

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.033

基于驻波率原理的森林枯落物和土壤含水率测量方法

颜小飞^{1,2} 郑晓亮^{1,2} 赵雅婕^{1,2} 赵燕东^{1,2}

(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)

摘要: 枯落物含水率测定在森林水文学、碳循环、林火蔓延以及火险等级评估等研究中具有重要作用。本文提出了一种基于驻波率(SWR)原理的森林枯落物含水率测量方法,所设计的SWR水分传感器具有复用双环式探头结构,可分时测量枯落物或土壤的含水率和电导率。实验结果表明,传感器输出电压与半分解、全分解枯落物和土壤含水率呈现良好的线性关系。与商品化TDR水分传感器相比,SWR传感器测量枯落物和土壤含水率的平均绝对误差较小,且在厚度小于10 cm的枯落物含水率测量以及测量成本方面具有明显优势。在对枯落物含水率进行长期原位测定时,SWR传感器可通过测量电导率判断半分解的枯落物是否随时间推移而完全分解,以便及时调整传感器水分测量的标定曲线,最大程度降低因枯落物成分改变对传感器测量精度造成的影响,为准确测量森林地表枯落物含水率奠定基础。

关键词: 森林枯落物; 土壤含水率; 驻波率; 电导率

中图分类号: S715 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0278-06

Measurement Method of Forest Floor and Soil Water Content Based on Standing Wave Ratio

YAN Xiaofei^{1,2} ZHENG Xiaoliang^{1,2} ZHAO Yajie^{1,2} ZHAO Yandong^{1,2}

(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)

Abstract: Forest floor moisture measurement plays a significant role in the research of forest hydrology, carbon cycle, forest fire spread and risk evaluation. A detection method of forest floor water content based on standing wave ratio (SWR) was introduced. The developed SWR sensor with two parallel annular probes could measure the water content and electrical conductivity in forest floor or mineral soil by using time-sharing multiplexing technology. Experimental results showed that the relationships between the output voltage of SWR sensor and the water content of partly decomposed forest floor, well decomposed forest floor and mineral soil were linear, respectively. Compared with the commercial TDR sensor, the SWR sensor showed a better performance with smaller mean absolute error and lower cost in the measurement of forest floor and soil water content. In addition, the SWR sensor had obvious advantages when the forest floor layer was thin (< 10 cm). It was notable that the partly decomposed forest floor might be decomposed completely in the long-term in situ moisture measurement. Therefore, the developed sensor estimated the decomposition rate by detecting electrical conductivity of forest floor, which would lay a foundation for the accurate measurement of forest floor water content.

Key words: forest floor; soil water content; standing wave ratio; electrical conductivity

引言

森林枯落物层是森林生态系统的主要功能层之

一,枯落物水分含量与地表径流、水分入渗和蒸发等水文过程以及土壤CO₂释放通量相关,实现枯落物含水率的原位测定对研究枯落物层水文特征和森林

收稿日期: 2017-09-22 修回日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500588)、国家重点研发计划项目(2017YFD0600901)和中央高校基本科研业务费专项资金项目

作者简介: 颜小飞(1982—),女,讲师,博士,主要从事森林生态信息检测研究,E-mail: yanxf@bjfu.edu.cn

通信作者: 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

土壤呼吸以及碳循环具有重要作用^[1-6]。此外,森林地表可燃物主要集中于枯落物层,其水分含量直接影响林火点燃的难易程度以及火势强弱^[7-9],因此,快速、准确获取枯落物含水率对于林火监测以及森林火险等级预测具有重要意义。

与土壤层相比,枯落物层具有结构松散、有机质含量高、厚度较薄的特点,常见的土壤水分传感器很难直接、准确地测定枯落物含水率。目前,国内学者对于枯落物含水率测量方法的研究较少。国外部分学者开展了相关研究,BÖRNER 等^[10]提出在枯落物与土壤交界面处和土壤中分别安装时域反射仪(TDR),通过 2 个 TDR 的测量值可推导出枯落物含水率。该研究提供了一种原位测定枯落物含水率的方法,但其测量的准确性受 TDR 校准方法、水分的空间变异性、TDR 一致性等诸多因素影响。CANONE 等^[11]考虑到枯落物为松散多孔结构,对传统的 TDR 探针结构进行了改进。然而,该研究是在条件可控的实验室环境下开展的,且尚需对 TDR 输出值与含水率关系的转换模型进行深入研究。此外,WILSON 等^[12]和 ATAKA 等^[13]分别尝试将电容型土壤水分传感器应用于枯落物含水率的测定,尽管取得了一定的成果,但测量的准确性和稳定性仍需进一步提高。

