

张召召, 雷金洋. 基于频域反射的环式农田土壤水分传感器的开发与试验验证[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 265-271. ZHANG Z Z, LEI J Y. Laboratory calibration and field precision measurement of FDR tubular moisture sensor[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 265-271. (in Chinese)

# 基于频域反射的环式农田土壤水分传感器的开发与试验验证

张召召<sup>1</sup>, 雷金洋<sup>2,3</sup>

(1. 河北省农村供水总站, 石家庄 050011; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;  
3. 河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定 071001)

**摘要:** 针对农田灌溉土壤含水量的监测需求, 设计开发一种基于频域反射(frequency domain reflectometry, FDR)法的环式土壤水分传感器, 并选取砂土、砂壤土、粉壤土和黏土 4 种类型的土壤对 FDR 传感器进行实验室标定。标定过程中将土壤体积含水量 $\theta_v$ 与 FDR 传感器电路的振荡频率 $S_F$ 采用指数函数 $\theta_v = aS_F^b$ 进行拟合来确定  $a$ 、 $b$  参数, 从而建立 $S_F$ 与 $\theta_v$ 对应关系。实验室标定结果表明: 当 FDR 传感器安装深度为 15 cm 时, 振荡频率 $S_F$ 与土壤体积含水量 $\theta_v$ 的拟合效果较好; 在 5 cm 深度处, FDR 传感器离土表距离较小, 电磁波受到表层空气的干扰, 导致数据测量不稳定, 两者数据拟合效果稍差。在此基础上, 将在实验室标定后 FDR 传感器安装于玉米田进行野外精度检定, 与取土烘干法对比分析发现 FDR 传感器可以较好地反映土壤水分的动态变化, 且精度符合行业标准的

**关键词:** 土壤水分传感器; 频域反射; 土壤含水量; 烘干法; 标定

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0028

水资源短缺是华北地区经济发展面临的突出问题<sup>[1-3]</sup>。发展节水农业是缓解华北地区水资源供需矛盾、促进区域可持续发展的重要措施<sup>[4-7]</sup>。土壤水是作物所需水分的主要来源, 土壤水分的含量变化直接关系到整个作物的生长及果实的发育<sup>[8-18]</sup>。因此, 如何准确掌握土壤水分的动态变化, 从而通过灌溉控制为作物根区提供适宜的水土环境, 一直是国内外学者关注的焦点。

国内外自动土壤水分观测的仪器有很多种, 利用土壤的介电特性来测量土壤含水量是近年来常用的方法, 其中频域反射(frequency domain reflectometry, FDR)法和时域反射(time domain reflectometry, TDR)法都属于基于土壤介电特性的土壤水分测量方法, 由于其相对稳定、简便, 在农业、水利等领域得到了广泛应用<sup>[19]</sup>。但需要特别指出的是, 不同地区的土壤质地、土壤剖面分层结构、土壤含盐量及有机质含量等各不相同, 导致土壤介电常

数各不相同。因此, 对于不同的土壤, 为获得较高的测量精度, 不能使用通用的标校公式, 需要对具体的土壤类型进行标定及数据校准, 以获得准确的土壤含水量。

当前国内田间试验观测所用的水分观测仪主要是澳大利亚、荷兰等一些仪器公司的产品, 这些仪器并不对普通用户开放其底层的传感器率定程序, 导致其在不同的土壤类型中使用水分监测精度差别很大。另外, 这些水分观测仪器的设计通常考虑水土保持、沙漠监测、农业、水利等多行业的通用性, 水分观测率定所用的区间跨度较大, 也是影响其率定精度的原因之一。

农业灌溉通常需要将田间土壤含水量控制在凋萎系数至饱和含水量的小范围区间, 本文针对农业灌溉的控制需求开发一种基于 FDR 原理的环式土壤水分传感器, 并选取农作物对土壤水分的利用区间(凋萎系数至饱和含水量)进行率定, 共设置 7 个

收稿日期: 2023-07-03 修回日期: 2023-09-13 网络出版时间: 2023-09-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230925.1645.002>

