

基于非线性耦合的土壤电导率传感器标定方法

穆卫谊¹ 韩 宁¹ 曲 植^{1,2} 白云岗³ 郑 明^{1,3} 王全九^{1,2}

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;
3. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049)

摘要: 针对土壤电导率传感器测量不准确的问题,提出了不考虑含水率 θ 与考虑 θ 的非线性耦合标定模型,并开展了土壤电导率传感器的标定与验证试验。标定试验采用新疆维吾尔自治区阿拉尔市十团苹果园沙土,使用去离子水与NaCl设计了9组含水率梯度与6组含盐量梯度共54组土样,分别使用土壤电导率传感器与高精度电导率仪对土样的电导率进行测量;根据耦合模型分别对不考虑 θ 、考虑 θ 以及考虑 θ 细分的3种处理进行拟合分析;最后对同一苹果园设计了大田验证试验。结果表明,土壤电导率传感器测量的电导率 EC_0 以及电导率仪测量的电导率 EC_1 与土壤含盐量均呈正相关, EC_0 随 θ 的增加而增加, EC_1 随 θ 的增加而减少;3次拟合结果表明, θ 对电导率测量有显著影响,随 θ 细分,3个处理的残差逐渐减小,拟合决定系数 R^2 均不小于0.839且逐渐增大;验证试验结果表明所提出耦合模型可以有效提高电导率测量精度,该标定方法可为土壤电导率准确测量以及土壤电导率传感器标定校准等相关研究提供依据。

关键词: 土壤电导率; 含水率; 含盐量; 传感器标定; 非线性耦合

中图分类号: S237; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0356-08

OSID:



Coupling Calibration Method for Multivariate Nonlinear Soil Electrical Conductivity Sensor

MU Weiyi¹ HAN Ning¹ QU Zhi^{1,2} BAI Yungang³ ZHENG Ming^{1,3} WANG Quanjiu^{1,2}

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
2. State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
3. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China)

Abstract: In order to solve the problem of inaccurate measurement of soil electrical conductivity sensor, a nonlinear coupling calibration model without considering water content θ within considering θ was proposed, and the calibration and verification tests of soil electrical conductivity sensor were carried out. The calibration test was conducted by using the sandy soil of the apple orchard in the 10th Regiment, Xinjiang Alar, China. With deionized water and NaCl, totally nine group of moisture content gradients and six groups of salinity gradients, 54 soil samples were designed. The electrical conductivity of soil samples was measured by soil electrical conductivity sensor and high precision conductivity meter respectively. According to the coupling model, the three treatments without θ , with θ and with θ subdivision were fitted respectively. Finally, a field verification test was designed for the same apple orchard. The results showed that the conductivity EC_0 measured by soil electrical conductivity sensor and conductivity EC_1 measured by conductivity meter were positively correlated with the soil salt content. However, EC_0 was increased with the increase of θ , while EC_1 was decreased with the increase of θ . The results of cubic fitting showed that θ had a significant effect on the measurement of electrical conductivity, and the residual of the cubic fitting was decreased gradually with θ subdivision. The fitting determination coefficients R^2 were not less than 0.839, which were gradually increased, and the fitting accuracy was increased. The verification test results showed that the proposed coupling model could effectively improve the measurement accuracy of soil electrical conductivity. The calibration method can provide a basis for the accurate measurement of soil conductivity and the calibration of soil conductivity sensors.

Key words: soil electrical conductivity; moisture content; salt content; sensor calibration; nonlinear coupling

0 引言

土壤盐渍化严重影响了作物生长和生产力发展,土壤电导率作为评估土样盐分的重要指标之一,近年来受到了广泛的关注^[1-2]。土壤电导率 EC 可分为土壤体电导率 EC_a 与土壤浸提液电导率 EC_w 。其中, EC_w 能显著反映土壤含盐量以及土壤中盐分离子的实际浓度^[3],其精度较高,但是需对土样进行自然风干、过筛、混合以及静置等多个步骤处理,不能满足现代农业实时大规模检测 EC 的要求^[4],因此一些学者将研究重点逐渐转移到对 EC_a 的研究上。 EC_a 是一种快速、简便与可靠的测量方法,可以进行大田土壤电导率检测,已经成为对土壤盐渍化进行检测、分析与评估常用的方法之一^[5]。 EC_a 可以反映土壤理化性质等丰富信息^[6],也可以评估土壤盐度^[7]。由 RHOADES 等^[8-9]建立的土-水体系电导率的宏观概念模型可知,当土体溶液中溶解有盐的条件下,土-水体系中存在 3 种类型的并联导电通路,即:在土颗粒与包裹小孔隙中的溶液间交替导电,即固-液相串联耦合导电(Ⅰ);大孔隙连续液相导电(Ⅱ);固相表面导电(Ⅲ)。基于此, EC_a 可由土壤孔隙中体积含水率 θ 与电导率或者固态表面和板结层的土壤体积含水率与电导率表示。因此,土壤 θ 和土壤盐分是影响 EC_a 测量最主要的因素^[6,10], EC_a - EC_w - θ 三者之间的关系更是 EC_a 评估土壤盐分的理论基础^[11-12],探究 EC_a - EC_w - θ 与盐分之间的耦合关系十分重要。

