2024年10月
第43卷 第10期

DOI:10.19652/j.cnki.femt.2406232

多类型土壤含水率传感器的完备标定方法*

王涵一[1,2] 廖爱民[1,3] 方国华[2] 林 锦[1,3]

(1.南京水利科学研究院滁州综合水文实验基地 滁州 239080;2.河海大学水利水电学院 南京 210024;
3.南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室 南京 210029)

摘 要:针对当前土壤含水率标定研究中缺乏统一方法和标准的问题,研发了一套完备的土壤含水率传感器标定方法和装置,以提高土壤含水率测量准确性。选取了6种不同类型的土壤含水率传感器,并在实验室中制造了标准土柱系列。通过与烘干法获得的标准值进行比较,采用多种拟合线型来建立传感器数据与标准值之间的关系,并对传感器测量值进行订正。实验结果表明,制定的土壤含水率传感器标定方法和装置能够有效地标定不同类型的传感器。研究发现,三次项曲线是土壤含水率传感器标定最适合的标定公式。所有传感器在经过标定后测量准确性都有显著提升,其中SoilVUE10(0.5和1 m)在整个体积含水率范围内测量精度最高,$R^2>0.99$。基于传感器的适用性分析,推荐在野外应用中监测表层土壤时使用标定后的针式传感器,监测土壤剖面时采用标定后的螺纹杆传感器。研究不仅规范了标准土柱的制作方法,提高了实验室环境下土壤含水率传感器的测量准确性,同时也为田间条件下选择合适的土壤含水率传感器提供参考。

关键词:标定方法;土壤含水率;传感器;标准土柱;比测;适用性分析

中图分类号:TP212.9;TN011 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:460.40

Complete calibration method for multiple types of soil water content sensors

Wang Hanyi[1,2] Liao Aimin[1,3] Fang Guohua[2] Lin Jin[1,3]

(1. Chuzhou Scientific Hydrology Laboratory, Nanjing Hydraulic Research Institute, Chuzhou 239080, China;
2. School of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Institute of Water Resources Science, Nanjing 210029, China)

Abstract: In view of the lack of unified methods and standards in the current research of soil moisture content calibration, this paper has developed a complete calibration method and device of soil moisture content sensor to improve the accuracy of soil moisture content measurement. Six different types of soil moisture content sensors were selected and standard soil column series were manufactured in the laboratory. By comparing with the standard value obtained by drying method, the relationship between the sensor data and the standard value is established by using a variety of fitting lines, and the measured value of the sensor is corrected. The experimental results show that the calibration method and device of soil moisture content sensor can effectively calibrate different types of sensors. It is found that cubic curve is the most suitable calibration formula for soil moisture content sensor. The measurement accuracy of all sensors improved significantly after calibration, with SoilVUE10 (0.5 and 1 m) having the highest measurement accuracy over the entire volume water content range, with $R^2>0.99$. Based on the applicability analysis of the sensor, it is recommended to use the calibrated needle sensor when monitoring the surface soil and the calibrated threaded rod sensor when monitoring the soil profile in field applications. This study not only standardizes the production method of standard soil column, improves the measurement accuracy of soil moisture sensor in laboratory environment, but also provides a reference for selecting suitable soil moisture sensor in field conditions.

Keywords: calibration method; soil moisture content; sensor; standard soil column; compare and measure; applicability analysis

收稿日期:2024-07-31

* **基金项目**:国家重点研发计划项目(2023YFC3206303-1)、国家自然科学基金(91847301,92047203)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y522017)资助

0 引 言

土壤水分是衡量土壤物理特性的关键指标，对于研究土壤性质和分析土壤状况至关重要。在水循环过程中，土壤水分扮演着重要角色，并受降水、温度、植被覆盖、土壤类型和地形等多种因素的影响[1-2]。因此，了解和有效管理土壤水分对于实现水资源管理、可持续农业、保护生态环境及提高农作物产量等方面都具有重要意义[3-4]。目前，测量土壤水分的方法众多，分为直接法和间接法两大类。其中，烘干法作为直接法，是最经典且精确的标准测量方法。间接法包括射线法、遥感法、中子法、核磁共振法、电阻法和介电特性法等[5-6]，这些方法因其各自特点，在不同领域得到一定应用，以满足对土壤水分测量的不同需求。随着环境变化和对实验结果精度要求的提高，越来越多的研究需要对土壤水分进行原位、精确和连续的监测。为此，出现了大量基于时域反射法(time domain reflectometry，TDR)和频域反射法(frequency domain reflectometry，FDR)为原理的土壤含水率传感器[7]。针对不同原理的土壤含水率传感器，已有国内外学者进行了大量研究，例如，在 TDR 法方面，在特定条件下，土壤含水率传感器测量土壤水分不受质地、容重和温度等环境因素的影响[8]。但在标定过程中，容重过大或过小都会对测量结果产生影响[9-10]；土壤黏粒含量的增加会降低介电常数和土壤含水率[11-12]，但当黏粒含量超过 20%时，传感器测量体积含水率的精度有所提高[13]。在 FDR 法方面，随着温度升高，介电常数增大，导致土壤含水率传感器读数线性增加[14-16]；由于不同地区土质的差异，当需要较高测量精度时，FDR 传感器内部的标定公式可能无法满足实际需求，因此需要进行专门的土质标定实验，以使测量结果更接近真实值[17-18]。

为了深入获取各类型土壤含水率传感器的性能及受土壤环境的影响，需要采用合理的标定方法。土壤含水率传感器的标定方法主要分为野外标定和室内标定两种[19-21]。野外标定指的是在所需测量土壤水分深度周围临时安装传感器，收集该土层的数据，然后在对应深度取土样，带回实验室用烘干法测定体积含水率，并与传感器数据建立标定关系，以提高传感器的准确性和可靠性。野外标定能够涵盖更多样的土壤类型和环境条件，更接近自然状态，但该方法存在两个不足：1)在取土过程中，土样容易受损，可能导致较大的测量误差，增加标定的难度[22-24]；2)需要人为制造不同的土壤含水率条件以覆盖适用范围，标定时间较长。室内标定是指将代表性土壤取回，在室内配制不同已知土壤含水率的标准土柱系列，使用传感器测量土柱土壤含水率，建立传感器监测值与已知值建立标定关系。室内标定相比野外标定，易于控制，用时较少，成为目前土壤含水率传感器标定的常用方法。但目前土壤含水率传感器存在多种原理，产品型式多样，主要包括针式和杆式，其中杆式又可分为有套管-杆式和无套管-杆式两种类型。这为室内标定土壤含水率传感器带了较大挑战，目前缺少系统完备的土壤含水率传感器方法。本文旨在通过实验研究，建立一套完备的土壤含水率传感器标定方法，用于提高土壤含水率传感器准确度和降低误差。选取了 6 种土壤含水率传感器进行室内标定，进行比测，并进行性能评价。

