

基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究

赵燕东^{1,2} 高超^{1,2} 张新^{1,2} 徐强³

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

3. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 水在植物的各项生理活动中起着至关重要的作用, 实时无损检测植物茎体的水分对研究植物的生命活动有着重要的指导意义。本文提出了一种基于驻波率原理的茎体水分实时无损在线检测方法, 并设计了 BD-IV 型植物茎体水分传感器, 分别在以有机溶剂及烧杯为实验材料的仿真环境、以松树为实验材料的树段环境及以桃树为实验材料的活立木实验环境下, 验证了 BD-IV 型植物茎体水分传感器的检测性能。当植物茎体直径在 5.0 ~ 10.5 cm 之间且体积含水率在 1.17% ~ 59.59% 之间时, BD-IV 型植物茎体水分传感器能准确地检测出植物茎体的体积含水率。通过长期监测桃树茎体水分的日变化和月变化情况, 得知 BD-IV 型植物茎体水分传感器的检测结果与植物生理特性相符; 与德国生产的 SF-L 型树干茎流仪同时监测柳树的茎体水分和茎流, 得出茎体水分和茎流之间的关系, 为植物生理特性研究提供了一种高性能价格比的国产化检测仪器。

关键词: 茎体水分; 驻波率; 无损检测; 茎流

中图分类号: TP212; S715.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0310-07

Non-destructive Measurement of Plant Stem Water Content Based on Standing Wave Ratio

Zhao Yandong^{1,2} Gao Chao^{1,2} Zhang Xin^{1,2} Xu Qiang³

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

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

3. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Water plays an important role in various physiological activities of plants. Measuring plant stem water content in real time without damage has important guiding significance for studying the life activities of plants. A kind of stem water content of real-time and non-damage online detection method based on standing wave ratio was introduced in detail. BD-IV stem water content sensor was designed based on the method. With organic solvents and the beakers as the simulation environment, pine as the experimental materials of the section of tree, and peach as experimental materials of standing tree, the detection performance of BD-IV stem water content sensor was verified. BD-IV stem water content sensor can accurately detect volume water content under the conditions of plant stem diameter between 5.0 cm and 10.5 cm, volume water content between 1.17% and 59.59%. Through the long-term monitoring of daily and monthly changing rule of stem water content of peach, the result measured by BD-IV stem water content sensor was consistent with plant physiological characteristics. Through the long-term monitoring of stem water content and stem sap flow of willow by using BD-IV stem water content sensor and SF-L stem flow gauge made in Germany, the relationship between stem water content and stem sap flow was summarized. It provides a localization testing instruments with high performance to price ratio for the research on plant physiological characteristics.

Key words: stem water content; standing wave ratio; undamaged detection; stem sap flow

收稿日期: 2015-05-19 修回日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371537)、北京市共建项目和林业公益性行业科研专项重大项目(201404401)

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

引言

水是植物新陈代谢的物质基础,是植物细胞原生质的重要组成部分,细胞必须在水分充足的情况下才能进行正常的生命活动^[1]。多数植物的体内都含有大量水分^[2]。一般来说,植物体内含水率约为 75%。如北京杨的含水率约为 78.7%,小叶杨的含水率约为 85.2%。植物从种子萌发到开花结果,整个生长发育过程中每时每刻都需要水。没有水,种子不能萌发(当然种子萌发还需要其他条件),没有养料植物不能生长发育,但植物所需的养料,必须首先溶解在水里,然后才能被植物吸收利用。

关于植物茎体含水率的无损实时在线检测,国外学者起步较早,采用了诸多技术手段,如 γ 射线法^[3]、核磁共振法^[4]、计算机层析成像技术^[5]、电阻法、植物体积测量法、介电常数法等。在以上诸多方法中, γ 射线法存在潜在的安全隐患;核磁共振法和计算机层析成像技术成本高,且使用不方便,不能实现野外的定点长期监测;电阻法在测量活体乔木水分时,存在绝对含水率与电阻值之间不是单值函数的缺陷^[6],并且植物组织的相对含水率与电阻值的联系并不紧密^[7],影响了其实际应用;植物体积测量法不仅对被测植物有巨大的损害,且测量结果不可重复,无法满足在线检测的需求;而介电常数法得到了普遍认可。