为此,本文以驻波率(SWR)原理为基础,设计复用双环式探头分时测定半分解、全分解枯落物和土壤含水率及其电导率。在此基础上,探究枯落物分解程度对含水率测量的影响以及与电导率之间的相关关系,最大程度提高枯落物含水率的测量精度。

1 系统设计与实现

1.1 系统总体设计

森林枯落物和土壤含水率测量系统以 STM 公司的 STM32F103RBT6 型芯片为核心^[14-15],能够实现林区半分解、全分解枯落物层和土壤层水分含量信息的定时采集与存储,与上位机之间既可通过 232 通信模块实现近距离有线传输,又可通过 GPRS 实现远距离无线传输。系统结构如图 1 所示,电源控制模块为水分和电导率检测模块分时供电,测得的数据存储于 SD 卡并通过 GPRS 数据传输模块传至上位机。

1.2 传感器设计

1.2.1 测量原理

测量土壤含水率采用驻波比法(Standing wave ratio, SWR)^[16-17],又称驻波率法,其工作原理如图 2 所示。采用 100 MHz 晶振作为激励信号源,晶振所产生的正弦信号沿同轴传输线传输到探头,如果探头

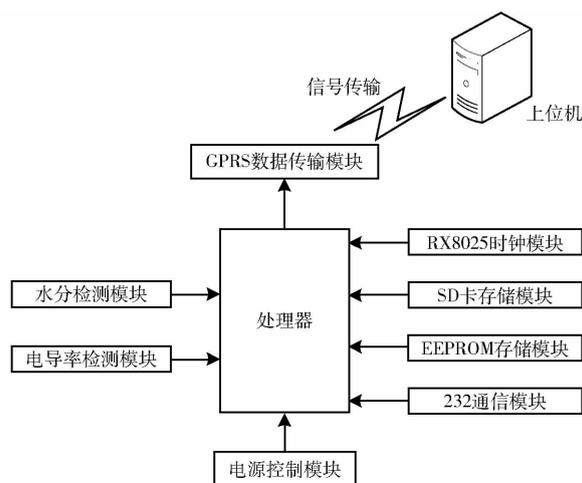


图 1 森林土壤信息采集系统

Fig. 1 Forest soil information acquisition system

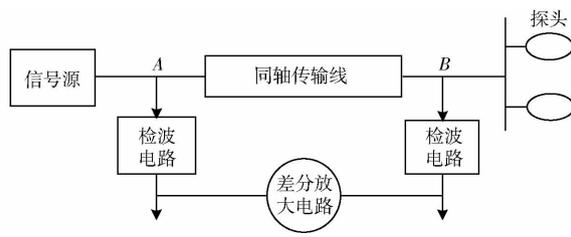


图 2 SWR 测量含水率原理图

Fig. 2 Principle diagram of moisture content measurement based on SWR

阻抗(取决于探头周围介质的介电常数)与传输线阻抗不匹配,一部分入射信号将被反射回信号源。反射信号与入射信号在同轴传输线上叠加并形成驻波,则传输线上各点的电压幅值存在变化。取图 2 中 A 点和 B 点的差分信号 ΔU_{AB} 作为传感器输出量。

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

式中 A_1 ——信号源输出信号幅值, V

Z_p ——双环式探头及其周围介质的阻抗, Ω

Z_L ——同轴传输线特征阻抗, Ω

本文同轴传输线特征阻抗 Z_L 为 50 Ω ,在信号幅值 A_1 恒定的情况下, A、B 两点的电压差 ΔU_{AB} 只与 Z_p 相关。当探头结构确定后,探头阻抗即为定值,因此 ΔU_{AB} 只与探头周围介质的阻抗有关^[18]。本文采用 SWR 原理测量枯落物和土壤含水率,故 ΔU_{AB} 的大小取决于被测样品的含水率。

采用 AD5933 阻抗芯片实现枯落物和土壤的电导率测量^[19-22]。如图 3 所示,AD5933 由内部振荡器或外部晶振 MCLK 产生振荡频率,通过直接数字合成器(DDS)产生正弦信号并经过 DAC 转换后由发射级信号差分放大器输出,并通过 VOUT 管脚激励外部复阻抗 Z_x ,在外部阻抗上产生的电流响应信号经过压流转换器转换为电压信号,其中压流转换器可通过反馈电阻 RBF 调节输出,转换后的电压信

