

活立木茎干水分状况实时检测传感器研究

赵燕东^{1,2} 黄红伦¹ 赵 玥^{1,3} 刘卫平^{1,2} 米 雪⁴

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;

3. 林草生态碳中和智慧感知研究院, 北京 100083; 4. 定州市绿谷农业科技发展有限公司, 定州 073006)

摘要: 活立木茎干水分状况是植物生命状态的有效体现,其中茎干含水率(Stem water content, StWC)和液流密度(Sap flux density, SFD)是研究植物体内水分变化规律的重要参数。准确检测活立木茎干同一空间位置的含水率和液流密度可以更有效地分析2个参数的关系、评估植物生长状况。将基于驻波率(Standing wave ratio, SWR)原理的茎干水分检测方法和基于热比率法(Heat ratio method, HRM)原理的茎干液流检测方法结合,设计了活立木茎干含水率和液流复合参数检测传感器,复合传感器的含水率检测单元和液流检测单元复用一套三针式探针,可对活立木茎干同一位置的含水率和液流实时精准检测。含水率检测单元输出电压与介电常数(6~53.3范围内,对应茎干含水率为0~85%)具有良好的线性关系(决定系数 $R^2=0.9701$),静态稳定性良好(长时间测试最大波动为0.6%全量程)。以杨树为研究对象,含水率检测单元与BD-IV型植物茎体水分传感器的对比实验结果一致(决定系数 $R^2=0.9800$)。液流检测单元与ST1221型热扩散式液流计对比,二者检测的杨树液流密度具有显著的线性关系(决定系数 $R^2=0.8991$),热扩散式液流计不能准确判断零液流条件而低估了液流密度,ST1221型液流计检测的平均值比本系统液流检测单元低1.1 cm/h,液流检测单元使用的热比率法可以准确检测低速液流。复合传感器对杨树茎干含水率和液流的长时间监测结果与前人研究一致且符合植物生理规律。茎干含水率和液流存在极显著的负相关性(Pearson 相关系数为-0.7951)。

关键词: 活立木; 茎干水分; 驻波率; 热比率法; 复合传感器

中图分类号: S715.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)07-0282-08

OSID:



Study of Real-time Detection Sensor for Stem Moisture Status of Living Tree

ZHAO Yandong^{1,2} HUANG Honglun¹ ZHAO Yue^{1,3} LIU Weiping^{1,2} MI Xue⁴

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China

3. Forestry and Grass Ecological Carbon Neutral Wisdom Sensing Research Institute, Beijing 100083, China

4. Dingzhou Lvgu Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Dingzhou 073006, China)

Abstract: The stem moisture status of living tree is an effective manifestation of plant life state. Stem water content (StWC) and stem sap flux density (SFD) are important parameters to study the variation of water in plants. Stem water content is a fundamental parameter to correctly detect the thermal equilibrium point or zero-flux conditions and measure the sap flux density. The water content at different heights and the sap flux density in different orientations of the stems of the living tree may differ significantly. The plant growth status can be evaluated comprehensively and the relationship between the water content and sap flux density can be analyzed effectively with accurate detection of the two parameters at the same spatial position of living tree stem. The stem water content detection method based on standing wave ratio (SWR) principle and the stem sap flow detection method based on heat ratio method (HRM) principle were combined to design a composite detection system for stem water content and sap flux density of living trees. The water content detection unit and the sap flow detection unit of the composite detection system reused one set of three-needle probes, which could accurately detect water content and sap flow in the same spatial position of the living tree stems in real time. The output voltage of the water content detection unit had a good linear relationship ($R^2=0.9701$) with the dielectric constant (in the range of

收稿日期: 2022-11-16 修回日期: 2022-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000500)和河北省产业创新创业团队项目(205A7603D)

作者简介: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

6 ~ 53.3, corresponding to the stem water content range of 0 ~ 85%), and the static stability was good (with maximum fluctuation of 0.6% of the full scale for a long time test). The measuring results of the water content detection unit and BD - IV plant stem moisture sensor were consistent ($R^2 = 0.980\ 0$) in a comparative test taking poplar as the research object. The comparative test between the sap flow detection unit and the ST1221 thermal dissipation plant sap flow meter showed a highly significant linear relationship between the value of sap flux density detected by both ($R^2 = 0.899\ 1$), and the mean value of sap flux density detected by the ST1221 sap flow meter was 1.1 cm/h lower than that of the sap flow detection unit, mainly because the thermal dissipation sap flow meter could not accurately determine the zero flow conditions leading to its underestimation of sap flux density, while the heat ratio method used by the sap flow detection unit can accurately detect low-speed sap flow. The long-term monitoring results of poplar stem water content and sap flow by the composite detection system were consistent with previous studies and in line with plant physiological laws. There was a significant negative correlation between stem water content and sap flux density (Pearson correlation coefficient was $-0.795\ 1$). A high-performance and low-cost device for plant life state monitoring was provided.