1 标定方法体系构建

本文制定了完备的土壤含水率传感器标定方法，适用于在实践过程共存的针式、有套管-杆式、无套管-杆式等多型式土壤含水率传感器的标定，共包含 11 个步骤，流程如图 1 所示。

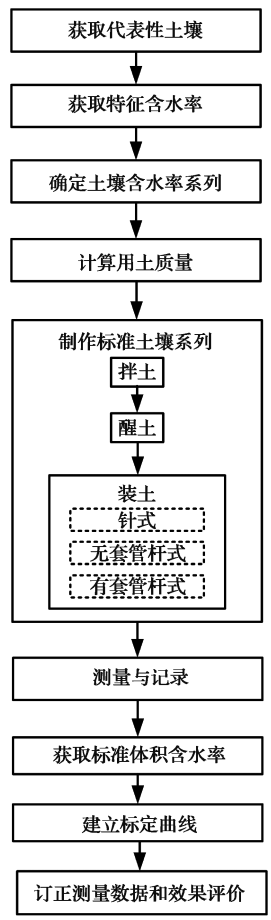

图 1 多类型土壤含水率传感器标定方法体系

Fig. 1 Calibration method system of multitype soil moisture content sensor

1)获取代表性土壤

根据研究或测试的需要，选取合适的土壤类型作为实验样品，如需研究不同深度的土壤性质，可以按上部土壤、中部土壤和下部土壤 3 个深度来取样；取足量的土壤平铺在通风处风干，风干后，先用碾碎机将土粉碎，再用孔径为

2 mm 的滚动筛土机过筛，获得土样备用。

2)获取土壤特征含水率

体积含水率设置为从干燥到湿润。关于“干土”和“饱和含水率(θ_s)”获取方法，通过将土壤样品放置在 105 ℃的烘箱内进行 12 h 的烘干，可以达到相对干燥的土壤样品状态，这个过程会使土壤中的游离水和吸附水蒸发掉，从而使土壤样品中的水分含量大大降低；将土壤样品填充到一个土柱桶中，并将土柱放入盆中浸泡，然后等待 24 h。在这个过程中，土壤中的水分会通过土柱上方渗出，直到土壤达到饱和状态，这时土壤的含水率就可以称为饱和含水率。

3)确定土壤含水率系列

根据“干土”和“饱和含水率”确定土壤含水率系列，包含 n 个土壤含水率点，例如 0%、3%、7%、10%、15%、25%直至 θ_s。

4)计算用土质量

根据不同型式土壤含水率传感器的感应空间范围，选取合适尺寸的土柱筒，确定计算出单个筒土柱筒的体积，乘以干容重得到单个土柱的干土重，再乘以 n 和保障系数(建议为 1.2)，得到配制完备土柱系列所需的干土质量。

5)拌土

先将称量好的土样放入塑料盆中，再把称好的水样放入喷壶中，先喷一层水覆盖在土壤表面，然后用工具(铲子)进行轻微的翻拌，使水和土壤初步混合，逐层重复以上步骤，一边喷水一边轻轻地翻拌土壤，直到喷壶内水全部喷完，再进行人工方式进行充分的拌匀，确保水和土壤充分混合，并且没有明显的颜色或质地差异，此过程是获取标准体积含水率的关键。

6)醒土

配置完成的土样搅拌均匀后，用保鲜膜包裹住土样的表面，再盖上塑料盆使其封闭，让土壤和水在封闭的环境中静置 1 d，这样可以让土壤和水进一步充分混合均匀，第 2 天可以进行装土。

7)装土

土壤含水率传感器可分为 3 种型式，针式、有套管-杆式和无套管-杆式。不同型式传感器采用不同的装土方式，形成不同的标准土柱系列(图 2)。(1)针式传感器，在装土过程中，使用尺子在装土容器上标记出刻度线，将其分成 5 个层次，然后按照刻度线的要求，将土样逐层装入容器中，用定制的压盘来压实土样，使每层土样更好地均匀紧实。(2)无套管-杆式传感器在装土过程中，需先将传感器放置在容器中央，逐层填装土样，每层填装后使用锤子均匀地压实土样，重复这个步骤，直到装满容器土样制作完成。(3)有套管-杆式传感器的装土过程与无套管-杆式传感器相似，首先将测管放入容器的中央，再采用与无套管-杆式传感器相同的填土和压实方法，直至容器填满；整个装土过程都旨在确保土样的均匀性和紧密性，以提供准确的土壤水分测量结果。

8)测量与记录

土柱制作完成后，对于针式传感器需将探针完全插入土样中，等待传感器稳定后读取数据；无套管-杆式传感器因已先预埋好直接等待测量即可；而有套管-杆式传感器每次测量后需将探头旋转 90°再进行测量；在测量过程中，建议对传感器进行 3 次重复测量，并取平均值，以确保得到准确的土壤体积含水率数据。

9)测量标准体积含水率

待传感器测量结束后，在传感器测量位置附近使用环刀采取土样，将土样放入 105 ℃的烘箱中，烘干时间为 12 h，将烘干后的土样进行称重，以计算出相应的土壤体积含水率并记录数据。

10)建立标定曲线关系

收集完所有测量数据后，进行数据处理和分析，建立土壤含水率传感器测量数据和烘干法曲线关系。

11)订正测量数据和效果评价

对已知体积含水率的样品进行测量，将测量结果带入建立的校正方程中，计算出实际的含水率值；比较实际值与烘干法之间的差异，评估标定方程的准确性和精度。

(a) 针式 (a) Needle type　(b) 有套管-杆式 (b) Casing-rod type　(c) 无套管-杆式 (c) No casing-rod type

图 2　标准土柱实物

Fig. 2　Physical diagram of standard soil column

2 材料和测试方法

实验在滁州综合水文实验基地蒸渗仪实验室开展，实验选取的土壤样品为滁州综合水文实验基地4号农田土壤(118°21′N，32°29′E)。按照《化学品 土壤粒度分析试验方法》(GB/T 27845—2011)和《美国制土壤质地分级标准》对土壤质地进行了测试，得到土壤样品为粉砂质壤土，颗粒组成结果为砂粒(＞0.05 mm)为10.73%，粉粒(0.002～0.05 mm)为84.04%，黏粒(＜0.002 mm)为5.22%。

室内标定实验选取不同3种型式、6种土壤含水率传感器，详细信息如表1所示。针式传感器有TDR-315 H和TEROS12；有套管-杆式传感器有TRIME；无套管-杆式传感器有SoilVUE10(0.5和1 m)、HRC-1和GroPoint 3种。以上传感器在实践中已用于野外土壤含水率监测。根据不同传感器的感应空间范围，选择合适的土柱筒尺寸，针对针式传感器采用的土柱筒为直径20 cm、高度30 cm，针对杆式传感器采用土柱筒为直径30 cm、高度30 cm。针式传感器标定预设体积含水率按0%、3%、7%、10%、15%、20%、25%、30%、40%、45%直至θ_s配置，管式传感器标定预设体积含水率按0%、5%、10%、20%、30%、40%直至θ_s配置。

