

盐分对土壤水分传感器测量精度的影响及适用性评价

胡慧玲^{1,2}, 王峰¹, 冯泉清^{1,2}, 韩其晟¹, 宁慧峰¹, 李小刚³, 王景雷^{1*}

(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业农村部作物需水与调控重点开放实验室,

河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院 研究生院, 北京 100081;

3.新疆生产建设兵团第一师水文水资源管理中心, 新疆 阿拉尔 843399)

摘要:【目的】探明盐分和水分对土壤水分传感器测量精确度和准确度的影响, 并进行适用性评价。【方法】在新疆阿拉尔兵团第一师灌溉试验站开展室内试验, 选用 FDR、TDR 型传感器, 试验设置 5 个盐分梯度(分别为 2、3、5、7、9 mS/cm), 土壤含水率调至田间持水率之后自然蒸发, 研究盐分和水分对土壤水分传感器测量精确度和准确度的影响。【结果】传感器的精确度和准确度受土壤盐分和水分的影响。标定前, CSF11、ML2x 传感器的准确度较高且精确度表现稳定, EC-5、TDR305H 传感器由于受土壤盐分和水分的双重影响, 准确度和精确度较低。校准后, 4 种传感器的准确度和精确度明显改善。【结论】综合准确度、精确度和价格因素, 资金充裕且含盐量不超过 9 mS/cm 时, 可选用 ML2x 传感器; 资金紧张时, 低盐条件下选用 CSF11 传感器, 中高盐条件下选用 EC-5 传感器; 当土壤含水率不超过 20% 时可选用 TDR305H 传感器。

关键词: 土壤水分; FDR; TDR; 土壤含盐量; 精确度; 准确度; 校准

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023066

OSID: 

胡慧玲, 王峰, 冯泉清, 等. 盐分对土壤水分传感器测量精度的影响及适用性评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 102-109.

HU Huiling, WANG Feng, FENG Quanqing, et al. The Effect of Soil Salinity on Accuracy of Soil Moisture Sensors[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 102-109.

0 引言

【研究意义】土壤水分是营养物质在植物体内传递的载体, 是植物正常生长的基础。实时准确的测量土壤水分是灌溉决策与作物生长调控的前提。目前, 对土壤含水率的测量有多种方法, 从最传统的烘干法到先进的传感器测量均有广泛应用。介电常数是表征介质中电场强弱的物理量, 由于水的介电常数比干土大得多, 所以当土壤含水率增加时, 其介电常数也相应增大, 利用土壤介电常数与土壤含水率之间的关系进行土壤水分测量是一种常见的方法, 其中以时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)原理的传感器最为常见。TDR 传感器是根据高频电磁脉冲在土壤中传播的速度依赖于土壤介电常数, 通过测量电磁波的传播时间计算介电常数, 再换算为土壤含水率。FDR 传感器是根据高频电磁波在土壤中传播的频率计算介电常数, 从而计算土壤含水率。国内外研究人员对介电法测定土壤含水率已进行了大量研究^[1-3], 测定

精度有很大提高^[4-7]。但在盐碱地上由于电磁波易发生多次反射和衰减, 使得传感器信号不清晰, 导致测定的含水率数据存在很大误差甚至不合理^[8]。【研究进展】土壤介电常数除受含水率影响较大外, 还与土壤中的可溶性盐量、有机质、土壤质地和温度有关, 且以土壤盐分和温度的影响最为显著^[9]。Kim 等^[10]研究表明, 在土壤较干时, 传感器水分读数与土壤含水率和干体积质量线性正相关, 土壤较湿时与土壤含水率和干体积质量非线性正相关, 传感器水分读数与土壤 $EC_{1:5}$ 呈显著线性关系。Louki 等^[11]研究表明, 传感器水分读数在土壤盐分和温度分别为 2.5 dS/m 与 25 °C 时精度最高, 在盐分和温度范围分别为 1.9~4.0 dS/m 和 16~30 °C 时, 必须经过校准方可获得较高精度, 超过此范围, 传感器则无法准确工作。Inoue 等^[12]研究表明, 水分传感器精度受土壤盐分影响显著, 与其他类型传感器相比, TDR 传感器精度最高($RMSE=0.007\text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 校准方程自变量应加入盐分因子。Spelman 等^[13]研究认为, 针对特定土壤, 传感器水分读数往往难以达到规格上标识的精度, 建立基于特定土壤的校准方程十分必要。Rosenbaum 等^[14]研究表明, 电磁感应式土壤水分传感器精度受土壤盐分和温度影响显著, 出现低温时低估和高温时高估问题, 土壤盐分导致介电常数与理论结果发生偏离, 必须经过校准方可达到理论模型的预测

收稿日期: 2023-02-26 修回日期: 2023-05-07 网络出版日期: 2023-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900502); 现代农业棉花产业技术体系建设专项(CARS-15-13)

作者简介: 胡慧玲(1998-), 女。硕士研究生, 主要从事作物高效用水理论与技术研究。E-mail: 2803290490@qq.com

通信作者: 王景雷(1972-), 男。研究员, 主要从事作物高效用水理论与技术研究。E-mail: firwjl@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

值。Cardenas-Lailhacar 等^[15]研究显示,在高盐 and 高温条件下,不同品牌传感器水分读数精度和稳定性不同,但基本均能达到旱地灌溉决策的精度要求。雷磊^[16]研究表明,土壤介电常数的实部受土壤体积含水率影响,而虚部与土壤含水率和含盐量关系密切,在含盐量较大的土壤中必须对传感器进行特定校准。【切入点】我国新疆南疆地区的土壤盐渍化严重,耕地的硫酸盐量普遍在 3‰~10‰之间。由于盐碱的存在,导致该地区土壤水分传感器存在测量精度不高、结果不稳定、传感器腐蚀严重、寿命短等问题,这给水分传感器在该地区的应用带来限制,而且目前缺乏在不同盐分条件下多种类型、多种型号的土壤水分传感器性能之间的对比试验。【拟解决的关键问题】因此,随机挑选市场上常见的 3 种 FDR 和 3 种 TDR 传感器,研究其在南疆不同盐碱水平下监测土壤含水率的表现,阐明盐分和水分对测量精确度和准确度的影响,并进行适用性评价,为其科学使用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在新疆阿拉尔第一师水利局灌溉试验站(40°6′N, 81°2′E)进行。试验选用 FDR 和 TDR 传感器的型号及详细参数见表 1。试验设计 5 个盐分梯度,控制土水质量比为 1:5 的土壤溶液电导率 $EC_{1:5}$