Key words: living tree; stem moisture; standing wave ratio; heat ratio method; composite sensor

0 引言

活立木茎干水分状况是植物生命状态的有效体现,活立木在生长、落叶、休眠等不同阶段,其体内水分含量会呈现出不同变化规律^[1],茎干含水率可以反映活立木的抗旱、抗寒能力;液流是树液在根、茎和枝中的运动,液流密度可以反映活立木的生命活力,液流的准确测量在水文和气候研究、植物生长检测中具有重要意义^[2]。常见茎干含水率检测方法有核磁共振法^[3]、电容法^[4]、时域反射法^[5]、驻波率法^[6-7]等。常见茎干液流检测方法有热扩散法^[8]、补偿热脉冲法^[9]、热比率法^[10]、Tmax 法^[11]以及 Sapflow + 法^[12]等。

茎干含水率是准确检测热平衡点、判断零液流条件、测量液流密度的基本参数^[8,13],活立木茎干不同高度的含水率、不同方位的液流密度可能存在显著差异^[14-16]。关于同时检测活立木茎干水分和液流参数的文献有限^[12,16-19],检测方法可分为两类:①在茎干相近的空间位置(方位相反或不同高度处)分别安装液流传感器探头和含水率传感器探头^[19-20],该类方法对树木的伤害较大,且没有考虑树干的空间异质性影响。②基于有些原理的液流计可在测量茎干液流的同时估算边材的体积热比等参数^[12,18],结合 SWANSON 等^[21]给出的边材热特性与含水率的转换公式得到边材含水率,该类方法估算含水率的精度远低于传统的茎干含水率测量方法(如时域反射法、驻波率法等)。

为弥补上述两类方法的缺陷,本文以杨树为实验对象,将基于驻波率原理的茎干水分检测方法和基于热比率法原理的茎干液流检测方法结合,设计活立木茎干水分和液流复合参数检测传感器(下文统称为复合传感器)。复合传感器的含水率检测单

元和液流检测单元复用一套三针式探头,减少对树木造成的伤害,无需考虑树干的空间异质性影响,实时、原位、准确地检测活立木树干同一空间位置的含水率和液流密度。

1 复合传感器检测原理和设计

1.1 复合传感器检测原理

1.1.1 基于驻波率法的茎干含水率检测原理

基于驻波率法(SWR 法)的活立木茎干含水率测量原理如图 1 所示,测量装置由 100 MHz 信号源、50 Ω 同轴传输线、检波电路、差分放大电路和平行探针组成。

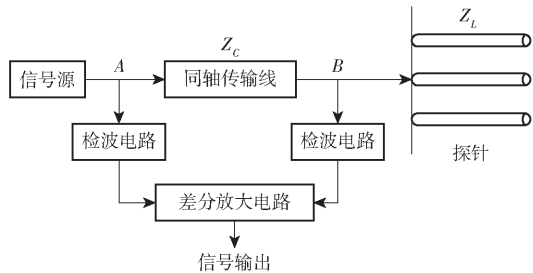


图 1 茎干含水率测量原理图

Fig. 1 Measuring principle of stem water content

在信号源频率及探针材料和几何参数(长度、半径、间距等)确定的情况下,探针阻抗只与检测介质的表观介电常数有关,同轴传输线两端电压差为

$$U_{AB} = 2A_L \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (1)$$

式中 U_{AB} ——同轴传输线两端电压差,V

A_L ——信号源幅值,V

Z_L ——平行探针阻抗, Ω

Z_c ——同轴传输线特征阻抗, Ω

WULLSCHLEGER 等^[22]采用时域反射法对 4 种落叶阔叶树种进行研究,得出茎干含水率和表观介

电常数之间关系的经验公式为

$$\theta = -0.251 + 4.66 \times 10^{-2} \varepsilon - 4.93 \times 10^{-4} \varepsilon^2 \quad (2)$$

式中 θ ——茎干体积含水率, %

ε ——茎干表观介电常数

综上,传输线两端的电压差、茎干体积含水率都与被测茎干的介电常数有一定关系,赵燕东等^[7,20]基于 SWR 法设计了 BD-IV 型植物茎体水分传感器,以柳树、杨树、桃树、海棠树等活立木为实验对象,验证了该传感器的检测性能,结合标定方程可以准确测量活立木体积含水率,本研究设计的含水率检测单元的原理就是 SWR 法。

1.1.2 基于热比率法的茎干液流检测原理

BURGESS 等^[10]推导出热比率法(下文统称为 HRM 法),该方法共有 3 个平行探针沿树干径向插入树干,中间探针提供热脉冲,上、下探针安装有温度检测元件且与中间探针的距离相同。热比率法计算热脉冲速率的公式为

$$V_h = 3\,600 \frac{k}{x} \ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_d} \quad (3)$$

式中 V_h ——热脉冲在树干中的传播速度, cm/h

k ——边材热扩散系数,取 $0.002\,5\text{ cm}^2/\text{s}$ ^[10,23]

x ——中间探针与上下探针距离,取 0.6 cm

ΔT_u 、 ΔT_d ——加热前后上方、下方探针的温度变化值, K

探针插入茎干会造成“因伤效应”,对热脉冲速率的测量产生影响,该影响可以进行校正,校正公式为

$$V_c = a + bV_h + cV_h^2 \quad (4)$$

式中 V_c ——校正后的热脉冲速率, cm/h

a 、 b 、 c ——校正系数,取值参考文献[21],随伤口宽度、探针尺寸和间距而变化
将 V_c 转换为液流密度公式^[24]为

$$V_{s_HRM} = V_c \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(M_c + \frac{c_d}{c_w} \right) \quad (5)$$

式中 V_{s_HRM} ——通过 HRM 法计算的液流密度, cm/h

ρ_d ——干材密度(干材质量与鲜材体积的比值) g/cm³

ρ_w ——水的密度,取 1 g/cm^3

c_d 、 c_w ——20℃ 时干材和水比热容,取 $1\,200$ 、 $4\,186\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

