

三种基于热技术的树干液流传感器系统

田晓楠^{1*}, 李新², 刘洋¹, 赵小宁¹, 席本野^{1**}

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 干旱半干旱地区森林培育和生态系统研究国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 2. 北京时域通科技有限公司, 北京 100193;)

摘要: 准确估测林木蒸腾是了解林木水分利用特征、实现精准水分管理的重要手段。基于木质部导热性的液流测量是估算林木蒸腾的有效方法。为了提高精准水分管理技术在白杨等大径材林培育中的可推广性和社会可接受度, 通过自主研发三种主流树干液流传感器包括热扩散液流探针、热比率液流探针和热场变形液流探针, 极大节约经济成本, 有利于开展大范围、多物种研究, 实现植物水分实时监测, 提高森林的集约经营水平。

关键词: 树干液流; 热扩散法; 热场变形法; 热比率法

中图分类号: S715.2

文献标识码:

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

液流是植物体内由于叶片的蒸腾作用引起的植物体失水, 从而引起水分通过木质部运输到叶片的过程^[1-2], 它决定了整个树冠的蒸腾量, 能够准确反映植物的蒸腾耗水状况及其对环境的响应^[3]。其中, 植物蒸腾中的90%以上来自茎干液流^[4-5]。因此, 茎干液流可以作为评估树木耗水特性以及研究树木水分传输机理的一项重要指标。

基于热力学方法的液流测量技术能够准确估算林木耗水量、了解干旱胁迫与植物生理响应, 被广泛用于林业、农业、水文学和生态生理学研究^[6]。主流液流测定仪器从热扩散、热场变形、热脉冲等角度来设计, 通过监测传感器周围能量变化进而反映树木液流速率。目前主流传感器均由国外科技公司率先研发应用, 国内公司多为代理商, 自主研发产品少, 国产化水平低。

1.2 应用价值

自主研发的国产化树干液流测定系统, 与国外同类产品相比, 性能相当, 但成本降低50%-60%。可实现云服务器平台的数据共享, 为研究者远程实时掌握林木的水分亏缺状态、预测液流变化趋势, 从而科学管理林木以及节水灌溉提供方法。

2 传感器研制与应用

2.1 传感器研发思路及试验设计

为了精准且连续的对林分蒸腾进行监测，对热扩散液流探针(Thermal Dissipation Probes, TDP)、热场变形液流探针(Heat Field Deformation, HFD)、热比率液流探针(Heat Ratio Method, HRM)共3项监测设备进行研发（表1）。设备研发主要经历四个阶段，分别为技术原理研究、材料与技术参数研究、产品对比测试、产品应用推广。

表 1 三种基于热技术的树干液流测定系统

树干液流测定系统	测定指标	关键技术	优点
热扩散液流探针	液流	热电偶	使用方便、计算简单、适用性广
热场变形液流探针	双向液流	多位点热电偶	高时间分辨率的不同深度多位点测量，可精准测定高、低、零液流以及逆向液流
热比率液流探针	双向液流	多位点热电偶	低能耗、易于维修以及精准测定中低液流与逆向液流

设备研发完成后，对3项产品进行对比测试与田间监测应用。试验地位于山东省高唐县国有旧城林场(116°5'25"E, 36°48'47"N)，海拔30 m。属暖温带半干旱季风区域大陆性气候，年均降水量544.7 mm，降水主要集中在7-8月。试验地于2015年春季采用毛白杨无性系B301 植苗造林。

针对热扩散液流探针，选择6 株毛白杨，样树胸径11~15 cm，测试时间为2020年5月27日-6月6日。在正北方向高1.1和1.3 m 处分别安装国外同类探针 (TDP-30, Dynamax, USA) 和本项目研发STDP30 探针，两组探针上下间距20 cm。为避免安装位置不同对测定结果的影响，于6月3日对两种类型探针的测定位置进行调换。

针对热场变形法液流探针，选择3 株毛白杨，位于胸径处左右安装2位点自研热场变形法探针(测定位点深度分别为15和30 mm)，并在其下方30 cm 处安装单测量位点的热扩散液流探针(TDP-30, Dynamax, USA)作为对比。