介电常数法是根据植物的介电特性间接测量植物体含水率的一种快速检测方法。其中,时域反射(Time domain reflectometry, TDR)法是当前主流的植物体积含水率检测方法,是一种介电测量中的高速检测技术。

Constantz 等^[8]以松树为研究样本,采用平行波导式探针结构的 TDR 法检测松树茎体体积含水率。Wullschlegler 等进一步采用双针平行不锈钢探头 TDR 法,监测了红花槭、黑橡胶、白栎和裂斗锥栗 4 种落叶阔叶树种含水率的季节性变化情况,并对这 4 个树种做了标定实验^[9],归纳总结得出了适合乔木类茎体体积含水率与有效介电常数之间的标定公式。该公式估算的树干体积含水率与称量法所得结果有良好的一致性。前人的研究表明:基于植物介电常数的茎体水分检测方法是可行的,但 TDR 波导探头的长度制约着检测效果。使用较短波导探头可以减小对植物的损伤,并且减少水分分布差异引入的误差,但是系统分辨率会降低;波导探头太长则信号的衰减会很大,同时 TDR 技术的实现要求比较高,生产成本比较高,目前仅应用于科学研究。

目前,寻求一种实用的植物茎体水分无损实时在线检测方法极为迫切。本文提出一种基于驻波率原理的植物水分无损实时在线检测方法。

1 基于驻波率原理的植物水分在线无损实时检测方法

基于驻波率原理^[10-14]的植物水分在线无损实时检测装置由 100 MHz 信号源、50 Ω 同轴传输线、高频检波电路和平行不锈钢探测环组成^[15-16],如图 1 所示。

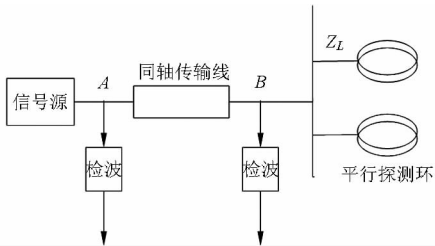


图 1 植物水分传感器测量装置示意图
Fig.1 Equipmnet of water content sensor

信号源产生的高频电磁波沿着传输线被传送到探头^[17-18],由于探头的阻抗与传输线的阻抗不匹配,一部分信号将被反射回来。在传输线上,高频入射波与反射波叠加形成驻波,传输线上各点的电压幅值存在变化。根据驻波率测量原理,取 A、B 两点的差动信号作为传感器变换电路的输出,即得到

$$U_{AB} = 2A_1 \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \tag{1}$$

式中 A_1 ——信号的幅值 Z_L ——探测环阻抗
 Z_c ——同轴传输线的特征阻抗

本研究中 Z_c 为 50 Ω 的标准同轴电缆。在 A_1 和 Z_c 恒定的情况下,传输线两端的电位差 U_{AB} 只与探测环阻抗 Z_L 有关。因此,确定探测环阻抗 Z_L 尤为重要。

2 探测环结构与其阻抗相关性分析

探测环阻抗 Z_L 的理论推导是一个极其复杂的过程,将是未来的研究重点。但归根结底其大小由两部分决定,一部分是探测环本身结构,另一部分是被测植物。因此,研究植物茎体水分传感器探测环的结构非常有必要。

选取 6 个不同直径(5.0、6.2、7.0、8.5、9.0、10.5 cm)的烧杯来模拟不同直径的树干,5 种不同的有机溶液(分别对应不同梯度的介电常数,并计算出对应的植物茎体体积含水率,如表 1 所示)来模拟不同的茎体体积含水率(图 2)。在烧杯上固定间距为 3 cm 的不锈钢平行探测环(宽度 12.00 mm,厚度 0.60 mm)。