分别为 2、3、5、7、9 mS/cm,其中 2~3 mS/cm 为低盐处理,5~9 mS/cm 为中高盐处理。 $EC_{1:5}$ 与干土盐分质量分数的换算关系 $y=3.04x-0.74$,对应的土壤盐分质量分数分别为 5.3‰、8.4‰、14.5‰、20.5‰和 26.6‰。试验基底土壤取自灌溉试验站周边的膜下滴灌棉田,采集根据 0~30 cm 土层土壤,土壤基础盐分 $EC_{1:5}$ 为 1.8 mS/cm (盐分质量分数为 4.73‰),土壤质地和原状土物理参数见表 2。将取得的土样晒干粉碎后过 2 mm 筛,根据土壤基础含盐量和目标设计含盐量,计算并加入所需的盐皮量(盐分质量分数为 802‰,目标土样质量 8 kg),混合后充分搅拌,使土盐混合均匀。之后将混合后的盐土以一定体积质量(1.59 g/cm³)按 5 层分刻度装到塑料桶中,桶直径 11 cm,高 17 cm,装土深度 15 cm,每个盐分梯度重复 3 次(每个桶为 1 次重复)。按照桶内土壤实际体积及田间持水率,计算并加入适量的蒸馏水,将土壤含水率全部调配至田间持水率,之后自然蒸发,为保证试验结果不受温度影响,实验室将温度控制在 25℃左右。各传感器在土样装填好后再插入,将传感器探针全部插入土样中。在蒸发过程中,分 5 次监测传感器所测量的土壤含水率,每次监测的同时称质量,利用称质量法计算实际质量含水率,再乘以干体积质量,计算得到实际体积含水率。配置盐土和田间持水率过程中的计算参数见表 3。

表 1 各传感器参数表

Table 1 Parameters of each sensor							
传感器	型号	生产厂家	土壤含水率测量范围/%	土壤体积测量范围/cm ³	电导率适用范围/(mS cm ⁻¹)	标识精度/%	探针长度/cm
FDR	EC-5	Meter	0~100	200	0~8	±3.0	5
	CSF11	星仪传感器	0~60	200	无明确范围	±3.0	6
	ML2x	Dynamax	0~100	75	0~20	±5.0	6
TDR	CSF15	星仪传感器	0~60	10	0~5	±3.0	11
	CS655	Campbell Scientific	0~100	3 600	0~8	±3.0	12
	TDR305H	Acclima	0~100	150	高盐(无明确范围)	±2.0	5

表 2 土壤物理参数

Table 2 Soil physical parameters						
砂粒量/%	粉粒量/%	黏粒量/%	土壤类别	干体积质量/(g cm ⁻³)	田间持水率/%	饱和含水率/%
74.84	9.21	15.95	砂壤土	1.59	31.3	39.5

表 3 土样配置参数

Table 3 Soil sample configuration parameters							
盐分水平	盐皮含盐量/%	目标土样质量/kg	设计含盐量‰	盐皮加入量/g	干体积质量/(g cm ³)	田间持水率/%	蒸馏水加入量/g
2			5.3	6.1			1 575
3			8.4	36.4			1 575
5	802	8	14.5	97	1.59	31.3	1 575
7			20.5	157.7			1 575
9			26.6	218.3			1 575

1.2 评价指标

土壤水分传感器的精确度用绝对误差 AE 和相对误差 RE 度量,测量准确度用绝对误差的标准差 SD 表示。 AE 值和 RE 值越低,说明传感器越精确,反之精度则差。 SD 值越小,说明测量值越集中,精确度高,反之则精确度低。

2 结果与分析

2.1 不同水分传感器的有效测量范围

根据实际的试验盐分条件,不同传感器具有有效读数的含水率测量范围见表 4。EC-5、CSF11、ML2x、TDR305H 传感器在土壤 $EC_{1:5}$ 值为 2~9 mS/cm 下均能正常读数,CSF15 传感器在 $EC_{1:5}$ 值为 2~3 mS/cm 时仅能读出含水率约为 5%的结果,其余盐分梯度下,

均不能正常读数。CS655 传感器在 $EC_{1:5}$ 值为 2 mS/cm 时可以正常测量, 在 $EC_{1:5}$ 值 ≥ 3 mS/cm 时无法获取数值。当土壤电导率一定时, 增加土壤含水率将增加盐分的溶解, 导致传感器脉冲信号不稳定, 使测量结果偏离, 同理, 当土壤含水率一定时, 增加土壤电导率同样影响测量结果准确性^[17]。这可能是 CSF15、CS655 传感器无法读出所有土壤含水率及土壤电导率水平下测量数据的原因。鉴于此, 本文后续只对 EC-5、CSF11、ML2x、TDR305H 传感器进行精确度和准确度的分析。

表 4 不同传感器具有有效读数的土壤含水率范围

Table 4 The range of soil moisture with effective reading of different sensors		%				
传感器	型号	$EC_{1:5}$ 值/(mS cm ⁻¹)				
		2	3	5	7	9
FDR	EC-5	√	√	√	√	√
	CSF11	√	√	√	√	√
	ML2x	√	√	√	√	√
TDR	CSF15	5	5	无数据	无数据	无数据
	CS655	√	5~15	5~15	5~10	5~10
	TDR305H	√	√	√	√	√