号通过 1 倍或 5 倍可调增益 GAIN 放大后输入到 LPF, 进而由片上 ADC 采样, 采样结果通过片上 DSP 进行离散的傅里叶变换 (DFT) 处理, 经过傅里叶变换后返回该输出频率下得到的实部数据 R 和虚部数据 I ^[23], 从而计算出在每个扫描频率下傅里叶变换的模和相角, 测量结果正比于被测对象的导纳, 在此基础上建立阻抗值与电导率关系的数学模型。

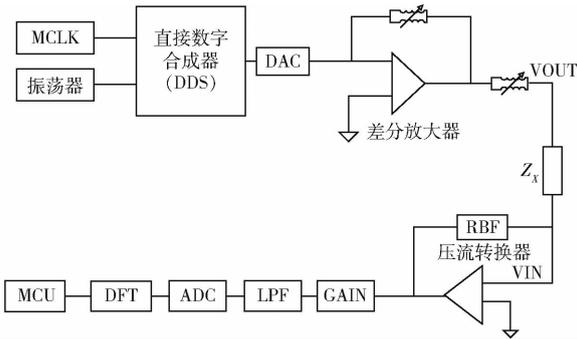


图3 AD5933 阻抗测量原理图

Fig. 3 Principle diagram of impedance measurement of AD5933

根据 AD5933 测量原理, 在某一频率下通过离散傅里叶变换后, 即

$$X(f) = \sum_{n=0}^{1023} x(n) (\cos n - js \sin n) \quad (2)$$

式中 $X(f)$ ——信号在频率点 f 的能量

$x(n)$ ——ADC 输出

$\sin n, \cos n$ ——频率点 f 的采样矢量

得到的实部数据 R 和虚部数据 I 正比于被测对象的导纳, 即

$$Z = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{I}{R} \quad (4)$$

式中 Z ——复阻抗幅值 θ ——复阻抗相角

通过计算得到该测量频率下的阻抗 Z_x , 即

$$Z_x = \frac{1}{GZ} \quad (5)$$

$$\text{其中 } G = \frac{1}{Z_n} \quad (6)$$

式中 G ——增益系数 Z_n ——标定阻抗

增益系数 G 确定后, 可计算出阻抗 Z_x , 通过实验数据建立阻抗 Z_x 与电导率关系的数学模型, 用于测量森林枯落物的表观电导率。

1.2.2 传感器探头结构

传感器双环式探头结构如图 4 所示, 在不锈钢圆管上套接用于绝缘的尼龙软管, 再套上 2 个不锈钢探测环, 两环之间用 PVC 环绝缘。其中, 不锈钢圆管直径为 2 cm, 探测环宽度为 1 cm, 绝缘 PVC 环

宽度为 1 cm。该探头可实现介质含水率和电导率的分时测量。

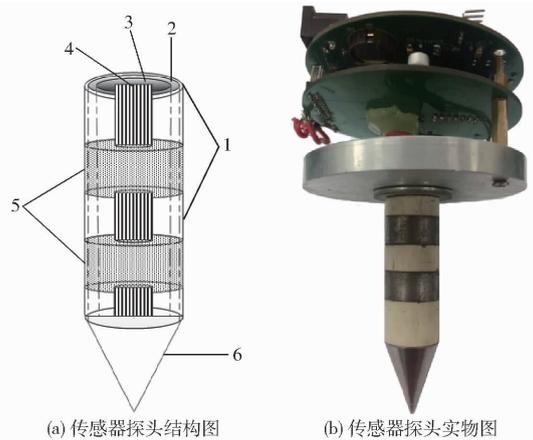


图4 传感器双环式探头结构

Fig. 4 Structure diagrams of sensor probe

1. 绝缘 PVC 管 2. 绝缘尼龙软管 3. 304 不锈钢圆管 4. 布线通道 5. 双环式探头 6. 不锈钢锥头

2 实验方案

2.1 样品采集

枯落物和土壤样品采集于北京西郊鹫峰国家森林公园, 地理坐标 $39^{\circ}54'N$ 、 $116^{\circ}28'E$, 海拔 $50 \sim 1100$ m, 属于暖温带半湿润大陆性季风气候。实验地点为一片栓皮栎林, 在相同立地条件下分别采集半分解的枯落物、全分解的枯落物和紧邻枯落物的表层土壤 ($0 \sim 10$ cm)。选取林地中枯落物层较厚的位置采集样品, 首先除去地表的植物体, 然后挖开垂直剖面, 在枯落物的半分解层、全分解层和土壤层分别用 100 cm^3 环刀取样, 并于林地的 3 个不同位置各取一组样品, 用于样品容重的计算, 最后分层采集样品并装入密封袋中, 用于传感器标定实验。

