

电容式土壤温度、水分、盐分三参数传感器率定

姚 丽, 王仰仁*, 王 浩, 李泳霖, 范欣瑞
(天津农学院 水利工程学院, 天津 300384)

摘 要:【目的】检验温度、水分、盐分三参数传感器(SMEC 300)测定土壤含水率、电导率的精度。【方法】在天津农学院西校区农田水循环试验基地进行了土壤含水率与电导率的率定试验。试验设置 3 种供水水平(2.65、3.25、3.80 kg)和 4 种盐分水平(加盐量 0、20、70、100 g)以及 6 种矿化度梯度(1、5、10、15、20、25 g/L)。布置 6 个盆, 每盆内干土质量为 8.85 kg, 土层厚度为 10 cm, 传感器埋置于土面下 5 cm 处, 试验期间定期称取盆的质量, 由此测得土壤实际含水率; 电导率率定试验也布置 6 个盆, 盆内加水 8 L/盆, 盆内放置 4 个传感器, 每 40 min 测试 1 个处理, 利用数据采集仪获取传感器数据。分别对土壤含水率和电导率进行率定。【结果】传感器测定的电导率与矿化度呈显著的指数关系, 相关系数均在 0.92 以上; 土壤盐分影响土壤含水率的率定, 实际含水率与传感器测定的土壤含水率和电导率呈二元线性关系, 相关系数最大为 0.940 4, 最小为 0.601 9, 均达到了显著或极显著水平, 不同传感器的率定参数有较大差异。【结论】电容式土壤温度、水分、盐分三参数传感器有其对应的参数, 应逐个传感器进行率定。

关 键 词: 土壤; 含水率; 电导率; 传感器

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019179

姚丽, 王仰仁, 王浩, 等. 电容式土壤温度、水分、盐分三参数传感器率定[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 58-64.

YAO Li, WANG Yangren, WANG Hao, et al. Calibrating Soil Temperature, Water and Salt Measured Using Capacitive Sensor [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 58-64.

0 引 言

【研究意义】土壤含水率是农田灌溉重要和常用的信息, 是调节土壤水分状况、实现科学用水和灌溉自动化的基础指标, 对抗旱减灾工作具有重要的指导意义^[1]。传统测定土壤含水率的方法是烘干法, 此法虽然测量准确, 但方法较为繁琐, 不能及时提供实时信息。因而提出了多种测定土壤水分的方法, 诸如中子仪法、 γ 射线透射法、电磁波法、电阻法、电容法、光电法等^[2]。【研究进展】国内外学者对此进行了较多的研究, 谭秀翠等^[3]利用多种 TDR 仪器测试不同盐分质量浓度条件下的含水率, 与烘干法测得的结果进行比较, 探讨了土壤盐分对各种 TDR 仪器测量精度的影响, 结果表明, 随盐分质量浓度的增加, 测得的含水率值增大或是无法得出合理数值; 在含盐率较低的土体中, 各传感器测试结果与烘干法测试结果变

化趋势基本一致, 可采用线性函数进行标定。杨鹏举等^[4]采用室内试验的方法, 使用时域反射仪(TDR100)测定不同含盐量及不同含水率土样的电导值, 与采用电导率仪测定的土壤溶液电导值及烘干法测得的含水率值进行比较。结果表明, 二者之间存在显著的线性关系。

准确测试土壤含水率、土壤电导率(EC_a)和土壤溶液电导率(EC_w)对更好地管理灌溉用水和有效地监测和控制土壤盐分至关重要^[5]。土壤溶液电导率 EC_w 和土壤含水率是影响土壤电导率的主要因素, 因此在开发和验证物理模型之前, 为准确测定 EC_w , 应在实验室进行 EC_a 的校准^[5-6]。ERIC等^[7]利用电磁感应法(EM-38)测试土壤电导率, 发现土壤温度日变化不会显著影响 EM-38 对土壤电导率的测定。Zhang等^[8]利用电磁感应式传感器测定土壤电导率, 认为土壤含水率的变化会显著影响传感器测定土壤电导率。Mojid等^[9]利用绝缘时域反射传感器测定高盐土壤的含水率, 认为应对特定传感器进行校准。【切入点】给出电容式传感器(SMEC 300(6470-20))水分盐分率定模型, 【拟解决的关键问题】检验传感器测定土壤含水率、电导率的精度。

收稿日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779174); 天津市校企协同创新重点实验室建设项目(17PTSJJC00110)

