

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205512

FDR 土壤水分传感器测量重复性研究*

王黎明^{1,2} 常 硕² 侯海军³ 袁 首² 周旭辉² 李松奎⁴ 韩 啸²

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室 长沙 410118; 2. 湖南省气象局 长沙 410007;
3. 中国科学院亚热带农业生态研究所 长沙 410125; 4. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘 要:利用多个不同质地未受扰动的原状土壤样本,对其进行质量体积含水率测量和电容式频域反射 FDR (frequency domain reflectometry) 土壤水分传感器体积含水率对比测量,得到传感器的标定方程。对每个样本重复多次从含水量饱和至几乎不含自由水状态全过程对比测量,得到不同土壤湿度上的动态测量重复性;同时在土壤湿度不变的每一次对比测量中,等间隔旋转土壤水分传感器,得到在同一湿度值上的不同方位的静态测量重复测性。以实测的数据对两种重复性进行了分析,实验研究表明:在环境温度相差不大的情形下,FDR 土壤水分传感器的原状土壤标定有较好的全量程重复性,试验用原状土壤样本体积含水率动态重复性误差最大为 3.57% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),最小为 2.29% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),平均为 2.81% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);体积含水率方向性静态误差最大为 0.22% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),最小为 0.01% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),平均为 0.02% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)。原状土壤动态重复性较好,能够作为站点后期校准标准物质,体积含水率方向性静态误差小,在测量中可以忽略。

关键词: FDR 土壤水分传感器;测量;重复性

中图分类号: TN752.1;S152.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Study on repeatability of FDR soil moisture sensor

Wang Liming^{1,2} Chang Shuo² Hou Haijun³ Yuan Shou² Zhou Xuhui² Li Songkui⁴ Han Xiao²

(1. State Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118, China;
2. Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410007, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 4. Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Using undisturbed soil samples with different soil textures, the mass volume moisture content is measured and the volume moisture content of capacitive frequency domain reflectometry (FDR) soil moisture sensor is compared, and the calibration equation of the sensor is obtained. The whole process of comparative measurement from water content saturation to almost no free water was repeated for several times for each sample, and the dynamic measurement repeatability on different soil moisture was obtained. At the same time, in each comparative measurement of soil samples, rotate the soil moisture sensor to obtain the repeatability of static measurement in different directions on the same soil moisture value. Based on the measured data, the repeatability difference between the dynamic error and the static error is analyzed. The experimental research shows that the undisturbed soil calibration of FDR soil moisture sensor has good full-scale repeatability under the condition of little difference in ambient temperature. The maximum undisturbed soil sample dynamic error of volume moisture content is 3.57% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), the minimum is 2.29% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), and the average is 2.81% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); The maximum error of directional static volume moisture content is 0.22% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), the minimum is 0.01% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), and the average is 0.02% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). The undisturbed soil has good dynamic repeatability and can be used as the standard material for post station calibration. The error of directional static volume moisture content is small and can be ignored in the measurement.

Keywords: FDR soil moisture sensor; measure; repeatability

收稿日期: 2022-05-19 Received Date: 2022-05-19

* 基金项目: 中国气象局气象探测中心 2021 年观测实验项目(SY2021013)、湖南省气象局重点科研项目(XQKJ17A003)资助

0 引言

土壤的含水率、土壤温度、土壤含盐碱量、土壤质地化学组分、容重等^[1-5]因素都对其介电常数有影响,不同物理化学特性的土壤其介电常数-土壤湿度数学模型参数不同。土壤介电常数与土壤各种性质密切相关,各种性质对土壤体积含水率的测量函数关系复杂,且其中某个因素的影响与其他因素高度的纠缠在一起,难以独立的剥离出来加以单独的研究,所以精确确定的确定不同因素对 FDR 土壤水分传感器体积含水率测量影响存在较大的困难。

国内外学者在土壤水分传感器标定方面进行了大量的研究,一般说来 FDR 土壤水分传感器需要基准频率标定、田间标定、实验室标定等三级标定。王黎明等^[6]、智永明等^[7]实验研究表明,原状土壤标定的土壤水分传感器能够很好的适应站点的土壤,有较高的测量精度;刘亮等^[8]对研磨处理后的土壤进行标定,表明标定曲线对自身有较高的精度,绝对误差小于 3.2%;高磊等^[2]和王黎明等^[9]研究表明,温度大于 20℃ 时,标定误差大,是不可忽略的因素。Rao 等^[10]研究表明,在体积含水率小于 5% 时, FDR 传感器有较好的测量重复性。