常见的 EC_a 传感器测量方法包括电阻法(Electrical resistivity, ER)^[3,13-15]、电磁感应仪法(Electromagnetic induction, EM)^[16-17]、时域反射法(Time domain reflectometry, TDR)^[18]。其中,EM 测量时穿透深度不易确定,测量结果为不同深度土层电导率加权值,其反演、校正过程较为复杂^[5,19];TDR 是利用电磁脉冲技术与土壤水分介质之间的数值关系确定土壤水分含量的测量方法,但是其电路复杂,受土壤质地影响较大;与其它测量方法相比,ER 法是根据土壤体中连续导通水分以及离子迁移速度测量电阻,再求解电导率,在农业电导率测量时更具有灵活性,可以通过改变电极之间的间距来改变测量的深度和土体体积,校正过程相对容易,测量范围灵活,既能测量较大的土体,也能满足小范围水盐运移研究要求^[6]。

ER 包括恒流源测量与脉冲法测量,脉冲法测量电导率多采用 2 探针或 4 探针,在 ER 基础上,测量时通过 PWM 调制、滤波后生成矩形波后得到 EC_a ,测量稳定,耗能较低;恒流源法多采用 4 探针

或 6 探针测量,通过检测输出端两电极的电压差和电流,换算出土壤的电导率信息,常用方法为四端法,由于其能消除 ER 电极极化效应,已经广泛应用于土壤盐分测定。孙宇端等^[20]从理论上深入探讨了四端法测量原理,建立了对应的数学模型,并通过试验验证了 3 种测量组态计算公式的正确性。李民赞等^[21]基于四端法的便携式土壤电导率实时分析仪,探究了 2 种组态条件下土壤电导率的变化趋势,并对试验结果进行了非线性回归建模。赵燕东等^[22]设计了交流四端法测量土壤电导率的全套方案,相较于直流四端法更适于长期精准在线监测。陶毅等^[14]基于四端法原理研究了不同恒流源的适用性范围,为四端法电导率仪设计中恒流源方案的选择提供依据。WANG 等^[23]在四端法的基础上,开发了“六端法”和近红外光谱信息融合的车载 EC 与含水率 θ 在线实时检测系统,建立并分析了 EC 的二元模型,测试了该系统的预测精度。

综上所述,针对土壤电导率传感器,目前开展的有关研究,主要表现为通过采用单一改变含盐量或含水率的方法来分析电导率变化特征及趋势^[22,24],而针对在含盐量与含水率耦合情况下,土壤电导率的变化特征、趋势及电导率传感器的标定方法目前尚不明确。

本文基于电阻法原理,以电导率仪测量值为参照基准,构建电导率与含水率的多元非线性耦合标定模型,设计 6 组含盐量和 9 组含水率组合试验,开展含盐量与含水率的耦合标定研究,并通过大田试验进行验证,可为基于 ER 测量法土壤电导率传感器标定和应用提供参考。

1 试验方案与仪器

1.1 试验材料

(1) 供试土样

试验使用新疆维吾尔自治区阿拉尔市十团苹果园的表层 0~20 cm 沙土,其初始含水率为 6.1%,电导率为 1 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$,田间持水率为 28%,平均容重为 1.52 g/cm^3 ,有机质质量比为 11.05 g/kg 。

(2) 含水率设计

采用去离子水按田间持水率的 10.0%、17.5%、25.0%、32.5%、40.0%、47.5%、55.0%、62.5%、70.0% 设计含水率,记为 0~8,共 9 组。

(3) 含盐量设计

采用结晶 NaCl(纯度 99.8%)试剂按加入量 0、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 g/kg 设计含盐量,记为 A~F,共 6 组。

(4)土样制备

共制备 54 组不同含水率与含盐量梯度土样,每组 3 个重复。每组称取过筛后的土样 1.5 kg 装入 PVC 标定圆柱容器(直径 16.0 cm,高 14.5 cm)中,将去离子水与 NaCl 两两均匀混合至 NaCl 溶解后,使用喷壶,配合搅拌将 NaCl 溶液均匀混合于土样中,保证同一容器中水盐均匀分布^[3,22],试验所使用的土样深度为 6 cm,可认为充分搅拌后的土壤含水率一致,不存在土壤水分空间变异^[25]。制备好的土样放置在 25℃ 环境中进行试验。

1.2 取样方法

(1)传感器测样

制备好的土样水盐均匀分布,首先使用传感器随机在 3 个不同的位置测量土样的 θ 与电导率(EC_a),记为 EC_0 。 EC_0 与 θ 的对应关系记为 EC_{0-i} , $i=0,1,2,\cdots,8$,与含水率水平序号对应。

(2)电导率仪测样

传感器测量结束后,在传感器测量时相对应的 3 个位置取土样,放在滤纸上自然风干,然后取 10 g 土样,按照土壤浸提液电导率测量法,静置 8 h 左右^[26],使用电导率仪测量 EC_w ,记为 EC_1 。 EC_1 与 θ 的对应关系记为 EC_{1-i} , $i=0,1,2,\cdots,8$,与含水率水平序号对应。