表 1 有机溶剂的介电常数

Tab.1 Permittivities of different organic solvents

参数	溶剂名称				
	乙酸乙酯	异戊醇	正丁醇	异丙醇	乙醇
介电常数	6.02	15.19	17.51	19.92	24.55
茎体体积含水率/%	1.17	34.31	41.38	48.16	59.59

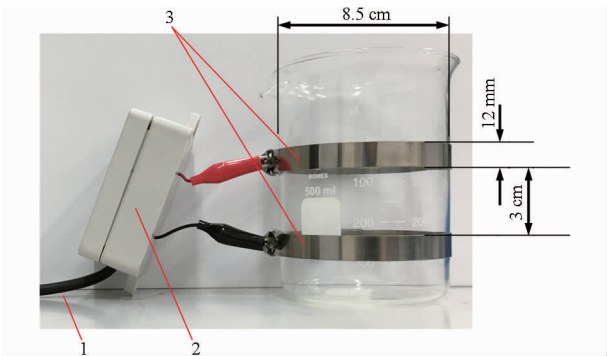


图 2 探测环阻抗实验装置

Fig.2 Experiments of annular probe impedance

1. 信号线 2. BD-IV 传感器 3. 平行探测环

植物茎体体积含水率计算公式为

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

$(R^2 = 0.89, n = 151)$

式中 θ ——茎体体积含水率, cm^3/cm^3

ε ——有效介电常数

n ——样本数

在 6 个直径不同的烧杯中装入乙酸乙酯溶液,依次记录植物茎体水分传感器的输出电压,分析探测环直径与传感器输出电压之间的相关性。然后依次改变烧杯中有机溶液。模拟茎体含水率相同时,传感器输出电压和树干直径的关系曲线如图 3 所示。

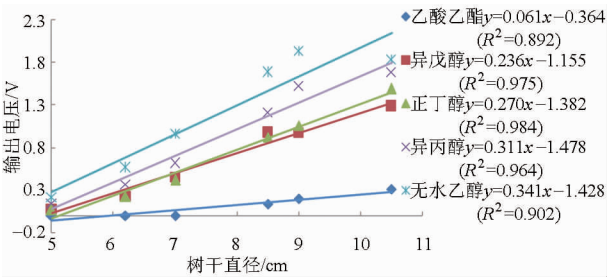


图 3 传感器输出电压与树干直径的关系

Fig.3 Relation between voltage and diameter of trunk

从图 3 可以分析出当有机溶剂的介电常数小于 24.55(对应的植物茎体体积含水率为 59.59%)时,传感器输出电压与对应树干直径线性相关度很高,平均决定系数 R^2 为 0.943 4。一般植物茎体的鲜质量含水率在 40%~50% 之间^[19],而植物茎体体积含水率小于鲜质量含水率,因此该传感器能够满足植物茎体水分检测的需要。

3 植物茎体水分与探测环阻抗 Z_L 相关性分析

除了探测环本身结构影响其阻抗 Z_L 以外,被测植物是另一个影响因子。植物物理学的研究结果表明,植物是一个空间结构和物质组成都极为复杂的多孔吸水介质。在综合考虑了频率、含水率、温度、纹理、树种、密度等因素对植物介电性质的作用后,James 认为对介电性质影响较大的因子是频率和含水率,温度、纹理方面的影响次之,而树种、密度的影响则更小^[20]。因此在测量频率一定时,植物的介电特性主要由含水率决定,可用装有不同介电常数有机溶剂的烧杯来模拟不同含水率植物的介电特性。而被测植物的阻抗 Z_L 与其介电常数有着直接的关系^[21],因此植物阻抗受其含水率的影响极大。