由于 FDR 法能够得到连续、稳定的土壤水分数据,有十分重要的应用价值,因此频域反射法测量土壤含水率近年来得到了广泛的应用^[11-12],但其测量结果与土壤具体特性有关,综上所述的研究结果来看, FDR 土壤水分传感器经过原状土壤标定后有较高的测量精度,温度是一个不可忽视的影响因素。Rao 等^[10]对传感器的测量重复性研究是基于研磨处理的土壤样本,与实际土壤有一定的差异,其未考虑同一湿度上不同方位测量差异。

本研究采用原状土壤样本,对电容式频域反射土壤水分传感器的测量重复性进行了较全面的研究,对同一个原状土壤样本,从饱和至几乎不含自由水状态过程中,对其进行质量含水率和传感器测量含水率对比测量,对比测量次数不少于 50 次,样本几乎不含水后,重新加水配置饱和,重复上述对比测量,以得到 FDR 土壤传感器测量的动态重复特性,考虑到温度影响,每个测量过程环境温度控制在一定的范围内。在上述的每个过程中,在样本的一个恒定湿度值上,测量 8 个不同方位值,得到传感器静态重复性。按照 FDR 土壤水分仪业务运行要求,对传感器需每 2 年进行实验室校准,校准采用玻璃砂为标准物质,其结果与实际土壤有较大的差别,原状土壤重复性实验结果表明,仪器安装站点采集的原状土壤样本在可控的温度范围内有较高的全过程动态一致性,作为站点的校准物质较石英砂更加合理。

1 测量原理

频域反射土壤水分传感器由圆柱形金属环作为感应电容,土壤为电介质组成的振荡电路。土壤中水含量主要决定了其介电常数值,通过返回的扫描频率即可推算出土壤中的含水量情况,如图 1 所示。传感器在空气、水、土壤介质中反射回的频率分别为 F_a 、 F_w 、 F_s ,对 3 个频率做式(1)形式的归一化处理,再由归一化频率 SF 通过式(2)计算土壤体积含水率。由于土壤性质的空间变异性, FDR 内置的标定曲线,式(2)并不适合具体站点的仪器,需要根据具体的土壤进行标定。

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (1)$$

$$\Theta = (0.51098 \cdot SF - 0.14573)^{2.475} \quad (2)$$

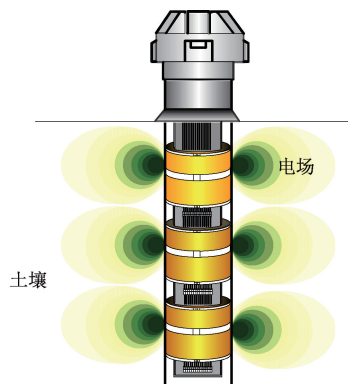


图 1 FDR 土壤水分传感器测量示意图

Fig. 1 Measurement schematic diagram of FDR soil moisture sensor

2 实验设计

实验中用 EnviroSMART 多点位置可调电容式 FDR 土壤水分传感器测量样本土壤体积含水率,传感器探测范围 99% 是从套管外部半径 100 mm 以内、垂直高度 100 mm 的范围读取,传感器套管外直径为 57.2 mm。在仪器安装点采集未受扰动的圆柱状土壤样本,根据传感器的测量范围,样本直径为 280 mm,高度 110 mm,如图 2 所示,以保证传感器电场几乎完全处于样本土壤空间中,避免传感器敏感电场暴露在空气中造成一定的误差。EnviroSMART 土壤水分传感器特性为:体积含水率测量范围为 0~100%,分辨率+0.1%。

为了减少土壤水分传感器与管壁接触不紧密导致转动时在水平方向发生偏差,实验中,在传感器上方再套接一个传感器,不参入测量,起额外稳定作用,如图 3 所示。实验所用的 4 个圆柱状原状土壤样本分别采集于桑

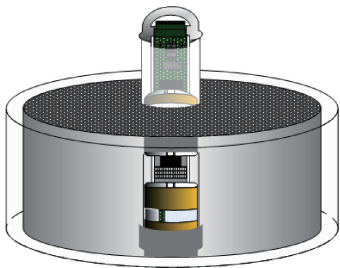


图2 测量用原状土壤样本
Fig.2 Undisturbed soil for measurement

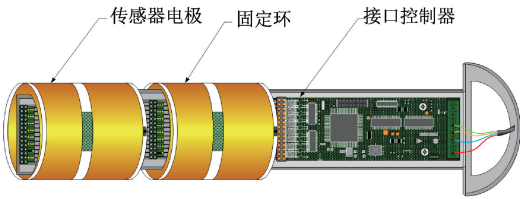


图3 实验测量用土壤水分传感器结构
Fig.3 Structure of soil moisture sensor for test measurement

植(E 110°12'03",N 29°15'13"深度 40~50 cm 层次,道县(E 111°35'43",N25°32'01") 30~40 cm 和 80~90 cm 层次,吉首(E109°40'55",N28°14'17") 10~20 cm 层次,采集的各个层次的土壤特性如表 1 所示。