基金项目: 农业灌溉水源置换成效监测与建设项目(HBAT02312301007-CG); 水利部水利技术示范项目(SF-202208)

作者简介: 张召召(1984—), 男, 河北石家庄人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: 304575705@qq.com

不同体积含水量的土壤试样,采用体积含水量进行率定和检验,以期得到准确的率定关系式,用于指导农业的灌溉。

### 1 FDR 土壤水分传感器的设计与开发

土壤体积含水量与其介电常数之间存在着确定性的单值多项式关系,通过测量土壤的介电常数即可实现精确测定土壤的体积含水量<sup>[20-24]</sup>。FDR 土壤水分观测传感器,采用 LC (其中 L 为电感、C 为电容)电路的振荡,根据电磁波在不同介质中振荡频率的变化来测定介质的介电常数变化,进而通过

一定的对应关系反演出土壤水分状况(公式 1)<sup>[22-23]</sup>。基于上述 FDR 原理设计的土壤水分传感器主要由一对圆形金属环组成一个电容,其间的土壤充当电介质,电容与起振电路(MC1648 压控振荡器芯片)组成一个中心频率 1 GHz 调谐电路(图 1 和图 2)。传感器电容量与两极间被测介质的介电常数成正比关系。由于水的介电常数比一般介质的介电常数要大得多,所以当土壤中的水分增加时,其介电常数相应增大,测量时传感器给出的电容值也随之上升,相应的传感器的测量频率也会发生变化。

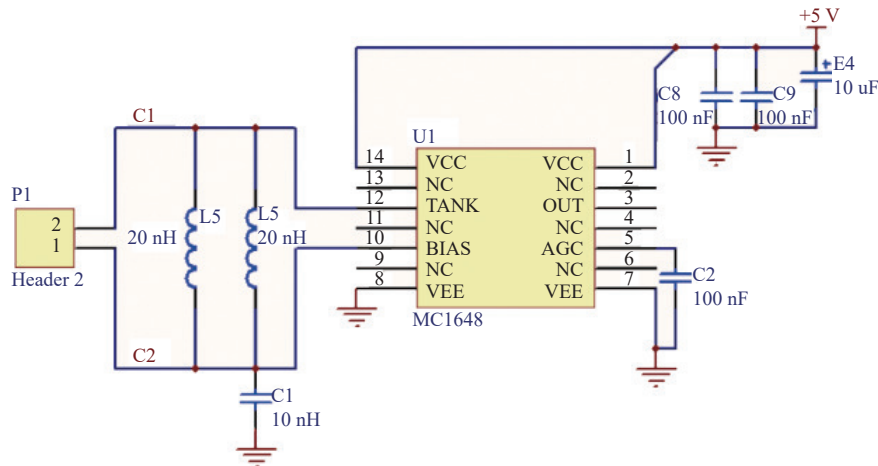


图 1 FDR 环式土壤水分传感器电路原理

Fig. 1 Circuit principle of FDR ring type soil moisture sensor

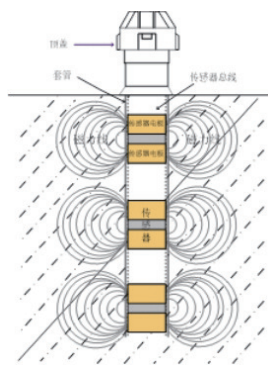


图 2 FDR 环式土壤水分传感器测量原理

Fig. 2 Measurement schematic diagram for FDR ring type soil moisture sensor

利用土壤水分传感器在不同土壤含水量条件下的振荡频率  $S_F$  (scaled frequency, 归一化频率) 来反映土壤体积含水量  $\theta_v$ , 两者的关系可以表述为

$$\theta_v = aS_F^b \quad (1)$$

式中:  $\theta_v$  为土壤体积含水量, %;  $S_F$  为振荡电路的归一化频率, %;  $a$ 、 $b$  为无量纲参数。

式(1)中的  $S_F$  计算公式为

$$S_F = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (2)$$

式中:  $F_a$  为仪器放置在空气中测得的电容率计数值, Hz;  $F_w$  为仪器放置在水中测得的电容率计数值, Hz;  $F_s$  为仪器安装于土壤中所量测得到的振荡频率(不同土壤含水量的  $F_s$  不同), Hz。