表1 土壤含水率传感器信息

Table 1 Information of soil moisture content sensor

型号	测量原理	标称测量范围/%	标称适用温度/%	标称精度/%	产地
TDR-315H	TDR	0～θ_s	－40～60	±2.5	美国
TEROS12	FDR	0～70	－40～60	±3	美国
SoilVUE10	TDR	0～100	－30～40	±1.5	美国
HRC-1	FDR	0～100	－10～65	±1	中国
GroPoint	TDT	0～100	－20～70	±1	美国
TRIME	TDR	0～100	－15～50	±2～±4	德国

对土壤含水率传感器标定时，主要选择线性、多项式曲线和指数型式[25]等对传感器和烘干法的测量值进行拟合，并采用线性、二次和三次多项式关系对实验数据进行拟合，确定拟合方程，用确定系数R^2作为曲线拟合效果的评价指标。

本文实验用烘干法得到的土壤含水率作为标准值θ_r。采用绝对误差(absolute error，AE)和相对误差(relative error，RE)评价土壤含水率传感器的测量精度：

$$AE = \theta_i - \theta_r \tag{1}$$

$$RE = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_r} \times 100\% \tag{2}$$

式中：θ_i为传感器测得的体积含水率；θ_r为烘干法测得的体积含水率。

2.1 传感器原理

传感器TDR-315 H、SoilVUE10(0.5和1 m)和TRIME测量原理为时域反射法，TDR法是利用电磁波在不同介质中的传播速度与介电常数之间的关系，而介电常数ε由土壤中的水分决定[26]。传感器TEROS12和HRC-1测量原理为频域反射法，FDR法是利用电磁脉冲原理，根据高频电磁波在介质中的传播频率来测量土壤内部的表观介电常数，从而得到土壤体积含水率[27]，测量方法与TDR类似。当测量频率较低时，FDR法容易受到土壤质地和含盐量等因素影响，需要进行土壤特定校准；测量精度较TDR法相对不高，但传感器成本相对较低。而传感器GroPoint测量原理为时域传输法，时域传输法(time domain transmission，TDT)是新兴的电磁测量技术[28]，与TDR法一样都是利用电磁波在介质中的传播速度获取土壤含水率，不同的是TDT法只需要测量电磁波在传感器探头中单程传输时间，传感器设计简单，技术难度低于TDR法，因此传感器成本较低，在使用时必须全部埋入土壤中，对土壤扰动程度较大，可能会破坏原有的土壤结构。

2.2 测试设备

主要采用CR1000X数据采集器(Campbell Scientific公司)获取土壤含水率传感器TDR-315 H、TEROS12、SoilVUE10(0.5和1 m)、HRC-1和GroPoint的测量值。CR1000X具备高精度、高分辨率的数据采集能力，支持多通道模拟和数字输入，可以灵活适应各种传感器的接入需求，也可长期在野外环境中运行，具有较强的抗干扰能力。传感器TRIME采用自配蓝牙采集器(PICO-BT)获取测量值。

土壤含水率传感器是通过测试介电常数来获取土壤含水率，因介电常数受温度的影响，所以同步监测土壤温度，可以将不同温度下的介电常数订正到同一个基准温度下进行推算土壤含水率。标定工作是在地下实验内开展，温度控制在25 ℃左右。

3 实验结果与讨论

3.1 拟合线性分析

表2和图3所示为不同传感器的标定拟合结果。TDR-315 H、TEROS12、GroPoint 3种传感器的不同拟合方程均达到R^2＞0.94，但采用三次曲线

拟合，R^2 最大，拟合效果最好，适合作为传感器的标定方程。传感器 HRC-1 和 TRIME 二次和三次曲线拟合结果大致相同。对于 SoilVUE10（0.5 和 1 m），3 种拟合方式均在 $R^2>0.99$ 以上，所以线性关系、二次曲线和三次曲线任意一个可以作为传感器的标定方程。

表 2 土壤含水率传感器不同线性拟合

Table 2 Different linear fitting of soil moisture content sensor

传感器类型	拟合方程	确定系数 R^2
TDR-315H	$y=0.942\ 4x-2.239\ 6$	0.961 5
	$y=0.002\ 4x^2+0.813\ 9x-1.164\ 4$	0.962 1
	$y=0.001\ 3x^3-0.097\ 9x^2+2.833\ 3x-10.702$	0.981 3
TEROS12	$y=1.086\ 3x-3.320\ 3$	0.975 8
	$y=0.003x^2+0.940\ 5x-2.142\ 3$	0.976 3
	$y=0.001\ 8x^3-0.128x^2+3.538\ 1x-14.981$	0.993 9
SoilVUE10-0.5 m	$y=0.910\ 4x-0.314\ 6$	0.996 8
	$y=-0.001\ 9x^2+1.011\ 6x-1.070\ 6$	0.997 3
	$y=0.000\ 3x^3-0.024\ 2x^2+1.500\ 4x-3.331\ 7$	0.999 6
SoilVUE10-1 m	$y=1.025\ 4x-1.942\ 7$	0.990 3
	$y=-0.005\ 1x^2+1.298\ 3x-4.196\ 3$	0.994 0
	$y=-0.000\ 2x^3+0.010\ 3x^2+0.946\ 7x-2.369\ 6$	0.994 7
HRC-1	$y=1.046\ 8x+2.627\ 6$	0.995 7
	$y=-0.004x^2+1.232\ 7x+1.532\ 8$	0.998 1
	$y=-0.000\ 2x^3+0.007\ 9x^2+1.026\ 2x+2.108\ 8$	0.998 7
GroPoint	$y=2.920\ 5x-24.399$	0.941 1
	$y=-0.010\ 7x^2+3.300\ 6x-27.407$	0.941 5
	$y=-0.019\ 9x^3+1.012\ 6x^2-12.87x+50.898$	0.974 9
TRIME	$y=1.013\ 6x-0.528\ 9$	0.933 4
	$y=-0.009\ 7x^2+1.540\ 4x-4.866\ 7$	0.943 5
	$y=0.000\ 05x^3-0.006\ 2x^2+1.481\ 6x-4.652\ 4$	0.943 5

3.2 同类型传感器对比分析

1）相同原理传感器对比

将相同原理（分 TDR、FDR 和 TDT）传感器测量值与烘干法测定值采用三次项曲线进行拟合（图 4）。对于 TDR 传感器（图 4(a)），在 0%～20%体积含水率范围内，4 种 TDR 传感器测量值都较为接近；在 20%～50%范围时，TDR-315 H 呈“U”型上升，传感器测量值偏大；SoilVUE10（0.5 和 1 m）两个传感器测量值较接近标准值；TRIME 在 10%～30%范围时传感器测量值偏低。对于 FDR 传感器（图 4(b)），HRC-1 传感器在整个体积含水率范围内的测量值都偏低；TEROS12 在含水率 20%时开始出现明显变化趋势，测量值由小变大。对于 TDT 传感器（图 4(c)），GroPoint 在标定过程中一共选取 3 根传感器测试，由测试结果可以看出 GroPoint 传感器测量值并不稳定，在整个体积含水率范围内测量值主要集中在 10%～20%，测量值大部分失真并与标准值偏差太大。