表 1 供试土壤样本相关参数

Table 1 Relevant physical properties of test soil

站点	土壤深度/ cm	质地	容重 (g·cm ⁻³)	饱和 持水量/%
桑植	40~50	壤土	1.60	40.18
道县	80~90	砂土	1.23	64.21
吉首	10~20	粘壤土	1.48	47.50
道县	30~40	砂壤土	1.50	44.38

注:容重测量设定烘箱在 105 ℃ 烘干 24 h^[13]。

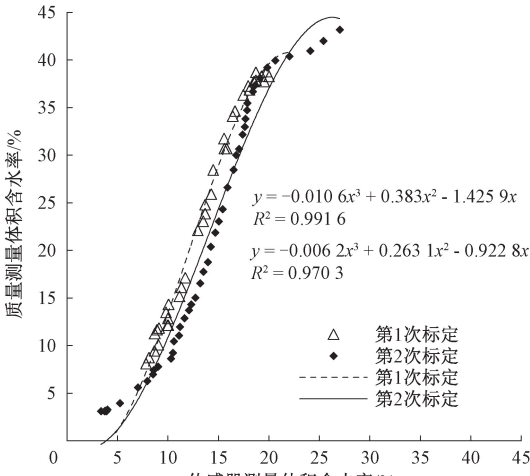
对实验原状土壤土柱从顶部缓慢注水,当表面无明显积水时,土柱达到饱和含水量,整个过程需持续约 12 h。对每个样本测量整体质量(精度 0.1 g),在假设土柱均匀的情况下结合烘干土质量可以计算出土壤的体积含水率^[6],再用 FDR 土壤水分传感器测量其体积含水率,土柱置于实验室环境下,让土壤中的水分自然蒸发,样本含水率由高至低的过程中,质量每降低 50~60 g 进行一次质量和传感器对比测量。

3 原状土壤动态重复性对比测量

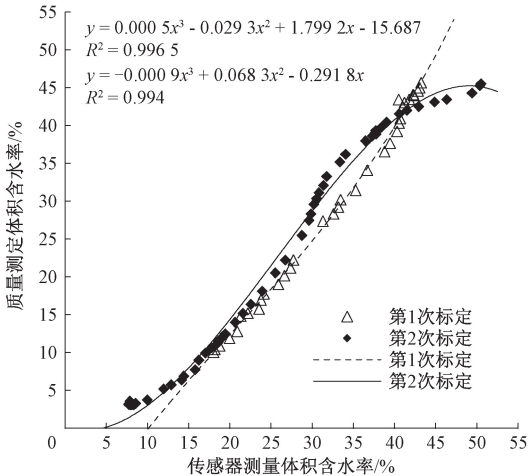
3.1 对比测量数据

图 4 所示为样本的 2 次重复测量标定数据分布,2 次测量时间分别为 2019 年 5 月~12 月和 2020 年 5 月~10

月。以质量测得的体积含水率为标准,用统计软件将每个样本的质量测量体积含水率和传感器测量体积含水率进行统计拟合,选取其中最优化的曲线作为标定曲线^[14-16]。对每个样本的标定数据进行回归分析,相关系数大于 0.97,经过检验 $\alpha=0.05$ 达到极显著相关水平。



(a) 桑植站壤土40~50 cm层次
(a) Sangzhi country 40~50 cm depth



(b) 道县站砂土80~90 cm层次
(b) Daoxian country 80~90 cm depth

图 4 质量测量和仪器测量体积含水率对比数据(2 次)
Fig.4 Comparison data of volume moisture content measured by mass and sensor

图 5 所示为样本的 3 次重复对比测量标定数据分布,3 次测量时间分别为 2019 年 5 月~12 月、2020 年 5 月~10 月和 2021 年 5 月~10 月。

3.2 数据分析方法

对图 4 所示的 2 次重复测量的情况,以式(3)定义平均不重复性。

$$\overline{E_x} = \frac{\int_a^b |f_1(\Theta) - f_2(\Theta)| d\Theta}{b - a} \quad (3)$$