1.3 耦合模型

由于土壤体中含水率与含盐量是耦合存在的,且有研究表明 EC_0 与土壤含水率不仅是线性关系^[27],因此,在建立 EC_0 与 EC_1 关系式时,应考虑 θ 对于两者之间的影响,为此分别构建在考虑含水率与不考虑土壤含水率情况下一元二次及二元二次非线性耦合模型

$$y = \begin{cases} a + a_0 + a_1x + a_2x^2 & (\text{不考虑含水率,模型 F1}) \\ a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 & (\text{考虑含水率,模型 F2}) \end{cases}$$

(1)

式中 y ——电导率仪测量的电导率 $EC_1, \mu\text{S}/\text{cm}$
 x ——传感器测量的电导率 $EC_0, \mu\text{S}/\text{cm}$
 x_1 ——土样体积含水率 $\theta, \%$
 x_2 ——传感器测量的电导率 $EC_0, \mu\text{S}/\text{cm}$
 $a, a_0 \sim a_5$ ——回归系数

1.4 试验仪器

土壤电导率传感器(以下简称“传感器”):型号为 RS-ECTH-N01,供电电压为 4.5~30 V DC,利用电阻法原理测量 EC_a ^[28],自带温度补偿功能,电导率精度为 $\pm 5\%$ 。

电导率仪:型号为 BANTE520,利用土壤浸提液

电导测量法测量 EC_w ,测量精度为 0.5% F·S,高于待标定传感器 1 个数量级,满足标定要求。本文以土水比为 1:5 土壤浸提液电导测量法所测数值作为土壤电导率标准值^[2,4]。

2 试验结果与分析

2.1 电导率与含盐量及含水率关系

以 NaCl 加入量为横轴,分别以 EC_0 与 EC_1 为纵轴绘图,如图 1、2 所示。

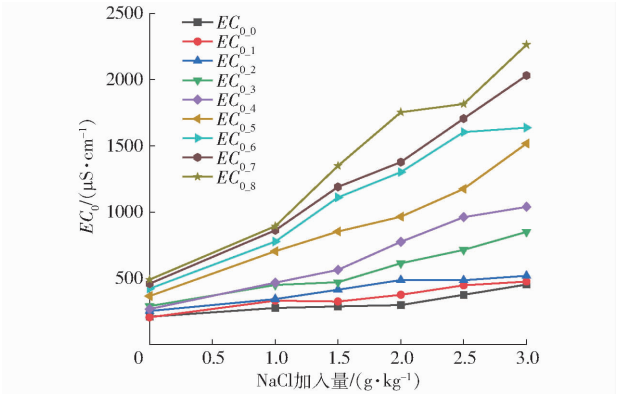


图 1 EC_0 与 NaCl 加入量关系

Fig. 1 Relationship between EC_0 and NaCl additional amount

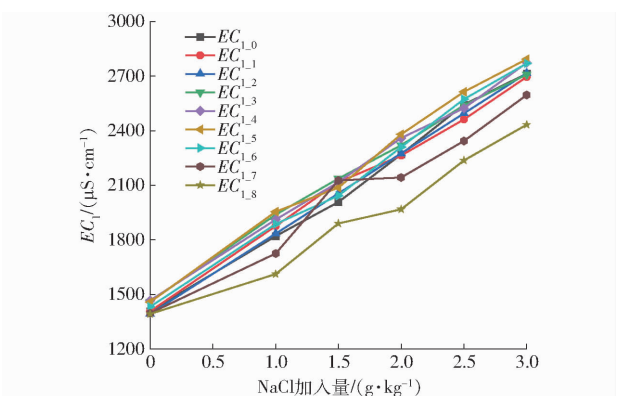


图 2 EC_1 与 NaCl 加入量关系

Fig. 2 Relationship between EC_1 and NaCl additional amount

由图 1、2 可知, EC_0 以及 EC_1 与 NaCl 加入量呈正相关,因为随着 NaCl 加入量增加,土壤中含盐量增加,土壤中可溶性盐离子增加,土壤电导率增加。

根据 ER 法测量原理, EC_0 与土体中连续导通水分以及离子迁移速度有关,由图 1 可知,对于同一组土样,含盐量相同时,随着样本 0~8 含水率增加,电导率 EC_0 增大。其原因因为在含水率较低时,土样中水分主要是孔角毛细水,此时土样中电流传导路径主要为第Ⅲ种,且离子迁移速度小, EC_0 相对较低;随着含水率增加,土样中水分开始以毛细水形式出现,此时第Ⅰ种电流传导路径增加,当含水率进一步增加时,土样颗粒间较大孔隙由连续的重力水联通,并且这种较大孔隙中的重力水进一步溶解土体中的