M_c ——鲜材质量含水率(鲜材含水质量与干材质量的比值), g/g

本研究液流检测单元的测量原理就是 HRM 法,该方法可以准确检测零速、反向和低速液流^[25]。

1.1.3 基于热扩散法的茎干液流检测原理

GRANIER^[8]提出的热扩散法(Thermal dissipation probe, TDP 法)原理液流密度计算公式为

$$V_{s_TDP} = 42.84 \left(\frac{dT_{\max} - dT}{dT} \right)^{1.231} \quad (6)$$

式中 V_{s_TDP} ——通过 TDP 法计算的液流密度, cm/h

dT ——加热探针和感温探针的温差, K

$dT_{\max}$ ——零液流条件下的 dT , K

由于零液流条件难以识别, $dT_{\max}$ 取 dT 的每日最大值,本研究使用 TDP 法的商用液流计与复合传感器的液流检测单元进行对比实验。

1.2 复合传感器探头设计

HRM 法液流计和 SWR 法含水率传感器的探头都含有 3 个探针,为减少多个探针插入树干对树木造成的伤害,复合传感器的含水率检测单元和液流检测单元复用一套三针式探头,通过继电器控制 2 个检测单元的分时供电,可以独立测量茎干同一位置的含水率和液流,复合探头的结构如图 2 所示。

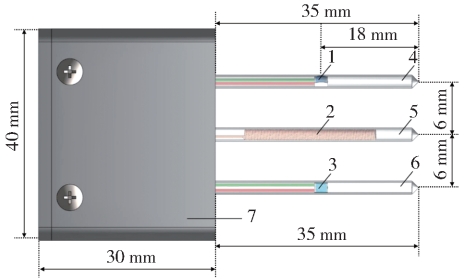


图 2 复合探头结构图

Fig. 2 Composite probe structure diagram

1. 上方热敏电阻 2. 镍铬电热丝管 3. 下方热敏电阻 4. 上方探针 5. 中间探针 6. 下方探针 7. 探头外壳

复合探头使用 3 个 304 不锈钢空心注射针头作为探针,每个探针长 35 mm,外径 1.3 mm,内径 0.8 mm,上、下探针与中间探针之间的距离均为 6 mm。每根探针的顶部使用电烙铁焊接密封,中间探针的尾部焊接到水分测量电路板的正极探针焊盘上,为水分检测电路的正极,上下探针的尾部焊接到负极探针焊盘上,为水分检测电路的负极。探头外壳(长 30 mm,宽 40 mm,高 40 mm)使用 ABS 树脂通过 3D 打印制作,在含水率检测单元工作时,被测茎干的含水率可以通过含水率检测单元测量的电压代入标定方程计算得到。

中间探针内部加热元件采用电阻约为 $24\ \Omega$ 的镍铬电热丝管,两条引线连接到 12 V 继电器的电压输出端,在液流检测单元工作时,单片机控制继电器的开闭从而控制加热脉冲的时间(本研究加热时间为 5 s);上下探针内部的中间位置(距离针头约 18 mm)装有负温度系数热敏电阻,热敏电阻与

10 kΩ 精密电阻串联接入 3.3 V 和地之间,由单片机内部的 ADC 模块测量热敏电阻分得的电压,从而求其阻值并换算得到加热前后热敏电阻的平均温度变化,结合式(4)~(6)可以得到茎干液流密度。复合传感器的探头安装如图 3 所示,将探头安装在杨树(2 年生,胸径 9.8 cm)树干北侧距离地面 1.3 m 高度处,用铝箔和塑料薄膜包裹探头安装部位的茎干以隔热和防水,采集器固定在其下方的树干上,系统采用 12 V 直流电源供电。

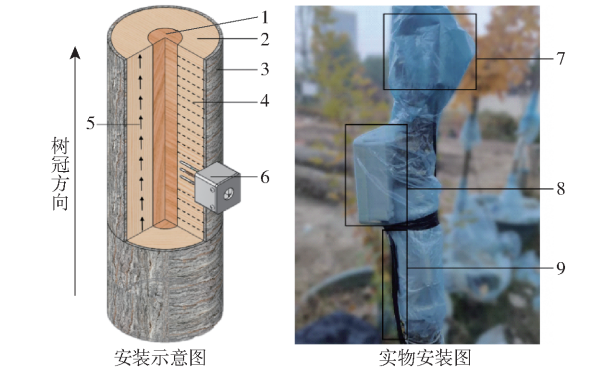


图 3 复合传感器探头安装图

Fig. 3 Composite sensor probe installation diagram
1. 心材 2. 边材 3. 树皮 4. 茎干水 5. 茎干液流 6、7. 复合传感器探头 8. 采集器 9. 电源线

1.3 复合传感器采集器设计

1.3.1 采集器硬件设计

复合传感器的采集器硬件设计框图如图 4 所示。

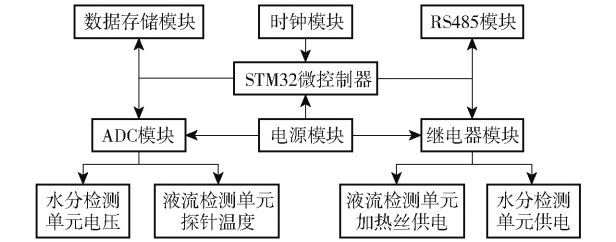


图 4 采集器硬件框图

图 4 Collector hardware block diagram
采集器以 STM32F103C8T6 单片机为控制核心,采用 12 V 直流电源供电。电源模块将输入的 12 V 电源先滤波处理,用于控制加热电热丝继电器的供电;滤波后的 12 V 电压经过降压处理,转换为精准的 5 V 和 3.3 V 电源,为含水率检测单元和控制系统供电;时钟模块采用 RX8025T 芯片,提供精确的系统时间;数据存储模块采用外接 SD 卡,用于本地存储数据;RS485 模块用于实现采集器与上位机之间的通信以修改重要的计算参数值;继电器模块控制含水率检测单元和液流检测单元的分时供电,防止两个不同测量原理的电路相互干扰;STM32 微控制器通过其内部集成的 ADC 模块采集含水率检测