针对热比率液流探针，测试时间为2023年3~4月，选择1株胸径为14 cm的七叶树为对象，对自研双位点HRM液流探针进行测试，监测其茎干以及根系液流。2023年4月末，在以上试验基础上，在位于茎干处的自研HRM液流探针上方25 cm处安装国外同类探针 (SFM1, ICT International PTY, Armidale, Australia)进行对比。

2.2 热扩散液流探针的研制与应用

1) 原理与技术参数

(1) 测定原理

热扩散法由法国农科院的André Granier提出,是目前应用最为广泛的液流测定方法^[7]。其测定原理为将同时内置有热电偶丝的一对探针(上部探针内置有线形电阻丝热源)插入具有水分传导功能的树干边材中,通过监测热电偶之间的温差,计算液流热耗散(液流携带的热量),建立温差与液流速度的关系,进而确定液流速度的大小^[8-9]。

(2) 材料组成

- ① 电缆。用于连接采集器的电缆线,采用单芯 0.3 mm²的无氧铜线,并带屏蔽层,抵抗外界对信号的干扰。
- ② 针管。采用成品的注射用针头,全金属结构,结实耐用。
- ③ 加热电阻丝。加热电阻丝实际绝缘长度与探针要求电阻率一致。
- ④ 热电偶丝。采用极细的T型热电偶丝0.08 mm以提高温度响应和灵敏度。
- ⑤ 胶质材料。采用AB双组份导热树脂填充针管,有利于短期固化和具有良好的导热性。

2) 对比测试与田间监测应用

如图1所示,在测试时间段内,自制高导胶材质探针测定的数据的变化趋势、幅度和导热敏感性均与国外同类探针(TDP-30, Dynamax, USA)基本保持一致。此外,利用自制探针和国外同类探针均敏感监测到了林木的夜间液流(如5月29日、5月30日和6月1日夜间)和液流在降雨前后随太阳辐射变异的敏感变化(5月29日)(图 1)。因此,自制探针和国外同类探针的液流数据变化趋势的一致性非常好;两种探针在各别时段内液流速率数值的差异主要是由探针安装位置的差异所引起,因为在6月3日对两种类型探针调换测定位置后,出现高液流位置的液流速率仍较高(图2)。综上,自制的TDP探针具有与国外同类产品相当的测量精度和稳定性,可很好的用于测定林分耗水量,帮助确定精准的灌溉量。