盐分,第Ⅱ种导电路径逐渐增多,离子迁移速度加快, EC_0 逐渐增加并呈现出 EC_0 随含水率逐渐增大的趋势^[29]。

根据电导率仪法测量原理,由图 2 可知,对于同一组土样,含盐量相同时,随着样本 0~8 含水率增加,电导率 EC_1 减小。其原因为该方法会产生较大稀释,导致某些离子浓度降低^[4],且土壤含水率的变化将改变土壤盐离子的平衡状态,随着土体含水率增加,稀释效果增强,土壤浸提上清液的可溶性盐离子逐渐减少, EC_1 减小。含水率相同时,随着含盐量增加, EC_1 的变化率呈现先增加后减小趋势,主要是因为 EC_1 随着土体浸提液中可移动离子浓度的增速先快速增加后缓慢增加。

由上述分析可知,因为测量方法不同,在含盐量相同时, EC_0 与 EC_1 随含水率的降低出现相反的趋势。

定义 EC_0 与 EC_1 的差值比 (Difference ratio, D_r) 为

$$D_r = \frac{EC_1 - EC_0}{EC_1} \times 100\%$$

(2)

按照含水率组 0~8 记为 $D_{r,0} \sim D_{r,8}$, 计算结果如图 3 所示。由图 3 可知,传感器测量的电导率与含盐量及含水率有一定的关系,沙土在含水率较低时,盐分的增加不会引起土壤电导率传感器测量的 EC_0 有明显的偏差,这与曹巧红等^[30] 研究结果一致。当含盐量一定时,随含水率的减少, D_r 越大,其原因是含盐量相同时, EC_0 和 EC_1 分别与含水率之间呈现相反的规律 (图 1、2), 含水率降低, EC_0 与 EC_1 之间的差值也会越大。当含水率一定时,随含盐量的增加, D_r 减小,但当土壤含水率降低到一定程度时,含盐量的增加也不会减小 D_r , 其原因是土壤电导率取决于空隙水电导率与含水率^[31], 当土壤空隙溶液达到饱和时,就难以进一步溶解土壤盐分,导致该范围内含盐量的变化对电导率的影响并不显著^[32]。

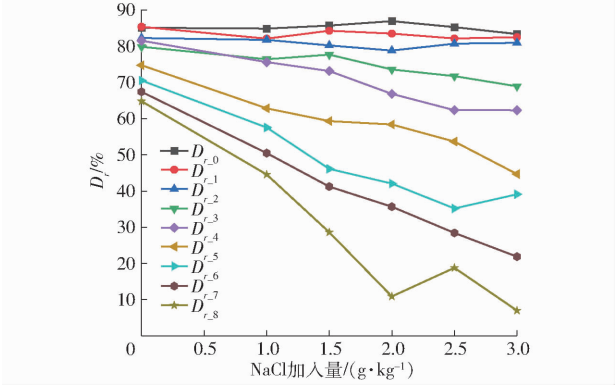


图 3 EC_0 与 EC_1 差值比 D_r 变化曲线

Fig. 3 Change curves of difference ratio D_r of EC_0 to EC_1

含盐量 (含水率) 只在一定的含水率 (含盐量) 范围内有较大的影响,低于该含水率 (含盐量) 时含水率影响小。再次证明传感器测量电导率与其含盐量和含水率具有相关性,不同含盐量和含水率均会影响电导率测量的准确性。

2.2 标定试验

由 1.1 节可知,含水率梯度为 0~8 共 9 组呈递增趋势,NaCl 加入量梯度为 A~F 共 6 组呈递增趋势,分别对不考虑含水率、考虑含水率以及考虑含水率细分 3 种处理情况下的 EC_0 与 EC_1 进行拟合分析。

(1) 不考虑含水率 (处理 1)

根据耦合模型 F1 对 6 组的 EC_0 与 EC_1 进行拟合,记为处理 1,拟合结果如图 4 所示。拟合函数图像开口均向下,不同含盐量时 EC_1 存在最大值,其范围在 1 400~2 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间。随着含盐量增加, A~F 组中每组最大 EC_1 所对应的 EC_0 逐渐增加。此外,随含盐量增加,截距 a_0 逐渐增大,原因为 EC_0 与 EC_1 随着含水率的增加呈现相反的增长趋势使两者之间的差值逐渐增大。拟合函数的开口与 $|a_1|$ 大小有关,随着含盐量增加, $|a_1|$ 减小,开口增大,原因为一定含水率范围内,含盐量的增加对电导率的影响逐渐减小。A~F 组的评价指标决定系数 R^2 不小于 0.839,使用耦合模型 F1 对传感器的电导率进行标定效果良好。

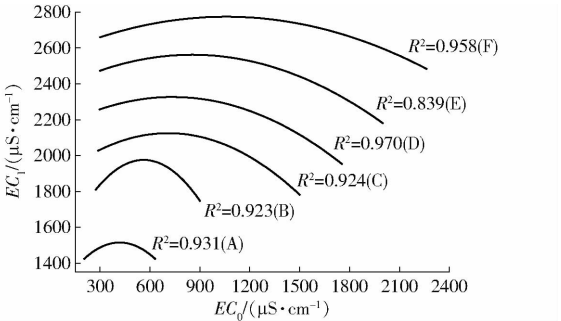


图 4 处理 1 的拟合结果

Fig. 4 Fitting result curves of treatment 1

(2) 考虑含水率 (处理 2)