作者简介: 姚丽(1994-), 女。硕士研究生, 主要从事水资源高效利用技术研究。E-mail: lilili320yao@163.com

通信作者: 王仰仁(1962-), 男。教授, 博士, 主要从事灌溉排水技术教学与科研工作。E-mail: wyrf@163.com

1 材料与方法

1.1 试验基地概况

试验于天津农学院西校区农田水循环试验基地(116°57'E, 39°08'N, 海拔 5.49 m)进行, 试验基地总面积为 1 hm², 地下水埋深变幅在 2.06~3.70 m 之间。试点分层土壤水分特征参数拟合值如表 1 所示(测试方法为离心机法(R11D2))。主要种植作物为冬小麦复播玉米, 或单作春玉米。

表 1 试点分层土壤水分特征参数值^[10]

Table 1 The characteristic parameters of water in layered soil

土层深度 Soil depth/cm	土壤水分特征曲线参数拟合值 Fitting value of soil water characteristic curve parameters			
	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	α	n
0~30	0.391	0.023	0.052 4	1.169
30~100	0.505	0.074	0.052 0	1.541
100~130	0.473	0.079	0.014 9	1.251

1.2 试验装置

1) 土壤含水率率定试验设置

本试验采用试验基地农田土壤进行室外水分传感器率定。试验基地土壤质地为粉砂壤土, 土壤 pH

值为 7.86, 含盐量为 0.89 g/kg^[11]。试验设备包括相同形状和体积的 6 个塑料盆、6 个传感器和精度为 0.001 kg 的电子秤。每个盆为作为 1 个处理, 编号分别为 1、2、3、4、5、6, 其中 2、3、4 为盐分处理, 1、5、6 为水分处理。首先在试验田取 0~40 cm 土层的土壤, 去除草根等杂物, 取 10 kg 放入盆中, 土层厚度为 10 cm; 同时带回土壤样品, 于实验室烘干称质量, 求得试验土的初始含水率(13%)以及干土质量(8.85 kg); 于 2019 年 4 月 5 日将 0、20、70、100 g 食用盐(NaCl)溶于水(2.2 kg/盆)中, 分别加入处理 1、处理 2、处理 3、处理 4 的盆中。处理 5、处理 6 加入同样的水量, 处理 1 为对照。在每个盆中放入 1 个传感器(SMEC 300(6470-20)), 埋设于土壤表面下 5 cm 处, 用数据采集仪(watchdog 2400)采集土壤含水率、土壤温度和土壤电导率, 定期称取盆的质量, 用于计算实际的土壤含水率。试验于 2019 年 5 月 9 日和 2019 年 6 月 2 日, 在 6 个处理中加入不同的水量, 具体加水量见表 2。于 2019 年 4 月 5 日开始测试, 于 2019 年 6 月 12 日结束, 历时 68 d, 其中称取盆的质量 10 次。距离试验装置 5 m 远处设有气象站, 定期下载气象数据(气温、降雨量)。

表 2 土壤含水率率定试验设置

Table 2 Setting of soil moisture content calibration test

项目 Project	处理编号 Number of treatment					
	1	2	3	4	5	6
2019 年 4 月 5 日土壤加盐量 Amount of salt added to the soil/g	0	20	70	100	0	0
2019 年 4 月 5 日初始加水量 Amount of water initially added/kg	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
2019 年 5 月 9 日加水量 Amount of water added/kg	2.65	2.65	2.65	2.65	3.25	3.8
2019 年 6 月 2 日加水量 Amount of water added/kg	2.65	2.65	2.65	2.65	3.25	3.8

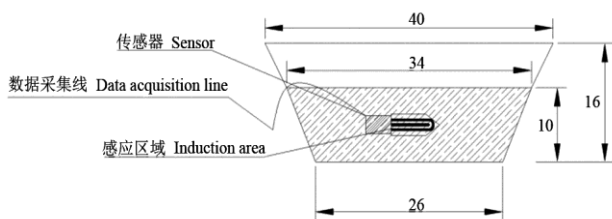


图 1 试验装置图

Fig.1 Test device diagram

2) 电导率率定试验设置

同时在该基地进行了盐溶液的率定试验, 该试验于 1 d 之内完成。采用自来水进行试验。试验设备包括 6 个盆、4 个传感器、精度为 0.001 kg 的电子秤、1 000 mL 的量筒。每个盆为作为一个处理, 其处理编号分别为 7、8、9、10、11、12, 设置 6 个矿化度梯度, 分别为 1、5、10、15、20、25 g/L^[3]。首先在每个盆中加入试验用水 8 L, 6 个处理分别放入 8、40、