2.2 实验方法与过程

(1) 计算容重。将 100 cm^3 环刀采集的 3 种 (共 9 个) 样品放入干燥箱于 65°C 下干燥 48 h, 冷却至室温后称量, 计算出半分解枯落物层、全分解枯落物层、土壤层的平均容重。

(2) 干燥样品。将 3 种样品中的枯枝、石块等杂质去除, 分别放入干燥箱于 65°C 下干燥 48 h^[24]。

(3) 配制不同含水率的样品。将干燥后的土壤样品分为若干份, 每份 2 kg。在每份样品中分别以 100 g 为梯度添加去离子水, 直至土样饱和。混合均匀后, 用分层填装的方式将每份样品分别装入一个圆柱形 PVC 容器 (内径 10.5 cm、高度 20 cm), 使其容重尽量与林地中原状土容重保持一致, 计算并记录每份样品的体积含水率 ($\theta_v, \text{cm}^3/\text{cm}^3$) 和质量含水率 ($\theta_c, \text{g/g}$)。对于半分解和全分解枯落物样品

的处理方式与土壤样品相同。

(4) 将传感器探头插入样品中, 用本文所设计的 SWR 水分传感器测量 3 种样品在不同含水率下的输出电压和阻抗 (图 5a), 同时采用商品化的 TDR (TRIME-PICO 64 型, IMKO, 德国) 测量各样品的体积含水率和电导率 (图 5b)。

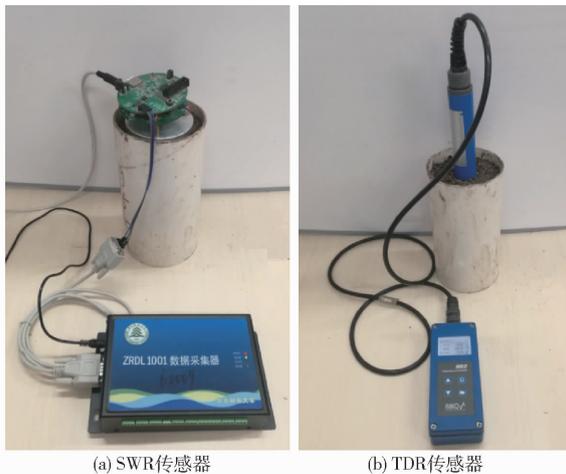
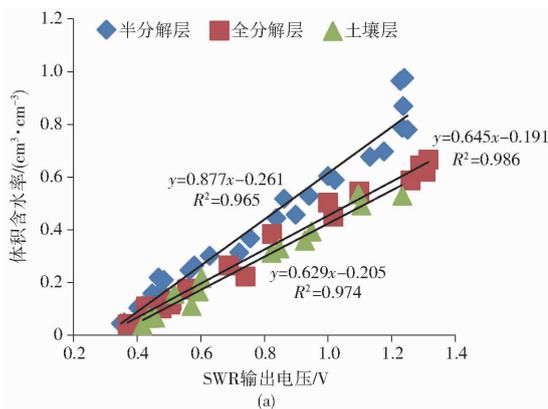


图 5 样品含水率测量

Fig. 5 Photographs of water content measurement



3 结果与分析

3.1 SWR 测定枯落物含水率结果分析

经环刀取样并计算得出, 供试栓皮栎林地中半分解枯落物层、全分解枯落物层和紧邻枯落物土壤层容重分别为 $0.65 \sim 0.67 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.86 \sim 0.89 \text{ g/cm}^3$ 和 $1.28 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$, 本文所配制被测样品尽量与林地中各层的原始容重保持一致。

由图 6a 可看出, 在半分解、全分解枯落物和土壤的测试中, SWR 水分传感器输出电压 ΔU_{AB} 与样品体积含水率 θ_v 之间具有良好的线性关系, 线性回归方程分别为 $\theta_v = 0.877\Delta U_{AB} - 0.261$ 、 $\theta_v = 0.645\Delta U_{AB} - 0.191$ 、 $\theta_v = 0.629\Delta U_{AB} - 0.205$ 。半分解枯落物与全分解枯落物、土壤回归曲线差异较大, 而全分解枯落物与其邻接土壤的回归曲线非常相近, 可能是由于两者的有机质成分相同且含量均较高, 从而使两者因质地不同导致的差异可以被忽略。因此, 使用本文所研制的 SWR 水分传感器测量全分解枯落物层和 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤层体积含水率时, 可以

