

新型 FDR 土壤水盐一体传感器标定研究与应用

郭 佳¹, 王振营^{2*}, 郑育锁³, 刘志杰³, 袁 枫², 文晓明²

(1. 北京邮电大学, 北京 100876; 2. 沈阳巍图农业科技有限公司, 辽宁 沈阳 110026; 3. 天津市土壤肥料工作站, 天津 300061)

摘 要: 运用新型频域反射 (FDR) 技术和分频技术, 实现传感器水盐同时测量。因土壤质地、容重等差异, 土壤水盐标定是利用 FDR 监测土壤水盐过程中的必要环节。以东北壤土为试验对象, 利用“由湿到干, 由小到大”的土壤水盐运动规律, 通过土柱试验, 用烘干法和土壤溶液电导率法对 FDR 进行室内标定研究。同时, 将时域反射 (TDR) 式水盐传感器作为对照系, 进行稳定性、精度度比较。结果表明: 1) 经土壤水分标定曲线校正后, FDR 式水盐一体传感器具有很高的测量精度, 可达 $\pm 1\% \sim 3\%$; 2) 在土壤里对同一水盐含量进行百次重复测定, TDR 传感器水分平均值为 20.07%, 相对标准偏差为 0.18%; 盐分 (电导率) 平均值为 0.29 mS/cm, 相对标准偏差为 11.06%; 新型 FDR 传感器水分平均值为 20.08%, 相对标准差为 0.21%; 盐分 (电导率) 平均值为 0.31 mS/cm, 相对标准差为 8.49%。新型 FDR 土壤水盐一体传感器可用于农田土壤连续水盐监测, 提供稳定、精确的基础数据, 结合数据分析软件, 指导种植生产。

关键词: 频域反射 (FDR); 土壤水盐; 土壤水盐原位监测; 标定

中图分类号: S151.9 文献标识码: A 文章编号: 1673-6257 (2016) 06-0156-06

土壤中的水分和盐分含量是作物水分和养分吸收的主要来源, 对作物生长具有决定性的影响, 如何在作物生长不同时期, 对耕作区的土壤含水量和可溶盐分浓度进行同时原位连续测量, 是了解土壤盐分的分布及运移规律, 进而实施耕作农田的有效灌溉和施肥管理等科学手段的一个基础性工作, 具有重要的意义。

国际上通过测量土壤介电常数的方式, 采用时域反射 (TDR) 和频域反射 (FDR) 技术进行土壤水盐原位测量, 获得了业内人士的普遍认可^[1-3]。国内土壤水盐同测技术的研究刚刚起步, 应用于生产实践的报道更少。沈阳巍图农业科技有限公司采用频域反射原理, 在同一传感器上采用分频技术, 对高频段进行复介电常数实部的测量, 即土壤含水量测量, 低频段进行复介电常数

虚部的测量, 实现了土壤孔隙水盐含量的同时测量。该种新型 FDR 土壤水盐一体传感器设计, 结合计算机技术, 将土壤水盐连续数据与作物生长时间进行连续观测, 帮助种植者进行灌溉施肥制度的分析与制定。

TDR 和 FDR 均可同时在同一体积元中测定土壤水分和土壤的溶质。两者埋设在土壤中不同深度的探头均可长期连续工作, 测量土壤水分、土壤溶液电导率以及土壤盐分浓度随时间的变化, 提供土壤盐分变化特征。其中 TDR 式探头的缺点是传感器与土壤接触式安装, 不易维护, 不易重复利用。FDR 式探头配置外探测管, 传感器与土壤无直接接触, 具有易维护, 可重复利用, 无安装残留和抗干扰性强等优点^[4-6]。

本文以 TDR 类产品为对照系, 从 FDR 原理与标定方法入手, 对比二者之间稳定性、测量精度等性能, 并就土壤水盐连续数据在农田种植中的作物生理学原理、技术路线等进行阐述。

