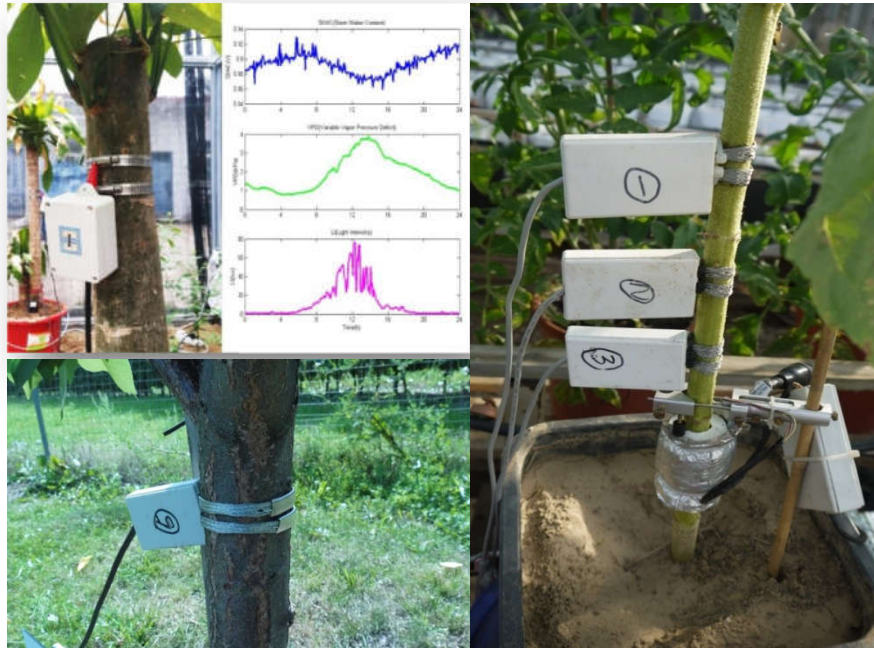


活立木茎体水分实时在线无损检测方法研究及传感器研制



1. 研究意义

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、核磁共振法、计算机层析成像技术、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，并且植物组织的相对含水率与电阻的联系并不紧密，影响了其实际的应用。而植物体积测量法不仅对被测植物有巨大的损害性，测量结果不可重复，无法满足在线检测的需求，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，TDR(Time domain reflectometry)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。前人的研究表明：基于植物介电特性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。

北京林业大学工学院研制的 BD-IV 型植物茎体水分传感器则可以实现植物茎体水分无损实时在线检测。

2. 检测原理

基于驻波率原理的 BD-IV 型植物茎体水分传感器由 100MHz 信号源，50Ω 同轴传输线、高频检波电路和平行不锈钢探测环组成，如图 1 所示。

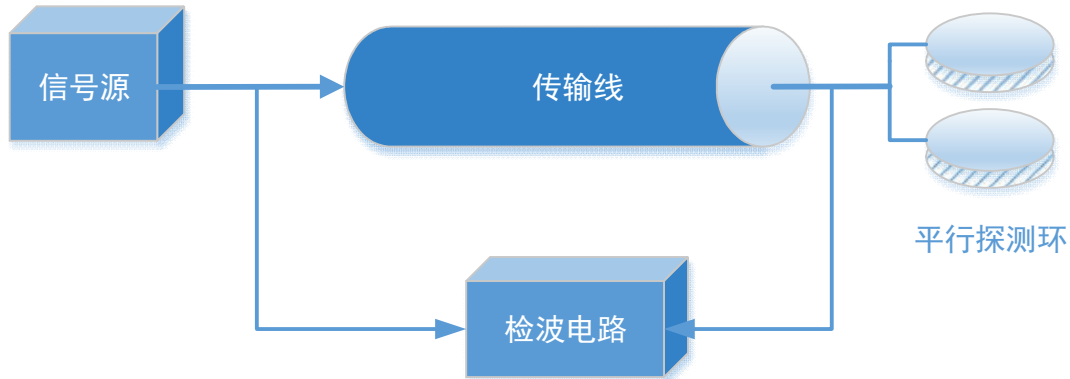


图 1 植物水分传感器测量装置示意图

信号源产生的高频电磁波沿着传输线被传送到探头，由于探头的阻抗与传输线的阻抗不匹配，一部分信号将反射回来。在传输线上，高频入射波与反射波叠加形成驻波，在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，即得到下式：