### 2 FDR 传感器的实验室标定与田间精度检验

#### 2.1 传感器实验室标定

为确定传感器振荡电路频率与土壤含水量的函数关系式中的参数  $a$  和  $b$ , 在实验室内制备了标准的土壤含水量土样。试验所用的土壤试样采自河北省保定市望都县冬小麦田 0~100 cm 深度的混合土样, 经过筛分法和比重计法结合实验, 确定土壤各组分含量分别为砂粒 75%、粉粒 15%、黏粒 10%。依据美国农业部制定的美国土壤质地分类三角形进行分类, 确定土壤类型为砂壤土。结合土壤类型及各组分含量, 采用美国农业局发布的土壤水分特

征分析软件(Version 6.02.74)初步估算出该土壤的凋萎系数(体积含水量)为 9.7%, 饱和含水量(体积含水量)为 33.4%。

在实际农业灌溉过程中,田间土壤含水量通常在凋萎系数至饱和含水量之间变化。根据上述初步估算的土壤凋萎系数至饱和含水量区间范围,为保证传感器的率定精度,试验过程中将用于率定的试验土样的体积含水量范围控制在 10%~40%。土样制备过程中,首先把 FDR 管式水分观测仪固定在高 40 cm,直径 40 cm 的塑料桶正中间,然后依次将土样分层装入容器并均匀击实,装填密度为 1.37 g/cm<sup>3</sup>。通过控制土样中加入蒸馏水的量,将用于标定样本的土壤体积含水量设置了 14%、16%、21%、27%、32%、35% 和 39% 共 7 个梯度。加水配置完成的土样,静置平衡 12 h。

通过土壤中 5 cm 和 15 cm 的深度处的 FDR 水分传感器读取土样的对应深度处的振荡频率  $F_s$  的值。结合公式(2),就可以计算得到 LC 振荡电路的归一化频率  $S_F$ 。

采用 FDR 传感器测定完毕后,再通过取样铲和环刀在各样品中逐个人工取样,用烘干法获得对应传感器埋设深度处(5 cm、15 cm)的土壤体积含水量  $\theta_v$ 。再将取土烘干法获得的土壤含水量与实测的传感器频率值进行回归分析,建立土壤含水量  $\theta_v$  与归一化频率  $S_F$  的对应关系曲线。将实测的土壤含水量  $\theta_v$  和频率  $S_F$  绘制散点图,并用指数函数进行拟合运算,可以用拟合的指数曲线来近似代替土壤含水量和仪器振荡频率的函数关系,并通过决定系数  $R^2$  来判断拟合效果。

在实际的农业生产中,管理者通常以田间持水率和凋萎系数作为灌溉的上下限参考阈值,因此,土壤曲线标定时,对体积含水量 10%~40% 的范围进行了集中标定。

由图 3 可以看出,用 15 cm 处实测的土壤体积含水量和频率数据可以拟合出一条指数曲线  $\theta_v = 0.4984 S_F^{4.0384}$ ,  $R^2=0.8764$ , 说明频率  $S_F$  与水分值的相关性很好,用此曲线得到的参数  $a$ 、 $b$  来标定仪器( $a=0.4984$ ,  $b=4.0384$ ),能很好地反映土壤水分变化状况。相比之下,用 5 cm 处实测的土壤体积含水量和频率数据难以拟合出一个合适的指数曲线(图 4)。其原因可能是在 5 cm 的深度处,传感器离土表距离较近,传感器电极发射的电磁波受到表层空气的干扰,导致数据测量不稳定。