1 传感器工作原理与标定方法

1.1 传感器工作原理

频域反射法 (FDR) 利用电磁脉冲原理, 根据电磁波在土壤中传播频率来测试土壤的表观介

收稿日期: 2016-02-01; 最后修订日期: 2016-08-04

基金项目: 天津市财政专项 (2015-2016) “土壤墒情远程自动监测与预警项目”; 科技型中小企业技术创新项目 (2013-2016) “土壤水分远程监测与精准灌溉系统” (13C26212100963)。

作者简介: 郭佳 (1994-), 男, 天津人, 在读大学生, 从事计算机、网络技术、物联网技术、土壤水盐传感器研究。E-mail: 774528244@qq.com。

通讯作者: 王振营, E-mail: chinacooperation@163.com。

电常数，得到土壤含水量和土壤电导率值。美国及澳洲的研究者在 20 世纪 90 年代发现，在测量复介电常数时，较高的频率表示土壤水分，而较低的频率则表示土壤水分和盐分的综合效应。高于 27 MHz，传感器测得的复介电常数主要是一个土壤含水量的函数，通常也是颗粒形状、孔隙率以及颗粒几何排列的函数。在低于 10 MHz 的频率下，水分含量、电导率与复介电常数之间呈现一个函数关系，它与土壤类型、温度及土壤溶液浓度有关。国内研究者也在试验中验证了这一规律^[7-8]。

沈阳巍图农业科技有限公司生产的土壤水盐一体传感器，当土壤中的水分、盐分增加时，其介电常数相应增大，测量电容值也随之上升，导致测量频率也会发生变化，从而测得土壤的含水量、含盐量，其基本逻辑关系见图 1。

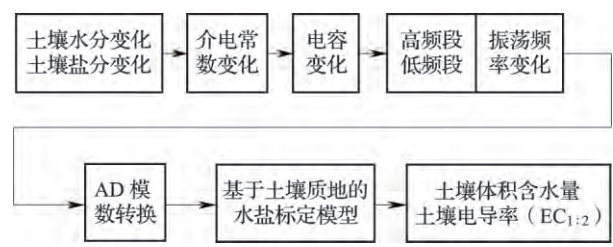


图 1 FDR 水盐同测原理基本逻辑关系

FDR 式土壤水盐一体传感器无需严格的校准，操作简单，受土壤温度的影响较小，并且其探头可与传统的数据采集器相连，从而实现自动连续的水盐监测。基于传感器的测量原理，该传感器设计的感应范围 90% 是从探测管外部 10 cm 以内的范围读取。

1.2 标定试验材料与方案

1.2.1 试验材料

供试土壤为壤土质地，采集于东北农田，其土粒密度 2.70 g/cm³，容重 1.2 g/cm³，孔隙度 50%，饱和导水率 1.02 × 10⁻⁴ cm/s，颗粒组成见表 1。

表 1 供试土壤颗粒组成

粒径 (mm)	重量百分比 (%)
<0.002	10.3
0.002~0.075	67.5
0.075~0.25	17.3
0.25~0.85	0.2
0.85~2.00	4.7

将土壤打碎，去除植物根系、落叶等杂物，过 2 mm 筛，结合土壤现有含水量及样柱体积，按照 1.2 g/cm³ 的容重（田间实测容重），均匀加入样柱中，并将土壤压实，制作成标准样品土样。土层高 40 cm，每 10 cm 为一测试土层。共制作 12 个样柱，每两个样柱为一组处理。

样柱高 50 cm（可根据试验数据密度要求进行层次调整，本试验为 4 层土壤），直径 20 cm，中间放置探测管（即本设计基于 FDR 的土壤原位水盐一体传感器的外壳）一根，样柱底部有排水孔若干。

1.2.2 标定技术路线与步骤

新型 FDR 土壤水盐一体传感器输出的电器原始信号是频率，在频率信号和土壤的水分含量和盐分含量之间建立曲线联系，是传感器的标定过程。其中土壤水分的标定过程已经成熟，因此，本文仅对土壤盐分的标定过程进行阐述。

土壤的导电性受到土壤含水量的严重影响，在土壤电导率的测量时，必须考虑随着土壤水分含量的变化，如何补偿电导率的变化。如果单位体积土壤中携带一定量可溶性盐的土壤溶液减少或增加，那么土壤盐度也会改变。使用同一传感器确定土壤电导率，将传感器进行网络化布局构成一个可以记录、存储、最终显示大量基本上连续的土壤水分、复介电常数的处理工具，是确定介质电导率的一种方法，该方法包括以下步骤：