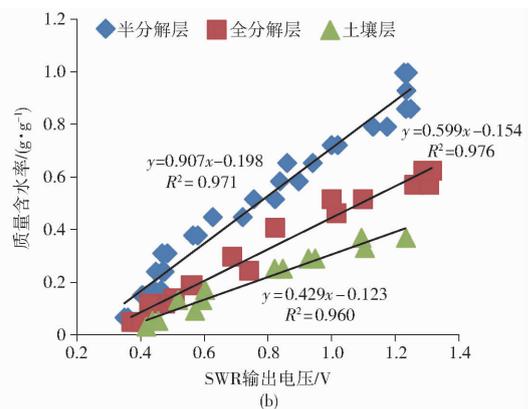


图 6 SWR 传感器输出电压 ΔU_{AB} 与样品体积含水率 θ_v 、质量含水率 θ_c 的关系

Fig. 6 Relationships of output voltage of SWR ΔU_{AB} vs volumetric water content θ_v and gravimetric water content θ_c in forest floor and mineral soil

使用相同的标定曲线。由图 6b 可见, SWR 输出电压 ΔU_{AB} 与样品质量含水率 θ_c 也呈线性关系, 然而由于容重不同, 在测量质量含水率 θ_c 时, 全分解枯落物层与土壤层不能使用同一标定曲线, 需要分别进行标定。

SWR 测量半分解枯落物、全分解枯落物和土壤体积含水率的平均绝对误差 (MAE) 分别为 0.038 、 0.020 、 $0.020 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 标准差 (SD) 分别为 0.044 、 0.027 、 $0.029 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (表 1)。半分解枯落物的 MAE 和 SD 明显高于全分解枯落物和土壤, 这是由于半分解枯落物中林地植被落下的枝叶、枝条、树皮等凋落物处于部分分解状态, 其均一性低于全分解枯落物和土壤。在半分解枯落物含水率测量过程中, 传感器探头不可避免地会随机插入样品中较大

表 1 SWR 与 TDR 测量样品体积含水率的平均绝对误差 (MAE) 和标准差 (SD)

Tab. 1 Mean absolute error (MAE) and standard deviation (SD) of volumetric water content measured by SWR and TDR probes cm^3/cm^3

样品	SWR		TDR	
	MAE	SD	MAE	SD
半分解枯落物	0.038	0.044	0.039	0.047
全分解枯落物	0.020	0.027	0.030	0.026
土壤	0.020	0.029	0.031	0.030

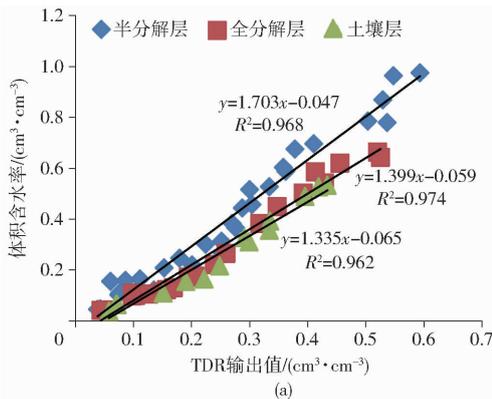
的孔隙之间, 从而造成测量结果的稳定性低于全分解枯落物和土壤。

3.2 SWR 与 TDR 测定枯落物含水率的对比

采用商品化的 TDR 与本文设计的 SWR 传感器

同步测量半分解枯落物、全分解枯落物和土壤含水率,由图7可知,采用商品化TDR的默认标定曲线直接测量枯落物含水率,误差较大,需要进行重新标定。TDR输出值与样品体积含水率、质量含水率也呈现良好的线性关系,且 R^2 均大于0.95。由表1可看出,重新标定后的TDR测量半分解枯落物、全分解枯落物和土壤含水率的平均绝对误差MAE明显大于SWR,其标准差SD则与SWR基本相当。因此,本文所研制SWR传感器在枯落物水分测量的准确性和稳定性方面略优于TDR。

森林中枯落物层通常比较薄($< 10\text{ cm}$),本研究采样林地枯落物的半分解层和全分解层厚度约为 5 cm 和 7 cm 。TDR测量含水率时可将整个探针垂直埋入,被测物的最小厚度应不小于探针长度