注 √表示在 5%~30% 土壤含水率范围内均可以正常出数。

2.2 低盐条件下 ($EC_{1:5}=2\sim3$ mS/cm) 水分传感器的准确性与精确性

在低盐 ($EC_{1:5}=2\sim3$ mS/cm) 条件下各传感器的绝对误差 AE 和相对误差 RE 分别见图 1 和图 2。由图 1 和图 2 可知, 土壤 $EC_{1:5}$ 值相同时, EC-5、TDR305H 传感器的 AE 值随土壤水分的升高逐渐增大, 为

1.32%~30.39%, CSF11、ML2x 传感器的 AE 值变化幅度较小, AE 值为 7.35%~17.21%。土壤 $EC_{1:5}$ 值为 3 mS/cm 时, 每个传感器在不同土壤含水率下的 AE 值均大于 2 mS/cm 时的 AE 值。当土壤 $EC_{1:5}$ 值为 3 mS/cm 时, 4 种传感器在全水分范围内的 AE 平均值分别为 20.47%、14.76%、11.68%、13.25%, 土壤 $EC_{1:5}$ 值为 2 mS/cm 时, AE 平均值分别为 14.25%、12.19%、8.66%、4.96%。当土壤 $EC_{1:5}$ 值相同时, EC-5、TDR305H 传感器的 RE 值随土壤含水率的变化较平缓, CSF11、ML2x 传感器的 RE 值逐渐降低。土壤 $EC_{1:5}$ 值为 3 mS/cm 时, 4 种传感器的 RE 平均值分别为 109.82%、98.83%、84.11%、52.64%, 土壤 $EC_{1:5}$ 值为 2 mS/cm 时, RE 平均值分别为 70.93%、73.34%、57.71%、21.51%。这说明传感器的测量准确性受传感器品牌、土壤电导率和土壤含水率的影响, 与其他 2 种传感器相比, CSF11、ML2x 传感器的准确度较高, 增加土壤电导率会降低准确度, 但当土壤 $EC_{1:5}$ 值一定时, 传感器的准确度随土壤含水率的变化较小。EC-5、TDR305H 传感器准确度由于受土壤电导率和土壤含水率的双重影响, 其准确度较低。这可能与传感器探针的物理设计有关, 与二针传感器相比, 三针传感器能形成更清晰的反射, 在土壤电导率较高时精度更高^[18]。TDR305H 传感器虽有 3 个探针, 但其探针间距较宽, 这会增加电磁波的传送时间, 增大介电常数, 导致测量结果变大, 准确度降低。

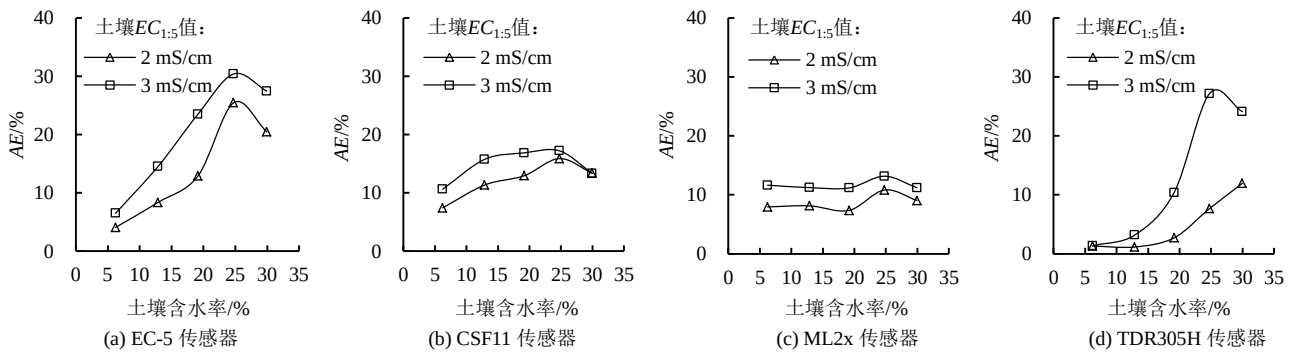


图 1 低盐条件下 ($EC_{1:5}=2\sim3$ mS/cm) 各传感器的 AE 值随土壤含水率的变化

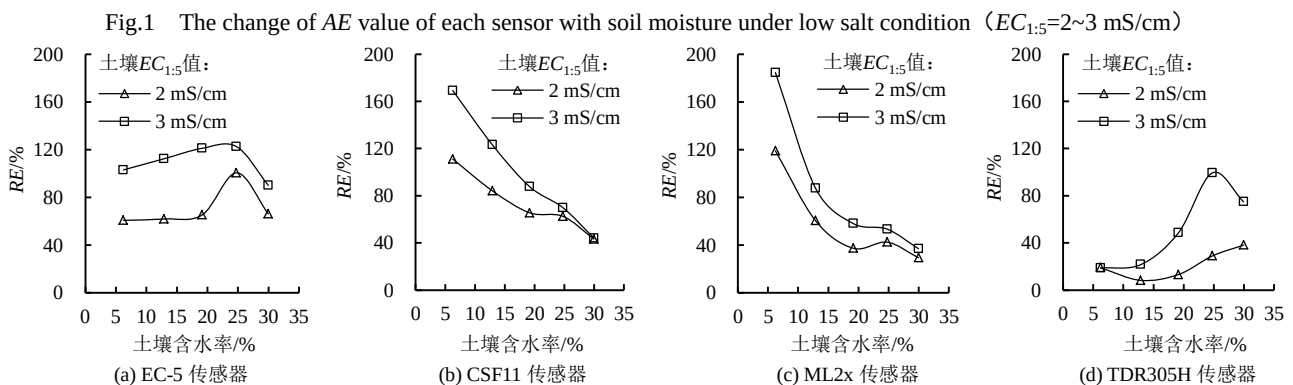


图 2 低盐条件下 ($EC_{1:5}=2\sim3$ mS/cm) 各传感器的 RE 值随土壤含水率的变化

Fig.2 The change of RE value of each sensor with soil moisture under low salt condition ($EC_{1:5}=2\sim3$ mS/cm)