$$U_{AB} = 2A_1 \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (1)$$

式中， A_1 ——信号的幅值， Z_C ——同轴传输线的特征阻抗。本研究中 Z_C 为 50Ω 的标准同轴电缆。在信号源振幅 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。探测环阻抗 Z_L 的大小由两部分决定，一部分是探测环本身结构，另一部分是被测植物。

3. 技术参数

测量参数：体积含水率；

测量范围：1%~60%

电源：DC 5 ~ 24V；

精度：±2%（校正后）；

动态响应：<1s；

输出信号：标准 RS-485、数字量信号、模拟量信号

4. 实验分析

4.1. 探测环结构与其阻抗相关性研究

选取 6 个不同直径（5、6.2、7、8.5、9、10.5cm）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）来模拟不同的茎体含水率。在烧杯上固定间距为 3cm 的不锈钢平行探测环（宽度 12.00mm，厚度 0.60mm）。

植物茎体体积含水率计算公式为：

$$\theta = -0.251 + 4.66 \times 10^{-2} \varepsilon - 4.93 \times 10^{-4} \varepsilon^2 \quad (r^2 = 0.89, n = 151) \quad (2)$$

式中， θ ——树干体积含水率（ $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$ ）， ε ——有效介电常数， r ——相关系数， n ——样本数。

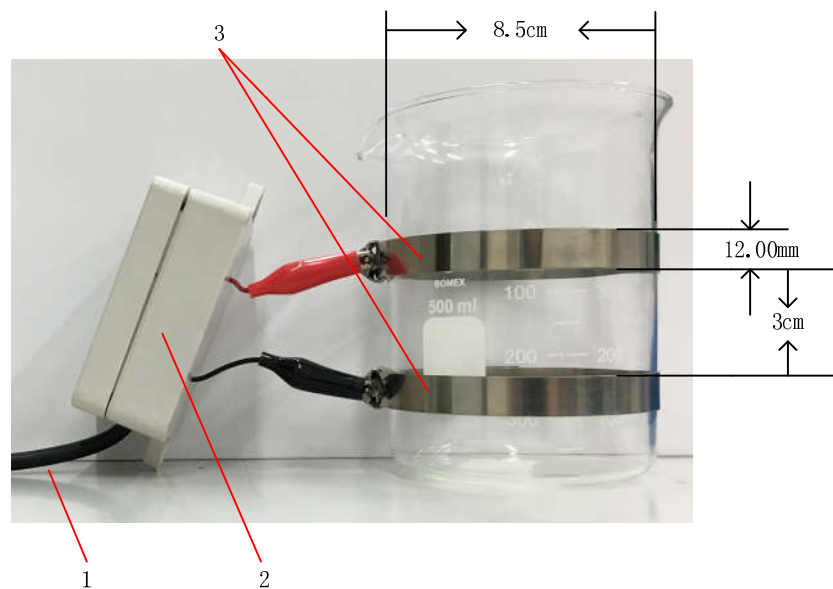


图 2 探测环阻抗试验

1.信号线 2.BD-IV 传感器 3.平行探测环

表 1 有机溶剂的介电常数

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
对应体积含水率/%	1.17	34.31	41.38	48.16	59.59