(11 cm);也可将探针水平埋入,被测物的最小厚度应大于探针的影响半径(约 8 cm)^[10]。SWR测量含水率时需将双环式探头全部埋入,被测物的最小厚度只需大于2个探头的宽度与距离之和(3 cm)。可见,与商品化TDR相比,本文所设计的SWR传感器在测量较薄枯落物($< 10\text{ cm}$)含水率方面具有更广阔的适用范围。

森林枯落物含水率具有很强的时空变异性^[10],在开展森林水文学和森林火险等级与林火蔓延研究时,往往需要将大量传感器安装于林区不同的位置。TDR价格昂贵,SWR成本则较低,因此,使用本文所设计SWR传感器开展枯落物含水率测量,在保证测量准确性的基础上可显著降低检测成本。

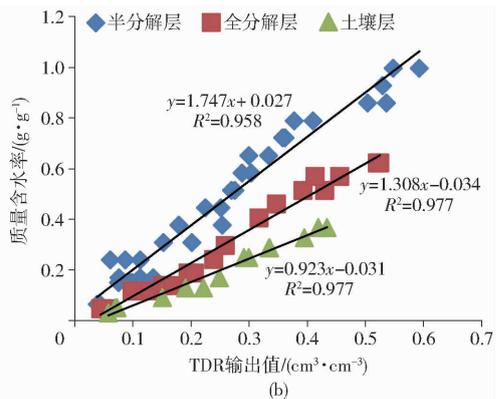


图7 TDR输出值 θ_{TDR} 与样品体积含水率 θ_v 、质量含水率 θ_c 的关系

Fig. 7 Relationships of output of TDR θ_{TDR} vs volumetric water content θ_v and gravimetric water content θ_c in forest floor and mineral soil

3.3 电导率测量结果与分析

在对森林枯落物含水率进行长期原位测定时,传感器需长时间埋在半分解层和全分解层,采用图6所示的标定曲线即可计算枯落物含水率。然而,在长期监测过程中,半分解枯落物会逐渐分解,最终变为全分解枯落物,需要变换不同的标定曲线来计算含水率。因此,实时判断枯落物的分解程度对于实现枯落物含水率的准确测定具有重要作用。

本研究通过测定电导率来判断半分解的枯落物是否随时间推移而完全分解。SWR传感器集成基于AD5933阻抗测量模块,水分测量和阻抗测量分时复用双环式探头,可同步获取被测样品的含水率和阻抗。将阻抗与TDR测得的样品电导率进行拟合,如图8所示,两者呈指数关系,因此可通过AD5933测得的阻抗推算出样品的电导率。由图9可知,在同一含水率下,半分解和全分解枯落物的电导率不同。在对枯落物含水率进行原位测定时,本研究设计的传感器探头同步输出枯落物含水率和电导率,在对半分解枯落物含水率进行长期原位测定

时,可有效估算枯落物的分解程度以及是否需要改变传感器的水分标定曲线,最大程度降低枯落物因成分改变对传感器测量精度造成的影响。

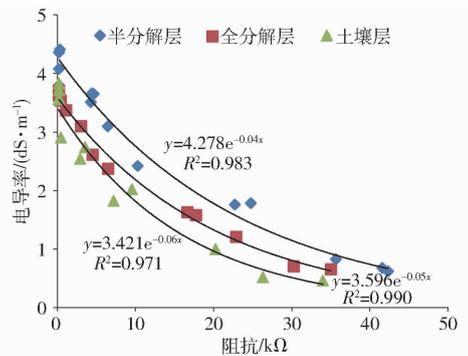


图8 样品阻抗与电导率的关系

Fig. 8 Relationships between impedance and electrical conductivity in forest floor and mineral soil

4 结论

(1)设计了一种可准确测量森林半分解枯落物、全分解枯落物和土壤含水率的传感器,其探头为复用双环式结构,可分时测量枯落物或土壤的含水

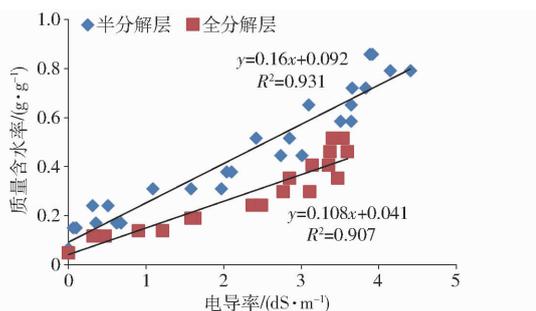


图 9 半分解和全分解枯落物电导率与质量含水率的关系

Fig. 9 Relationships between electrical conductivity and gravimetric water content in partially decomposed and well decomposed forest floor