- (1) 通过该传感器装置在第一种操作模式下得出的第一个复介电常数（基本上代表介质的非导电组分）来确定；
- (2) 通过该传感器装置在第二种操作模式下得出的第二个复介电常数（代表介质的导电和非导电组分）来确定；
- (3) 基于先前所述的方法得到确定介质绝对电导率的方法，应用相关方程确定下列方程的相对复介电常数：

$$K(w) = k'(w) - ik''(w)$$

其中：K(w) 为相对复介电常数；k'(w) 为相对介电常数；k''(w) 为相对介电损耗系数；w 为角频率。

应用以下方程可以计算电导率 σ (dS/m)：

$$\sigma = k''(w) \times \epsilon_0(w)$$

其中：ε₀ = 8.85 × 10⁻¹² F/m，ε₀ 为真空介电常数，单位为 F/m。

因此不难发现,由传感器产生的频率差与所测介质的定性电导率有直接关系,并且通过对两组或两组以上测量结果进行比较可以得出土壤电导率变化趋势的定量指标。

在实际的标定过程中,即将传感器测量中干扰土壤电导率的背景值全部去除,包括空气值、纯水

值、干土壤值、饱和土壤值,通过数据分析的方法去除土壤水分对电导率的影响,在同一水分含量下,分析盐分对传感器介电测量的影响,得到盐分标定曲线。其具体标定步骤如下:

步骤一:先对空气值、水值、干土壤值和饱和土壤值进行测定。

表2 传感器在不同土壤背景值中的 AD 模数

土壤质地	ADaH	ADwH	ADaL	ADwL	ADdsH	ADssH	ADdsL	ADssL	ADsH	ADsL
壤土	12 773.02	18 076.92	22 439.97	39 044.71	14 323.06	16 423.96	38 407.37	41 668.11	15 482.07	38 042.10

注: ADaH: 高频段空气中设备 AD 模数; ADwH: 高频段水中设备 AD 模数; ADaL: 低频段空气中设备 AD 模数; ADwL: 低频段水中设备 AD 模数; ADdsH: 高频段干土中设备 AD 模数; ADssH: 高频段饱和土壤中设备 AD 模数; ADdsL: 低频段干土中设备 AD 模数; ADssL: 低频段饱和土壤中设备 AD 模数; ADsH: 高频段土壤中设备 AD 模数; ADsL: 低频段土壤中设备 AD 模数。

步骤二:用滴灌系统模拟田间水肥一体化灌溉,直至样柱土壤水分饱和。6 组样柱使用灌溉水的电导率分别为 0.012、1.462、2.60、3.64、4.92、6.16 mS/cm。其中,第 1 组是蒸馏水,其余 5 组溶解了复合肥料。采用的复合肥料也可以用单一肥料离子替代,制作出的曲线即为单一离子的标定曲线。

步骤三:待水盐运移 24 h 后,使用本传感器测量第一土层的 ADsH 和 ADsL,并做好记录。

步骤四:对样柱第一土层进行土壤样品采集,用烘干法测量土壤含水量数值,并测量土壤土水质量比 1:2 的电导率值 $EC_{1:2}$ 。

步骤五:以后每隔二周左右进行一次下一土层的 ADsH 和 ADsL 测量,并采集土壤样品,用烘干法测量土壤含水量数值,并测量土壤土水质量比 1:2 的电导率值 $EC_{1:2}$,即重复步骤三、四操作。注意:其中的间隔时间需要实验者自行掌握,标准是样柱中各土层的含水量值拉开差距,从饱和土壤至干土壤都有。

步骤六:数据处理,将数据进行整理,分别制作土壤含水量标定曲线和土壤盐分标定曲线。

步骤七:在曲线获得后,使用专业安装工具,田间实际安装 FDR 土壤水盐一体传感器,对应 10~20 cm 土层,读取传感器感应数据和土壤体积含水率、土水质量比 1:2 电导率,以验证所得标定方程的精度及可行性。