综上可知，TDR 传感器 SoliVUE10（0.5 和 1 m）传感器测量结果较好，该传感器适合在整个含水率范围内使用；FDR 传感器 TEROS-12 和 HRC-1 虽然有明显波动变化，测量结果可以接受因此推荐；TDT 原理 GroPoint 传感器 3 根测量值结果都不理想，存在异常现象，不推荐该原理传感器。

2）相同型式传感器的对比分析

将相同型式（针式和杆式）传感器测量值与烘干法测定值采用三次曲线进行拟合如图 5 所示。对于针式传感器（图 5(a)），TEROS12 和 TDR-315 H 测量值与标准值都拟合效果好，整体呈“S”型走向，且随着土壤含水率的增加，TEROS12 传感器测量值偏大，而 TDR-315 H 传感器更接近实测值。对于杆式传感器（图 5(b)），HRC-1＜TRIME＜SoilVUE10（0.5 和 1 m），HRC-1 和 TRIME 测量值在体积含水率 10%时与标准值较为接近，其他范围

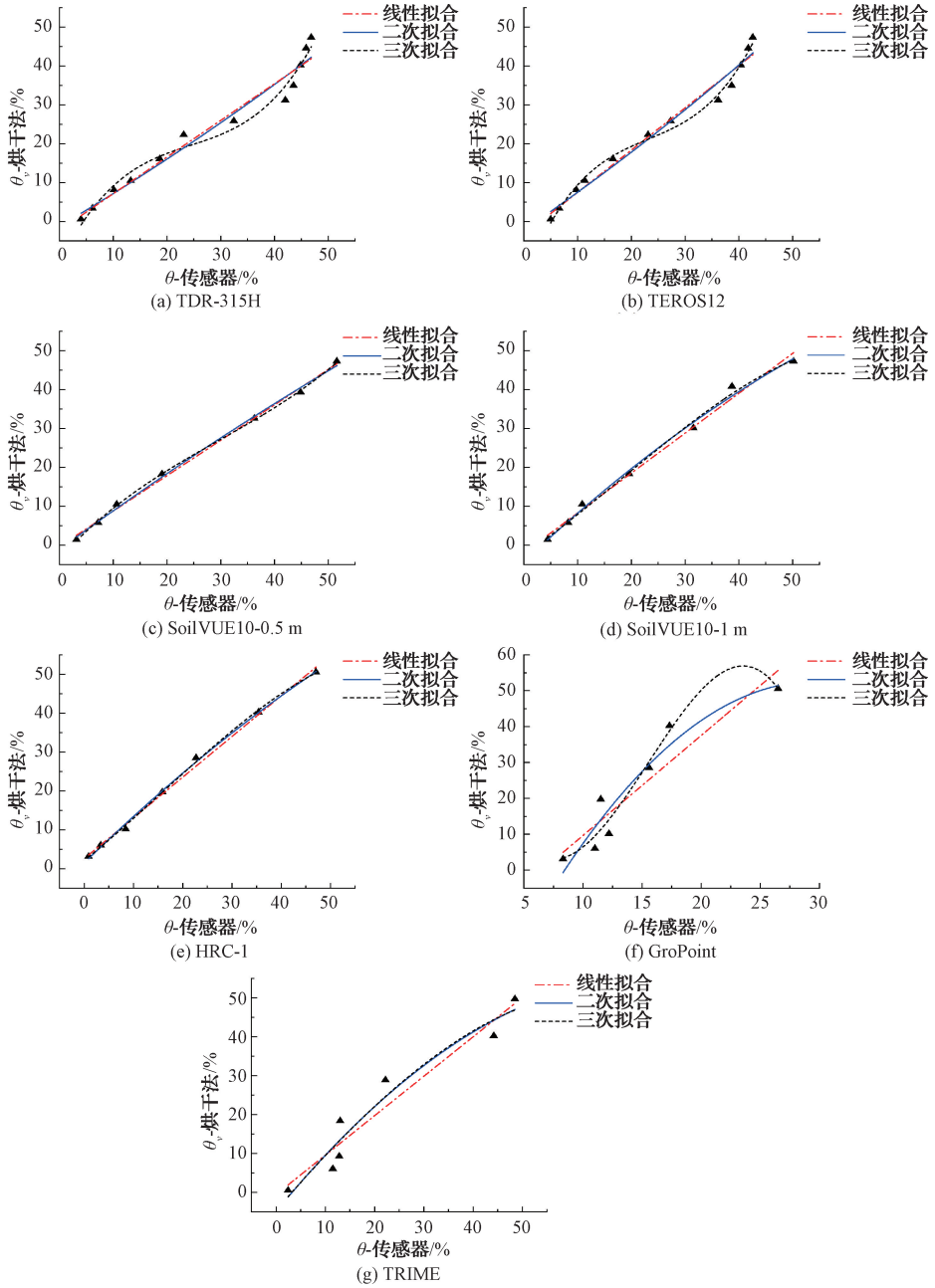

图 3　不同线性拟合结果

Fig. 3　Different linear fitting results

内传感器的测量值均偏大或偏小，SoilVUE10（0.5 和 1 m）传感器在整个体积含水率范围内变化趋势与标准值相近；选取 3 根 GroPoint 误差较小的 1 号来进行对比，可知 GroPoint 传感器测量值是变化波动最大的，且测量值的范围都在 10%～30%。

综上所述，针式两款传感器变化趋势相似，选择 TDR-315 H 传感器较好因其测量值结果更接近标准值；在杆式传感器中，SoilVUE10（0.5 和 1 m）传感器整体变化趋势稳定，测量值更准确。

3.3　不同水分条件下误差分析

不同水分条件下可能对实验结果的准确性产生影响，不同传感器的绝对误差和相对误差表现出不同的变化趋势，因此对不同传感器进行相应的误差分析，结果如图 6 和表 3、4 所示。由图 6(a)可知，当体积含水率在低含水率（0%～10%）范围内增加时，传感器 TDR-315 H、TEROS12、SoilVUE10（0.5 和 1 m）和 HRC-1 的绝对误差基本在±4%范围内变化，说明 5 款传感器能够满足测量精度要求；传感器 TRIME 的绝对