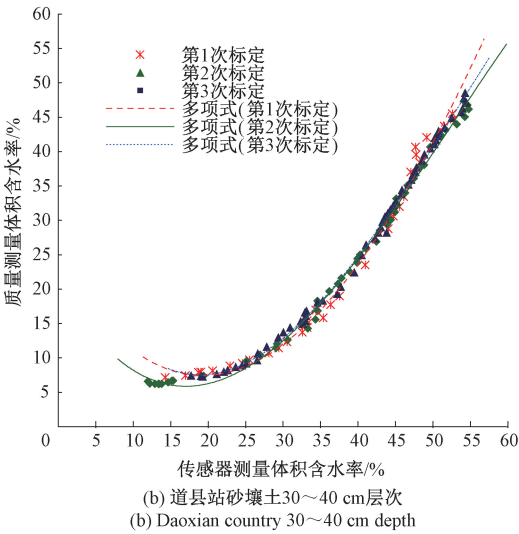
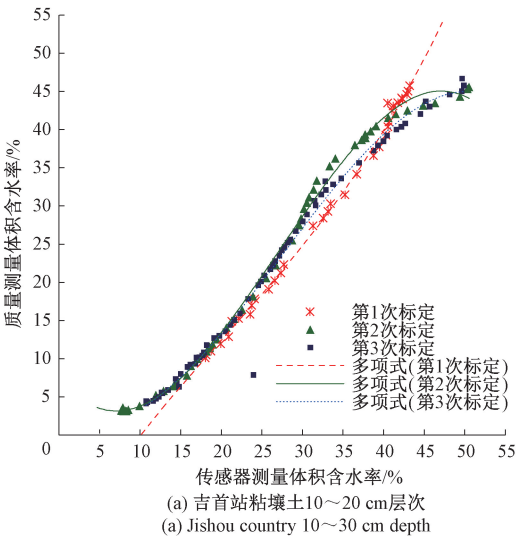


图 5 质量测量和仪器测量体积含水率对比数据(3 次)

Fig. 5 Comparison data of volume moisture content measured by mass and sensor

其中 $f_1(\Theta)$ 、 $f_2(\Theta)$ 为同一土壤样本 2 次重复对比测量得到的标定函数,在此为多项式函数。对图 5 所示 3 次重复测量的情况,取 3 条标定曲线两两之差最大值的积分除以积分区间定义平均不重复性,如式(4)所示。

$$\overline{E_x} = \frac{\int_a^b \text{Max}(|f_i(\Theta) - f_j(\Theta)|) d\Theta}{b - a} \tag{4}$$

其中, $i, j = 1, 2, 3$, Θ 为传感器测量的体积含水率, a , b 分别为标定时传感器测到的最小和最大体积含水率,即土壤样本在干和饱和时的测量值,平均不重复性表示了样本在干和饱和之间标定曲线之间的平均体积含水率差异。

土壤样本标定曲线之间的不重复性采用式(5)形式的极限误差表示:

$$E_x = \frac{\text{Max}\Delta\Theta_v}{\text{Max}\Theta_v} \cdot 100\% \tag{5}$$

其中, $\text{Max}\Theta_v$ 为同一个土壤样本标定测量的最大体积含水率, $\text{Max}\Delta\Theta_v$ 为同一个样本标定曲线之间体积含水率最大差值。

以样本质量测量的体积含水率为标准,计算拟合曲线上各测量点上的偏差的绝对值 $|\Delta|$,统计 $|\Delta| \leq 2.5\%$ 所占的百分比。标定数学模型参数的准确性用式(6)均方根误差(RMSE)表示:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Theta_m - \Theta_v)^2}{n}} \tag{6}$$