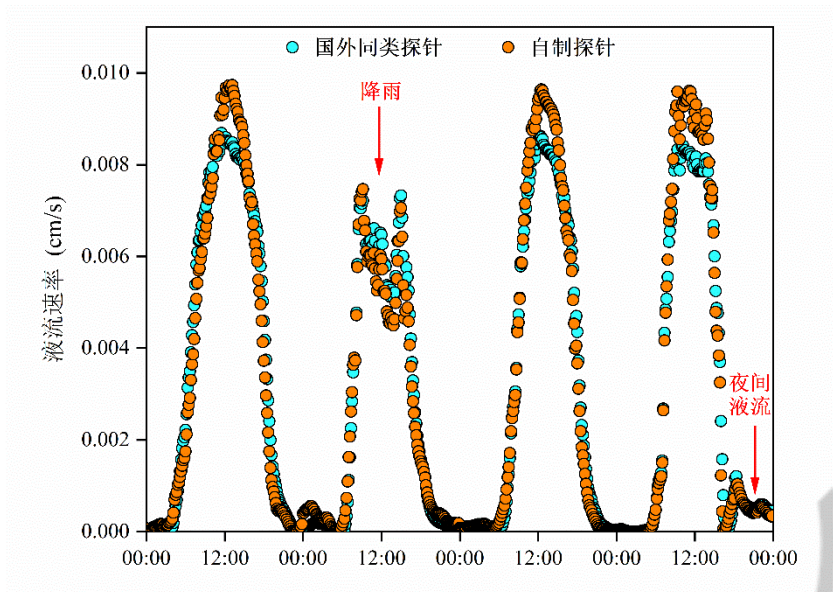


图1 自制 TDP 探针与国外同类探针（Dynamax）的实测液流对比

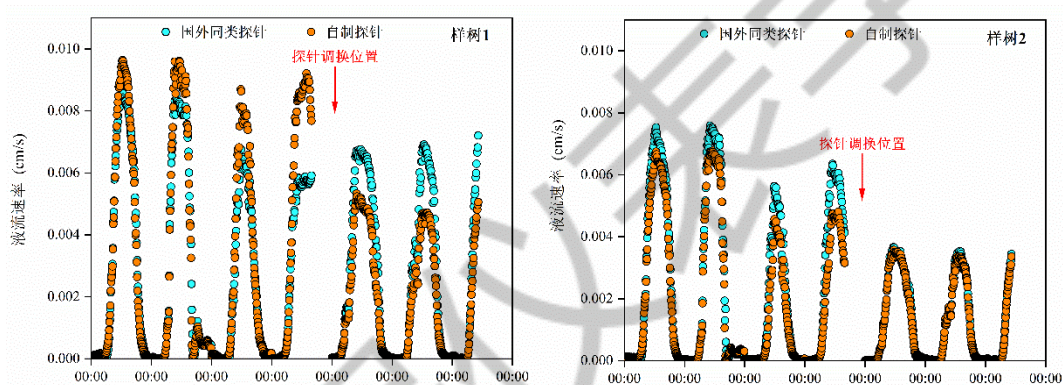


图2 探针调换前后的数据对比

2.3 热场变形液流探针的研制与应用

1) 原理与技术参数

(1) 测定原理

热场变形法由捷克布尔诺孟德尔大学的 Nadezhda Nadezhdina 教授提出, 是一种基于连续加热的液流测量技术, 该方法可以测定线性加热器周围的木质部中不同径向位置的热场变化, 并将热场变形与木质部液流联系起来^[10-11]。其测定原理为沿边材径向插入线性加热探针, 由于边材在轴向与切向上导热率的不同, 在没有液流情况下, 热场正视图接近于对称的椭圆形; 而存在流量的情况下, 热场椭圆体发生延长变形。HFD 法根据轴向与切向方向上线性加热探针周围的温度差(dT_{sym} 、 dT_{as})的比值对液流进行计算。

(2) 配置

每套 HFD 探针包含线性加热探针（H）一根，多位点温度探针（S、C、R）3 根，其中温度探针 S、R 分别位于加热探针 H 上下方各 15 mm 处，温度探针 C 位于加热探针 H 同一高度、间距 5 mm。S-R 之间温差为 dT_{sym} ，C-R 之间温差为 dT_{sym} （图 3）。

（3）探针参数

加热探针长 60 mm，；测温探针长 45 mm，温度测定位点分别位于距探针基部 20 mm 与 40 mm 处（特殊情况可进行定制）（图 3）。

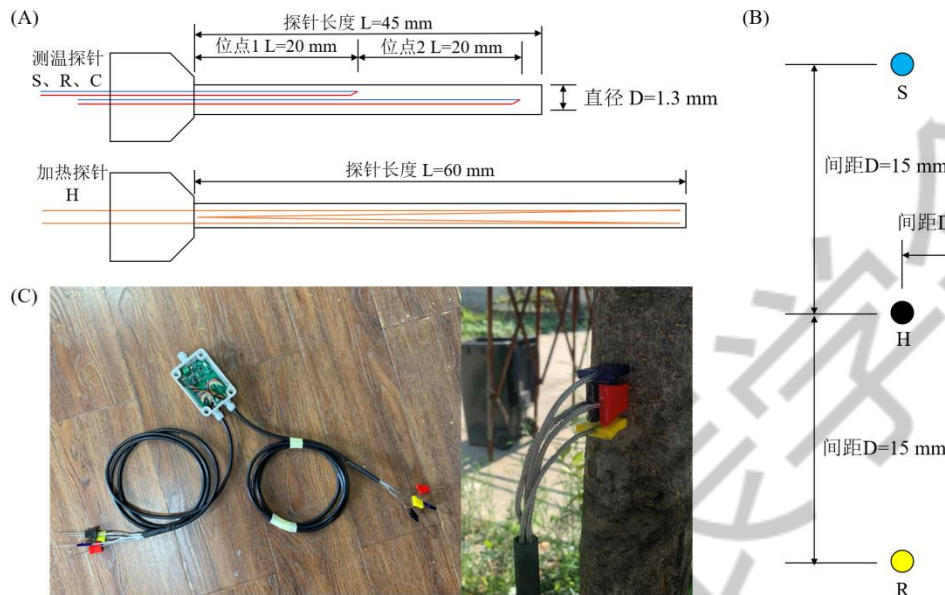


图 3 HFD 探针参数配置

（4）数据采集

信号输出为 $40\mu V/^{\circ}C$ ，每套探针占用 4 个通道，可使用通用的数据采集器，推荐使用型号为 HFD2 液流采集模块进行测量，模块 8 个差分通道，自带 1 个可调节的加热电源，加热电压 3~6V，可接入 2 套 HFD 探针，输出信号为 SDI-12，可实现远距离连接到采集器，温度分辨率 $0.003^{\circ}C$ 。