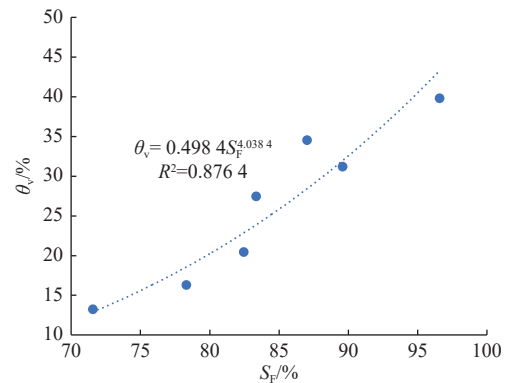


图 3 15 cm 深度处土壤体积含水量  $\theta_v$  与管式水分仪  $S_F$  值拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of soil volumetric moisture content  $\theta_v$  at a depth of 15 cm and  $S_F$  value of tubular moisture meter

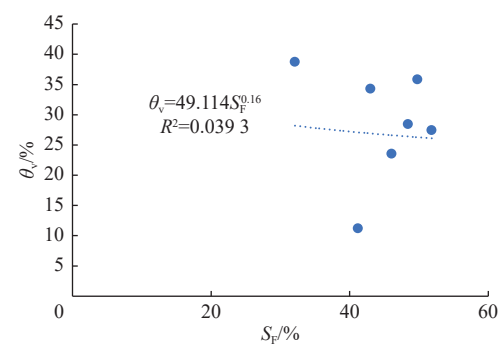


图 4 5 cm 深度处土壤体积含水量  $\theta_v$  与管式水分仪  $S_F$  值拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of soil volumetric moisture content  $\theta_v$  and  $S_F$  value of tubular moisture meter at 5 cm depth

## 2.2 传感器精度实验室检测

针对 15 cm 深度处的传感器,为进一步验证通过试验建立的  $S_F$  与土壤水分间函数关系的精度,再次制备了体积含水量目标值为 13%、16%、20%、31% 的土样作为验证标准土样(因试验误差,表 1 中烘干法实测值与目标值存在微小差异)。采用烘干法求得不同含水量水平下土样的体积含水量,然后和 FDR 传感器观测数据进行误差分析。

FDR 传感器及烘干法测量的数据见表 1,目标值为 13%、16%、20% 和 31% 的标准土样对应的体积含水量绝对误差的平均绝对值分别为 1.02%、2.22%、2.43%、1.46%。绝对误差的平均绝对值都不大于 2.5%,符合《自动土壤水分观测仪》(QX/T 567—2020)<sup>[21]</sup> 的要求,说明传感器准确性检验合格。

## 2.3 传感器田间精度检验

土壤的介电常数受到土壤孔隙的数量及大小、土壤水电导率(或孔隙水电导率)和土壤颗粒、土壤酸碱度等诸多因素的影响。为进一步验证所开发的 FDR 传感器的精度,在实验室标定的基础上,进一步开展田间实际使用条件下的精度验证。

表 1 FDR 传感器及烘干法测量的数据

Tab. 1 Measurement data of FDR sensor and drying method

设计 $\theta_v/\%$	$F_s/\text{Hz}$	$F_w/\text{Hz}$	$F_d/\text{Hz}$	$S_p/\%$	机测 $\theta_v/\%$	烘干 $\theta_v/\%$	绝对误差 $/\%$
13	10 776	8 448	9 115	71.34	12.75	12.16	0.59
	10 776	8 448	9 104	71.81	13.09	14.26	-1.17
	10 776	8 448	9 104	71.81	13.09	14.26	-1.17
	10 776	8 448	9 104	71.81	13.09	14.26	-1.17
16	10 776	8 448	8 954	78.26	18.52	16.62	1.90
	10 776	8 448	8 954	78.26	18.52	16.28	2.24
	10 776	8 448	8 951	78.39	18.65	16.28	2.37
	10 776	8 448	8 951	78.39	18.65	16.28	2.37
20	10 776	8 448	8 856	82.47	22.89	20.04	2.85
	10 776	8 448	8 856	82.47	22.89	20.87	2.02
	10 776	8 448	8 856	82.47	22.89	20.46	2.43
	10 776	8 448	8 856	82.47	22.89	20.46	2.43
31	10 776	8 448	8 689	89.64	32.06	29.66	2.40
	10 776	8 448	8 691	89.64	31.93	31.37	0.56
	10 776	8 448	8 690	89.64	31.99	30.56	1.43
	10 776	8 448	8 690	89.64	31.99	30.56	0.05