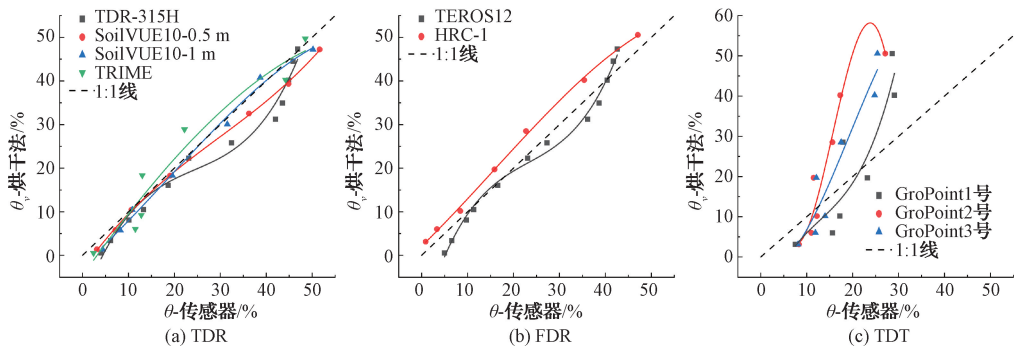

图 4　相同原理传感器的对比

Fig. 4　Comparison of sensors with the same principle

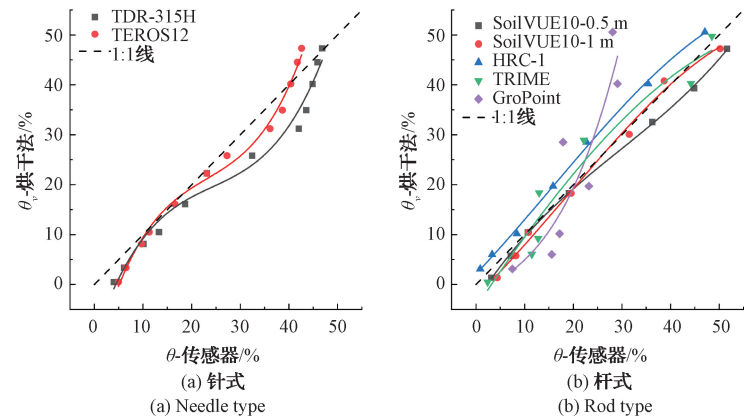

图 5　相同型式传感器的对比

Fig. 5　Comparison of sensors of the same type

误差部分在 4%以上，说明传感器 TRIME 在低含水率测量值偏高。图 6(b)中所有传感器在干燥点测量值的相对误差都相对偏高，随着含水率的增加，传感器相对误差逐渐减小。

由图 6(c)和(d)可知，当体积含水率在中含水率(10%～30%)范围内增加时，所有传感器的绝对误差和相对误差整体上均呈现相似的变化趋势。随着含水率的增加，传感器 TDR-315 H 和 TEROS12 的误差先逐渐减小，然后在一定范围内开始增大，传感器 SoilVUE10(0.5 和 1 m)的误差则一直呈增大趋势，表明在中含水率范围内测量值偏大；而传感器 HRC-1 和 TRIME 的误差随着含水率增加呈负向增大，说明传感器测量值偏低。绝对误差在±4%变化时，有传感器 TEROS12 和 SoilVUE10(0.5 和 1 m)测量值满足精度。

由图 6(e)和(f)可知，当体积含水率在高含水率范围时，传感器 TDR-315 H 和 TEROS12 的绝对误差和相对误差都随着含水率增加呈阶段下降，表示在这个范围内的传感器测量值误差率不断减小；传感器 SoilVUE10-0.5 m 的绝对误差随含水率增加而增大，相对误差随含水率增加呈减小趋势，而传感器 SoilVUE10(0.5 和 1 m)的绝对误差变化相同，相对误差呈相反变化；传感器 HRC-1 和 TRIME 绝对误差和相对误差都呈负向减小，在这个范围内传感器误差不断减小。绝对误差在±4%变化时，有传感器 TEROS12 和 SoilVUE10-1 m 测量精度符合误差要求。

从综合比较来看，在低体积含水率(0%～10%)范围内，TDR-315 H 和 TEROS12 传感器的绝对误差相对较高，在中等体积含水率(10%～30%)的绝对误差呈上升趋势，而在到达高含水率(30%～θ_s)范围时绝对误差又开始下降，说明两款针式传感器在高体积含水率范围内的测量值较准确一些；而 TRIME 传感器在整个体积含水率范围内，绝对误差变化过大，说明该传感器测量不稳定；SoilVUE10(0.5 和 1 m)传感器在高体积含水率的绝对误差有略微的变化，其他在中、低含水率的绝对误差变化趋于稳定，传感器测量值整体较接近标准值，因此推荐使用该传感器；而 HRC-1 传感器在整个体积含水率范围内绝对误差都为负数，即测量结果低于标准值，不推荐该传感器。当绝对误差在±4%变化时，在整个体积含水率范围内只有 TEROS12 和 SoilVUE10-1 m 传感器满足精度要求。