单元的输出电压以及液流检测单元温度探针的温度;采集的原始数据经过微控制器计算处理,得到茎干含水率和液流密度。

1.3.2 采集器程序设计

复合传感器两次测量的时间间隔选为 10 min,图 5 为单次测量流程图。

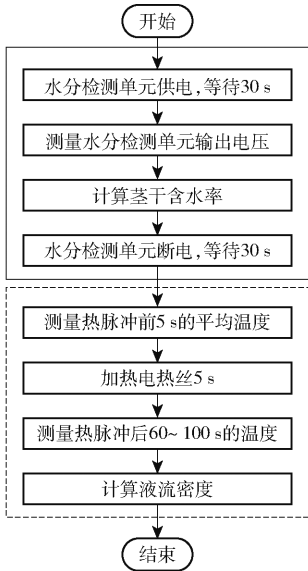


图 5 单次测量流程图

Fig. 5 Flowchart of single measurement process

图 5 中实线边框矩形内是含水率测量过程,虚线边框矩形内是液流测量过程。检测含水率时,使用继电器控制水分检测电路的 5 V 总电源供电和断电,单片机内部的 ADC 模块采集电路的输出电压,代入标定方程可得到茎干含水率。检测液流时,先测量上下探针在加热脉冲前 5 s 的平均温度,作为原始温度,使用继电器控制液流检测单元的 12 V 加热线管加热 5 s,再测量上下探针在热脉冲后 60 ~ 100 s 的温度平均值,减去原始温度值得到的平均温度上升量,代入式(3)~(5)可以计算液流密度。

2 实验与结果分析

2.1 含水率检测单元性能测试

2.1.1 含水率检测单元量程测试

参考文献[7],使用有机溶剂法对复合传感器含水率检测单元进行性能和量程测试。选用不同介电常数的有机溶剂及其与水的混合液体来模拟不同含水率的茎干,溶液的介电常数见表 1。

取容量为 500 mL 的烧杯(直径 9 cm),将复合传感器探头固定在烧杯上方,探针向下正对烧杯中心,依次向烧杯中加入各种测试液体直到液体完全浸没探针,记录含水率检测单元输出的电压,结果如图 6 所示。

由图6可知,复合传感器的含水率检测单元输

表 1 有机溶液的介电常数

有机溶液	介电常数
乙酸乙酯	6.0
正丁醇	17.5
乙醇	24.6
乙二醇	47.7
乙醇与水混合液(体积比 2:1)	43.6
乙醇与水混合液(体积比 1:1)	53.3

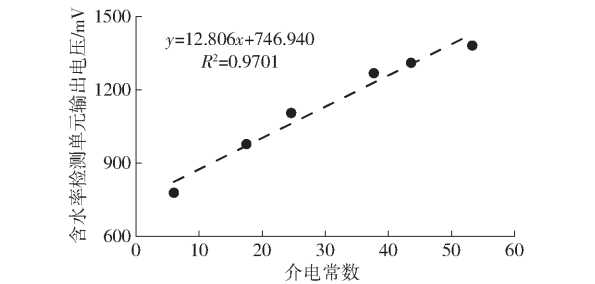


图 6 含水率检测单元输出电压对介电常数的响应
Fig. 6 Response of output voltage of water content detection unit to dielectric constant

出电压与介电常数(6~53.3 范围内)具有良好的线性关系($R^2=0.9701$)。由式(2)可知,所选溶液对应的茎干含水率为 1%~85%,复合传感器含水率检测单元的量程为 0~85%。

2.1.2 含水率检测单元稳定性测试

向 80 g 干燥的白杨木屑中分别加入 0、30、60、90、120 g 水并搅拌均匀,依次将不同含水率的木屑压入直径 8 cm 容量 500 mL 的塑料量杯并拧上盖子防止水分蒸发。在量杯侧面钻孔,将传感器探针插入量杯并固定。对装满上述不同含水率的木屑以及空气的量杯分别连续测量 120 min,探针插入后的每 10 min 记录一次传感器输出电压,实验结果如图 7 所示。

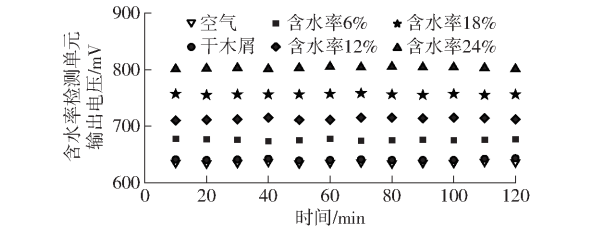


图 7 含水率检测单元稳定性测试结果
Fig. 7 Water content detection unit stability test result

图 7 中,在对 5 种不同含水率的白杨木屑及空气的测试中,含水率检测单元在 120 min 内电压输出值波动范围均在 5 mV 以内,对应的最大茎干含水率波动在 0.6% 全量程内,表明含水率检测单元的稳定性良好。