其中, Θ_m 为质量测量的体积含水率, Θ_v 为标定后的体积含水率,重复测量标定结果的各项指标如表 2 所示。

3.3 动态重复性误差分析

原状土壤在取样时取样区域需要进行浇灌,需要几天的下渗时间,取样时间难以精确的把握在正好是土壤

表 2 重复测量标定实验结果

Table 2 Test result of repeat measurement calibration

土壤样本	标定次数	标定方程 $f(\Theta)$	R^2	$\text{Max}\Theta_m$	$ \Delta $	$ \Delta \leq 2.5$	$\text{Max}\Delta\Theta_v$	E_x	$\overline{E_x}$
桑植 40~50	1	$-0.010\ 6\Theta^3 + 0.383\ 2\Theta^2 - 1.425\ 9\Theta$	0.993 0	38.79	0.89	100.00%	4.63	10.75%	3.57
	2	$-0.006\ 2\Theta^3 + 0.263\ 1\Theta^2 - 0.922\ 8\Theta$	0.970 3	43.18	1.06	97.92%			
道县 80~100	1	$-0.002\ 1\Theta^3 + 0.165\ 1\Theta^2 - 2.022\ 1\Theta + 7.469\ 2$	0.990 1	54.63	2.47	80.00%	3.79	6.65%	2.66
	2	$-0.002\ 3\Theta^3 + 0.206\ 4\Theta^2 - 3.732\ 6\Theta + 21.99$	0.987 9	56.95	1.90	68.89%			
吉首 10~20	1	$0.000\ 5\Theta^3 - 0.029\ 3\Theta^2 + 1.799\ 2\Theta - 15.687$	0.996 5	45.70	2.15	81.75%	3.94	9.07%	2.71
	2	$-0.001\ 3\Theta^3 + 0.106\ 3\Theta^2 - 1.306\ 9\Theta + 7.499\ 7$	0.997 4	45.56	1.35	77.52%			
	3	$-0.000\ 9\Theta^3 + 0.072\ 3\Theta^2 - 0.559\ 6\Theta + 2.681\ 5$	0.987 7	46.66	1.30	81.02%			
道县 30~40	1	$-0.000\ 2\Theta^3 + 0.021\ 5\Theta^2 - 1.782\ 2\Theta + 23.97$	0.990 1	45.48	1.50	87.60%	3.04	6.43%	2.29
	2	$-0.000\ 4\Theta^3 + 0.073\ 3\Theta^2 - 2.297\ 9\Theta + 27.792$	0.997 3	47.34	1.70	87.59%			
	3	$-0.000\ 4\Theta^3 + 0.065\ 4\Theta^2 - 1.870\ 6\Theta + 20.776$	0.996 7	48.56	0.82	96.12%			

注: R^2 为相关系数; $\text{Max}\Theta_m$ 为质量测得的最大体含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) 百分比; $|\Delta|$ 为样本标定后体积含水率与标准值偏差的平均值; $|\Delta| \leq 2.5$ 为体积含水率偏差小于等于 2.5%; 对 2 次重复测量 $\text{Max}\Delta\Theta_v$ 为样本 2 条标定曲线体含水率的差值, 对 3 次重复测量, $\text{Max}\Delta\Theta_v$ 为样本标定 3 条曲线体含水率两两之间差值。

湿度最高的时段,导致实验重新加水配置饱和后的湿度普遍大于第1次测量时的最大湿度,第2次测量的最高体积含水率比初次平均高 2.82% (cm³·cm⁻³)。

吉首站 10~20 cm 层次粘壤土样本第 2 次标定 $|\Delta| \leq 2.5$ 占比较低,为 77.52%,其他均在 80%以上,达到准确性要求; $\overline{E_x}$ 值较好的描述了土壤样本从高湿至低湿过程各次测量标定曲线的一致性程度, $\overline{E_x}$ 值越小,表明各次标定曲线之间的重复性越高,土壤样本的重复利用性越好,如图 5(b)所示,道县 30~40 cm 层次样本除个别点外 3 条标定曲线几乎重合。

样本多次标定不一致性主要原因为:样本在取出后需要打孔安装测量套管,对土壤样本的扰动是不可避免的,从土壤水分仪运行规范来看,需要仪器安装 3 个月后,待传感器安装地段的土层恢复稳定,再进行标定。由于制作样本时安装传感器对套管周围的土壤有一定的扰动,在进行加水配置饱和后,能够将传感器安装套管与土壤接触处进行充分的均匀沉降,导致测量套管与土壤接触处更加恢复到接近原始状态,因此,加水饱和后的标定更能够代表原来土壤的状况。根据重复性测量要求,多次重复测量的环境条件应保持不变,而多次标定环境温度并不是严格一致的,本实验只是尽可能将测量控制在年度对应同一时间段,土壤样本温度差异导致重复标定测量的体积含水率有一定的差异。

4 原状土壤静态重复性测量

4.1 实验数据

由于制作工艺的限制,传感器的形状并不是理想柱对称的,且与套管并非严格接触,相关仿真表明此类影响是一个不可忽略的因素^[17-20],加之被测量介质也并非严格的均匀,导致在不同方向上所测得的体积含水率并不相同。实验测量中,在每一个湿度测量点上每隔 45°进行 8 次重复测量,用样本标准差除样本均值来定义每次观测土壤样本归一化频率的方向系数 D_{SF} ,如式(6)所示,4 个样本的标定归一化测量分布如图 6 所示。