田间验证试验在保定市灌溉试验站进行,保定市灌溉试验站位于冀中平原,望都县城西 1 km,北纬 38°42'9",东经 115°6'57",海拔高程 51.0 m。地下水埋藏较深,其向上补给量可忽略不计。年平均气温 11.8 °C,年平均降雨量约为 508.9 mm,多年平均蒸发量 1 709.56 mm,年平均日照时数 2 677.8 h,无霜期 189 d。试验小区面积为 12 m×5 m=60 m<sup>2</sup>,种植的作物为玉米;灌水方式采用管灌,水表控制灌水。FDR 传感器埋在灌区小区 15 cm 和 60 cm 两个深度处进行土壤含水量观测,并同时采用取土烘干法进行常规观测。

在玉米生育期内,埋设深度 15 cm 和 60 cm 处的 FDR 传感器与取土烘干法的土壤含水量观测数据分别见图 5 和图 6。由图 5 和图 6 可知,FDR 传感器观测值与人工观测值具有较好的一致性。在 15 cm 处的体积含水量的 FDR 观测值与取土烘干法的绝对误差的绝对值为 0.5%,60 cm 处体积含水量绝对误差的绝对值为 1.1%,均不大于 5%,符合《自动土壤水分观测仪》(QX/T 567—2020)对野外观测仪器的精度要求<sup>[21]</sup>。这说明当土壤性质相同时,采用实验室内土柱试验的率定参数  $a$  和  $b(a=0.498 4, b=4.038 4)$  时,即使不再进行田间原位标定,FDR 传感器依然可以较好地反映出田间土壤水分的动态变化。

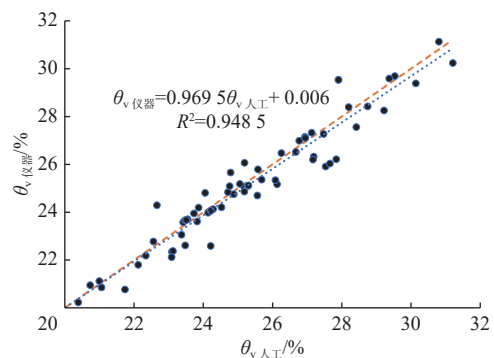


图 5 15 cm 深度处 FDR 传感器观测值与人工观测值  
Fig. 5 FDR sensor observations and manual observations at a depth of 15 cm

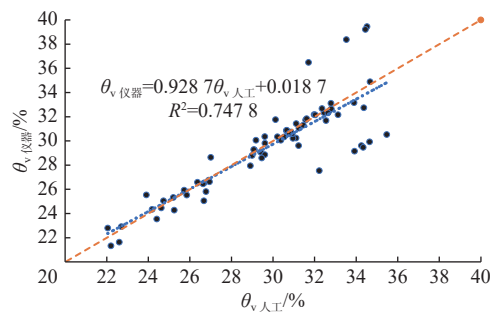


图 6 60 cm 深度处 FDR 传感器观测值与人工观测值  
Fig. 6 FDR sensor observations and manual observations at a depth of 60 cm

为进一步检验 FDR 传感器在不同土壤类型中的测量精度,按照上述方法,分别选取了砂土、黏土、粉壤土(土壤类型依据美国土壤质地分类三角形确

定)进行实验室率定及传感器的田间试验验证,结果见表2。由表2可知,FDR传感器观测值与人工观测值具有较好的一致性。在砂土、黏土、粉壤土中体积含水量的FDR观测值与取土烘干法人工观