1.3 标定曲线的建立与验证

1.3.1 土壤体积含水量测量结果

通过使用 FDR 传感器测量空气和纯水,可以得到介质为空气和水的感应频率,再计算归一化频

率 SF,并通过幂指数函数与土壤体积含水量建立模型的方式,已经是目前 FDR 测量土壤水分的成熟技术,得到大家的广泛认可和验证^[9-10]。

对东北壤土的数据进行整理,其曲线方程决定系数达到 0.96。

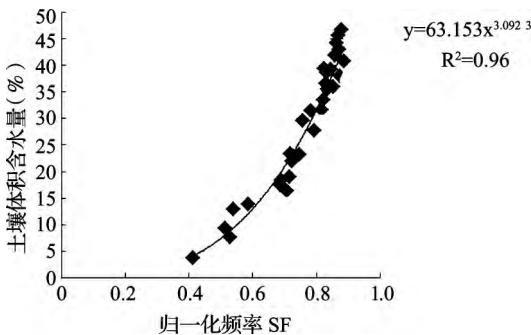


图2 东北壤土体积含水量标定曲线

1.3.2 土壤盐分测量结果

在进行盐分测量时,需要去除土壤质地所代表的一系列背景值,包括空气值、水值、干土壤值和饱和土壤值。通过数据分析,本设计引入了 VSIC 的概念,用于扣除不同土壤背景值对盐分测量的影响。VSIC 定义为体积盐离子含量,由 LC 振荡电路在不同介质中输出的 AD 模数计算得到,其计算公式为:

$$VSIC = \frac{[(ADaL \times 3 - ADaH - ADdsH - ADdsL) - (ADsL \times 3 - ADsH - ADssH - ADssL)]}{[(ADaL \times 3 - ADaH - ADdsH - ADdsL) - (ADwL \times 3 - ADwH - ADssH - ADssL)]} \times 10\,000$$

将 VSIC 值与土壤 $EC_{1:2}$ 值代入以下公式获得土壤盐分数据的标定模型:

$$EC_{1:2} = a_2 \times VSIC + b_2$$

其中, a_2 、 b_2 为土壤盐离子标定曲线常数; 其曲线方程决定系数达到 0.805 5。

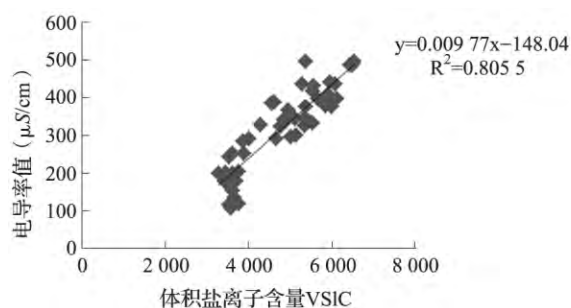


图3 东北壤土 $EC_{1:2}$ 标定曲线

1.3.3 标定结果的验证

在田间取土试验的同一地块, 使用专业安装工具, 田间实际安装 FDR 土壤水盐一体传感器, 对应 10~20 cm 土层, 读取传感器感应数据和土壤体积含水率、土水质量比 1:2 电导率, 本文选择田间土壤标定后, 携带仪器到田间标定土层进行实测的 10 cm 土层深度的结果如表 3。

表3 土壤水盐一体传感器标定方程及误差分析结果

项目	方程类型	标定方程	决定系数	样本个数	平均相对误差 (%)	标准误差
水分	幂指数	$Y = 63.153x^{3.0923}$	0.96	10	0.27	0.055
盐分	线性	$Y = 0.0977x - 148.04$	0.8055	10	11.67	0.011

该传感器水分测量的分辨率为 0.1%, 精度标定后可达 $\pm 1\% \sim 3\%$ 。传感器盐分测量的分辨率可达 0.001 mS/cm, 精度 $\pm 8.9\%$ (介于 4%~45% 的水含量和 0~7 mS/cm 电导率之间)。