根据耦合模型 F2 对含水率 θ 与电导率 EC_0 和 EC_1 进行拟合,记为处理 2,处理 2 拟合回归系数与处理的评价指标 R^2 如表 1 所示。

由表 1 可知,在考虑含水率时,处理 2 的 R^2 均不小于 0.978,相较于处理 1 的拟合程度有所提高。随着含盐量的增加,拟合公式的回归系数 a_0 (截距) 逐渐增加,这与处理 1 结果一致。由图 2 并根据全盐量与电导率关系^[33], A、B 组属于中盐化土, C~F 组属于重盐化土,表 1 中, A、B 组回归系数 a_3 (含盐量与含水率耦合项系数) 均小于 0, C~F 组回归系

表 1 处理 2 拟合回归系数与 3 个处理评价指标

Tab. 1 Treatment 2 fitting regression coefficient and evaluation index of three treatments							
参数		A	B	C	D	E	F
处理 2 回归系数	a_0	1 195. 35	1 614. 67	1 896. 57	2 024. 52	2 443. 66	2 592. 55
	a_3	-0. 04	-0. 28	0. 35	0. 13	0. 12	0. 08
	a_4	0. 33	2. 02	-4. 16	-1. 22	-1. 23	-0. 90
R^2	处理 1	0. 931	0. 923	0. 924	0. 970	0. 839	0. 958
	处理 2	0. 997	0. 998	0. 996	0. 998	0. 978	0. 997
	处理 3-1	0. 999	0. 999	0. 999	0. 998	0. 998	0. 999
	处理 3-2	0. 999	0. 986	0. 999	0. 999	0. 999	0. 997
	处理 3-3	0. 999	0. 997	0. 999	0. 998	0. 999	0. 996

数 a_3 均大于 0,且其绝对值 $|a_3|$ 均呈现先增加后减小趋势,说明土壤电导率随着含盐量和含水率的耦合影响呈现先增加后减小趋势。A、B 组的回归系数 a_4 (含水率二次项系数) 均大于 0,C ~ F 组回归系数 a_4 均小于 0,且其绝对值 $|a_4|$ 均呈现先增加后减小趋势,说明在中度盐化土中随着含水率增加,电导率增加速率加速增加,在重度盐化土中随着含水率增加,电导率增加速率呈现减小趋势,土壤电导率受含水率影响,含水率过低或者过高均会影响土壤电导率传感器的测量精度,这与刘广明等^[34]的研究结果相同。

(3)考虑含水率细分(处理 3)

由处理 2 可知,对于中、重盐土,含水率对土壤电导率的影响不同,原因可能为含盐量不同,其含水率对于土壤电导率增加或降低的速率有所影响。因此,在处理 2 的基础上,对于同一含盐量,将土壤含水率细分,根据耦合模型 F2 对含水率 θ 与电导率 EC_0 、 EC_1 进行拟合,记为处理 3。将 A ~ F 组含水率分别划分为 50% ~ 70%、20% ~ 50%、10% ~ 20% 3 个范围,依次记为处理 3-1、处理 3-2、处理 3-3,进行标定,将处理 3 与处理 1、处理 2 的评价指标 R^2 进行对比分析(表 1),处理 1、处理 2 对应残差如图 5 所示,处理 3 残差如图 6 所示。

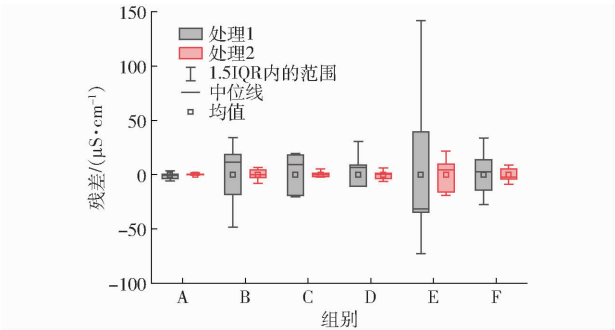


图 5 处理 1 与处理 2 残差

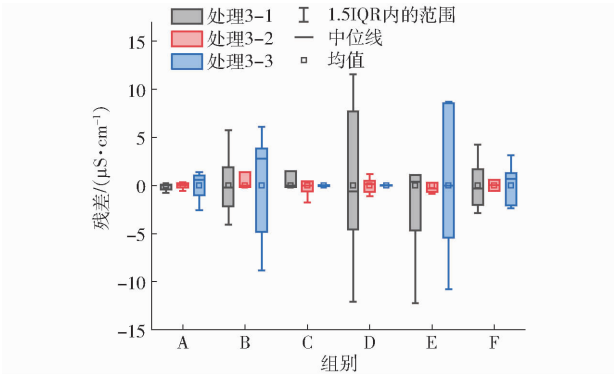


图 6 处理 3 残差

Fig. 6 Residual results for treatment 3

理 2 未将同一含盐量下的土壤含水率细分处理,导致拟合程度降低,证明了含水率对传感器电导率测量值具有重要影响,含水率细分越精细模型拟合程度越高,传感器的测量也就越精确。