率及电导率。采用 SWR 原理实现含水率测定, 传感器输出电压与枯落物和土壤含水率呈良好的线性关系。实验结果表明, 传感器测量全分解枯落物层和与其邻接的土壤层(0~10 cm)体积含水率时, 两者的标定曲线非常接近, 且与半分解枯落物层标定曲线的差异较大。在测量质量含水率时, 由于容重不同, 半分解、全分解枯落物和土壤的标定曲线差异显

著。此外, 传感器集成 AD5933 芯片测量被测物的阻抗, 应用实验数据对阻抗和电导率进行回归分析, 则传感器可测定枯落物和土壤的电导率。

(2) 将本文所设计的基于 SWR 的水分传感器与商品化的 TDR 水分传感器进行对比, 结果表明, 2 种传感器输出与枯落物和土壤含水率均呈现良好的线性关系, 且 TDR 测量 3 种样品含水率的平均绝对误差 MAE 明显大于 SWR, 标准差 SD 则与 SWR 基本相当。此外, 与 TDR 相比, SWR 传感器在测量较薄的 (<10 cm) 枯落物含水率以及测量成本方面具有明显优势。

(3) 在对枯落物含水率进行长期原位测定时, 考虑到半分解枯落物的分解程度会随着时间推移逐渐加深, 根据相同含水率下半分解和全分解枯落物的电导率差异, 在测量枯落物含水率时同步测定其电导率, 可判断半分解枯落物是否已经完全分解以及是否需要变换传感器的标定曲线, 为准确测量林地枯落物的含水率奠定基础。

参 考 文 献

- 王贺新, 李根柱, 于冬梅, 等. 枯枝落叶层对森林天然更新的障碍[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 83-88.
WANG Hexin, LI Genzhu, YU Dongmei, et al. Barrier effect of litter layer on natural regeneration of forests [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1): 83-88. (in Chinese)
- SINGH K P, SINGH P K, TRIPATHI S K. Litter fall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(4): 371-378.
- OGÉE J, BRUNET Y. A forest floor model for heat and moisture including a litter layer[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1): 212-233.
- RUFFO M L, BOLLERO G A. Modeling rye and hairy vetch residue decomposition as a function of degree-days and decomposition-days[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(4): 900-907.
- 陈印平, 赵丽华, 吴越华, 等. 森林凋落物与土壤质量的互作效应研究[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(4): 88-94.
CHEN Yinping, ZHAO Lihua, WU Yuehua, et al. Interaction effect and mechanism between litter and soil quality[J]. World Science-Technology R&D, 2005, 27(4): 88-94. (in Chinese)
- KOSUGI K, MORI K, YASUDA H. An inverse modeling approach for the characterization of unsaturated water flow in an organic forest floor[J]. Journal of Hydrology, 2001, 246(1): 96-108.
- VARNER J M, HIERS J K, OTTMAR R D, et al. Over story tree mortality resulting from reintroducing fire to long-unburned longleaf pine forests: the importance of duff moisture[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(8): 1349-1358.
- 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 140-143.
ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, NIU Jianzhi, et al. Ecohydrological functions of litter on different forest stands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 140-143. (in Chinese)
- STOOF C R, MOORE D, FERNANDES P M, et al. Hot fire, cool soil[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(8): 1534-1539.
- BÖRNER T, JOHNSON M G, RYGIWICZ P T, et al. A two-probe method for measuring water content of thin forest floor litter layers using time domain reflectometry[J]. Soil Technology, 1996, 9(4): 199-207.
- CANONE D, PREVIATI M, FERRARIS S, et al. A new coaxial time domain reflectometry probe for water content measurement in forest floor litter[J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(2): 363-372.
- WILSON T B, KOCHENDORFER J, MEYERS T P, et al. Leaf litter water content and soil surface CO₂ fluxes in a deciduous forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 192(2): 42-50.
- ATAKA M, KOMINAMI Y, MIYAMA T, et al. Using capacitance sensors for the continuous measurement of the water content in the litter layer of forest soil[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2014, 1(4): 1-5.
- 彭曾愉, 赵燕东. 基于 UC/OS-II 操作系统的土壤水分实时监测系统[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 114-119.
PENG Zengyu, ZHAO Yandong. A monitoring system of real-time soil water content based on UC/OS-II operating system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 114-119. (in Chinese)