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。

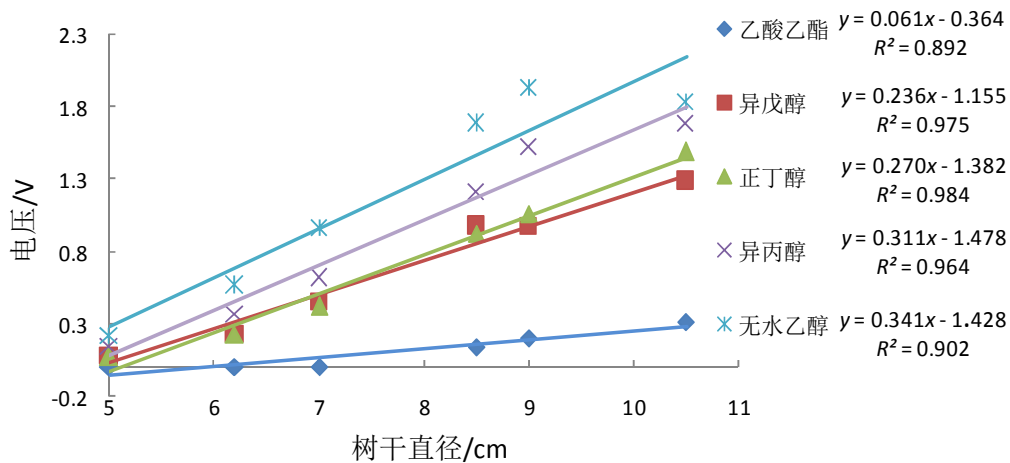


图 3 电压与树干直径的关系

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，传感器电压输出值与对应树干直径线性相关度很高，平均决定系数 R^2 在 0.94 以上。一般植物茎体的鲜质量含水率在 40%-50%之间，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。

4.2. 植物茎体水分与探测环阻抗 Z_L 相关性分析

采用直径为 5cm 的烧杯 5 个，模拟直径 5cm 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值，得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。

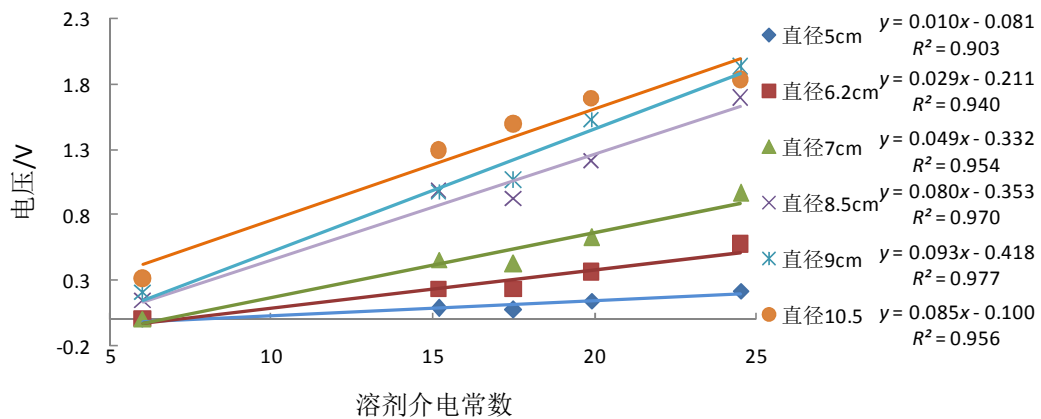


图 4 电压与溶剂介电常数的关系

从图 4 并结合表 1 可以分析出当探测环直径小于 10.5cm，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，传感器电压输出值与对应溶剂介电常数线性相关度很高，平均决定系数 R^2 在 0.95 以上。因此当植物茎体直径小于 10.5cm 时，该传感器能够满足茎体水分检测的需要。

4.3. 树段样本检测性能分析

截取平均直径为 7cm、长 40cm 的 10 a 生松树树段样本 40 个，截取环境温度为 25°C。然后将树段放入 60°C 的恒温箱中干燥，试验中开始阶段 6 次测量的间隔时间为 0.5h，中间阶段 5 次测量的间隔时间为 1h，最后阶段 7 次测量的间隔时间为 10h，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值，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，在显著水平为 0.01 的情况下，进行 pearson 相关性分析，得 BD-IV 传感器输出电压与体积含水率之间的相关性如表 3 所示。体积含水率的计算公式为：