测值的绝对误差的平均绝对值分别为0.9%、0.8%和0.6%,均不大于5%,符合《自动土壤水分观测仪》(QX/T 567—2020)的对野外观测仪器的精度要求<sup>[21]</sup>。

表2 不同土壤验证结果

Tab. 2 Validation results for different soils

土壤类型	试验室率定	回归方程(田间验证)	绝对误差的平均绝对值/%	是否符合精度要求
砂土	$\theta_v = 0.396 2S_F^{4.536 7}$ $R^2 = 0.852 4$	$\theta_{v\text{测量}} = 0.912 5\theta_{v\text{人工}} + 0.021 5$ $R^2 = 0.812 5$	0.9	符合
黏土	$\theta_v = 0.423 6S_F^{4.253 3}$ $R^2 = 0.897 2$	$\theta_{v\text{测量}} = 0.932 7\theta_{v\text{人工}} + 0.017 8$ $R^2 = 0.892 3$	0.8	符合
粉壤土	$\theta_v = 0.576 2S_F^{3.526 1}$ $R^2 = 0.901 5$	$\theta_{v\text{测量}} = 0.957 9\theta_{v\text{人工}} + 0.010 3$ $R^2 = 0.954 1$	0.6	符合

为获得相对较高的土壤含水量观测精度,在FDR传感器投入使用之前,针对不同的土壤类型进行 $a$ 、 $b$ 参数的率定是十分必要的。郑文刚等<sup>[22]</sup>、陈海波等<sup>[23]</sup>分别针对不同的土壤类型进行了FDR土壤传感器的率定研究,认为由于土壤的介电常数受到土壤质地、含盐量、土壤有机质、土壤温度等诸多因素的影响,在待测地块采集土样并在实验室制备土壤含水量标样的方法,可以大幅提高标定的效率。王黎明等<sup>[24]</sup>为获得准确的土壤水分传感器标定参数,利用野外的大型原状土壤为样本,在实验室同时进行人工称重观测和FDR传感器自动对比观测,对传感器进行了标定,克服了原来田间订正存在的体积含水量变化振幅小、体积含水量与降水等土壤实际墒情呈负相关、体积含水量超出阈值3种不合理状态,通过实验室标定参数,进一步提高了观测精度。这种采用大型原状土进行实验室标定的方式比传统的含水量标样制备方法更具优势,但是对试验条件的要求相对较高。

由于试验条件的限制,本文在FDR传感器 $a$ 、 $b$ 参数率定过程中采用了从待测田块采集的土壤进行率定试验样本的制备,而并未采用原状土,但是仍然获得了较好的田间验证精度。这可能与待测田块土壤性质在垂直方向上一致性较好有关,尽管标样制备过程中将不同深度的土样进行了混合,但是由于土壤质地、有机质等含量相近,因此实验室采用混合土样的方式率定的关系式在田间观测过程中依然具有较好的精度。

### 3 结论

针对农业灌溉的需求,开发一种基于FDR原理

的环式土壤水分传感器,并在室内和野外进行精度检验。通过在实验室土柱试验的传感器检测发现,传感器的精度受其在土壤中的埋设深度的影响。当传感器的埋设深度在离土样表面15 cm处,FDR传感器的测量数据和烘干法的体积含水量拟合曲线的决定系数 $R^2=0.876 4$ ,两者拟合的效果较好。在离土样表面5 cm处,对FDR数据和烘干法的数据进行标定,拟合的曲线效果不理想,主要是由于传感器离土表距离较小,电磁波受到表层空气的干扰,数据测量不稳定。为保证数据的可靠性,实际应用中建议环式土壤水分传感器用于土表15 cm以下深度的土壤墒情监测。

通常田间标定要比实验室标定繁琐,所需要的时间也远多于实验室标定。本文开发的FDR传感器采用从田间待测小区取土制备的土样进行参数 $a$ 、 $b$ 的率定后,其田间体积含水量观测值与取土烘干法的误差范围为[0.5%, 1.1%],符合《自动土壤水分观测仪》(QX/T 567—2020)的精度要求。因此,可采用在待测田块采土样进行实验室标定的方法来提高标定效率。