图3是不同传感器在低盐条件($EC_{1:5}=2\sim3\text{ mS/cm}$)下土壤含水率的SD值。由图3可知,土壤 $EC_{1:5}$ 值为 2 mS/cm 时,4种传感器的SD值均较低,为 $0.27\%\sim2.30\%$ 。当土壤 $EC_{1:5}$ 值增加至 3 mS/cm 时,EC-5、TDR305H传感器的SD值随土壤含水率的升高逐渐增大,且其SD值均大于土壤电导率为 2 mS/cm 时的SD值。随着土壤 $EC_{1:5}$ 值的增加,CSF11、ML2x

传感器的SD值增加,但随土壤含水率的变化不明显。这说明传感器的精确性受土壤电导率和土壤含水率影响,土壤电导率增加导致传感器的精度降低,不同型号传感器的精度随土壤含水率的变化规律不同。整体看,CSF11、ML2x传感器的精度在低盐条件下($EC_{1:5}=2\sim3\text{ mS/cm}$)表现更稳定。

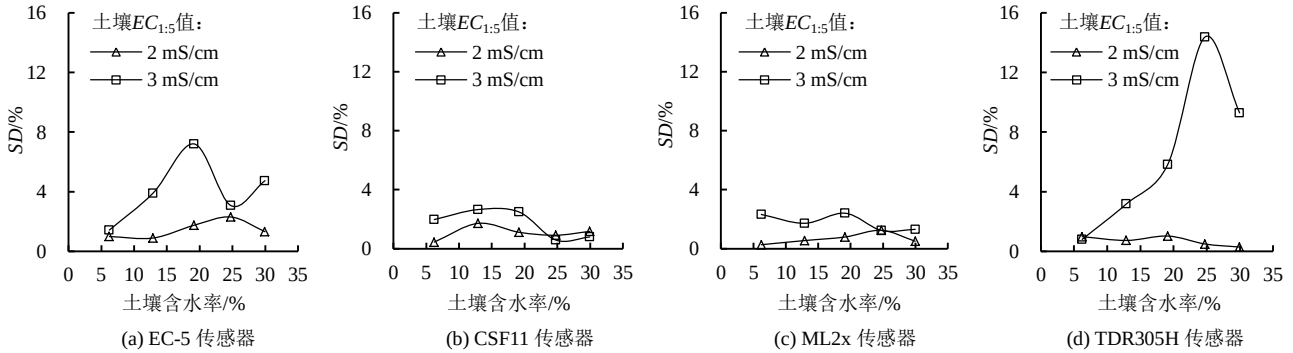


图3 低盐条件下($EC_{1:5}=2\sim3\text{ mS/cm}$)各传感器的SD值随土壤含水率变化

Fig.3 The change of SD value of each sensor with soil moisture under low salt condition ($EC_{1:5}=2\sim3\text{ mS/cm}$)

2.3 中高盐条件下($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)传感器测量的准确性与精确性

图4和图5为不同传感器在中高盐($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)条件下的AE值和RE值。由图4和图5可知,土壤电导率不同时,3种FDR传感器的AE值随土壤含水率的增大呈先升后降趋势,TDR传感器的AE值随土壤含水率升高呈上升趋势。土壤含水率相同时,土壤 $EC_{1:5}$ 值增加,同一传感器的AE值增加,说明土壤电导率增加导致准确度降低;土壤电导率相同时,土壤含水率对不同传感器的AE值影响不同。在中高盐($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)水平下,ML2x传感器在5、7、9 mS/cm下土壤含水率全量程范围内的平均AE值分别为16.02%、17.64%、18.09%,精度最高,

且AE值随土壤含水率的变化不显著。TDR305H传感器的AE值最大,在土壤 $EC_{1:5}$ 值为5、7、9 mS/cm时,AE值分别为31.87%、54.79%、53.27%,精度最低,AE值随土壤含水率的增加呈指数增加,甚至出现土壤含水率大于100%的不合理数据。EC-5传感器在土壤含水率低于12.89%时,RE值有一段递增过程,随后与CSF11、ML2x传感器类似,RE值随土壤含水率的增加而降低,FDR传感器在土壤含水率大于12.89%时均表现为土壤含水率越高反而RE值越小;TDR传感器在土壤含水率较低($\leq 6.23\%$)时AE值和RE值最小,准确性最高,之后均剧烈增加,测量结果极不合理。