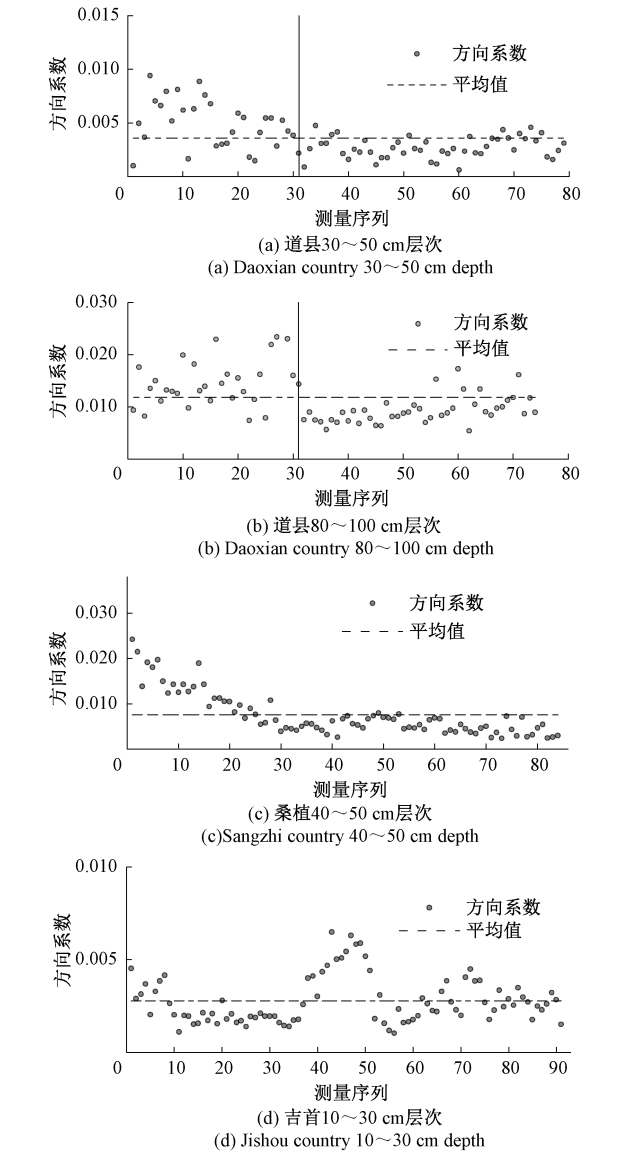
$$D_{SF} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SF_i)^2 - n\overline{SF}^2}{n-1}}$$

(7)

利用式(2)及表 2 中对应的标定方程,计算在每个方向上的体积含水率,得到经过标定后的体积含水率方向性误差如表 3 所示。

4.2 静态重复性误差分析

传感器套管由于加工工艺的限制,其内径并非严格一致,导致体积含水率方向性误差还与传感器和测量套管接触的紧密程度有关,从表 3 可以看出,测量套管的内



注:图 a、图 b 中黑色竖线为加装传感器固定环前后分割线
图 6 传感器测量归一化频率方向系数

Fig. 6 Directivity coefficient of normalized frequency

表 3 体积含水率方向性误差

Table 3 Directivity coefficient of volume water content

样本	最小值	最大值	平均	套管内径/mm
道县 30~50	3.04×10^{-5}	0.133 5	0.014 0	50.70
道县 80~100	0.000 4	0.221 0	0.047 8	51.11
桑植 40~50	0.000 2	0.134 8	0.027 1	50.81
吉首 10~30	5.06×10^{-5}	0.012 5	0.002 6	50.08

注:表中各量单位均为体积含水率%(cm³·cm⁻³)百分比。
径越大,测量静态重复性时转动传感器引起偏离越大,平均体积含水率方向性误差越大,最大值为 0.221% (cm³·cm⁻³),离散性较大,其对应在同一湿度点上 8 个体积含水率测量范围为 29.78%~39.20% (cm³·cm⁻³),差值为 9.42% (cm³·cm⁻³)。在实际使用中一般为 8 个传感器

安装在套管中,随着套管加长,可以预计测量的方向性误差能够进一步减少。

5 结 论

动态重复性测量标定 4 个样本平均 85.84% 的数据分布在偏差 ± 2.5 以内,平均不重复性为 2.81% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),传感器的测量重复性达到业务要求。原状土壤土柱标定还原了真实土壤的物理特性、结构和质地,保证了传感器安装结合紧密,至少在目前关于 FDR 土壤水分传感器未有统一的校准标准物质的情况下,能够作为站点安装传感器后定期校准的标准物质。

