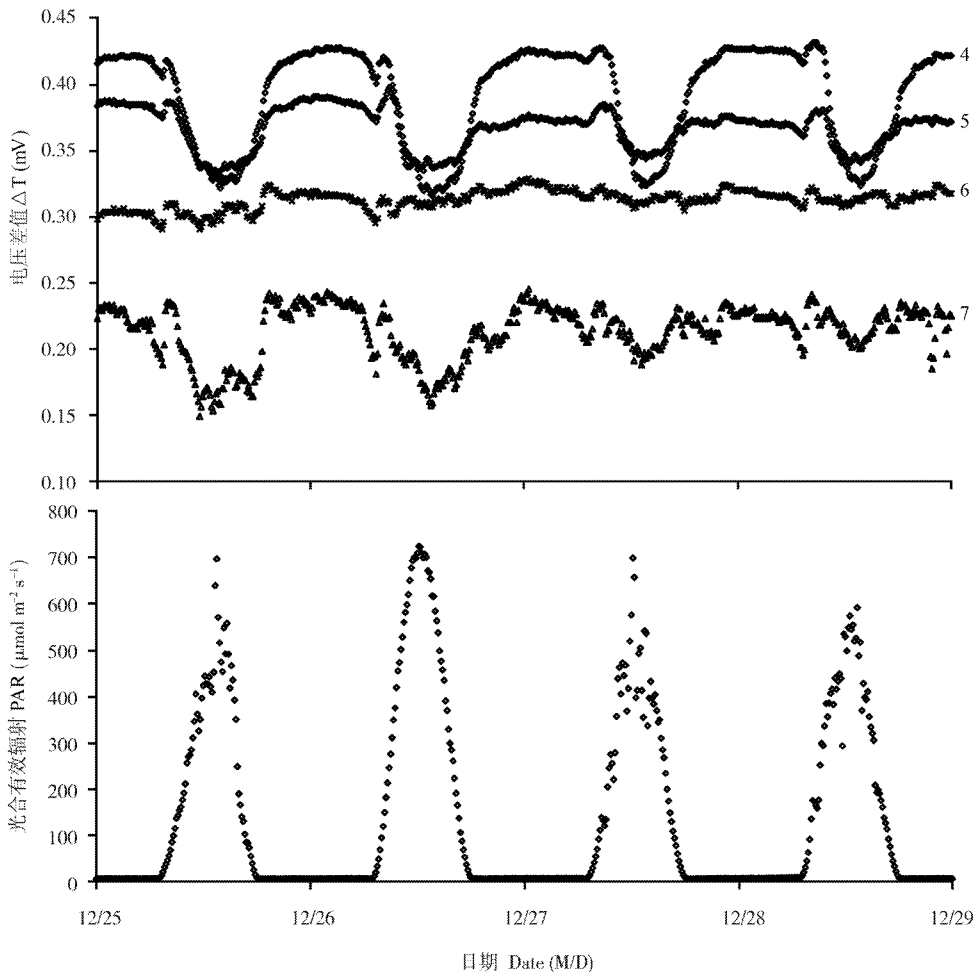


图 4 马占相思树干液流探针电压信号值和光合有效辐射的日变化(2007 年 12 月 25~29 日)

林生态系统的水文平衡的研究起到非常重要的作用。在全球气候变暖过程中森林碳平衡也越来越受到重视,基于森林树干液流连续测量估算的整树蒸腾与冠层光合作用之间的藕合来评价森林碳同化具有广阔的发展前景^[31]。