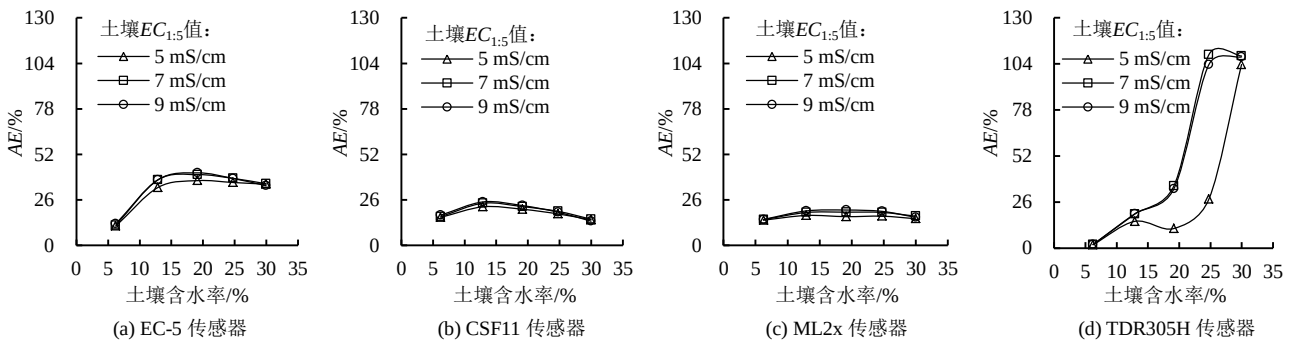
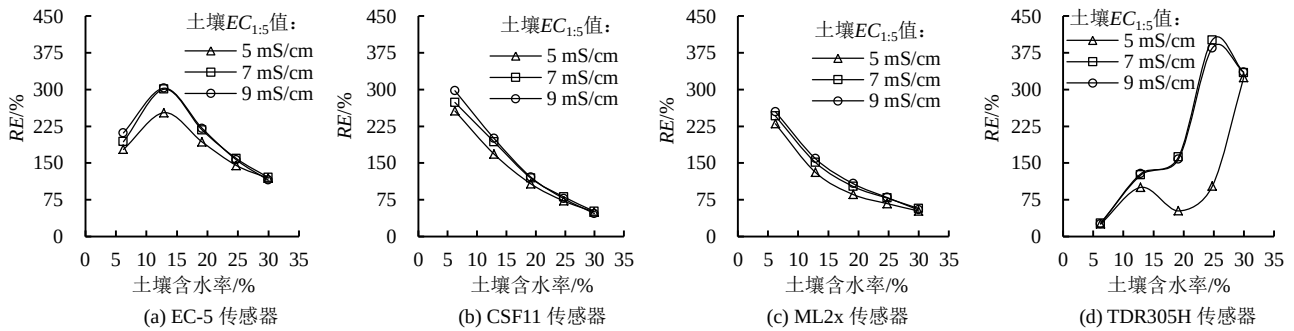
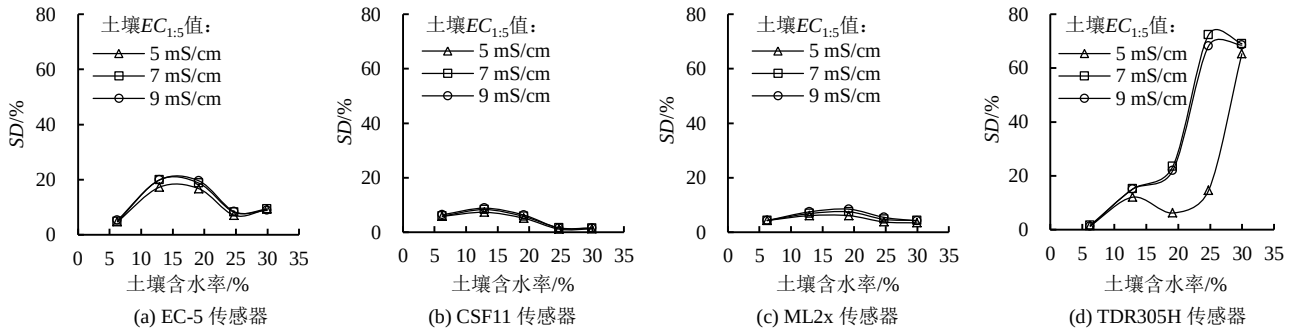


图4 中高盐条件下($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)各传感器的AE值随土壤含水率的变化

Fig.4 The change of AE value of each sensor with soil moisture under medium and high salt conditions ($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)

图6为不同传感器在中高盐($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)条件下SD值。由图6可知,中高盐($EC_{1:5}=5\sim9\text{ mS/cm}$)条件下,4种传感器的SD值趋势线几乎重合,说明此时传感器的精确度趋于稳定。从整体来看,CSF11、ML2x传感器在中高盐条件下的SD值最小,分别为 $1.12\%\sim8.82\%$ 和 $3.42\%\sim8.46\%$,SD值随土壤含水率增

加变化不大。EC-5传感器的SD值随土壤含水率的增加呈先增加后降低趋势,TDR305H传感器的SD值随土壤含水率的增加呈显著上升趋势,土壤含水率为24.75%时达到最大值,3个土壤电导率水平下的SD均值达到了51.71%。

图5 中高盐条件下 ($EC_{1.5}=5\sim 9$ mS/cm) 各传感器的 RE 值随土壤含水率的变化Fig.5 The change of RE value of each sensor with soil moisture under medium and high salt conditions ($EC_{1.5}=5\sim 9$ mS/cm)图6 中高盐条件下 ($EC_{1.5}=5\sim 9$ mS/cm) 各传感器的 SD 值随土壤含水率的变化Fig.6 The change of SD value of each sensor with soil moisture under medium and high salt conditions ($EC_{1.5}=5\sim 9$ mS/cm)

2.4 校准方程对传感器测量准确度和精确度的改善

基于各土壤水分传感器说明书中厂家所给的原始校准方程, 本文尝试在不同电导率条件下建立实际含水率与传感器测量的土壤含水率之间新的对应关系。CSF11 传感器基于原始校准进行改进; EC-5、ML2x 传感器在低盐条件下基于原始校准方程进行改进, 中高盐条件下则选择了拟合度更好的多项式函数; TDR305H 传感器在低、中高盐分条件下均采用拟合度更好的幂函数。通过分析传感器测量的土壤含水率与实际土壤含水率的关系, 获得了在低盐和高盐条件下各传感器校准前后的土壤含水率、校准方程及 AE 值、 RE 值、 SD 值的改善结果, 结果见表 5。由表 5 可知, 不同盐分条件下, 通过线性或非线形拟合, 均可得到较好的校准方程, 低盐条件下, 利用各校准方程计算得到的土壤含水率的 R^2 在 0.901~0.943 之间; 中高盐条件下, R^2 在 0.834~0.947 之间。低盐条件下, EC-5、CSF11、ML2x、TDR305H 传感器经过校准后的 AE 值较校准前分别降低了 86.515%、85.098%、82.840%、70.415%, RE 值分别降低了 84.713%、