2.1.3 含水率检测单元标定实验

本研究参照文献[20]以海棠树干为实验对象对 BD-IV 型茎体水分传感器标定的方法,对含水

率检测单元输出电压与干燥法计算的杨树茎干体积含水率的关系进行了标定实验。从实验地(北京市海淀区北京林业大学三顷园苗圃,116°21'14"E,40°0'54"N)选取一颗长势良好、胸径约 9 cm 的杨树,截取长度约 15 cm 的树干段,用排水法测得鲜木段的体积 V_0 ,并将其完全浸入水中 24 h 以增加茎干水分含量。将木段放入 25℃ 的干燥箱,每隔 6 h 取出测量其质量 m 并将复合传感器探针插入木段中间位置,记录含水率检测单元的输出电压。重复上述过程直至木段质量和含水率检测单元输出电压趋于稳定后,将木段放置于 60℃ 的干燥箱内 72 h 后取出,质量记为 m_0 ,视为木段干质量。则干燥法计算茎干体积含水率的公式为

$$\theta = \frac{m - m_0}{\rho_w V_0} \times 100\%$$

(7)

式中 θ ——木段体积含水率, %

拟合由式(7)计算的体积含水率和标定过程中对应含水率检测单元输出电压的关系,得到拟合标定方程如图 8 所示。

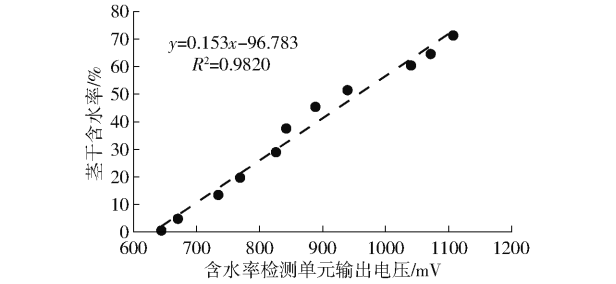


图 8 含水率检测单元标定实验结果
Fig. 8 Calibration experiment of water content detection unit

茎干体积含水率与含水率检测单元输出电压存在良好的线性关系($R^2=0.9820$),说明复合传感器的含水率检测单元可以准确测量活立木茎干含水率。

2.1.4 含水率检测单元与 BD-IV 植物茎体水分传感器对比实验

选用三针式 BD-IV 型茎体水分传感器^[7,19-20]与复合传感器的含水率检测单元进行对比实验。2 个传感器的探头安装示意图如图 9 所示,将对比的 BD-IV 型茎体水分传感器探头安装在复合传感器探头的对面相同高度处。

每 10 min 记录一次 2 个传感器的含水率测量值,连续监测 10 d,实验完成后拆除 BD-IV 型水分传感器,二者对含水率的检测结果如图 10 所示,对应的散点图如图 11 所示。

由图 10、11 可知,复合传感器含水率检测单元与 BD-IV 型传感器对同一棵杨树的含水率测量对比实验中,二者检测的结果每日变化形状和规律一致,存在显著线性相关性($R^2=0.9800$),同一时刻

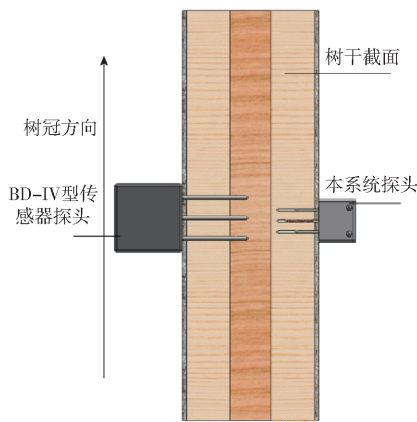


图 9 含水率检测对比实验示意图

Fig. 9 Water content detection comparison experiment diagram

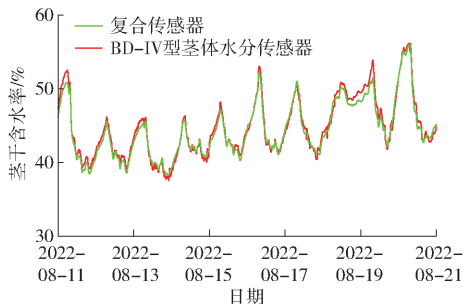


图 10 茎干含水率检测实验结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental results of stem water content detection

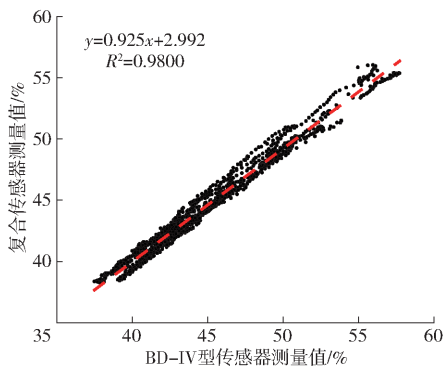


图 11 茎干含水率检测对比实验散点图

Fig. 11 Scatter plot of stem water content detection comparison experiment

测量值接近,两条测量曲线高度重合,说明复合传感器也可以准确检测活立木茎干含水率。

2.2 液流检测单元与 ST1221 型热扩散式液流计对比实验

TDP 法的液流计原理简单且可以测量零速率、低速率至高速率液流,本研究使用商用 ST1221 型热扩散式(TDP 法)植物液流计(北京时域通科技有限公司,ST1221 型热扩散式植物液流观测系统)与复合传感器的液流检测单元(HRM 法)进行对比实验,用于对比的 ST1221 型液流计探针型号为 STDPI0,探针长 10 mm,直径 1.2 mm,2 个探针的安

装间距 4 cm,上方为加热探针,上下方探针温差通过 2 个探针内部的热电偶元件测得。将 STDPI0 型探针安装在复合传感器探针的正上方约 10 cm 处,两个系统的探头安装示意图如图 12 所示。