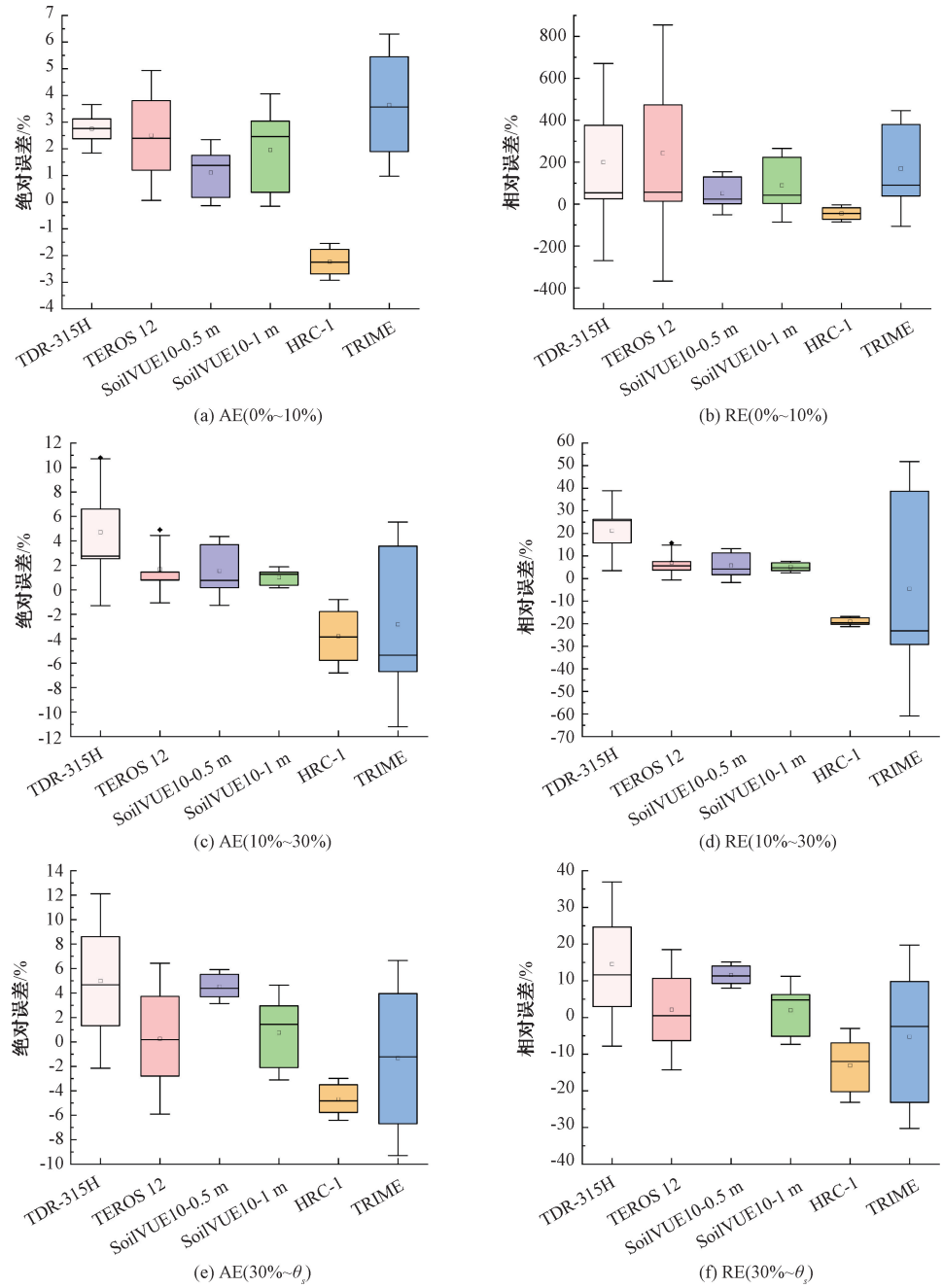

图 6　不同水分条件下误差对比结果

Fig. 6　Error comparison results under different moisture conditions

3.4　标定效果分析

标定效果指的是采用标定得到的关系线对传感器测量值进行订正值与真值的差距。不同传感器标定前后的对比散点图如图 7 所示。由图 7 可知，所有传感器经过标定后，测量值更为准确，曲线的稳定性和趋势有所改善。具体而言，针式传感器 TDR-315 H 标定前具有较大均方根误差，而标定后均方根误差有所减少。相比之下，另一款针式传感器 TEROS12 在标定前后的均方根误差均传感器 TDR-315 H，表明测量值更接近真值，曲线波动显著减小，标定的效果在提高测量稳定性的方面取得显著成果。传感器 SoilVUE10(0.5 和 1 m)的测量曲线的整体趋势相对平缓，标定前后的均方根误差差异不大，表明该传感器在标定前已具备较高的测量准确性。传感器 HRC-1 标定后均方根误差(RMSE)明显减小，测量值明显提升，反映出标定曲线对传感器性能的显著改善。传感器 TRIME 标定前后的均方根误差变化不大，且曲线波动与标定前相似，表明标定对波动特性的影响有限，整体测量值只有微小的变化，标定后对曲线整体性质的影响相对较小。

表3 针式传感器不同土壤含水率条件下的测量误差

Table 3 Measurement errors of needle type under different soil moisture content conditions (%)

体积含水率	TDR-315H 绝对误差	TDR-315H 相对误差	TEROS12 绝对误差	TEROS12 相对误差
0	3.48	669.23	4.43	851.92
3	2.76	82.14	3.18	94.64
7	2.00	24.66	1.61	19.85
10	2.76	26.26	0.79	7.52
15	2.54	15.77	0.46	2.86
20	0.85	3.82	0.83	3.73
25	6.61	25.6	1.45	5.62
30	10.8	34.59	4.91	15.73
35	8.61	24.65	3.72	10.65
40	4.67	11.62	0.19	0.47
45	1.33	2.99	−2.80	−6.29
θ_s	−0.49	−1.04	−4.71	−9.95

3.5 传感器适用性分析

基于本文在标定实验中得到认识，将从测量精度、型式、成本等因素进行传感器适用性分析。

1)传感器精度

TDR传感器因非破坏性、便携、易安装且操作安全等优点被广泛应用[21]，尤其适用于土壤水电导率和有机质含量不高的场景。FDR传感器成本较低，但易受土壤质地和含盐量影响，一般需要进行特定土壤的标定[29]。TDT传感器技术难度低于TDR法，传感器成本较低，在使用时必须全部埋入土壤中，对土壤扰动程度较大会破坏原有的土壤结构。综合本文标定结果，推荐TDR-315 H和SoilVUE10(0.5和1 m)两款TDR传感器，测量结果稳定；FDR传感器中，TEROS12稳定性优于HRC-1且价格低廉，本文选取TDT传感器测量结果不理想，因此不做推荐。

2)传感器型式

针式传感器适用于表层土壤含水率监测，而监测深层土壤时则需开挖或钻孔安装，工作量大且对土壤扰动明显。杆式传感器更适合监测不同深度的土壤含水率，其安装过程能最大限度地减少对土壤的扰动。对于有套管−杆式传感器，需预先将套管安装到土壤中，通常涉及钻孔、套管放置和泥浆注入等步骤。目前的套管都是光滑管(如TRIME传感器)，可能会与土壤产生分离，影响测量准确性。无套管−杆式传感器有两种亚类：(1)光滑杆式(如HRC-1)，其安装方式与上述相同；(2)螺纹杆式(如SoilVUE10)，安装更简便，只需钻孔后将螺纹杆旋入，无需注泥浆，且传感器能与土壤充分接触。对于监测表层土壤，宜使用针式传感器；对于监测土壤剖面，宜采用像SoilVUE10型式的螺纹杆传感器。

表4 杆式传感器不同土壤含水条件下的测量误差

Table 4 Measurement errors of rod type under different soil moisture content conditions (%)

体积含水率	SoilVUE10-0.5 m 绝对误差	SoilVUE10-0.5 m 相对误差	SoilVUE10-1 m 绝对误差	SoilVUE10-1 m 相对误差	HRC-1 绝对误差	HRC-1 相对误差	TRIME 绝对误差	TRIME 相对误差
0	1.76	129.41	3.04	223.53	−2.25	−71.88	1.90	380.00
5	1.38	23.92	2.46	42.63	−2.69	−44.68	5.40	90.08
10	0.18	1.72	0.37	3.54	−1.77	−17.37	3.60	38.68
20	0.77	4.21	1.27	6.93	−3.85	−19.53	−5.40	−29.19
30	3.69	11.34	1.44	4.78	−5.77	−20.24	−6.70	−23.16
40	5.52	14.03	−2.09	−5.13	−4.82	−11.99	4.00	9.81
θ_s	4.38	9.27	2.95	6.25	−3.50	−6.92	1.20	−2.46