80、120、160、200 g 的食用盐(NaCl), 搅拌均匀。然后在处理 7 中放入 4 个传感器, 用数据采集仪(watchdog 2400)采集电导率, 由于数据采集仪是每 0.5 h 采集 1 次数据, 因此, 将传感器放入水中 40 min 时采集数据, 采集数据后, 再将传感器移至下一个处理, 直至试验结束。

传感器性能数据包括, 测量范围: 土壤水分分为 0%VWC~饱和含水率, 电导率为 0~10 mS/cm, 温度为(-18~+50)℃; 分辨率: 土壤水分分为 0.1%VWC; 电导率为 0.01 mS/cm; 温度为 0.1℃; 测量精度: 土壤水分分为 3%VWC, 电导率为±2%, 温度为±0.8℃; 电缆长度为 6.1 m, 最大延长到 15 m, 供电为 3V @ 6~10 mA, 感应面积为 5.7×1.9 cm。

1.3 测试方法

1) 土壤体积质量的计算

盆中装有 10 kg 的试验田土壤(0~40 cm 土层,

未经任何处理), 盆内土的体积可由式 (1) 计算式为:

$$V_{\pm} = \frac{1}{3} \cdot h \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 + d \cdot D + \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right), \quad (1)$$

土壤干体积质量计算式为:

$$\gamma_m = \frac{M}{V_{\pm}}, \quad (2)$$

式中: $V_{\pm}$ 为土壤的体积 (cm^3); h 为盆内土壤的厚度 (cm); d 为盆底直径 (cm); D 为盆内土壤表面直径 (cm); M 为盆内干土质量 (kg); γ_m 为土壤的干体积质量 (g/cm^3)。

由式 (2) 得土壤干体积质量为 $1.24 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2) 土壤含水率的计算

由于试验在户外进行, 且不得破坏土壤的结构, 故盆内土壤含水率只能用称质量法确定, 计算式为:

$$\theta_m = \frac{m_i - M - m_p}{M} \times 100\%, \quad (3)$$

将质量含水率换算为体积分含水率, 计算式为:

$$\theta_v = \gamma_m \theta_m \times 100\%, \quad (4)$$

式中: θ_v 为体积分含水率 (%); θ_m 为质量含水率 (%); m_i 为每次称量的盆加湿土的质量 (kg); m_p 为盆的质量 (kg)。

3) 土壤电导率的率定

通过设置 6 个水溶液矿化度梯度进行电导率的率定, 目的是分析确定传感器测定电导率的精度。以矿化度 (g/L) 为因变量, 以传感器测定的电导率 (ms/cm) 为自变量, 确定二者之间的关系:

$$y_1 = a_1 e^{x_1} + b_1, \quad (5)$$

式中: x_1 为传感器测得的水溶液电导率 (mS/cm); y_1 为水溶液矿化度 (g/L); a_1 、 b_1 为待定参数。

4) 土壤含水率的率定

以实测土壤含水率为因变量、传感器测得的土壤含水率为自变量, 采用线性模型、指数模型、幂函数模型等进行率定, 得到的拟合精度较低, 相关系数变化于 0.012 2~0.935 4, 因此, 考虑盐分对传感器测定土壤含水率的影响, 以实测土壤含水率为因变量, 传感器测定的土壤含水率和电导率为自变量, 采用线性模型、指数模型、幂函数模型等进行率定, 拟合精度较之前有显著提高, 最后选择 3 结果较为合理的模型, 比较其拟合精度, 由此确定适用的率定关系, 具体模型计算式为:

$$y_2 = a_2 x_2 + b_2 x_3 + c_1, \quad (6)$$

$$y_2 = a_3 x_3^{n_1} \cdot x_2 + c_2, \quad (7)$$

$$y_2 = a_4 x_3^{n_2} \cdot x_2 + b_3 x_3 + c_3, \quad (8)$$

$$Q = \sum_{i=1}^m (y_2 - \hat{y}_2)^2, \quad (9)$$

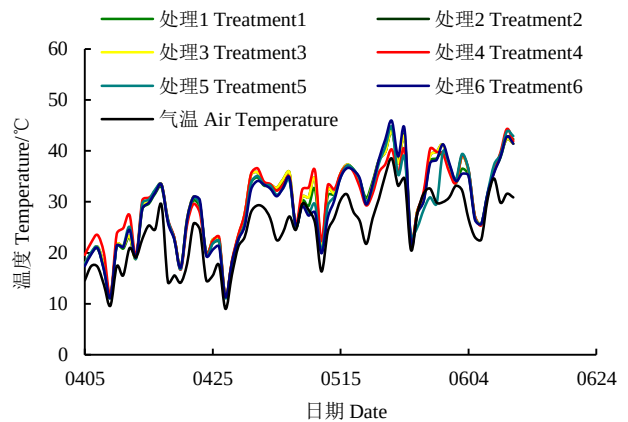
式中: x_2 为传感器测定土壤含水率 (%); x_3 为传感器测定土壤电导率 (mS/cm); y_2 为实际测定土壤含水率 (%); a_2 、 a_3 、 a_4 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 n_1 、 n_2 均为待定参数; $\hat{y}_2$ 为土壤含水率的模拟值, Q 为土壤含水率实际值与模拟值之差的平方和。

式 (6) 为多元线性函数, 可利用 Excel 中回归分析的方法确定其待定参数; 式 (7) 和式 (8) 均为非线性函数, 待定参数的确定属于非线性规划问题, 利用 Excel 中规划求解方法进行参数的拟合, 由此可得到率定曲线以及相应的参数。

2 结果与分析

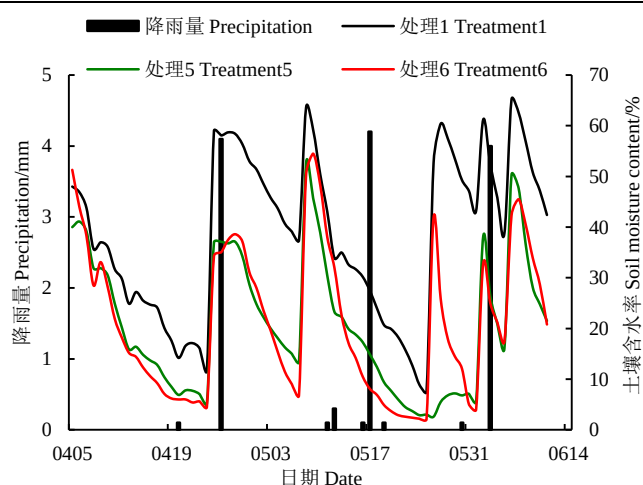
2.1 土壤温度、电导率和含水率随时间的变化

根据传感器测定的数据, 绘制出土壤温度、土壤含水率、土壤电导率随时间的变化过程, 见图 2。同时在图 2 (a) 中给出了同步的气温变化情况, 在图 2 (b) 和图 2 (c) 中给出了同步的降雨量情况。从图 2 (a) 可以看到, 土壤温度的变化趋势与气温变化趋势基本一致, 且土壤温度普遍高于气温; 各传感器测试的土壤温度变化也非常一致, 大部分时间都重合在一起, 表明土壤温度测试比较准确稳定, 故本文只对土壤含水率和电导率进行了率定。