采用直径为 5 cm 的烧杯 5 个,模拟直径 5 cm 的植物茎体,分别装入表 1 所示的 5 种有机溶液,同时记录传感器的输出电压,得出茎体含水率与传感器输出电压之间的相关性。然后依次选择不同直径的烧杯,模拟不同直径的植物,获得传感器输出电压和溶剂介电常数的关系曲线,如图 4 所示。

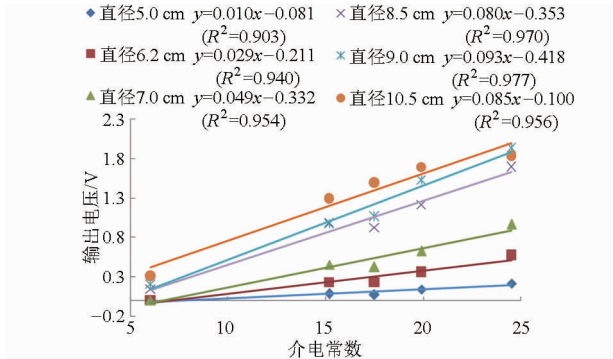


图 4 传感器输出电压与溶剂介电常数的关系

Fig.4 Relation between voltage and stem water content

从图 4 并结合表 1 可以分析出当探测环直径小于 10.5 cm,且溶剂介电常数在 6.02~24.55(对应的植物茎体体积含水率为 1.17%~59.59%)的变化范围内时,传感器输出电压与对应溶剂介电常数线性相关度很高,平均决定系数 R^2 为 0.950 0。因此当植物茎体直径小于 10.5 cm 时,该传感器能够满足茎体水分检测的需要。

4 植物茎体水分传感器的检测性能分析

4.1 树段样本检测性能分析

截取平均直径 7 cm、长 40 cm 的 10 a 生松树树段样本 40 个,截取环境温度为 25℃。

然后将树段放入 60℃ 的恒温箱中干燥,实验开始阶段 6 次测量的间隔时间为 0.5 h,中间阶段 5 次

测量的间隔时间为 1 h,最后阶段 7 次测量的间隔时间为 10 h,每次采集其质量及自制的 BD-IV 型植物茎体水分传感器的输出电压,并根据质量变化计算出相应时刻的质量含水率和体积含水率,直至树段质量变化为零,任意抽取 4 个样本(表 2),在显著水平为 0.01 的情况下,进行 Pearson 相关性分析,得到 BD-IV 型传感器输出电压与体积含水率之间的相关性如表 3 所示。

表 2 不同时间下传感器输出电压、质量含水率和体积含水率

Tab.2 Measured value, quality water content and volume water content under different drying time

树段编号	测试指标	测量值																	
2	温度/℃	25	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	间隔时间/h	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	10	10	10	10	10
	电压/V	0.37	0.38	0.35	0.25	0.24	0.21	0.22	0.20	0.15	0.17	0.13	0.12	0.11	0.08	0.06	0.03	0	0
	质量含水率/(g·cm ⁻³)	0.26	0.26	0.25	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.12	0.09	0.10	0.05	0.04
17	体积含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.18	0.17	0.17	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.09	0.07	0.05	0.06	0.03	0.02
	电压/V	0.69	0.69	0.70	0.68	0.52	0.42	0.43	0.38	0.29	0.26	0.25	0.24	0.13	0.14	0.10	0.05	0.03	0.04
	质量含水率/(g·cm ⁻³)	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.22	0.17	0.17	0.10	0.08
	体积含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18	0.15	0.12	0.11	0.06	0.05
23	电压/V	0.80	0.80	0.74	0.58	0.58	0.54	0.54	0.50	0.41	0.40	0.34	0.33	0.28	0.22	0.13	0.07	0.01	0
	质量含水率/(g·cm ⁻³)	0.35	0.35	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23	0.22	0.17	0.13	0.13	0.07	0.06
	体积含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.25	0.24	0.24	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.18	0.16	0.15	0.13	0.13	0.10	0.07	0.07	0.03	0.03
	电压/V	0.57	0.58	0.58	0.41	0.38	0.34	0.34	0.31	0.26	0.25	0.22	0.20	0.13	0.08	0.02	0	0	0
24	质量含水率/(g·cm ⁻³)	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28	0.27	0.25	0.24	0.22	0.21	0.17	0.12	0.11	0.05	0.07
	体积含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.23	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.10	0.07	0.06	0.03	0.04