由图 5、6 可知,处理 1、处理 2 的残差分别在 -100 ~ 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 -50 ~ 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,处理 2 的残差小于处理 1,处理 3 的残差范围为 -12 ~ 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$,远小于处理 1 和处理 2,证明了含水率对传感器测量精度有显著影响,在考虑含水率情况下,可以明显提高传感器的测量精度。对比处理 2 和处理 3,对含水率进行细分拟合后(处理 3)电导率测量的误差明显减小,且处理 3-2 的残差小于处理 3-1 和处理 3-3,说明含水率过低或过高均会影响土壤电导率传感器的测量精度。

2.3 验证试验

为了验证标定方法的适用性,于 2022 年 6—8 月在新疆维吾尔自治区阿拉尔市十团苹果园布设验证试验,传感器安装如图 7 所示,每组埋设 5 个传感器,传感器间垂直距离 20 cm,设置 3 个重复。在埋设传感器附近的试验小区利用土钻取土,采用 1.2 节取样方法进行测量,采用 1.3 节耦合模型 F1 和 F2 对试验结果进行处理。试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,处理 1 残差范围为 -120 ~ 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

由表 1 可知,与处理 2 相比,处理 3 的 R^2 均不小于 0. 986,模型拟合程度进一步提高,这是因为处

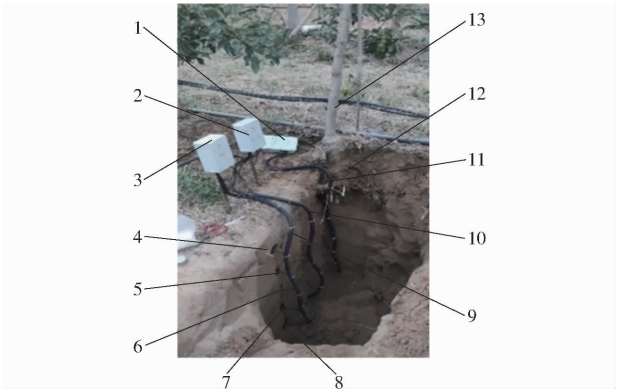


图 7 大田试验传感器布置示意图

Fig. 7 Layout of soil sensors for field tests

1 ~ 3. 集线器 4 ~ 8. 传感器 9 ~ 11. 缆线 12. 根系 13. 砧木

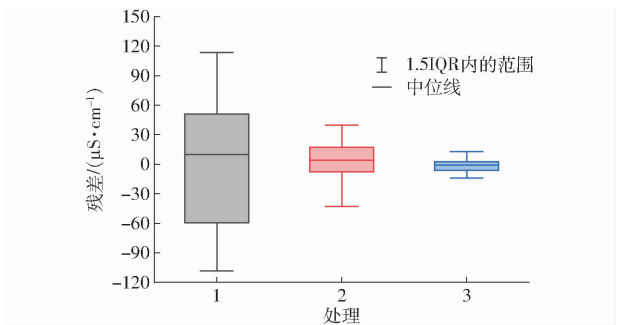


图 8 验证试验结果

Fig. 8 Verification test results

残差范围最大,其次是处理 2 的残差,范围为 $-60 \sim 60 \mu\text{S}/\text{cm}$,处理 3 的残差最小,在 $-15 \sim 15 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,此外,处理 1、处理 2、处理 3 的残差中位数也依次减小,处理 3 所得的标定公式能更加显著提高土壤电导率测量的准确性,证明了考虑含水率可以提高传感器在大田的测量精度。因此使用传感器测量的电导率反映土壤含盐量时,需要结合含水率的变化,才能较为正确地测量电导率,该试验不仅验证了耦合模型和标定方法的正确性,还为传感器测量电导率的标定提供了参考依据。

3 结论

(1)土壤电导率传感器测量值 EC_0 与电导率仪测量值 EC_1 均随着土壤含盐量的增加而增加,但含盐量相同情况下,两者测量的电导率随土壤含水率呈现相反的变化趋势, EC_0 随含水率 θ 的增加而增加, EC_1 随含水率 θ 的增加而减少,在使用传感器测量土壤电导率时,需要考虑土壤含盐量与含水率对其测量的影响。

(2)不考虑含水率时(处理 1),根据耦合模型 F1 对电导率传感器测量值 EC_1 与电导率仪测量值 EC_0 进行了拟合处理,6 组拟合所得的 R^2 均不小于 0.839,残差范围为 $-100 \sim 150 \mu\text{S}/\text{cm}$,残差较大,电导率变化速率随着含盐量的增加逐渐减小。

(3)在考虑含水率时(处理 2),根据耦合模型对 EC_0 与 EC_1 进行拟合, R^2 均不小于 0.978,相对处理 1 有所提高,残差范围为 $-50 \sim 50 \mu\text{S}/\text{cm}$,相比处理 1 明显减小,证明了考虑含水率可以提高传感器的测量精度。

(4)在处理 2 基础上,对于不同含盐量范围的含水率进行细分拟合(处理 3),处理 3 的 R^2 均不小于 0.986,相对处理 1 和处理 2 有所提高,残差范围为 $-12 \sim 12 \mu\text{S}/\text{cm}$,明显小于处理 1 和处理 2。通过大田试验进行了验证,处理 1、处理 2 的残差范围分别在 $-120 \sim 120 \mu\text{S}/\text{cm}$ 和 $-60 \sim 60 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,且处理 2 的残差小于处理 1,处理 3 残差范围为 $-15 \sim 15 \mu\text{S}/\text{cm}$,远小于处理 1 和处理 2,证明了含水率细分情况可以进一步提高传感器的测量精度。

(5)提出了传感器电导率的耦合标定方法,揭示了新疆地区沙土条件下含水率对传感器电导率测量的影响规律,构建了土壤电导率与其含盐量和含水率的数学模型,并通过试验验证了标定方法的适用性。

参 考 文 献

[1] KARGAS G, PERSSON M, KANELIS G, et al. Prediction of soil solution electrical conductivity by the permittivity corrected linear model using a dielectric sensor[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(8): 04017030.