85.033%、82.927%、57.198%。中高盐条件下, EC-5、CSF11、ML2x 传感器校准后的 AE 值分别降低了 94.105%、87.246%、91.524%, RE 分别降低了 94.340%、90.714%、93.099%。校准不仅提高了测量的精确性, 还提高了测量的准确性。与校准前相比, 低盐条件下, EC-5、CSF11、ML2x 传感器的 SD 值分别降低了 72.200%、4.094%、15.790%, 达到 0.768%、1.331%、1.041%。中高盐条件下, EC-5、CSF11、ML2x 传感器的 SD 值分别降低了 93.071%、71.597%、84.942%, 达到 0.821%、1.293%、0.814%。TDR305H 传感器的表现类似, 低盐条件下, 传感器的 SD 值降低了 72.888%; 高盐条件下, 传感器的 SD 值降低了 98.336%。总体而言, 校准对传感器准确度和精确度的改善较明显, 校准后, AE 、 RE 、 SD 值最低分别可以达到 1.462%、8.537%、0.50%。与原始校准方程相比, 新的校准方程极大地提高了各传感器在不同盐分条件下的土壤含水率测量精确度与准确度, 其中以 EC-5 传感器改善效果最为明显。

表 5 不同土壤盐分条件下各传感器土壤含水率校准结果

Table 5 Calibration results of soil water content of each sensor under different soil salinity conditions

传感器	土壤盐分	土壤含水率/%		校准方程	R^2	指标降低百分比/%		
		校准前	校准后			AE	RE	SD
EC-5	低盐	36.37	19.02	$y = 0.474x + 1.902$	0.901	86.515	84.713	72.200
	中高盐	50.26	18.36	$y = 0.0145x^2 - 0.73x + 14.559$	0.907	94.105	94.340	93.071
CSF11	低盐	32.49	19.02	$y = -6.005 + 0.770x$	0.911	85.098	85.033	4.094
	中高盐	37.43	18.33	$y = 19.523 - 1.396x + 0.035x^2$	0.834	87.246	90.714	71.597
ML2x	低盐	29.19	19.02	$y = -7.526 + 0.909x$	0.943	82.840	82.927	15.790
	中高盐	35.56	18.28	$y = 1.250 - 0.062x + 0.014x^2$	0.947	91.524	93.099	84.942
TDR305H	低盐	28.88	20.25	$y = 2.064x^{0.692}$	0.912	70.415	57.198	72.888
	中高盐	67.17	20.58	$y = 2.930x^{0.487}$	0.882	92.589	87.223	98.336

2.5 不同传感器在盐碱地上测定土壤水分的评价

线性或非线性校准方程很好地拟合了实际土壤含水率和传感器测量土壤含水率值。由图 7 可知, 低盐条件下, EC-5、CSF11、ML2x 传感器校准后土壤含水率与实际土壤含水率的绝对误差最大均不超过 5%, TDR305H 传感器校准后土壤含水率整体上较 EC-5、CSF11、ML2x 传感器更接近实际土壤含水率, 只是在土壤含水率较高时 ($\geq 26.804\%$) 仍会偏离 1:1 线。从图 8 可以看出, 中高盐分条件下, ML2x 传感器校准后土壤含水率与实际土壤含水率拟合最好, 整体上绝对误差最大不超过 4.40%, TDR305H 传感器经过校准后的土壤含水率在土壤含水率较低时 ($\leq 15.708\%$) 与 1:1 线非常吻合, CSF11 传感器在 4 种传感器中拟合效果最差, 在土壤含水率为 30% 时绝对误差最大达到 9.082%, EC-5 传感器与 CSF11、TDR305H 传感器相比拟合较好, 绝对误差基本上不超过 5%。综合考虑, 在低盐条件下各传感器的精确度和准确度表现为 ML2x 传感器 > TDR305H 传感器 > CSF11 传感器 > EC-5 传感器, 中高盐条件下精确度和准确度表现为 ML2x 传感器 > EC-5 传感器 > TDR305H 传感器 > CSF11 传感器。通常传感器的选择不仅要考虑精确度、准确度和适用范围, 还需要考虑价格因素, 4 种传感器的价格分为高、中、低 3 档: 低档传感器价格在 1 000 元以内, 为 EC-5、CSF11 传感器; 中档传感器价格不超过 3 000 元, 为 TDR305H 传感器; 高档传感器价格不超过 5 000 元, 为 ML2x 传感器。因此, 资金充裕且含盐量不超过 9 mS/cm 时, 可选用 ML2x 传感器; 资金紧张时, 低盐条件下选用 CSF11 传感器, 中高盐条件下选用 EC-5 传感器; 土壤含水率不超过 20% 时, TDR305H 传感器测量土壤含水率的精确度和准确度较高。

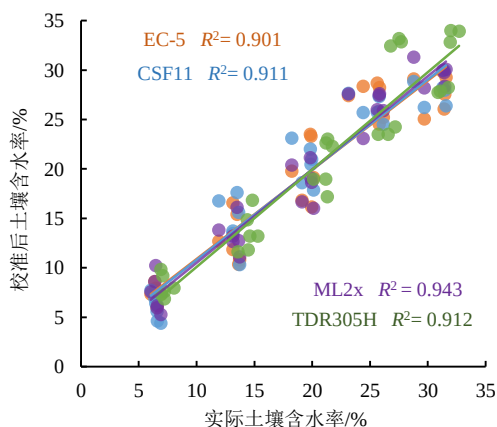


图 7 低盐条件下 ($EC_{1.5}=2\sim 3$ mS/cm) 各传感器校准后土壤含水率与实际土壤含水率的拟合

Fig.7 Fitting diagram of the measured values of each sensor after calibration and the actual soil water content under low salt conditions ($EC_{1.5}=2\sim 3$ mS/cm)