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

式中， θ ——茎体体积含水率 (cm^3/cm^3)， m_A ——含水树段的质量 (g)， m_B ——绝干树段的质量 (g)， ρ ——水的密度 (g/cm^3)， V ——树段的体积 (cm^3)。

表 2 电压和树干体积含水率的相关性分析

树段编号	电压和体积含水率 相关系数	电压和体积含水率 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 决定系数很高，表现为极强相关。为了更好的定量分析 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 所示的曲线图。

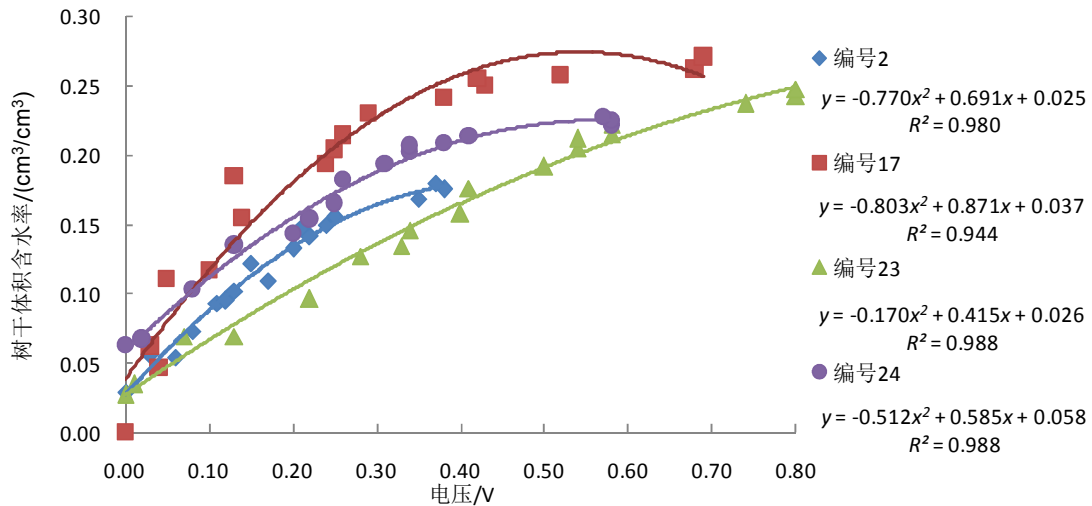


图 5 树干体积含水率和电压的关系

从图 5 可以看出树干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 在 0.97 以上。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的体积含水率。

4. 4. 活立木检测性能分析

以 10 a 生桃树为试验对象(北京林业大学八家试验苗圃，东经 $116^{\circ}20'43.6236''$ ，北纬 $40^{\circ}0'41.9184''$)，在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（如图 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 5cm，安装处的树干直径为 9.1cm，距离地面高度为 80cm。