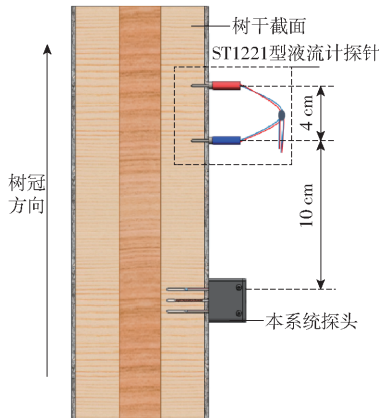


图 12 探头安装示意图

Fig. 12 Sap flow detection contrast experiment probe installation schematic diagram

对比测量杨树 7 d 的液流变化,测量结果如图 13 所示。

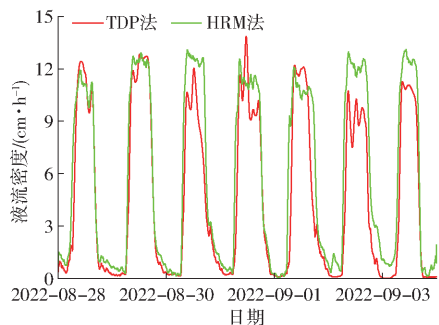


图 13 茎干液流密度对比测量结果

Fig. 13 Stem sap flux density comparative test

由图 13 可知,复合传感器液流检测单元(HRM 法)的测量结果与商用 ST1221 型热扩散式液流计(TDP 法)的测量结果日变化趋势一致,但是 HRM 法白天测量值较稳定,夜间液流密度大于 TDP 法测量值,二者测量值的线性拟合如图 14 所示。

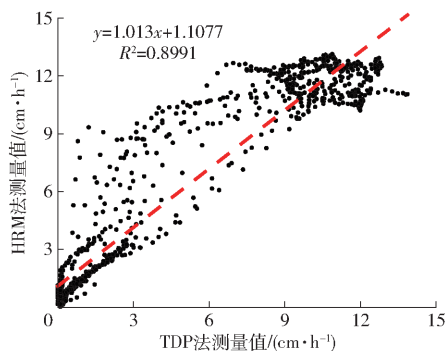


图 14 茎干液流密度测量结果对比

Fig. 14 Comparison of stem sap flux density measurement results

由图 14 可知,2 个系统测量结果拟合直线的斜率约为 1,说明二者灵敏度一致,二者的测量结果具有显著的线性相关性($R^2=0.899\ 1$)。HRM 法所有测量点的平均值比 TDP 法高约 1.1 cm/h(拟合直线的截距),主要因为 HRM 法可以检测到夜间的低速液流,而 TDP 法认为夜间的液流密度为零并据此条件计算每天的液流密度,如果夜间零流条件不成立,式(6)中每日选取的 $dT_{\max}$ 会小于零流条件的上下探针温差,TDP 法测量值会偏小。HRM 法可以准确测量低速(小于 45 cm/h)液流^[25],因此对比实验中 HRM 法测量值会比 TDP 法大,测量更准确。此外,探针长度和安装深度不同也可能导致两种方法测量值存在偏差。

2.3 茎干含水率和液流密度对比实验

2022 年 7 月 20 日—8 月 2 日,复合传感器对杨树茎干含水率和液流的监测结果如图 15 所示。

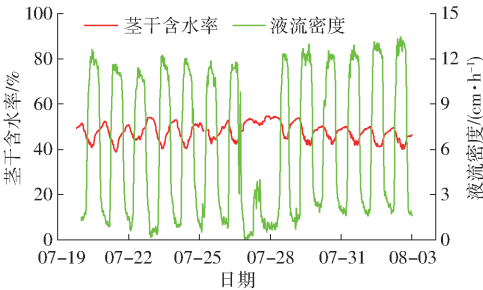


图 15 复合传感器现场监测结果
Fig. 15 Composite sensor field monitoring

2.3.1 茎干含水率和液流密度相关性分析

由图 15 可知,茎干含水率和液流密度以 1 d 为周期有规律地变化。液流密度白天呈“几”字形,夜晚呈“U”字形,这与文献[26]研究结论相同,测试期间液流密度最小值为 0.1 cm/h,最大值为 13.5 cm/h。茎干含水率每日呈单峰(波峰出现在每日 05:00—06:00)、单谷(波谷出现在每日 15:30—16:30)形状变化,这与文献[1]研究结果一致,测试期间茎干含水率最小值为 38.9%,最大值为 54.7%。

杨树茎干含水率和液流密度之间存在显著的负相关性,Pearson 相关系数为 -0.795 1,显著性检验概率 $P<0.001$,即杨树的液流密度越大,茎干含水率越小,这与王海兰^[16]使用独立的茎干水分传感器和液流计对同一棵柳树进行实验,得到“2 个参数存在相关系数为 -0.534 的显著负相关性”的结论相似。两个研究存在相关性的差别,可能是因为文献[16]测量不同高度处的茎干含水率和液流密度,未考虑树干的空间异质性影响,而本研究测量同一位置的茎干含水率和液流密度;也可能与实验树种、环境因素的差异有关。