- 16 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3)(偏最小二乘回归与 PLS 过程)[J]. 数理统计与管理, 2002, 21(2): 58 - 64.
GAO Huixuan. Statistical analysis of two multiple correlated variables (3) (partial least squares regression and PLS process) [J]. Application of Statistics and Management, 2002, 21(2): 58 - 64. (in Chinese)
- 17 王礼沅, 郭基联, 张恒喜. 递阶偏最小二乘回归在飞机研制费用预测中的应用[J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1380 - 1384.
WANG Liyuan, GUO Jilian, ZHANG Hengxi. Application of hierarchical partial least squares regression to development cost prediction of aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(8): 1380 - 1384. (in Chinese)
- 18 刘云, 宇振荣, 孙丹峰, 等. 冬小麦遥感冠层温度监测土壤含水量的试验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 352 - 356.
LIU Yun, YU Zhenrong, SUN Danfeng, et al. Canopy temperature monitoring soil water content based on field experiment of winter wheat[J]. Advance in Water Science, 2004, 15(3): 352 - 356. (in Chinese)
- 19 杨涛, 官辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6264 - 6277.
YANG Tao, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6264 - 6277. (in Chinese)
- 20 刘培君, 张琳. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 135 - 138, 81.
LIU Peijun, ZHANG Lin. A method for estimating soil moisture by satellite remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(2): 135 - 138, 81. (in Chinese)
- 21 高志海, 李增元, 魏怀东, 等. 干旱地区植被指数(VI)的适宜性研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 243 - 248.
GAO Zhihai, LI Zengyuan, WEI Huaidong, et al. Study on the suitability of vegetation indices (VI) in arid area[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 243 - 248. (in Chinese)
- 22 范闻捷, 盖颖颖, 徐希孺, 等. 遥感反演离散植被有效叶面积指数的空间尺度效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(2): 280 - 286.
FAN Wenjie, GAI Yingying, XU Xiruo, et al. Spatial scale effect of remote sensing inversion of vegetation effective leaf index [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(2): 280 - 286. (in Chinese)
- 23 王喜鹏, 张养贞. 应用神经网络模型分解 AVHRR 混合像元[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 51 - 56.
WANG Xipeng, ZHANG Yangzhen. Decomposition of AVHRR mixed pixels using neural network model[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(1): 51 - 56. (in Chinese)

(上接第 283 页)

- 15 ZEGELIN S J, WHITE I, JENKINS D R, et al. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1989, 25(25): 2367 - 2376.
- 16 孙宇瑞, 汪懋华, 赵燕东. 一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 37 - 41.
SUN Yurui, WANG Maohua, ZHAO Yandong. A kind of determinations of soil dielectric constant using the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(2): 37 - 41. (in Chinese)
- 17 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, 43(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, 43(4): 109 - 111. (in Chinese)
- 18 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量灵敏度分析[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)
- 19 FERREIRA J, SEOANE F, ANSEDE A, et al. AD5933-based spectrometer for electrical bioimpedance applications[J]. Journal of Physics: Conferences Series, 2010, 224(1): 11 - 12.
- 20 温新华, 颜小飞, 安冬. 基于 AD5933 的便携式阻抗抗仪研制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4): 1090 - 1095.
WEN Xinhua, YAN Xiaofei, AN Dong. Development of portable impedance meter based on AD5933[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(4): 1090 - 1095. (in Chinese)
- 21 黎步银, 黄兆祥, 幸会, 等. 基于 AD5933 的阻抗频谱设计系统设计与实现[J]. 微计算机信息, 2008, 24(10 - 2): 288 - 290.
LI Buyin, HUANG Zhaoxiang, XING Hui, et al. Designing and implementation of measurement system of impedance spectroscopy analyzer based on AD5933[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(10 - 2): 288 - 290. (in Chinese)
- 22 李静, 陈世利, 靳世久. 基于 AD5933 的阻抗分析仪的设计和实现[J]. 现代科学仪器, 2009, 124(2): 28 - 30.
LI Jing, CHEN Shili, JIN Shijiu. Design of impedance analyzer based on AD5933[J]. Modern Scientific Instruments, 2009, 124(2): 28 - 30. (in Chinese)
- 23 傅元, 吴然, 韩吉声. AD5933 测量水电导率电路设计中的若干问题[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 342(7): 63 - 65.
FU Yuan, WU Ran, HAN Jisheng. Measurement of water conductivity based on AD5933[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011, 342(7): 63 - 65. (in Chinese)
- 24 SCHAAP M G, DE LANGE L, HEIMOVAARA T J. TDR calibration of organic forest floor media[J]. Soil Technology, 1997, 11(2): 205 - 217.