#### 参考文献:

- [1] 张欣,张保祥,李冰,等.基于用水定额的区域节水评价方法及应用[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 95-106. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0011.
- [2] 赵维岭,纪义虎,左其亭,等.区域水资源供需平衡指数分析方法:以引沁灌区为例[J].*灌溉排水学报*, 2023, 42(3): 128-135. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2021587.
- [3] 黄峰,杜太生,王素芬,等.华北地区农业水资源现状和未来保障研究[J].*中国工程科学*, 2019, 21(5): 28-

37. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.05.024.
- [4] 陈飞, 羊艳, 史文龙, 等. 河北省地下水超采综合治理农业措施压采效果与技术经济性分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 1019-1026. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0101.
- [5] 李慧, 丁跃元, 李原园, 等. 新形势下我国节水现状及问题分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 202-208. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0027.
- [6] 王小亚, 孔锋, 刘秋荣. 新时期我国农业综合风险防范及提升路径研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(12): 1-10. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.12.001.
- [7] 赵长龙, 邢英梅, 董心亮, 等. 河北低平原区坑塘水水量水质变化特征及影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 900-909. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0094.
- [8] 段伟娜, 徐家屯, 曹玉鑫, 等. 夏玉米不同生育期亏缺-复水对蒸发蒸腾和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 18-26. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2021388.
- [9] 吴梦茜, 李桂玲, 蔡甲冰, 等. 玉米浅埋滴灌工程综合效益及对地下水位影响分析: 以科尔沁区为例[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(5): 490-498. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200070.
- [10] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 94-100. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.012.
- [11] 吴文勇, 龚时宏, 李久生, 等. 现代灌溉水肥调控原理与技术研究进展[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(1): 81-89. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200122.
- [12] 张瑞, 李鹏展, 王力. 黄土旱塬区土壤水分状况与作物生长、降水的关系[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 359-369. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201902.015.
- [13] 党毅, 王维, 张永娥, 等. 坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(5): 106-118. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20220220.
- [14] 何晓帆, 田丽慧, 汪海娇, 等. 高寒沙地沙棘群落的土壤水分时空变异特征[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 23-33. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230420.001.
- [15] 张梦雅, 马育军, 谢婷. 青海湖流域生长季土壤水分空间分布特征研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 85-95. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.03.007.
- [16] 秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 36-42. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0003.
- [17] 范习超, 秦京涛, 徐磊, 等. 大型灌区节水水平评价指标体系构建与实证[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 99-107. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.20.011.
- [18] 王磊, 樊廷录, 闫妍, 等. 不同覆盖栽培对旱作冬小麦土壤水分、产量和品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 248-257. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.03.032.
- [19] 冯娜, 张维江, 李娟, 等. 覆膜集雨渗灌系统在半干旱区土壤水分监测中的应用[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 187-192. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.027.
- [20] 谢鹏宇, 刘泽鑫. 土壤水分测量原理与技术方法研究[J]. *现代农业科技*, 2020(23): 166-168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2020.23.066.
- [21] 龚振平. 土壤学与农作学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [22] 全国气象仪器与观测方法标准化技术委员会, 自动土壤水分观测仪: QX/T 567—2020[S]. 北京: 中国气象局.
- [23] 郑文刚, 罗晨云竹, 杨凤茹, 等. 灌溉水质对FDR土壤水分传感器的性能影响研究[J]. *节水灌溉*, 2022(2): 82-88. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2022.02.014.
- [24] 陈海波, 陈涛, 胡锦涛, 等. FDR型土壤水分仪的温度补偿设计与应用[J]. *节水灌溉*, 2022(8): 24-29.
- [25] 王黎明, 常硕, 侯海军, 等. FDR土壤水分传感器测量重复性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(1): 231-238. DOI: 10.13382/j.jemi.B2205512.