3)传感器成本

不同类型的土壤含水率传感器在价格上存在差异如表5所示。本文选择传感器SoilVUE10两个尺寸进行室内标定，其中0.5和1 m价格分别约为20 000元和36 000元；而传感器HRC-1的价格范围在8 000～40 000元，本文选择的是6段式；传感器GroPoint从2段式到6段式的价格范围2 200～6 000元，本文选择的是3段式。随着传感器测量深度的增加导致设计和技术要求上升。对于预算较低或需要针式传感器的情况，TDR-315 H和TEROS12是较为合适的选择；对于需要杆式传感器应用时，可以根据具体需求权衡价格和性能，在TRIME、SoilVUE10(0.5和1 m)和HRC-1这3款传感器中选择。

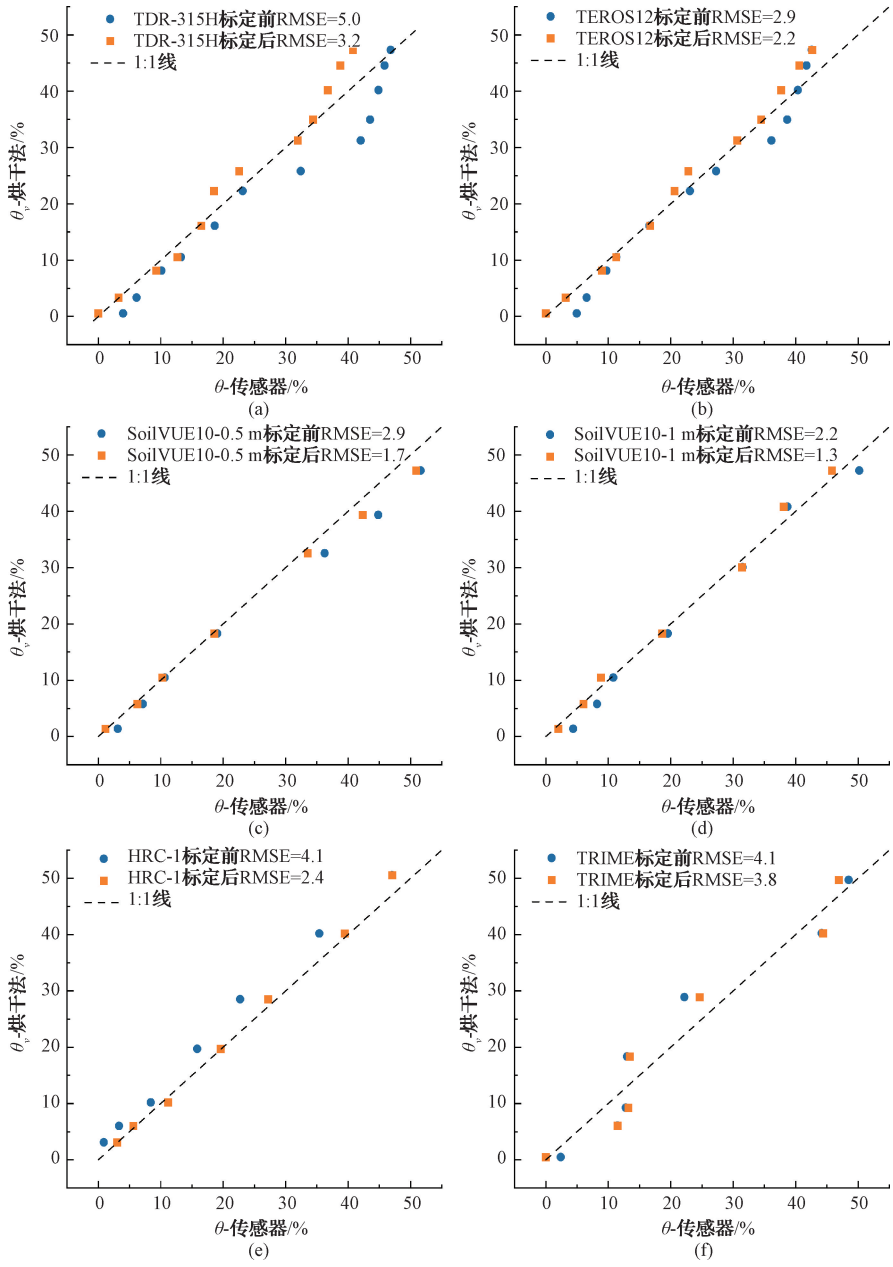

图 7　标定前后的对比

Fig. 7　Comparison before and after calibration

表 5　传感器单价

Table 5　Unit price of sensors

名称	单价/元
TDR-315H	4 000
TEROS12	3 200
SoilVUE10	20 000～36 000
HRC-1	8 000～40 000
TRIME	50 000
GroPoint	2 200～6 000

4　结　论

本文制定了一套完备土壤含水率传感器标定方法和装置，可高效地完成 3 种型式的土壤含水率传感器的标定，对标定前后的结果进行系统分析和讨论，得到如下结论。

1）研制的完备土壤含水率传感器标定方法和装置，能够有效地标定不同型式的土壤含水率传感器，可进一步评价实用土壤含水率传感器的精度性能。

2）三次项曲线最适合土壤含水率传感器标定关系线的拟合；所有传感器在经过标定后，其测量准确性均有显

著提升。除 TRIME 传感器标定前后没有改善，其他传感器经过标定后，测量误差明显降低，绝对误差基本能控制在都在±3%以内。

3)TDR-315 H 和 TEROS12 在高体积含水率范围内表现良好；HRC-1 和 TRIME 在整个体积含水率测量范围内偏低；GroPoint 的测量结果存在异常现象；而 Soil-VUE10(0.5 和 1 m)在整个体积含水率范围内测量精度最高，R^2 值超过 0.99。

4)通过传感器适用性分析，推荐在野外监测土壤土含水率的方案为对于监测表层土壤，宜使用标定后的针式传感器；对于监测土壤剖面，宜采用标定后的螺纹杆传感器。

参 考 文 献

[1] 朱青，廖凯华，赖晓明，等. 流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展[J]. 地理科学进展，2019，38(8)：1150-1158.
ZHU Q，LIAO K H，LAI X M，et al. Progress in multi-scale soil moisture monitoring and modeling research in watersheds [J]. Advances in Geoscience，2019，38(8)：1150-1158.

[2] 邱德勋，赵佰礼，尹殿胜，等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J]. 中国水土保持科学，2021，19(3)：72-80.
QIU D X，ZHAO B L，YIN D SH，et al. Vertical variation of soil moisture in loess hills and gullies and its influencing factors [J]. Soil and Water Conservation Science in China，2021，19(3)：72-80.

[3] 张益，马友华，江朝晖，等. 土壤水分快速测量传感器研究及应用进展[J]. 中国农学通报，2014，30(5)：170-174.
ZHANG Y，MA Y H，JIANG ZH H，et al. Research and application progress of rapid soil moisture measurement sensor [J]. China Agronomy Bulletin，2014，30(5)：170-174.