FDR 土壤水分传感器静态方向性误差相比是最少的,4 个样本平均为 0.023% ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),是实际测量中是一个可以忽略的因素。

本文重复性实验存在两个不足的地方:重复性试验一般要求进行正反行程的测量,由于样本在由干到湿需将供试土壤从几乎不含水状态逐步提高到土壤田间持水量乃至饱和持水量的水平,这个过程须保持土壤中的水分均匀增加,水分的分布不易控制,实现难度大。

由于每个动态过程测量过程约需进行 7 个月时间,本实验中每次的过程从 5 月开始至 12 月结束,尽管每个过程的测量时间段是年份相同的,要严格的消除每个过程之间的重复性差异应该将土壤样本置于恒温实验室中,如果土壤样本始终置于恒温环境下,各动态标定曲线之间的差异能够进一步减少。

实验样本土壤中水分的分布情况是一个需要特别关注的问题:传感器不管是在实际地下土壤中还是在实验室标定容器土壤中,土壤中的水分布并非均匀状态,即使在实际地下土壤中,垂直方向不同深度其质地和含水量有较明显的差异,在水平方向由于变异性,其含水量分布也并非均匀,因而传感器在实际土壤中测量的为一定范围内的平均情况。但实验室标定容器土壤与实际土壤的差别在于,土柱在高湿状态时,土壤能够与标定容器侧面紧密接触,随着水分的蒸发,由于土壤收缩,样本与容器侧面之间将出现缝隙,样本中的水分将从其侧面缝隙之间蒸发,与实际土壤相比实验样本土壤中的水分布将更加不均匀,而实际地下土壤是整个一体,并不会出现这种情况,根据本实验观测以及相关研究^[21-23],土壤体积含水率在 20% 左右出现明显的裂缝,即图 4、5 所示曲线下 1/3 左右,此时样本测量与实际土壤测量间将出现一定的差异,容器边缘裂缝是本实验无法克服的问题,实验室样本与实际土壤之间的定量差异是有待进一步解决的问题。根据电容式 FDR 土壤水分传感器的测量特性可知,越靠近传感器电极部分电场能量越集中,可以预计样本与容器侧面裂缝的影响与实际土壤相比应处于较小

的值。

参考文献

- [1] 刘蓓. 土壤含盐量和温度对 FDR 土壤水分传感器检测模型的影响研究[D]. 西安:西北农林科技大学, 2014.
LIU B. Detection model of FDR moisture content sensor affected by soil salinity and temperature[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2014.
- [2] 高磊,施斌,唐朝生,等. 温度对 FDR 测量土壤体积含水量的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 964-969.
GAO L, SHI B, TANG CH SH, et al. Experimental study of temperature effect on FDR measured soil volumetric water content[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 964-969.
- [3] SKIERUCHA W, WILCZEK A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10~500 MHz frequency range[J]. Sensors, 2010, 10(4): 314-329.
- [4] 池涛,李丙春,孜克尔·阿不都热合曼,等. 频率响应下的盐渍土介电特性及其含盐量估算[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 332-338.
CHI T, LI B CH, ZI KERR ABDURAHMAN, et al. Dielectric properties of soil under frequency response and its estimation of salinity[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2017, 34(3): 332-338.
- [5] 郭文川,宋克鑫,张鹏,等. 土壤温度和容重对频率反射土壤水分传感器测量精度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 136-143.
GUO W CH, SONG K X, ZHANG P, et al. Effect of temperature and bulk density on measurement precision of soil moisture sensor based on frequency domain reflectometry[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10), 136-143.
- [6] 王黎明,张雪芬,周旭辉,等. FDR 土壤水分传感器原状土壤标定方法研究[J]. 气象科技, 2016, 44(3): 347-353.
WANG L M, ZHANG X F, ZHOU X H, et al. Correction method of undisturbed soil measurement from FDR soil moisture sensor[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(3): 348-353.
- [7] 智永明,韩继伟,邓超,等. 基于原状土柱土壤水分传感器率定方法的研究[J]. 水文, 2016, 34(4): 48-52.
ZHI Y M, HAN J W, DENG CH, et al. Soil moisture sensor calibration method based on undisturbed soil column[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 34(4): 48-52.
- [8] 刘亮,路炳军,符素华,等. 东北黑土区 TDR 测定农田