表 3 输出电压和茎体体积含水率的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between output voltage and volume water content

树段编号	相关系数	显著性(双侧)	样本数
2	0.956	0	19
17	0.882	0	19
23	0.979	0	19
24	0.928	0	19

在显著水平为 0.01 的情况下,4 个任意抽取样本的传感器输出电压和树干体积含水率的 Pearson 相关系数很高,表现为极强相关。为了更好地定量分析 BD-IV 型植物茎体水分传感器输出电压与体积含水率之间的关系,绘出了如图 5 所示的曲线。

从图 5 可以看出茎体体积含水率是关于传感器输出电压的一元二次函数关系,可以采用二次曲线进行拟合,平均决定系数 R^2 为 0.975。表明 BD-IV 型植物茎体水分传感器能够较精确地测量植物茎体体积含水率。

4.2 活立木检测性能分析

以 10 a 生桃树为实验对象(北京林业大学八家实验苗圃,116°20′43.623 6″E,40°0′41.918 4″N),在

体积含水率的计算公式为

$$\theta = \frac{m_A - m_B}{\rho V}$$
(3)

式中 m_A ——含水树段质量,g
 m_B ——绝干树段质量,g
 ρ ——水密度,g/cm³
 V ——树段体积,cm³

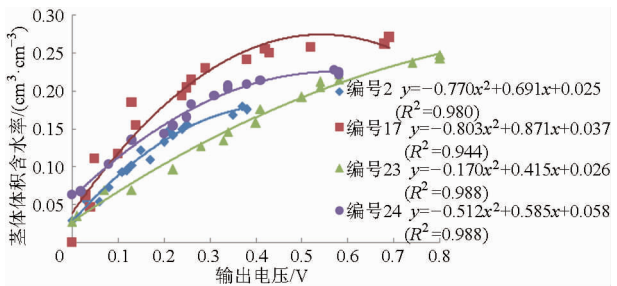


图 5 植物茎体体积含水率和输出电压的关系

Fig.5 Relation between trunk volume water content and output voltage

桃树茎体上安装北京林业大学工学院研发的 BD-IV 型植物茎体水分传感器(图 6)。BD-IV 型植物茎体水分传感器的平行探测环紧贴树干,两环垂直间距为 5 cm,安装处的树干直径为 9.1 cm,距离地面高度为 80 cm。

从 2014 年 10 月 1—30 日实时监测桃树茎体水分变化,设定传感器间隔 5 min 自动采集一次输出电压,最后绘出的植物茎体水分传感器输出电压的日变化曲线和月变化曲线分别如图 7、8 所示。