2 TDR 式与新型 FDR 式传感器对比

2.1 TDR 设备选择

本文选择 TDR 探头 (CAMPBELL, CS-610) 为三针式, 探针直径 0.48 cm、长 30 cm, 各针间距 2.2 cm。TDR 探头水平插入土壤中, 尽量减少对土壤原状的扰动。

2.2 多次重复测试与结果

室内实验环境下, 在土壤里对同一含水、含盐量 (体积水分含量 20%, $EC_{1:2}$ 为 0.30 mS/cm) 进行 100 次重复测定, 使用数据采集器对传感器数据每 10 min 进行一次采集。依据两种传感器的测量数值分别计算平均值和相对标准偏差。

使用 TDR 在同一含水、含盐量情况下连续读

数 100 次, 取得 100 个单次计数值, 水分平均值为 20.07%, 相对标准偏差为 0.18%; 盐分平均值为 0.29 mS/cm, 相对标准偏差为 11.06%。

使用 FDR 在同一含水、含盐量情况下连续读数 100 次, 取得 100 个单次计数值, 水分平均值为 20.08%, 相对标准偏差为 0.21%; 盐分平均值为 0.31 mS/cm, 相对标准偏差为 8.49%。

3 新型 FDR 在农田土壤连续水盐监测上的应用

借助数据分析软件 (作物水盐廓线监测分析系统 IrriScan), 用图解的方法将土壤各土层水分、盐分数据进行线性显示, 横轴为培育作物的时间, 结合田间灌溉操作进行数据分析, 积累 “经验”, 进行种植调整。

现用图解的方式, 展示基于土壤水分测量的灌溉方案制定过程。

步骤一: 判断作物生长的根系层深度, 作为计划灌溉的湿润层。非饱和土壤中有效水分移动不超过几厘米, 因此如果希望植物从某一土层吸水, 那么此层必须有根系存在。

图 4 中, 10 和 20 cm 土层出现以昼夜为单位的水分梯度下降趋势, 据此判断根系生长范围在 10 和 20 cm 土层内, 40 cm 土层含水量表现为平滑下降, 无昼夜植物根系吸水造成的波动变化, 因此判断此土层无植物根系存在。

步骤二: 作物日耗水量、补偿点、饱和点判断。只要土壤含水量保持在补偿点以上, 植物气孔就一直张开, 日耗水量保持不变, 光合作用也就保持不变。土壤含水量的降低导致植物气孔的孔径减小, 光合作用降低。这就是土壤水分降低到补偿点以下时光合作用迅速降低的原因。光合作用降低将导致物质累积速率的降低, 影响细胞再生和发育。

将根系生长各土层的含水量进行累加计算, 得到土层内总的水量, 可以看出, 水量呈昼夜梯度降低的趋势, 一日的变化量, 即为日耗水量 (图 5)。

当作物因过涝或干旱, 造成光合作用减弱时, 其水分消耗也随之减弱, 在土壤水分的消耗上, 表现为日耗水量的下降。如图 6 所示, 当一次灌溉或降雨事件发生后, 在饱灌点前, 因作物生长受到水涝的胁迫, 耗水速率较低, 饱灌点与胁迫点之间, 作物生长最旺盛, 水分消耗速率最大, 当进入胁迫点, 作物生长受到干旱胁迫, 水分消耗速率降低, 至萎蔫点, 作物基本在土壤中难以吸收到水分。