2) 对比测试与田间监测应用

毛白杨茎干液流监测结果如图 4，HFD 与 TDP 呈现出一致的变化趋势，其中 HFD 具备更高的时间分辨率(本测试中所采用的时间间隔为 5min，而在实际研究中可根据需求进行设定)，能够更好地反映出树木对于环境因子变化的响应。3 株样树的外侧测点液流均高于内侧测点液流速率，即证明毛白杨茎干液流存在径向差异，边材由外到内液流呈现出降低的趋势；而 TDP-30 探针由于仅具有单个测量位点，无法表现出这一边材特征，因此在树木以及林分尺度对耗水量进行估算时，会很大程度对其高估。此外，受限测定方法，TDP 所测量的夜间液流接近于 0，而 HFD 结果表明出毛白杨存在较高的夜间液流，且细微的变

化更明显。因此，在树木水分关系和树木夜间生理研究中，HFD 技术能够获取更为精准的液流数据，尤其是能用于精准估算林木耗水从而帮助确定合理的灌溉量。

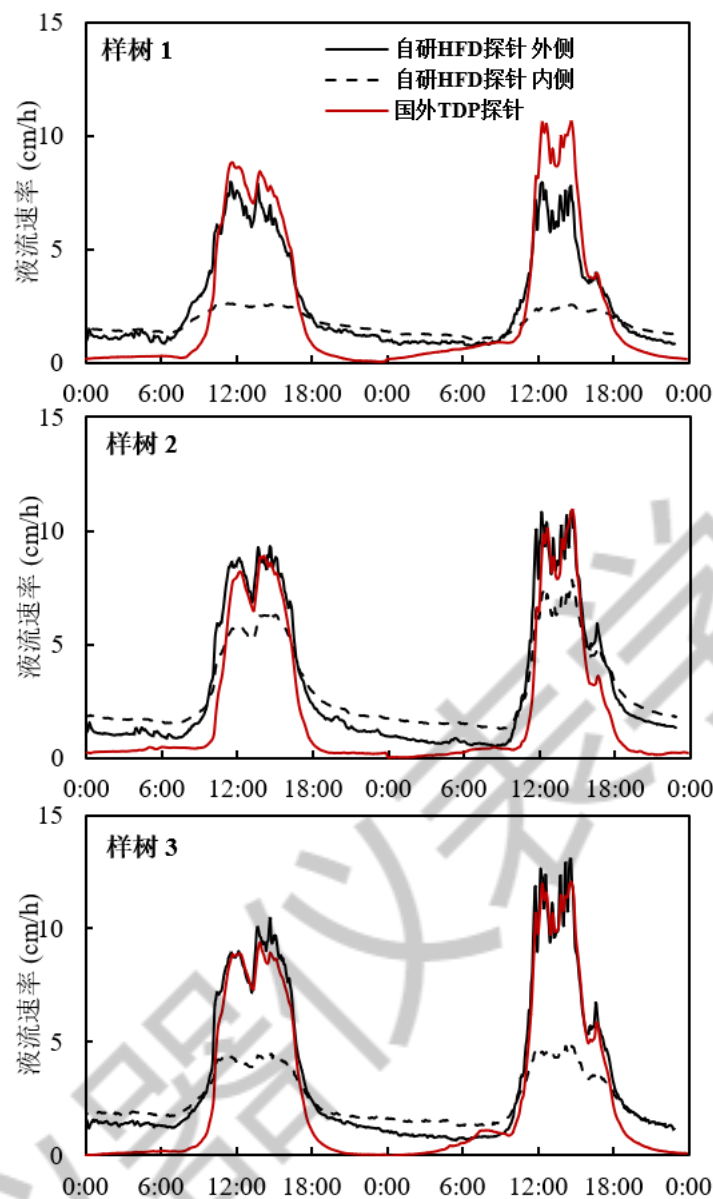


图 4 自研 HFD 探针与国外 TDP（Dynamax）探针的实测液流对比

2.4 热比率液流探针的研制与应用

1) 原理与技术参数

(1) 测定原理

热比率法(heat, ratio method, HRM)是由澳大利亚西澳大学的 Stephen S. O. Burgess 提出，是一种基于热脉冲的液流测量技术^[12]。其测定原理是将两个温度传感探针对称的放置在加热探针两侧，当测量开始时，加热探针进行短暂加热，将热脉冲释放进入木质部，随后由温度传感探针记录上下游的温度变化，并基于 Marshall (1958)^[13]的热传导公