从图 7 中可以看出,桃树茎体含水率的日变化趋势显著,日间呈单谷状,在 14:30 左右达谷底。植



图 6 BD-IV 型植物茎体水分传感器

Fig. 6 BD-IV stem water content sensor

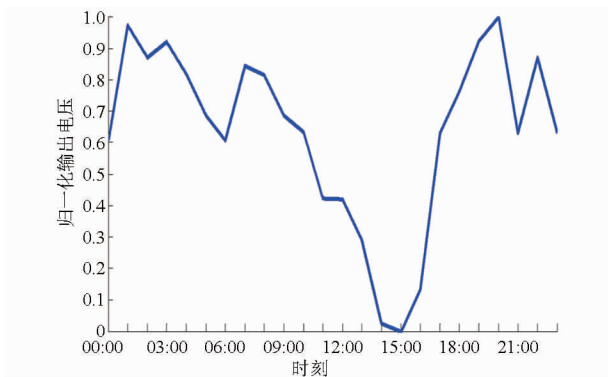


图 7 植物茎体水分的日变化曲线

Fig. 7 Daily changing curve of plant stem water content

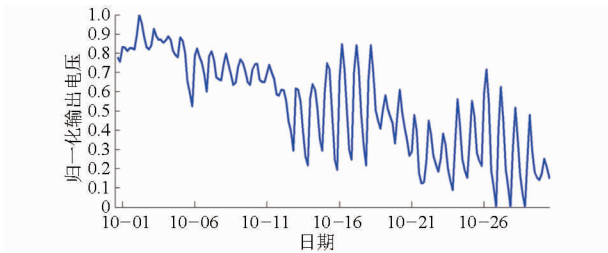


图 8 植物茎体水分的月变化曲线

Fig. 8 Monthly changing curve of plant stem water content

物在一天中不同时段耗水率差异很大,一般耗水最多的时段为 15:00 左右,多数阔叶树种在中午前后有一个耗水的暂缓期^[22]。由于午后 15:00 点左右,阳光充足,并且温度较正午时刻相比有所回落,因而此时桃树气孔开度增大,光合作用增强,植物体茎流增大,从而导致桃树茎体含水率减少,这与植物生理特性相符^[23]。

从图 8 中可以看出,在检测初期,可能由于植物

茎体水分传感器的探测环没有完全紧贴树干,造成前 10 d 桃树茎体含水率日变化幅度较小。随着树木的生长,探测环与树干贴合更加紧密,桃树茎体含水率的变化幅度逐步增大。茎体水分变化幅度随着环境及植物本身生理状况的不同而有所不同,这将是下一步研究的重点,桃树茎体含水率的月变化呈现出明显的周期性,周期为 1 d。

4.3 植物茎体含水率与其茎流相关性分析

植物茎流体现的是植物体内水分的变化,植物茎体含水率体现的是植物体内水分的存储量,二者之间应该存在一定的关联性。为了寻找植物茎体水分与其茎流之间的相关性,本研究选取北京林业大学内一颗 15 a 生柳树为实验对象,在柳树茎体同高度处安装德国生产的 SF-L 型树干茎流仪及 BD-IV 型植物茎体水分传感器。

SF-L 型树干茎流仪安装处树干直径为 30 cm,距离地面高度为 150 cm;BD-IV 型植物茎体水分传感器安装处树干直径为 30 cm,距离地面高度为 150 cm。SF-L 型树干茎流仪探针长度为 33 mm、平行间距为 100 mm、垂直间距也为 100 mm。BD-IV 型植物茎体水分传感器的平行探测环紧贴树干,两环垂直间距为 3 cm。

2014 年 7 月 20 日—9 月 20 日实时监测植物茎体水分传感器输出电压与树干茎流量。每天间隔 1 h 记录植物茎体水分传感器输出电压与树干茎流量,除去前 1 个月由于探测环没有完全紧贴树干而引起的测量误差,取 2014 年 8 月 20 日—9 月 21 日的测量数据 745 个,并对植物茎体水分传感器输出电压取倒数,归一化处理,然后绘出其与树干茎流量的关系如图 9 所示。同时对植物茎体含水率与茎流量的相关性进行定性分析。

从图 9 可以看出植物茎体水分传感器输出电压的倒数与树干茎流量有较好的一致性,并且两者都呈现出周期性的变化,每天采样点为 24 个,因而周期为 1 d。在显著水平为 0.01 的情况下,植物茎体含水率与茎流量的 Pearson 决定系数为 -0.534,呈现出负显著相关。当植物茎流较大时,则植物茎体含水率较小;当植物茎流较小时,则植物茎体含水率较大。这也符合植物的生理活动规律^[24]。图中还