[2] SEO B S, JEONG Y J, BAEK N R, et al. Soil texture affects the conversion factor of electrical conductivity from 1:5 soil-water to saturated paste extracts[J]. Pedosphere, 2022, 32(6): 905-915.

[3] 韩长杰, 杨文奇, 窦汉杰, 等. 大田土壤电导率快速检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 301-310. HAN Changjie, YANG Wenqi, DOU Hanjie, et al. Design and experiment of rapid detection system for field soil conductivity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 301-310. (in Chinese)

[4] KARGAS G, LONDRA P, SOTIRAKOGLU K. The effect of soil texture on the conversion factor of 1:5 soil/water extract electrical conductivity ($EC_{1:5}$) to soil saturated paste extract electrical conductivity (ECE)[J]. Water, 2022, 14(4): 642.

[5] 张顺, 贾永刚, 连胜利, 等. 电导率法在土壤盐渍化中的改进和应用进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 754-759. ZHANG Shun, JIA Yonggang, LIAN Shengli, et al. Application and improvement of electrical conductivity measurements in soil salinity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 754-759. (in Chinese)

[6] 刘梅先, 杨劲松. 土壤盐分原位测定方法[J]. 土壤, 2011, 43(5): 688-697. LIU Meixian, YANG Jinsong. In-situ determination methods for soil salinity[J]. Soils, 2011, 43(5): 688-697. (in Chinese)

- [7] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005, 46(1-3):45-70.
- [8] RHOADES J D, MANTEGHI N A, SHOUSE P J, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 433-439.
- [9] RHOADES J D, CORWIN D L. Soil electrical conductivity: effects of soil properties and application to soil salinity appraisal[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1990, 21(11/12): 837-860.
- [10] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 一种土壤盐分传感器的敏感场分析及其校正研究[J]. 土壤, 2011, 43(6): 1009-1014.
LIU Meixian, YANG Jinsong, LI Xiaoming, et al. Sensitivity distributions and calibration of a sensor of soil slinity[J]. Soils, 2011, 43(6): 1009-1014. (in Chinese)
- [11] RHOADES J D, RAATS P, PRATHER R J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 651-655.
- [12] BOHN H L, BEN-ASHER J, TABBARA H S, et al. Theories and tests of electrical conductivity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6): 1143-1146.
- [13] 梁栋, 胡丽娜, 王秀, 等. 车载式大田土壤电导率在线检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 274-285.
LIANG Dong, HU Li'na, WANG Xiu, et al. Design and experiment of vehicle-mounted field soil electrical conductivity online detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 274-285. (in Chinese)
- [14] 陶毅, 孟繁佳, 盛文溢. 四端法土壤电导率传感器恒流源设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 415-420.
TAO Yi, MENG Fanjia, SHENG Wenyi. Design and experiment of constant current source of four-terminal conductivity sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 415-420. (in Chinese)
- [15] 钟翔君, 杨丽, 张东兴, 等. 四端法土壤电导率原位快速检测传感器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 90-99.
ZHONG Xiangjun, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of a sensor for in-situ rapid detection of soil electrical conductivity using four-electrode method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 90-99. (in Chinese)
- [16] 吴家林, 彭杰, 白建铎, 等. 基于电磁感应数据的电导率反演模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 80-87.
WU Jialin, PENG Jie, BAI Jianduo, et al. Calculating electrical conductivity of soil using electromagnetic induction data[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 80-87. (in Chinese)
- [17] FEI W, YANG S, WEI Y, et al. Characterizing soil salinity at multiple depth using electromagnetic induction and remote sensing data with random forests: a case study in Tarim River Basin of southern Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142030.
- [18] SKIERUCHA W, WILCZEK A, SZYPOWSKA A, et al. A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity[J]. Sensors, 2012, 12(10): 13545-13566.
- [19] CORWIN D L, LESCH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005, 46(1-3): 11-43.
- [20] 孙宇瑞, 汪懋华. 一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 20-23.
SUN Yurui, WANG Maohua. A mathematical model and its experimental study for a kind of measurement method of soil electric conductivity[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(2): 20-23. (in Chinese)
- [21] 李民赞, 王琦, 汪懋华. 一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51-55.
LI Minzan, WANG Qi, WANG Maohua. Testing and modeling of soil EC sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 51-55. (in Chinese)
- [22] 赵燕东, 李宁, 皮婷婷. 基于交流“四端法”的土壤电导率在线实时检测系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 299-307.
ZHAO Yandong, LI Ning, PI Tingting. Soil electrical conductivity online real-time detection system based on four-electrode method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 299-307. (in Chinese)
- [23] WANG D, YANG W, MENG C, et al. Research on vehicle-mounted soil electrical conductivity and moisture content detection system based on current-voltage six-terminal method and spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107640.
- [24] 王瑛瑛, 宋良图. 土壤电导率测量系统开发[J]. 仪表技术, 2013(12): 21-24.
WANG Yingying, SONG Liangtu. Measurement system development of soil electrical conductivity[J]. Instrumentation Technology, 2013(12): 21-24. (in Chinese)
- [25] 徐爱珍, 胡建民, 熊永, 等. TDR法、干烧法及烘干法测定土壤含水率的比较研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 253-256.
XU Aizhen, HU Jianmin, XIONG Yong, et al. Comparison of soil moisture measurement using TDR method, dry burning method and oven drying method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 253-256. (in Chinese)
- [26] 辛明亮, 何新林, 吕廷波, 等. 土壤可溶性盐含量与电导率的关系实验研究[J]. 节水灌溉, 2014(5): 59-61.
XIN Mingliang, HE Xinlin, LÜ Tingbo, et al. Experimental research on relationship between content soluble salt in soil and electric conductivity[J]. Water Saving Irrigation, 2014(5): 59-61. (in Chinese)
- [27] NADLER A, FRENKEL H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity

- measurements by the four-electrode method[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980(6): 1216 – 1221.
- [28] NADLER A. Matrix nonuniformity effect on measurement of apparent bulk soil electrical conductivity[J]. *Soil Science*, 1988, 145(3): 157 – 162.
- [29] 徐志闻, 刘亚斌, 胡夏嵩, 等. 基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 148 – 154.
- XU Zhiwen, LIU Yabin, HU Xiasong, et al. Salt content estimation model of saline soil in Xining Basin based on water content and in-situ electrical conductivity[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(5): 148 – 154. (in Chinese)
- [30] 曹巧红, 龚元石. 土壤电导率对时域反射仪测定土壤水分的影响[J]. *土壤学报*, 2001, 38(4): 483 – 490.
- CAO Qiaohong, GONG Yuanshi. Effect of soil bulk electrical conductivity on time domain reflectometry measurement of soil water content [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 483 – 490. (in Chinese)
- [31] ALJOUANI B, SANCHEZ-ESPIGARES J A, WESSOLEK G. Estimating pore water electrical conductivity of sandy soil from time domain reflectometry records using a time-varying dynamic linear model[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4403.
- [32] MIRZAKHANINAFCHI H, MANI I, HASAN M, et al. Development of prediction models for soil nitrogen management based on electrical conductivity and moisture content[J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6728.
- [33] 毛任钊, 田魁祥, 松本聪, 等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. *土壤*, 1997, 29(6): 326 – 330.
- MAO Renzhao, TIAN Kuixiang, MATSUMOTO Cong, et al. Relationship between salinity index and chemical composition of saline soil[J]. *Soils*, 1997, 29(6): 326 – 330. (in Chinese)
- [34] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. *土壤通报*, 2001, 32(增刊 1): 85 – 87.
- LIU Guangming, YANG Jinsong. Experimental study on the relationship between soil salt content and soil electrical conductivity and water content[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(Supp. 1): 85 – 87. (in Chinese)
-

(上接第 281 页)

- [14] MATHIS A, MAMIDANNA P, CURY K M, et al. DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning[J]. *Nature Neuroscience*, 2018, 21(9): 1281 – 1289.
- [15] YU H, XU Y, ZHANG J, et al. Ap-10k: a benchmark for animal pose estimation in the wild[J]. *arXiv preprint arXiv:2108.12617*, 2021.
- [16] YAN S, XIONG Y, LIN D. Spatial temporal graph convolutional networks for skeleton-based action recognition [C] // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018.
- [17] MA N, ZHANG X, ZHENG H T, et al. Shufflenet v2: practical guidelines for efficient CNN architecture design [C] // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018: 116 – 131.
- [18] LI Y, YANG S, LIU P, et al. SimCC: a simple coordinate classification perspective for human pose estimation [C] // *Computer Vision-ECCV 2022*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 89 – 106.
- [19] LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft coco: common objects in context [C] // *Computer Vision-ECCV 2014: 13th European Conference*. Springer International Publishing, 2014: 740 – 755.
- [20] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R – CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137 – 1149.
- [21] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [J]. *Communications of the ACM*, 2017, 60(6): 84 – 90.
- [22] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 770 – 778.
- [23] ZHANG H, WU C, ZHANG Z, et al. Resnest: split-attention networks [C] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022: 2736 – 2746.
- [24] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 4510 – 4520.
- [25] 张飞宇, 王美丽, 王正超. 引入 Transformer 和尺度融合的动物骨骼关键点检测模型构建[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 179 – 185.
- ZHANG Feiyu, WANG Meili, WANG Zhengchao. Construction of the animal skeletons keypoint detection model based on Transformer and scale fusion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(23): 179 – 185. (in Chinese)