式，将热脉冲速度与热脉冲释放后的上下游探针温度升高的比率相关联，以确定热脉冲速率。经平行性校正与伤口校正后，可通过热脉冲速率计算为液流速率。

(2) 配置

HRM 传感器包括一根位于中间的线性加热探针和两根对称放置于温度传感探针上下放的温度传感探针（图 5）。温度传感探针可包含一个甚至多个温度传感探位点，用于在边材的不同深度进行点测量。



图 5 自研 HRM 热比率液流探针

(3) 探针参数

加热探针长 35 mm，测温探针长 35 mm，温度测定位点分别位于距探针基部 12.5 mm 与 27.5 mm 处，探针长度以及测定位点的数量与位置可根据需求进行定制。

(4) 数据采集

采集系统基于 4G 无线网络传输，供电电压 11-15V DC，采用 TYPE-C 通信接口，辅助有可输出控制热脉冲、温度测量以及热脉冲速率计算的测量模块，使用 SDI-12 数字总线接口，可接入多组双位点热比率液流探针，可远程或实地通过该模块指令的调整修改探针加热能量等。

2) 对比测试与田间监测应用

七叶树茎干液流监测结果如图 6，自研 HRM 探针与国外同类探针呈现一致的动态变化趋势，且外侧边材液流均高于内侧边材液流。自研 HRM 探针无论在正午高液流阶段还

是在夜间低液流阶段, 均比国外同类探针更稳定, 能够较为准确的对低液流进行监测。

在 10 min 尺度, 自研 HRM 探针与国外同类探针数据结果达到了极显著相关($P<0.001$, $R^2>0.98$)(图 7)。此外, 由于 HRM 为基于热脉冲的液流测定方法, 每次测量过程中会在较短的时间内释放出较高的热量, 因此其测量不易受环境变化的影响, 并且仅太阳能板供电即可满足常规测量, 极适用于不具有稳定电源的野外监测。综上, 自研 HRM 探针具有与国外同类产品相当的测量精度和稳定性, 在树木水分关系和树木夜间生理研究中, HRM 技术能够获得精准、稳定的液流数据, 能用于精准估算林木耗水从而帮助确定合理的灌溉量。