## Laboratory calibration and field precision measurement of FDR tubular moisture sensor

ZHANG Zhaozhao<sup>1</sup>, LEI Jinyang<sup>2,3</sup>

(1. Hebei Province Station for Irrigation, Drainage and Water Supply Technique Service, Shijiazhuang, 050011, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

**Abstract:** Dynamic monitoring of soil moisture is of great significance for guiding timely and appropriate

agricultural irrigation. Currently, the water content measurement instruments used in domestic field experiments are mainly imported from instrument companies in Australia, the Netherlands, and other countries. However, these instruments do not open the bottom-level sensor calibration program to ordinary users, resulting in significant differences in water monitoring accuracy when used in different soil types. Frequency domain reflectometry (FDR) is the most widely used soil moisture measurement method in China. In response to the monitoring needs of soil moisture in agricultural irrigation fields, a ring-shaped soil moisture sensor based on the FDR method was designed and developed. The function relationship between soil volume moisture content and FDR sensor circuit oscillation frequency was established by preparing standard soil samples in the laboratory, and the accuracy of the sensor was verified through field measurement data.

Seven treatments were set up in the indoor experiment, with soil volume moisture content of 13.21%, 16.28%, 20.46%, 27.45%, 31.20%, 34.54%, and 39.80%, respectively. FDR sensors were installed at two depths of 5 cm and 15 cm from the soil surface, and the oscillation frequency  $S_f$  of the sensor and the soil volume moisture content  $\theta_v$  obtained by the drying method were fitted using the exponential function relationship  $\theta_v = aS_f^b$  to determine the coefficients  $a$  and  $b$  corresponding to the sensor oscillation circuit. The field validation experiment was conducted at the irrigation test station in Baoding. FDR sensors were buried at depths of 15 cm and 60 cm in the irrigation district for soil moisture observation, and conventional observations were conducted using the soil drying method at the same time.

The laboratory calibration results showed that at a depth of 15 cm, the fit between the oscillation frequency  $S_f$  and the soil volume moisture content  $\theta_v$  was good, and the  $R^2$  value of the fitting curve was 0.876 4. In contrast, at a depth of 5 cm, the data measurement was unstable due to the small distance between the FDR sensor and the soil surface, and the electromagnetic wave was interfered with by the surface air, resulting in slightly worse fitting results. The field validation experiment results showed that the FDR soil moisture sensor calibrated with  $a$  and  $b$  coefficients prepared in the laboratory with soil samples can accurately reflect the actual soil moisture content ranging from the crop wilting coefficient to the soil saturation moisture content, and can be used for guidance of precision irrigation.

In response to the needs of agricultural irrigation, a ring-shaped soil moisture sensor based on the FDR principle was developed, and its accuracy was tested in the laboratory and field. The laboratory soil column test of the sensor found that the accuracy of the sensor is affected by the burial depth in the soil. When the burial depth of the sensor is 15 cm from the soil sample surface, the  $R^2$  value of the fitting curve between the FDR sensor measurement data and the volume moisture content obtained by the drying method is 0.876 4, and the fitting effect is better. At a depth of 5 cm from the soil sample surface, the fitting curve effect between FDR data and drying method data is not ideal, mainly because the FDR sensor is too close to the soil surface, and the electromagnetic wave is interfered with by the surface air, resulting in unstable data measurement. To ensure the reliability of the data, it is recommended that the ring-shaped soil moisture sensor be used for soil moisture monitoring below 15 cm from the soil surface in practical applications. Field calibration is usually more cumbersome than laboratory calibration, and requires much more time than laboratory calibration. The FDR sensor developed is calibrated with soil samples prepared from the field measurement area, and its observed soil volume moisture content and the error range of the soil drying method are [0.5%, 1.1%], which meets the accuracy requirements of the "Automatic Soil Moisture Observation Instrument" (QX/T 567-2020). Therefore, the method of laboratory calibration by taking soil samples in the measurement field can be used to improve the calibration efficiency.

**Key words:** soil moisture sensor; FDR; soil moisture content; drying method; calibration