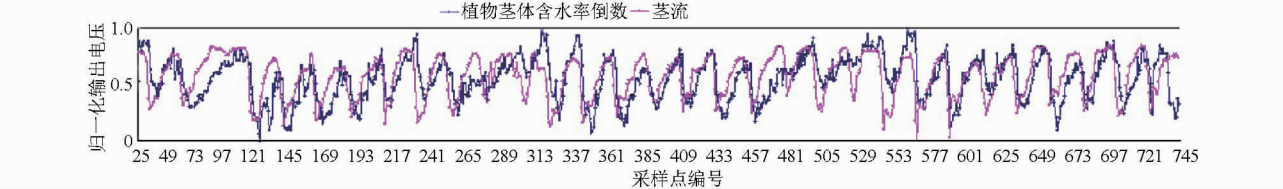


图 9 植物茎体含水率倒数与茎流之间的关系

Fig. 9 Relation between reciprocal of stem water content and sap flow

可以看出桃树茎流的变化略微超前于桃树茎体含水率的变化,说明植物茎体水分的变化先于其体内水分存储量的变化。

5 结论

(1)应用基于驻波率原理的植物茎体水分的测量方法,设计了一种植物茎体水分实时无损在线检测传感器(BD-IV 型)。分别在以有机溶剂及烧杯为实验材料的仿真环境、以松树为实验材料的树段环境及以桃树为实验材料的活立木实验环境下,验证 BD-IV 型植物茎体水分传感器的检测性能。

(2)当植物茎体体积含水率一定且小于 59.59% 时,传感器输出电压与树干直径在一定范围内(5.0~10.5 cm),平均决定系数为 0.943 4;当探测环直径一定且小于 10.5 cm 时,传感器输出电压与溶剂介电常数在一定范围内(6.02~24.55,对应的植物茎体体积含水率为 1.17%~59.59%),平均决定系数为 0.950 0。能够满足植物茎体水分检测的需要。

(3)BD-IV 型植物茎体水分传感器能够准确

地测量活立木茎体体积含水率。针对桃树来说,植物茎体体积含水率是关于 BD-IV 型植物茎体水分传感器输出电压的单值函数关系,可以通过检测传感器输出电压,达到获取桃树茎体体积含水率的目的。

(4)采用 BD-IV 型植物茎体水分传感器,验证了桃树茎体含水率呈现出周期性变化,变化周期为 1 d,每天的变化趋势大体相同。茎体含水率的日变化趋势显著,日间呈单谷状,在 14:30 左右达谷底。一天中不同时段耗水率差异很大,一般耗水最多的时段为 15:00 左右。但是由于植物本身特点及环境因素的影响,每天植物茎体含水率变化范围有所不同。

(5)通过与德国产 SF-L 型植物茎流计检测结果对比,得知:植物茎体含水率与茎流量呈负显著相关。通过实时无损检测植物茎体含水率可以获得植物茎流所体现出的植物生理特征,本研究可以成为一种取代植物茎流检测的手段和方法,为植物生理特性研究提供一种高性能价格比的国产化检测仪器。