参考文献

- [1] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2005, 13(6): 457-468.(in Chinese)
- [2] Liu F J(刘奉觉), Zheng S K(郑世楷), Ju G S(巨关升), et al. A study on comparison of measuring water-consumption for transpiration in poplar [J]. *Sci Silv Sin(林业科学)*, 1997, 33(2): 117-126.(in Chinese)
- [3] Sun P S(孙鹏森), Ma L Y(马履一). The Water Use of Water Conservation Tree Species — Research and Application [M]. Beijing: Chinese Environment Science Press, 2002: 1-18.(in Chinese)
- [4] Deng D Z(邓东周), Fan Z P(范志平), Wang H(王红), et al. Determination and estimation methods of tree transpiration: A review [J]. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, 2008, 27(6): 1051-1058.(in Chinese)
- [5] Anfodillo T, Sigalotti G B, Tomasi M, et al. Applications of a thermal imaging technique in the study of the ascent of sap in woody species [J]. *Plant Cell Environ*, 1993, 16(8): 997-1001.
- [6] Ma L Y(马履一), Wang H T(王华田). Spatial and chronic fluctuation of sapwood flow and its relevant variables of *Pinus tabulaeformis* [J]. *J Beijing For Univ(北京林业大学学报)*, 2002, 24(3): 23-27.(in Chinese)
- [7] Sun P S(孙鹏森), Ma L Y(马履一), Wang X P(王小平), et al. Temporal and spacial variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) [J]. *J Beijing For Univ(北京林业大学学报)*, 2000, 22(5): 1-6.(in Chinese)
- [8] Ma L Y(马履一), Wang H T(王华田), Lin P(林平). Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area [J]. *J Beijing For Univ(北京林业大学学报)*, 2003, 25(2): 1-7.(in Chinese)
- [9] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest [J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, 2006, 30(4): 655-665.(in Chinese)
- [10] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiol*, 1987, 3: 309-320.
- [11] Steinberg S L, McFarland M J, Worthington J W. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in Pecan [J]. *J Exp Bot*, 1990, 41(227): 653-659.
- [12] Li H T(李海涛), Chen L Z(陈灵芝). The hydro-physiological characteristics of major plant species of the forest ecosystem in the warm temperate zone of northern China [J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, 1998, 22(3): 202-213.(in Chinese)
- [13] Sun H Z(孙慧珍), Zhou X F(周晓峰), Zhao H X(赵惠勋). A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla* [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2002, 22(9): 1387-1391.(in Chinese)
- [14] 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) [J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, 2002, 26(6): 661-667.(in Chinese)
- [15] Wang H T(王华田), Ma L Y(马履一), Xu J L(徐军亮). Water potential and its impact on sapwood flow velocity [J]. *J Plant Ecol(植物生态学报)*, 2004, 28(5): 637-643.(in Chinese)
- [16] Ma L(马玲), Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), et al. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2005, 25(9): 2145-2151.(in Chinese)
- [17] Nakai T, Abe H. The relationship between sap flow rate and diurnal change of tangential strain on inner bark in *Cryptomeria japonica* saplings [J]. *Wood Sci*, 2005, 51: 441-447.
- [18] Wang H(王华), Zhao P(赵平), Wang Q(王权), et al. Characteristics of nighttime sap flow and water recharge in *Acacia mangium* trunk [J]. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, 2007, 26(4): 476-482.(in Chinese)
- [19] Wang H(王华), Zhao P(赵平), Cai X A(蔡锡安), et al. Partitioning of sap flow of *Acacia mangium* and its implication for estimation whole-tree transpiration [J]. *J Plant Ecol(植物生态学报)*, 2007, 31(5): 777-786.(in Chinese)
- [20] Wang H(王华), Zhao P(赵平), Cai X A(蔡锡安), et al. Time lag effect between stem sap flow and photosynthetically active radiation, vapor pressure deficit of *Acacia mangium* [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2008, 19(2): 225-230.(in Chinese)
- [21] Xu W T(许文滔), Zhao P(赵平), Wang Q(王权), et al. Calculation and modelling of the canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* from sap flow data [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2007, 27(10): 4122-4131.(in Chinese)
- [22] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice [J]. *Acta Bot Sin*, 2004, 46(6): 631-646.
- [23] Granier A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres [J]. *Ann For Sci*, 1985, 42: 193-200.
- [24] Čermák J, Ku čera 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.
- [25] Granier A, Biron P, Breda N, et al. Transpiration of trees and forest stands: Short and long term monitoring using sap flow methods [J]. *Global Change Biol*, 1996, 2: 265-274.
- [26] Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade J L, et al. Potential errors in measurement of non-uniform sap flow using heat dissipation probes [J]. *Tree Physiol*, 1999, 19: 681-687.
- [27] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. Responses of canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* forest to environmental driving factors [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2006, 17(7): 1149-1156.(in Chinese)
- [28] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. The

- variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, 26(12): 4050–4058. (in Chinese)
- [29] Waring R H, Running S W. Sapwood water storage: Its contribution to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir [J]. *Plant Cell Environ*, 1978, 1: 131–140.
- [30] Goulden M L, Field C B. Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies — Ventilated Chamber, Sap-flow and Penman Monteith measurements on evergreen Oaks [J]. *Func Ecol*, 1994, 8:125–135.
- [31] Zhao P, Lu P, Ma L, et al. Combining sap flow measurement-based canopy stomatal conductance and ^{13}C discrimination to estimate forest carbon assimilation [J]. *Chin Sci Bull*, 2005, 50(18):2021–2027.