2.3.2 晴天茎干含水率和液流密度变化规律

晴天(2022 年 7 月 19—23 日、2022 年 7 月 28 日—8 月 2 日),每日 05:00—06:00 杨树将要进行光合作用,土壤中的水和营养物质通过液流传输到树叶,液流启动。06:00—08:00 茎干液流密度由不足 3 cm/h 快速上升到 10 cm/h 以上,并在 08:00—17:00 保持均值为 11.67 cm/h 的高速率波动。17:00—18:00,光照强度减弱,液流密度极速下降并在 20:00 前下降到 3 cm/h 以下。夜间(20:00—次日 05:00)液流维持在均值 1.57 cm/h 的低速率。测试期间夜间液流不为零,且夜间液流量占全天液流量比例为 8.6%,这与文献[27—28]研究结论“夜间刺槐树干液流速率对整日液流速率的贡献率为 7%~12%”、“夜间液流量约占全天液流量 10%”一致。

日出后光照强度增大、空气温度上升,杨树的生理活动加强,当杨树生理活动耗水速率大于根系从土壤吸收水分的速率时,茎干含水量会下降。日落后光照强度减小、空气温度下降,杨树的生理活动减弱,耗水量和液流密度减小,茎干含水率缓慢上升以补充白天的水分消耗。

2.3.3 晴雨天气对茎干含水率和液流的影响

2022 年 7 月 23 日为晴天,全天液流密度变化范围为 0.21~12.35 cm/h,茎干水分波动很大,日变化为 14.0%。2022 年 7 月 27 日为雨天,全天液流密度变化范围为 0.20~3.64 cm/h,茎干水分波动很小,日变化为 4.2%,即晴天茎干液流变化范围和茎干水分波动都大于雨天。

2022 年 7 月 26 日夜晩—28 日早晨一直间断性降雨,7 月 26 日夜间液流密度为测试时段内的最小值(平均 0.28 cm/h),即雨天夜间的液流密度会小于晴天,与文献[29]研究结论一致。7 月 27、28 日液流启动时间为 07:00 和 09:00,均滞后于晴天的液流启动时间(05:00—06:00),即雨天液流启动时间会滞后于晴天,与文献[26]研究结论一致。

3 结论

(1)针对现有对同一棵树茎干含水率和液流同时检测的方法中存在未考虑茎干空间异质性影响、多个探针对树木伤害大以及对茎干含水率的测量不准确的问题,本研究设计了活立木茎干含水率和液流复合传感器,可以实时测量同一位置的茎干含水率和液流,无需考虑树干的空间异质性影响,减少了多个探针对树木的伤害。

(2)通过有机溶液实验、标定实验,获得了含水率检测单元的标定模型,含水率检测单元输出

电压与介电常数(6 ~ 53.3 范围内)具有良好的线性关系,含水率测量范围为 0 ~ 85%,稳定性良好,与 BD-IV 型植物茎体水分传感器对同一棵杨树的对比测试结果一致($R^2 = 0.980\,0$)。液流检测单元与 ST1221 型热扩散式植物液流计对比测试同一棵杨树,二者灵敏度一致、液流密度测试结果有极显著的线性关系($R^2 = 0.899\,1$),复合传感器

液流检测单元对低速液流的测量更加准确。

(3)使用复合传感器监测茎干含水率和液流密度,得到二者呈显著的负相关性(Pearson 相关系数为 $-0.795\,1$, $P < 0.001$)。分析了晴雨天气下茎干含水率和液流密度的变化规律,雨天液流启动时间会滞后于晴天,晴天茎干液流变化范围和茎干水分波动都大于雨天。

参 考 文 献

[1] 刘卫平,宋维,高超,等. 基于活立木茎干含水量的杨树生长状态评估模型构建[J]. 林业科学, 2021, 57(5): 43 – 52.
LIU Weiping, SONG Wei, GAO Chao, et al. Construction of poplar growth status evaluation model based on stem water content of standing trees[J]. Forestry Science, 2021, 57(5): 43 – 52. (in Chinese)

[2] HULTINE K R, WILLIAMS D G, BURGESS S S O, et al. Contrasting patterns of hydraulic redistribution in three desert phreatophytes[J]. Oecologia, 2003, 135(2):167 – 175.

[3] BYRNE G F, FENN M D, BURGAR M I. Nuclear magnetic resonance studies of water in tree sections[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 38(4):307 – 317.

[4] CHETPATTANANONDH P, THONGPULL K, CHETPATTANANONDH K. Interdigital capacitance sensing of moisture content in rubber wood[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142:545 – 551.

[5] CONSTANTZ J, MURPHY F. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1990, 119(1 – 4):31 – 42.

[6] 白陈祥. 基于驻波原理的乔木茎干含水率检测方法研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008.
BAI Chenxiang. The study on measurement of stem water content based on standing wave theory[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)

[7] 赵燕东, 高超, 张新, 等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1):310 – 316.
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):310 – 316. (in Chinese)

[8] GRANIER A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres[J]. Annals of Forest Science, 1985,42(2):193 – 200.

[9] SWANSON R H. Water transpired by trees is indicated by heat pulse velocity[J]. Agricultural Meteorology, 1972, 10:277 – 281.

[10] BURGESS S S, ADAMS M A, TURNER N C, et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants[J]. Tree Physiology, 2001, 21(9):589 – 598.

[11] 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.

[12] VANDEGEHUCHTE M W, STEPPE K. Sapflow + : a four-needle heat-pulse sap flow sensor enabling nonempirical sap flux density and water content measurements[J]. New Phytologist, 2012, 196(1): 306 – 317.

[13] LOOKER N, MARTIN J, JENCOS K, et al. Contribution of sapwood traits to uncertainty in conifer sap flow as estimated with the heat-ratio method[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2016, 223:60 – 71.