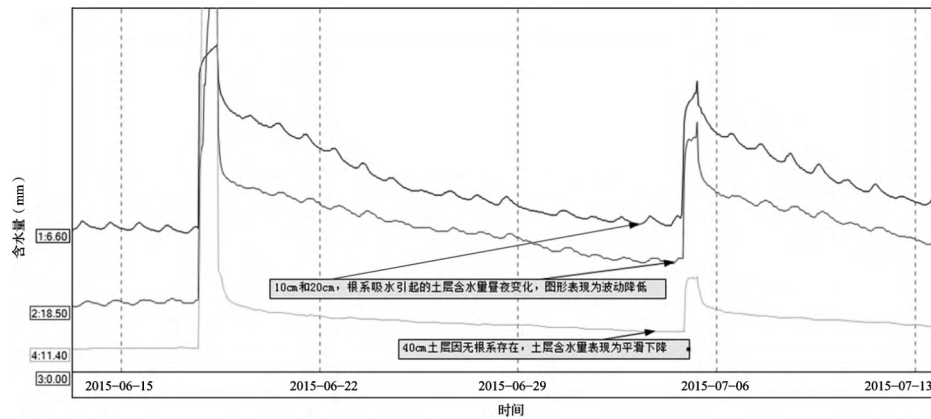


图4 各土层土壤水分时间走势图

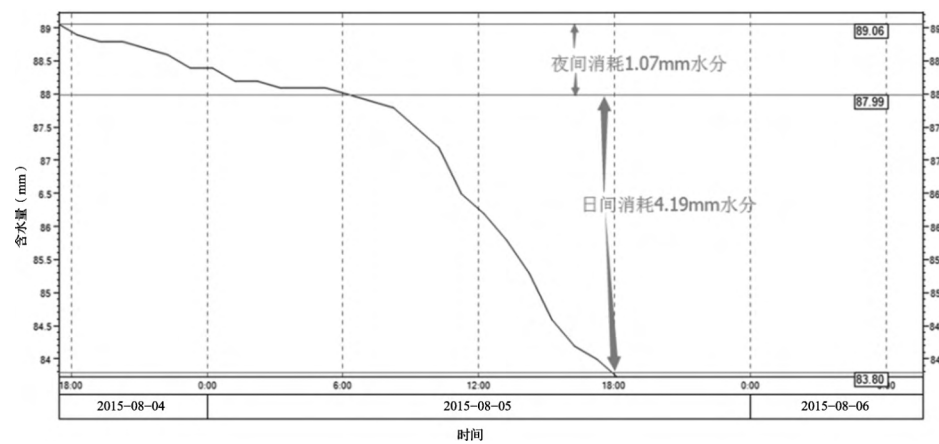


图5 土壤各土层日耗水量

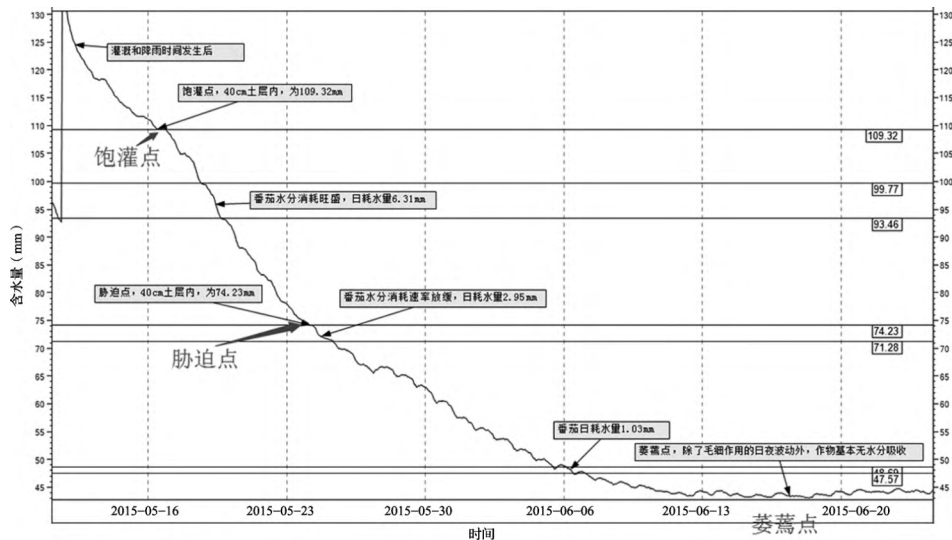


图6 饱和点与补偿点判断示意图

总之,用图解的方法分析土壤水分、盐分变化规律及作物生长规律,可了解到土壤田间持水量、有效水含量、水分渗透率、作物水分胁迫点、每日消耗动态、作物养分吸收、肥料溶解情况等。