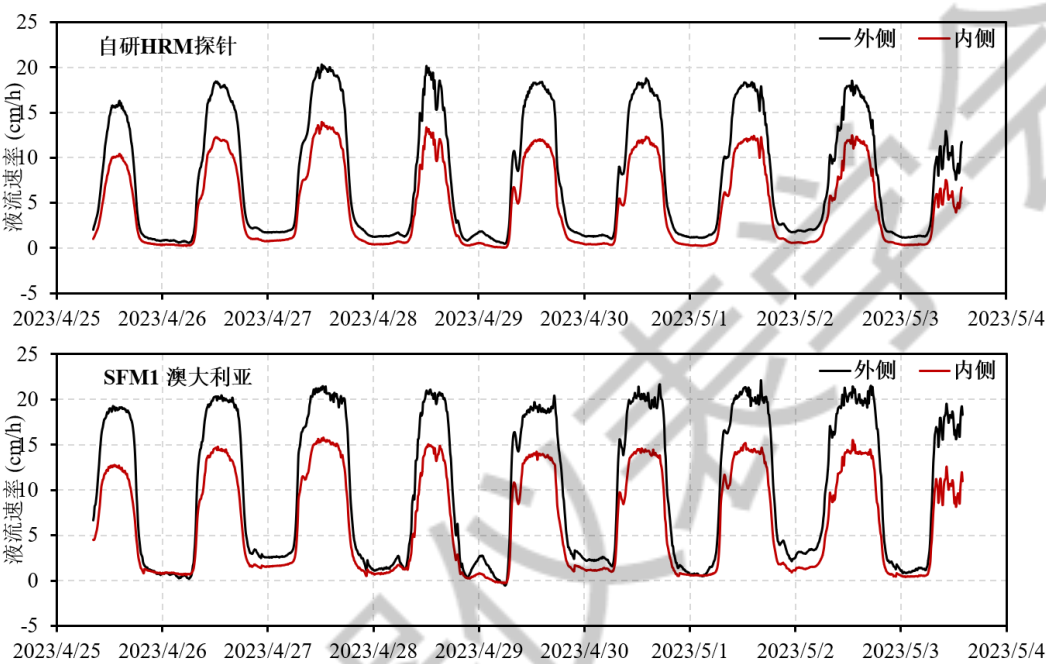


图 6 自研 HRM 探针与国外同类探针 (ICT) 的实测液流对比

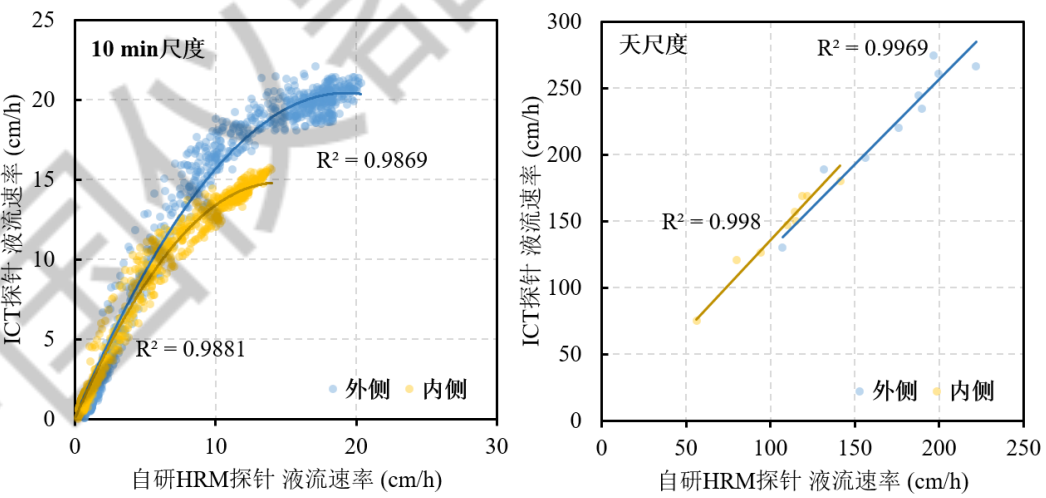


图 7 自研 HRM 探针与国外同类探针 (ICT) 监测的数据相关性

参考文献:

- [1]Daley, M.J. and Phillips, N.G. Interspecific Variation in Nighttime Transpiration and Stomatal Conductance in a Mixed New England Deciduous Forest[J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(4), 411-419.
- [2]赵春彦,司建华,冯起等.树干液流研究进展与展望[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(05):98-105.
- [3]Cohen Y, Fuchs M, Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1981, 4(5): 391-397.
- [4]Swanson R H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 72(1-2): 113-132.
- [5]Wullschlegel S D, Meinzer F. C., Vertessy R. A. A review of whole-plant water use studies in tree[J]. *Tree Physiology*, 1998, 18(8-9): 499-512.
- [6]Poyatos, R., Granda, V., Molowny-Horas, R., *et al.* SAPFLUXNET: towards a global database of sap flow measurements[J]. *Tree Physiol.* 2016, 36(12):1449-1455.
- [7]Flo V, Martinez-Vilalta J, Steppe K, *et al.* A synthesis of bias and uncertainty in sap flow methods[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 271: 362- 374.
- [8]Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. *Annales des Sciences Forestières*, 1985, 42: 193-200.
- [9]Lu P, Woo KC, Liu ZT. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53: 1771-1779.
- [10]Nadezhdina N, Sap flow index as an indicator of plant water status[J], *Tree Physiology*, 1999, 19(13): 885-891.
- [11]Nadezhdina N. Revisiting the Heat Field Deformation (HFD) method for measuring sap flow [J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11(1): 118.
- [12]Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, *et al.* An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants[J]. *Tree Physiology*, 2001, 21: 589-598.
- [13]Marshall D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport[J]. *Plant physiology*, 1958, 33(6): 385.