[14] 张含含,秦永旗,王秀敏,等. 基于热扩散原理的树干液流测定误差性分析[J]. 林业与生态科学, 2022, 37(1): 1 – 6.
ZHANG Hanhan, QIN Yongqi, WANG Xiumin, et al. Error analysis of stem sap flow measurement based on thermal diffusion principle[J]. Forestry and Ecological Science,2022, 37(1): 1 – 6. (in Chinese)

[15] 赵飞飞,马煦,邸楠,等. 毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子[J]. 植物生态学报, 2020, 44(8): 864 – 874.
ZHAO Feifei, MA Xu, DI Nan, et al. Azimuthal variation in nighttime sap flow and its mainly influence factors of *Populus tomentosa*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2020, 44(8): 864 – 874. (in Chinese)

[16] 王海兰. 乔木体水分的测试技术及其监测系统的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
WANG Hailan. Research on measurement and monitor of stem water content[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)

[17] REN R, CRONE J, HORTON R, et al. An improved single probe method for sap flow measurements using finite heating duration[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280:107788.

[18] LOPEZ-BERNAL A, TESTI L, VILLALOBOS F J. Using the compensated heat pulse method to monitor trends in stem water content in standing trees[J]. Tree Physiology, 2012, 32(11): 1420 – 1429.

[19] 赵燕东,王海兰,胡培金,等. 基于活立木介电特性的植物茎体含水量测量方法[J]. 林业科学, 2010, 46(11): 179 – 183.
ZHAO Yandong, WANG Hailan, HU Peijin, et al. A method for measuring plant stem water content based on plant dielectric properties[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(11): 179 – 183. (in Chinese)

LI Yucui. Research on leaf area index retrieval of different crops[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)

[50] 邓尚奇,赵钰,白雪源,等. 基于无人机图像分割的冬小麦叶绿素与叶面积指数反演[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 136 – 145.

DENG Shangqi, ZHAO Yu, BAI Xueyuan, et al. Inversion of chlorophyll and leaf area index for winter wheat based on UAV image segmentation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(3): 136 – 145. (in Chinese)

[51] ZHANG J, QIU X, WU Y, et al. Combining texture, color, and vegetation indices from fixed-wing UAS imagery to estimate wheat growth parameters using multivariate regression methods [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185(14): 106138.

[52] SPRINTSIN M, KARNIELI A, BERLINER P, et al. Evaluating the performance of the MODIS leaf area index (LAI) product over a mediterranean dryland planted forest[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(19): 5061 – 5069.

[53] 高铭阳,张锦水,潘耀忠,等. 结合植被指数与作物高度反演冬小麦叶面积指数[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(8): 49 – 57.

GAO Mingyang, ZHANG Jinshui, PAN Yaozhong, et al. Retrieval of winter wheat leaf area index based on vegetation index and crop height[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(8): 49 – 57. (in Chinese)

[54] WENGERT M, PIEPHO H, ASTOR T, et al. Assessing spatial variability of barley whole crop biomass yield and leaf area index in silvoarable agroforestry systems using UAV-Borne remote sensing[J]. Remote Sensing, 2021, 13(14): 2751.

[55] ZHOU J, GUO R Y, SUN M, et al. The effects of GLCM parameters on LAI estimation using texture values from QuickBird satellite imagery[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7366.

[56] 何丽. 基于 PROSAIL 和 GPR 模型的若尔盖草地地上生物量遥感反演研究[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.

HE Li. Study on the remote sensing retrieval of aboveground biomass in the Zoigê grass-land based on PROSAIL and GPR models[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)

(上接第 289 页)

[20] 赵燕东,郑焱,周海洋,等. 基于海棠茎干含水率的智能灌溉控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 323 – 331.

ZHAO Yandong, ZHENG Yan, ZHOU Haiyang, et al. Research of intelligent irrigation control strategy based on stem water content of crabapple[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 323 – 331. (in Chinese)

[21] SWANSON R H, WHITFIELD D W A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice[J]. J. Exp. Bot. , 1981 (1):221 – 239.

[22] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Measuring stem water content in four deciduous hardwoods with a time-domain reflectometer[J]. Tree Physiology, 1996, 16(10):809 – 815.

[23] 季虹. 基于热比率法(HRM)的茎流测量及环境因子修正方法研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2012.

JI Hong. Study on stem flow measurement and environmental factor correction method based on heat ratio method[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)

[24] BARRETT D J, HATTON T J, ASH J E, et al. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia[J]. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(4):463 – 469.

[25] VANDEGEHUCHTE M W, STEPPE K. Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability[J]. Functional Plant Biology, 2013, 40(3): 213 – 223.

[26] 武鹏飞,刘云强,李冬梅,等. 环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5): 402 – 411.

WU Pengfei, LIU Yunqiang, LI Dongmei, et al. Driving influence of environmental factors on the sap flow of the artificial poplar forest on sandy land[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(5): 402 – 411. (in Chinese)

[27] FORSTER M A. How significant is nocturnal sap flow? [J]. Tree Physiology, 2014, 34(7):757 – 765.

[28] 张荣,毕华兴,焦振寰,等. 生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应[J]. 浙江农林大学学报,2022, 39(6):1238 – 1246.

ZHANG Rong, BI Huaxing, JIAO Zhenhuan, et al. Diurnal and nocturnal changes in stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* during growing season and its response to meteorological factors[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(6): 1238 – 1246. (in Chinese)

[29] DORONILA A I, FORSTER M A. Performance measurement via sap flow monitoring of three eucalyptus species for mine site and dryland salinity phytoremediation[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17: 1 – 6.