- 土壤含水量的室内标定[J]. 中国水土保持学报, 2013, 11(6): 16-22.
- LIU L, LU B J, FU S H, et al. Calibration of TDR for soil moisture content at farmland of black soil region in northeastern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(6): 16-22.
- [9] 王黎明, 周旭辉, 雷永恒. 温度对 FDR 土壤水分传感器测量影响 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 47-54.
- WANG L M, ZHOU X H, LEI Y H. Temperature effect on FDR soil moisture sensor measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 47-54.
- [10] RAO B H, SINGH D N. Moisture content determination by TDR and capacitance techniques: A comparative study[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2011, 4(6): 132-137.
- [11] MINET J, LAMBOT S, DELAIDE G, et al. Generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination[J]. Vadose Zone, 2010, 9: 1063-1072.
- [12] 高志平, 刘卫涛, 赵燕东. 基于电容法的非接触式土壤水分传感器设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 185-191.
- GAO ZH P, LIU W T, ZHAO Y D. Design and performance analysis of soil moisture sensor based on capacitance technology [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machine, 2016, 47(11): 185-191.
- [13] 中国气象局综合观测司. 自动土壤水分观测规范 [G]. 北京: 中国气象局, 2010.
- Department of Integrated Observations of China Meteorological Administration. Specification for automatic soil moisture observation [G]. Beijing: China Meteorological Administration, 2010.
- [14] 刘亚军, 祝连庆, 杨德斌, 等. 基于空气湿度的土壤含水量估计模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2582-2587.
- LIU Y J, ZHU L Y, YANG D B, et al. Study of estimation model of the soil moisture estimation model based on air humidity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2582-2587.
- [15] 杨连乔, 陈伟, 阙秀福, 等. 基于指数拟合的半导体瞬态热学测试分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2421-2425.
- YANG L Q, CHEN W, QUE X F, et al. Transient thermal analysis of semiconductor based on exponential fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2421-2425.
- [16] 裴晶, 马颖, 刘春. 多项式拟合法在周跳探测中的研究与改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1828-1834.
- PEI J, MA H, LIU CH. Research and improvement of polynomial fitting method in cycle slip detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1828-1834.
- [17] 张颖, 行鸿雁, 张旭, 等. 土壤水分传感器探头的仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 55-65.
- ZHANG Y, XING H Y, ZHANG X, et al. Simulation analysis of soil moisture sensor probe [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 55-65.
- [18] 黄云志, 郑亮, 汪蓓蓓. 多波长边缘电场传感器介电测量系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 853-859.
- HUANG Y ZH, ZHENG L, WANG B B. Research on permittivity measurement for multi-wavelength fringing electric field sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 853-859.
- [19] 王睿怀, 高鹤鸣. 平面阵列电容式固体颗粒速度测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 133-139.
- WANG R H, GAO H M. Study on planar array capacitance measurement for solid particle velocity [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 133-139.
- [20] 赵燕江, 房玉康, 张永德. 基于有限元的套管柔性针穿软组织弯曲建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 202-211.
- ZHAO Y J, FANG Y K, ZHANG Y D. Research on soft tissue bending modeling of flexible trocar puncture based on finite element method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 202-211.
- [21] 李翠娜, 刘天琦, 吴东丽. 自动土壤水分观测资料异常数据检测方法[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1094-1102.
- LI C N, LIU T Q, WU D L. Anomaly data detection method for in situ automatic soil moisture [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1094-1102.
- [22] 冯杰, 解河海, 黄国如, 等. 土壤大空隙流机理及产汇流模型[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- FENG J, XIE H H, HUANG G R, et al. Mechanism of Soil Large Void Flow[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [23] 张展羽, 朱文渊, 朱成立, 等. 农田土壤表面干缩裂缝的随机分布统计特征[J]. 农业工程学报, 2013,

29(16):119-124.

ZHANG ZH Y, ZHU W Y, ZHU CH L, et al. Statistical characteristics of random distribution of shrinkage cracks on farmland soil surface [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (16): 119-124.

作者简介



王黎明, 2003 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为湖南省气象技术装备中心高级工程师, 主要研究方向为大气探测。

E-mail: 234387817@qq.com

Wang Liming received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2003, Now he is a senior engineer of Hunan Meteorological

Technology & Equipment Center. His research interest is meteorological observation.



常硕(通信作者), 2011 年于中国农业大学获得学士学位, 2012 年于英国伯明翰大学获得硕士学位, 现为湖南省气象技术装备中心综合气象观测高级工程师, 主要研究方向为综合气象观测。

E-mail: 232808834@qq.com

Chang Shuo(Corresponding author) received B. Sc. degree from China Agricultural University in 2011 and M. Sc. degree from the University of Birmingham in 2012. She is a comprehensive meteorological observation senior engineer of Hunan Meteorological Technology & Equipment Center. Her main research interest includes comprehensive meteorological observation.