[4] 周凌云，陈志雄，李卫民. TDR 法测定土壤含水率的标定研究[J]. 土壤学报，2003，40(1)：59-64.
ZHOU L Y，CHEN ZH X，LI W M. Calibration study of TDR method for determining soil water content [J]. Journal of Soil Science，2003，40(1)：59-64.

[5] 胡建东，段铁城，石建华，等. 土样含水量快速测定传感技术研究[J]. 仪器仪表学报，2003，24(2)：142-145.
HU J D，DUAN T CH，SHI J H，et al. Research on sensing technology for rapid determination of water content in soil samples [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2003，24(2)：142-145.

[6] 李玥，汪雅婷，黄致绮. 土壤含水率测量方法分析及比较[J]. 仪表技术，2017(8)：15-17.
LI Y，WANG Y T，HUANG ZH Q. Analysis and comparison of soil water content measurement methods [J]. Instrumentation Technology，2017(8)：15-17.

[7] LIMING W，WENHUA L. Temperature effect on the reference frequency of FDR soil moisture sensor [J]. Journal of Instrumentation，2015(3)：19-26.

[8] TOPP G C，DAVIS J L，ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content：Measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research，1980，16(3)：574-582.

[9] 张麒昆，闵雷雷，王玉才，等. 不同水分传感器在河北平原典型土壤中的测量准确度对比[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2023，31(11)：1851-1859.
ZHANG Q K，MIN L L，WANG Y C，et al. Comparison of measurement accuracy of different moisture sensors in typical soils of Hebei Plain [J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture，2023，31(11)：1851-1859.

[10] MALICKI M A，PLAGGE R，ROTH C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil Groenekennis [J]. Blackwell Publishing Ltd，1996，47(3)：357-366.

[11] JACOBSEN O H，SCHJØNNING P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture [J]. Journal of Hydrology，1993，151(2-4)：147-157.

[12] PONIZOVSKY A A，CHUDINOVA S M，PACHEPSKY Y A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture [J]. Journal of Hydrology，1999，218(1/2)：35-43.

[13] SINGH J，LO T，RUDNICK D R，et al. Quantifying and correcting for clay content effects on soil water measurement by reflectometers [J]. Agricultural Water Management，2019，216：390-399.

[14] 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.
CHEN H B，CHEN T，HU J T，et al. Design and application of temperature compensation for FDR-type soil moisture meter [J]. Water Saving Irrigation，2022(8)：24-29.

[15] CHEN L, ZHANG ZHOU L, ZHENG W, et al. Data-driven calibration of soil moisture sensor considering impacts of temperature: A case study on FDR sensors [J]. Sensors, 2019, 19(20): 4381-4392.

[16] 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. Effect of temperature on soil volumetric water content measured by FDR [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 964-969.

[17] 邓超，李玉梅，刘满红，等. FDR对不同类型土壤检测方法的研究[J]. 水利信息化，2017(1)：41-43，48.
DENG CH, LI Y M, LIU M H, et al. Research on FDR detection methods for different types of soil [J]. Water Resources Informatization, 2017(1): 41-43, 48.

[18] 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.
WANG L M, CHANG SH, HOU H J, et al. Measurement repeatability of FDR soil moisture sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 231-238.

[19] 吴日峰，李润奎，刘生根，等. 不同原理土壤水分传感器的室内外标定方法及对比测试研究[J]. 安徽农业科学，2013，41(13)：6048-6050.
WU R F, LI R K, LIU SH G, et al. Study on indoor and outdoor calibration methods and comparative testing of soil moisture sensors with different principles [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(13): 6048-6050.

[20] 肖雷，季天剑，张清淞. 电容式土壤水分湿度传感器标定方法的研究[J]. 南京航空航天大学学报(英文版)，2020，37：109-114.
XIAO L, JI T J, ZHANG Q S. Research on calibration method of capacitive soil moisture and humidity sensor [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (English), 2020, 37: 109-114.

[21] 郭佳，王振营，郑育锁，等. 新型FDR土壤水盐一体传感器标定研究与应用[J]. 中国土壤与肥料，2016(6)：156-161.
GUO J, WANG ZH Y, ZHENG Y S, et al. Research and application of a new FDR integrated sensor for soil water and salt [J]. China Soil and Fertilizer, 2016(6): 156-161.

[22] 苏都，红梅，陈有君，等. TDR测定淡栗钙土水分的标定[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2012，33(1)：88-92.
SU D, HONG M, CHEN Y J, et al. Calibration of water content in light chestnut soil by TDR [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2012, 33(1): 88-92.

[23] 康洁，张维江，李娟. TRIME-T3管式TDR土壤水分测定系统在宁夏泾源地区的标定研究[J]. 宁夏工程技术，2015，14(2)：146-148.
KANG J, ZHANG W J, LI J. Study on calibration of TRIME-T3 tube TDR soil moisture measurement system in Jingyuan, Ningxia [J]. Ningxia Engineering Technology, 2015, 14(2): 146-148.

[24] 吴华山，陈明，杭天文，等. 扬州地区TDR法田间测定不同土壤含水量的标定[J]. 灌溉排水学报，2009，28(4)：104-106，110.
WU H SH, CHEN M, HANG T W, et al. Calibration of TDR method for field determination of different soil water contents in Yangzhou [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(4): 104-106, 110.

[25] 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]. 中国水土保持科学，2013，11(6)：15-22.
LIU L, LU B J, FU S H, et al. Indoor calibration of farmland soil water content determined by TDR in the black soil area of Northeast China [J]. China Soil and Water Conservation Science, 2013, 11(6): 15-22.

[26] FELLNER-FELDEGG H. The measurement of dielectrics in the time domain [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1969, 73(3): 616-623.

[27] 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): 3314-3329.

[28] 赵燕东，高超，刘卫平，等. 基于相位检测的高盐碱与高有机土壤水分传感器研究[J]. 农业机械学报，2015，46(9)：151-158.
ZHAO Y D, GAO CH, LIU W P, et al. Research on high saline and high organic soil moisture sensor based on phase detection [J]. Journal of Agricultural

Machinery, 2015, 46(9): 151-158.

[29] 陈栋, 温宗周. 基于频域反射法的土壤水分传感器设计[J]. 电子测量技术, 2016(3): 4-10.
CHEN D, WEN Z ZH. Soil moisture sensor design based on frequency domain reflection method [J]. Electronic Measurement Technology, 2016(3): 4-10.

作者简介

王涵一,硕士研究生,主要研究方向为水文实验和水文仪器。
E-mail: 2459233051@qq.com

廖爱民(通信作者),高级工程师,主要研究方向为水文实验、水文地球物理和同位素水文学。
E-mail: seamsun1226@163.com

方国华,教授,主要研究方向为水资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度等。
E-mail: ghfang@hhu.edu.cn

林锦,教授级高级工程师,主要研究方向为地下水开发利用与保护、水资源管理等。
E-mail: jlin@nhri.cn