参 考 文 献

- 1 郑荣良,赵新明. 植物生理需水信息的采集研究[J]. 农业机械学报,1996,27(4):46-49.
Zheng Rongliang, Zhao Xinming. Investigation into water needing information collecting system for plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(4):46-49. (in Chinese)
- 2 吴沿友,张明明,邢德科. 快速反映植物水分状况的叶片紧张度模型[J]. 农业机械学报,2015,46(3):310-314.
Wu Yanyou, Zhang Mingming, Xing Deke. Quick reflection of moisture condition for plant using leaf tensility[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):310-314. (in Chinese)
- 3 Edwards W R N, Jarvis P G. A method for measuring radial differences in water content of intact tree stems by attenuation of gamma radiation[J]. Plant Cell and Environment, 1983, 6(3):255-260.
- 4 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.
- 5 Raschi A, Tognetti R, Ridder H W, et al. Water in the stems of sessile oak (*Quercus petraea*) assessed by computer tomography with concurrent measurements of sap velocity and ultrasound emission[J]. Plant Cell and Environment, 1995, 18(5):545-554.
- 6 宋蜚存,林迎忠. 活性对电导法测量木材含水率的影响[J]. 东北林业大学学报,1994,22(1):113-116.
Song Zhecun, Lin Yingzhong. The influence of wood cell activity on moisture content measurement by electric resistance[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1994, 22(1):113-116. (in Chinese)
- 7 Mederski H J. Determination of internal water status of plants by beta gauging[J]. Soil Science, 1961, 92(2):143-146.
- 8 Constantz J, Murphy F. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1990, 119(1-4):31-42.
- 9 Wullschlegel 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.
- 10 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报,2002,33(4):109-111.
Zhao Yandong, Wang Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4):109-111. (in Chinese)
- 11 冯磊. 基于驻波率原理的土壤水分测量技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Feng Lei. Study on soil moisture measuring technique based on standing-wave ratio theory [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 12 张志勇. 基于驻波率原理的土壤水分测量方法的研究[D]. 太谷:山西农业大学,2005.
Zhang Zhiyong. Research of soil moisture measurement based on standing-wave ratio theory [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2005. (in Chinese)

13 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析[J]. 农业工程学报,2002, 18(2):5-8.
Zhao Yandong, Wang Yiming. Analysis of sensitivity of soil moisture measurement based on standing-wave ratio[J]. Transactions of the CSAE,2002, 18(2):5-8. (in Chinese)

14 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)

15 赵燕东,聂铭君. 双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(11):39-43.
Zhao Yandong,Nie Mingjun. Optimal analysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):39-43. (in Chinese)

16 刘贺,赵燕东. 基于驻波原理的短探针小麦茎水分传感器[J]. 农业工程学报,2011,27(11):140-144.
Liu He, Zhao Yandong. Wheat stem moisture sensor using short probes based on SWR principle[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(11): 140-144. (in Chinese)

17 岳志勤,姚志明,宋岩. 同轴电缆转接中特性阻抗的错位补偿计算方法[J]. 现代应用物理,2014(1):64-70.
Yue Zhiqin,Yao Zhiming,Song Yan. Calculation of impedance compensation for design of coaxial cable connectors[J]. Modern Applied Physics,2014(1):64-70. (in Chinese)

18 冯良平,徐岚. 射频同轴连接器设计要点[J]. 国外电子测量技术,2005(11):42-47.
Feng Liangping,Xu Lan. Some design art for RF coaxial connectors[J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2005(11): 42-47. (in Chinese)

19 陈昌雄,余坤勇,曹祖宁. 小叶青冈天然林树干含水率的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(12):39-41,46.
Chen Changxiong,Yu Kunyong,Cao Zuning. Moisture content of tree stem of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* (Bl.) oerst in natural forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2010,30(12):39-41,46. (in Chinese)

20 James W L. Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content and grain orienuation[R]. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory,1975.

21 苗银月. 阻抗谱法研究植物叶片水分关系[D]. 北京:北京林业大学,2011.
Miao Yinyue. Application of impedance spectroscopy in the study on leaf water[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2011. (in Chinese)

22 王瑞辉. 北京市主要园林树种耗水性及节水灌溉制度研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
Wang Ruihui. Research on water consumption and irrigation regime of main landscape tree species in Beijing City[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2006. (in Chinese)

23 杨立成. 北京城市绿地复合系统植物耗水规律及灌溉模型研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
Yang Licheng. Studies on water consumption and irrigation model of compound plant ecosystem in urban green space in Beijing [D]. Beijing:Beijing Forestry University,2011. (in Chinese)

24 王海兰. 乔木体水分的测试技术及其监测系统研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
Wang Hailan. Research on measurement and monitor of stem water content[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2010. (in Chinese)