4 结论

新型 FDR 土壤水盐一体传感器,采用分频技术,快速诊断和测定土壤的水、盐含量,实现田间

尺度上土壤的水、盐数据的快速采集与动态监测。介于 4% ~ 45% 的水含量和 0 ~ 7 mS/cm 电导率之间, 该传感器在壤土中的测量效果较好, 水分测量的分辨率为 0.1%, 精度标定后可达 $\pm 1\% \sim 3\%$, 盐分测量的分辨率可达 0.001 mS/cm, 精度 $\pm 8.9\%$ 。

总之, FDR 传感器响应快速、稳定性好、精度高, 与 TDR 测量方法相比, FDR 传感器与土壤隔离安装, 具有易维护、易回收、价格便宜等优点, 预计将在以下几个方面有较大的发展: 结合 3S 技术, 研究不同尺度土壤的水、盐运移和空间变异规律, 实现田间和区域尺度的土壤的水、盐快速诊断和预报; 发展自动水、盐调控系统, 根据实时水、盐含量数据, 进行作物种植的灌溉施肥指导, 在水肥耦合、土壤面源污染、施肥效果跟踪等方面发挥作用。

参考文献:

- [1] 曾江源, 李震, 陈权, 等. SAR 土壤水分反演中的介电常数实部简化模型 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31 (6): 556 - 562.
- [2] 邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究 [J]. 遥感学报, 2002, 6 (6): 416 - 423.
- [3] 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.
- [4] 胡建东, 赵向阳, 李振峰, 等. 参数调制探针式电容土壤水分传感器技术研究 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (5): 1057 - 1060.
- [5] 卢启福, 吴慕春, 胡月明, 等. 基于 TDR-3 的土壤水分传感器标定模型研究 [J]. 传感技术学报, 2009, 22 (7): 1066 - 1070.
- [6] 黄飞龙, 黄宏智, 李昕娣, 等. 基于频域反射的土壤水分探测传感器设计 [J]. 传感技术学报, 2011, 24 (9): 1367 - 1370.
- [7] 胡庆荣. 含水含盐土壤介电特性实验研究及其对雷达图像的响应分析 [D]. 北京: 中国科学院, 2003.
- [8] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 干旱区盐渍土介电常数特性研究与模型验证 [J]. 农业工程学报, 2013, 16 (8): 125 - 132.
- [9] 熊文成. 含水含盐土壤介电特性及反演研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [10] 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.

Research and application of new FDR soil water and salt integrated sensor calibration

GUO Jia¹, WANG Zhen-ying^{2*}, ZHENG Yu-suo³, LIU Zhi-jie³, YUAN Feng², WEN Xiao-ming² (1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876; 2. Shenyang Wei Figure Agricultural Science and Technology Co. Ltd., Shenyang Liaoning 110026; 3. Soil and Fertilizer Station of Tianjin, Tianjin 300061)

Abstract: A new type of FDR technology, which used frequency division technology and combined with sensor, was introduced for simultaneous measurement of soil water and salt. Due to the differences in soil texture, bulk density etc., calibration of FDR in site-specific soil water and salt was necessary in the process of soil water and salt monitoring with FDR. North-east soil was chosen as the research object, following the law of "from wet to dry, from small to big", method by soil column experiment, the FDR calibration was conducted by indoor drying method and soil solution conductivity method. At the same time, the TDR type water salt sensor was chosen as the control to compare the precision and accuracy. The results showed that: 1) After the correction by soil moisture calibration curve, the FDR integrated sensor had high accuracy in salt and water determination, which was up to $\pm 1\% \sim 3\%$; 2) When measuring the same water and salt content in the soil with 100 repeats, when monitored with the TDR moisture sensor, average value of soil water was 20.07%, the relative standard deviation was 0.18%, the average salinity was 0.29 mS/cm, and the relative standard deviation was 11.06%; when the new FDR sensor was used, the average water content, the relative standard deviation, the salinity and the relative standard deviation was 20.08%, 0.21%, and 0.31 mS/cm, and 8.49%, respectively. New FDR sensor could be used for continuous monitoring of the soil water and salt, to provide stable and accurate basic database.

Key words: frequency domain reflection (FDR); soil water and salt; in situ monitoring of soil water and salt; calibration