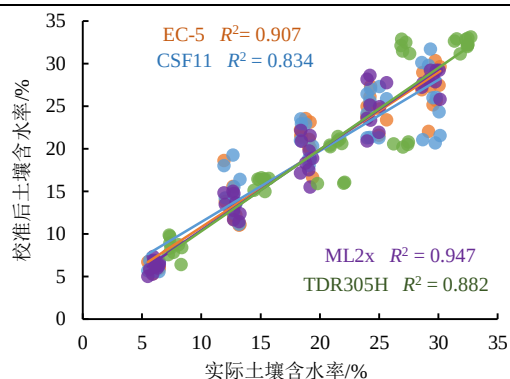


图 8 中高盐条件下 ($EC_{1.5}=5\sim 9$ mS/cm) 各传感器校准后土壤含水率与实际土壤含水率的拟合

Fig.8 The fitting diagram of the measured values of each sensor after calibration and the actual soil water content under medium and high salt conditions ($EC_{1.5}=5\sim 9$ mS/cm)

3 讨论

土壤含盐量对许多土壤水分传感器的输出有强烈的影响^[19-20]。本试验使用基于介电原理的 FDR 和 TDR 传感器, 前者是根据电磁波在土壤中传播频率来测试土壤介电常数, 而后者则是根据电磁波在不同介电常数物质中传播速度的差异求出土壤介电常数, 最终二者都通过土壤介电常数进而求得土壤含水率。本研究发现, 土壤含盐量和土壤含水率的增加都会影响水分传感器的准确性, 这与刘蓓^[21]、Scudiero 等^[22]的研究结果一致, 这可能是因为土壤含盐量影响土壤导电性, 即介电常数的虚部, 当土壤含水率较小时, 土壤介电常数虚部与土壤含盐量的关系不明显, 而当土壤含水率较大时, 介电常数虚部同时与土壤含水率、土壤含盐量具有明显的正相关关系, 土壤溶液中盐离子极大的影响了土壤-水-电解液系统的电导率, 增加土壤介电常数虚部中电导率项的作用, 从而影响土壤的介电特性^[23]。试验所用的传感器虽然均会受土壤含盐量和土壤含水率的影响, 但是 CSF11、ML2x 传感器在低、中高盐条件下, 其绝对误差和相对误差较 EC-5、TDR305H 传感器平缓, 这可能是因为传感器探针的物理属性不同, EC-5 传感器为二探针传感器, CSF11、ML2x 传感器为三探针传感器, Zegelin 等^[18]研究显示, 二针的传感器会形成更清晰的反射, 更适合土壤盐分较高的土体, 而 TDR305H 传感器虽为三探针传感器, 但其三探针之间的间距较 CSF11、ML2x 传感器大, 也有研究显示^[24], 探针间距较宽, 增加传感器信号的消耗, 使电磁波传送时间变长, 所测得介电常数增大, 进而导致测量结果变大。刘鹏等^[25]对市场上主流水分传感器在高盐分土壤中 (6.8 g/kg) 的含水率进行量化对比及校正, 其中选取的 EC-5、TDR305H、CS655 传感器与本试验相

同, 试验发现 CS655 传感器在土壤含水率范围失真, EC-5、TDR305H 传感器在整个试验阶段均未出现失真, 这与本试验结果一致, TDR305H 传感器的 *MAE* 和 *RMSE* 均小于 $0.11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, EC-5、TDR305H 传感器的 *MAE* 和 *RMSE* 较高, 但均小于 $0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。崔静等^[26]研究发现, 土壤电导率小于 2.56 dS/m 时, TDR 传感器测定电压与烘干法测得土壤含水率显著正相关; 土壤电导率大于 3.2 dS/m 时, 测定数值不能很好地反映土壤含水率变化。本文所选用的 TDR305H 传感器在土壤电导率值为 $2、3 \text{ mS/cm}$ 时也能较好地反映土壤含水率变化, 同一盐分条件下, 土壤含水率的增加会影响 TDR 传感器测量的精确度和准确度。

本文只选择新疆阿拉尔第一师水利局灌溉试验站的砂壤土对各传感器进行不同土壤盐分和土壤水分条件下的测试, 可能在其他地区还不适用。未来应设置不种质地土壤对各传感器精确度和准确度的影响试验, 从而建立应用于不同土壤盐分、土壤水分、土壤质地的土壤含水率校准体系。

4 结 论

1) 传感器的精确度和准确度受土壤盐分和土壤水分影响。

2) 4 种传感器在低盐条件下精确度和准确度表现为 ML2x 传感器 > TDR305H 传感器 > CSF11 传感器 > EC-5 传感器; 中高盐条件下表现为 ML2x 传感器 > EC-5 传感器 > TDR305H 传感器 > CSF11 传感器。