图 6 BD-IV 型植物茎体水分传感器

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 5min

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。

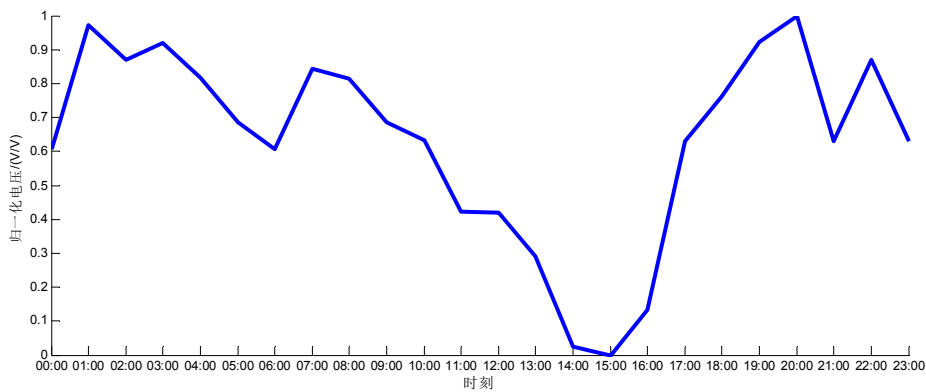


图 7 植物茎体水分的日变化曲线

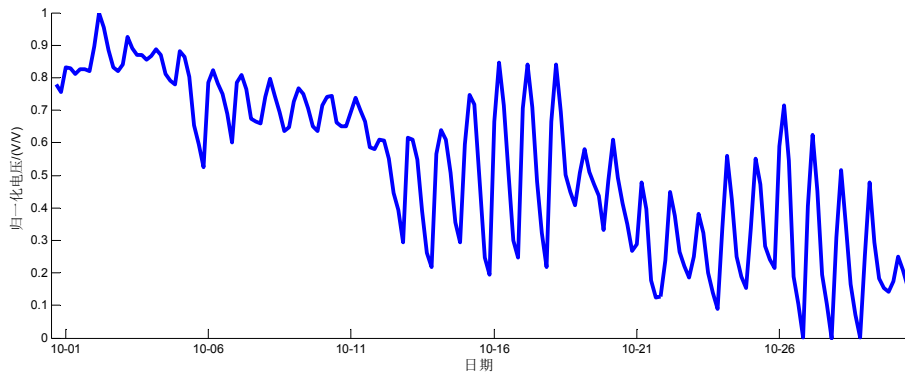


图 8 植物茎体水分的月变化曲线

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。植物在一天中不同时间段的耗水率差异很大，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。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，光合作用增大，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。

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一个重点，不论怎样，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。

4.5. 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 生柳树为试验对象(北京林业大学八家试验苗圃,东经 116°20'43.6236",北纬 40°0'41.9184"),在柳树茎体同高度处安装德国生产的 SF-L 型树干茎流仪及北京林业大学工学院研发的 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 30cm,距离地面高度为 150cm;BD-IV 型植物茎体水分传感器安装处树干直径为 30cm,距离地面高度为 150cm。SF-L 型树干茎流仪的探针长度为 33mm、平行间距为 100mm、垂直间距也为 100mm。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 3cm。

从 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值与树干茎流量。每天间隔 1h 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。

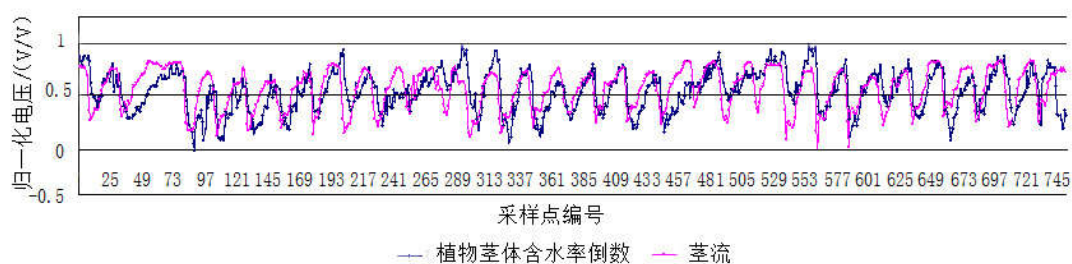


图 9 植物茎体含水量倒数与茎流之间的关系

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,每天的采样点为 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 相关系数为-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。图中还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:

当植物茎体体积含水率一定且小于 59.59%时,传感器输出电压值与树干直径在一定范围内(5~10.5cm)线性相关度达到 0.94 以上;当探测环直径一定且小于 10.5cm 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%)线性相关度达到 0.95 以上。能够满足植物茎体水分检测的需要。

。