3) 综合精确度、准确度及价格, 资金充裕且含盐量不超过 9 mS/cm 时, 可选用 ML2x 传感器; 资金紧张时, 低盐条件下选用 CSF11 传感器, 中高盐条件下选用 EC-5 传感器; 当土壤含水率不超过 20% 时可选用 TDR305H 传感器。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- 胡建东, 李林泽, ABDULRAHEEM Mukhtar Iderawumi, 等. 介电特性土壤水分测定方法研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(4): 603-611, 638.
- HU Jiandong, LI Linze, IDERAWUMI A M, et al. Research progress of soil water content measurements using dielectric properties[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(4): 603-611, 638.
- MAJCHER J, KAFARSKI M, WILCZEK A, et al. Application of a dagger probe for soil dielectric permittivity measurement by TDR[J]. Measurement, 2021, 178: 109 368.
- DENG X, GU H N, YANG L, et al. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance[J]. Measurement, 2020, 150: 107 052.
- ZAWILSKI B M, GRANOULLAC F, CLAVERIE N, et al. Calculation of soil water content using dielectric-permittivity-based sensors—benefits of soil-specific calibration[J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2023, 12(1): 45-56.
- LOUKI I I, AL-OMRAN A M. Calibration of soil moisture sensors (ECH₂O-STE) in hot and saline soils with new empirical equation[J]. Agronomy, 2022, 13(1): 51.
- SONGARA J C, PATEL J N. Calibration and comparison of various sensors for soil moisture measurement[J]. Measurement, 2022, 197: 111 301.
- LI B Z, WANG C M, GU X F, et al. Accuracy calibration and evaluation of capacitance-based soil moisture sensors for a variety of soil properties[J]. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107 913.
- 赵学伟, 王萍, 李新举, 等. 基于 BP 神经网络 GPR 反演滨海盐渍土含盐量模型构建[J]. 山东农业科学, 2018, 50(5): 152-155.
- ZHAO Xuewei, WANG Ping, LI Xinju, et al. Model construction of saline soil salinity inverted by GPR based on BP neural network[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(5): 152-155.
- MITTELBAACH H, LEHNER I, SENEVIRATNE S I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland[J]. Journal of Hydrology, 2012, 430/431: 39-49.
- KIM D, SON Y, PARK J, et al. Performance evaluation and calibration of capacitance sensor for estimating the salinity of reclaimed land[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 206-210.
- LOUKI I I, AL-OMRAN A M, ALY A A, et al. Sensor effectiveness for soil water content measurements under normal and extreme conditions[J]. Irrigation and Drainage, 2019, 68(5): 979-992.
- INOUE M, OULD AHMED B A, SAITO T, et al. Comparison of three dielectric moisture sensors for measurement of water in saline sandy soil[J]. Soil Use and Management, 2008, 24(2): 156-162.
- SPELMAN D, KINZLI K D, KUNBERGER T. Calibration of the 10HS soil moisture sensor for southwest Florida agricultural soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(12): 965-971.
- ROSENBAUM U, HUISMAN J A, VRBA J, et al. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH₂O sensors[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(2): 582-593.
- CARDENAS-LAILHACAR B, DUKES M D. Effect of temperature and salinity on the precision and accuracy of landscape irrigation soil moisture sensor systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(7): 04 014 076.
- 雷磊. 盐渍土介电特性研究及对雷达图像的响应分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- LEI Lei. Studies on dielectric behavior of saline soil and its effect on backscattering coefficients extracted from radar image[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2011.
- 谭秀翠, 杨金忠, 查元源. 土壤含盐量对 TDR 含水率测试结果的影响及校正方法[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 1-6.
- TAN Xiucui, YANG Jinzhong, ZHA Yuanyuan. The impact of soil salinity on measurement of water content by using TDR and the calibration method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 1-6.
- ZEGELIN S J, WHITE I, JENKINS D R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1989, 25(11): 2 367-2 376.
- KARGAS G, KERKIDES P, SEYFRIED M S. Response of three soil water sensors to variable solution electrical conductivity in different soils[J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(9): 1-13.
- KARGAS G, SOULIS K X. Performance evaluation of a recently developed soil water content, dielectric permittivity, and bulk electrical conductivity electromagnetic sensor[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 568-579.

- [21] 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]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
LIU Bei. Detection model of FDR moisture content sensor affected by soil salinity and temperature[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [22] SCUDIERO E, BERTI A, TEATINI P, et al. Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 17 588-17 607.
- [23] 胡庆荣. 含水含盐土壤介电特性实验研究及对雷达图像的响应分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- [24] TOPP G C, DAVIS J L. Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling[M]. Amsterdam: Elsevier, 1985: 107-127.
- [25] 刘鹏, 姜月华, 杨海, 等. 高盐土壤环境对土壤水分传感器的影响及校正研究[J]. 西北农业学报, 2023, 32(1): 109-116.
LIU Peng, JIANG Yuehua, YANG Hai, et al. Performance analysis and calibration of soil moisture sensors in heavy saline soil environment[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2023, 32(1): 109-116.
- [26] 崔静, 马富裕, 范守杰, 等. 利用 TDR 对不同盐分土壤水分含量的测定[J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 82-86.
CUI Jing, MA Fuyu, FAN Shoujie, et al. Measurement of soil water content in different soil salt contents using time domain reflectrometry (TDR)[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(12): 82-86.
- [27] ZHANG R B, GUO J J, ZHANG L, et al. A calibration method of detecting soil water content based on the information-sharing in wireless sensor network[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(2): 161-168.

The Effect of Soil Salinity on Accuracy of Soil Moisture Sensors

HU Huiling^{1,2}, WANG Feng¹, FENG Quanqing^{1,2}, HAN Qisheng¹,
NING Huifeng¹, LI Xiaogang³, WANG Jinglei^{1*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/

Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Xinjiang Production and Construction Corps First Division Hydrology and Water Resources Management Center, Alaer 843399, China)

Abstract: 【Objective】 Soil moisture sensors have been increasingly used in different fields to measure soil water content at high temporal resolution, but its reliability depends on many factors. In this paper, we investigate the effect of soil salinity on their accuracy. 【Method】 The laboratory experiment was conducted at the Irrigation Test Station of the First Division of Xinjiang Alaer Corps. FDR and TDR sensors were used in the experiment. We compared five salinity treatments: 2, 3, 5, 7, 9 mS/cm; the soil moisture was adjusted to the field capacity followed by natural evaporation. The absolute error (AE), relative error (RE) and standard deviation (SD) were used to evaluate the accuracy and consistency of the sensors. 【Result】 Soil moisture and salinity both affected accuracy and consistency of the sensors. Without calibration, the accuracy of the CSF11 and ML2x sensors was high and measurements were consistent, while the EC-5 and TDR305H sensors were less accurate and consistent due to the combined influence of soil salinity and moisture. Calibration significantly improved the accuracy and consistence of all four sensors. 【Conclusion】 Considering accuracy and consistency, the expensive ML2x sensors worked best when salt content does not exceed 9 mS/cm. The less expensive CSF11 sensors also worked well when soil salt is low. The EC-5 sensors can measure soil moisture reasonably well for soil with moderate and high salinity. When the soil moisture is less than 20 cm³/cm³, TDR305H sensors is accurate and reliable.

Key words: soil moisture; FDR; TDR; soil salt content; precision; accuracy; calibration

责任编辑: 白芳芳