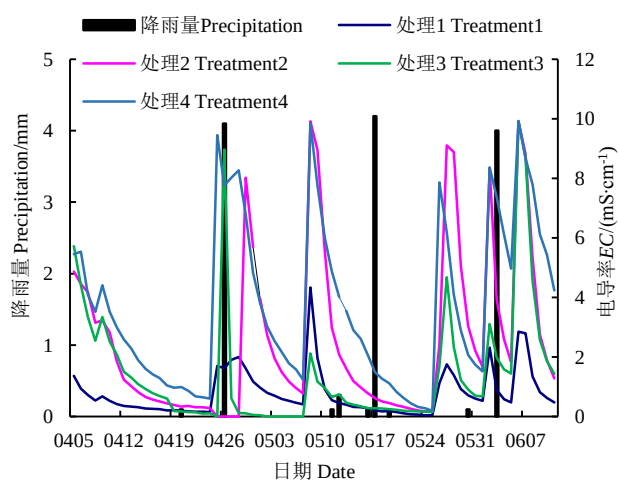


(a) 温度随时间变化过程

(a) Temperature change with time



(b) 土壤含水率和降雨量
(b) Soil water moisture and precipitation



(c) 土壤电导率和降雨量
(c) Soil electrical conductivity and precipitation

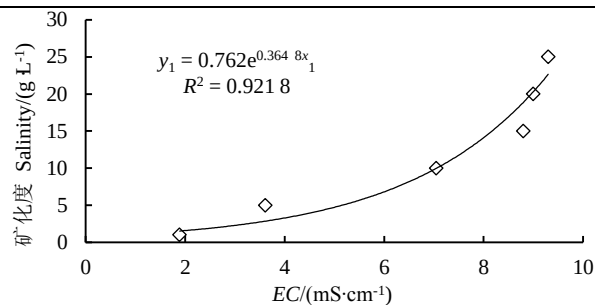
图 2 温度、土壤含水率、土壤电导率随时间变化过程

Fig.2 Change in temperature, soil moisture content, and soil electrical conductivity with time

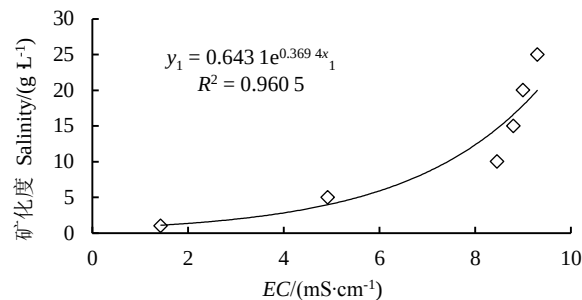
从图 2 (b) 可以看出, 土壤含水率有 5 次明显的增加过程, 与此相对应的为 3 次降雨过程和 2 次灌水; 处理 5 和处理 6 的土壤含水率变化情况基本一致, 处理 1 的土壤含水率普遍高于处理 5 和处理 6, 从图 2 (c) 可以看出, 电导率也有 5 次明显的增加过程, 与含水率变化一致, 不同处理土壤电导率增加的幅度不同, 土壤含盐量越大, 电导率增加的幅度越大。

2.2 土壤电导率的率定曲线

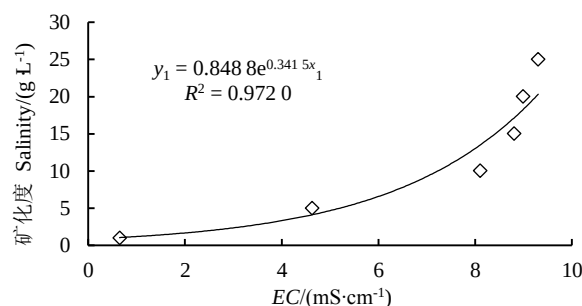
针对 6 种矿化度梯度测试的电导率, 采用线性函数、指数函数、幂函数等模型寻找二者之间的关系, 发现拟合精度均较低。为此以矿化度取对数为横坐标, 以传感器测得的电导率为纵坐标, 点绘散点图 (图 3), 二者呈显著的对数关系, 相关系数均在 0.92 以上。



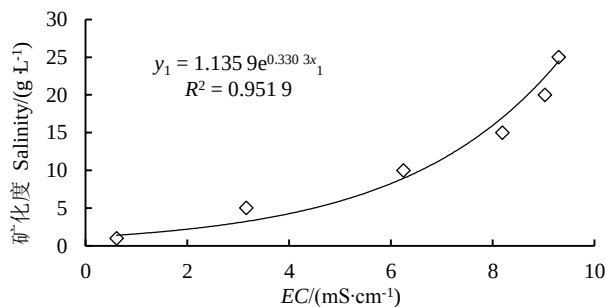
(a) 1 号传感器 (a) Sensor # 1



(b) 2 号传感器 (b) Sensor # 2



(c) 3 号传感器 (c) Sensor # 3



(d) 4 号传感器 (d) Sensor # 4

图 3 电导率和矿化度的率定关系

Fig.3 Calibration relationship between conductivity and salinity

从图 3 可以看出, 4 个传感器的系数 b_1 变化于 0.330 3~0.369 4, 相应的变异系数为 0.053 1, 变化比较稳定, 系数 a_1 变化于 0.643 1~1.135 9, 相应的变异系数为 0.247 7, 变化幅度较大; 因此应对每个传感器单独进行参数率定。

2.3 土壤含水率率定曲线

首先只利用传感器测试的数据建立土壤含水率率定模型, 针对不同传感器测试数据选择了线性模型 ($y=ax+b$) 和幂函数模型 ($y=ax^n$) 进行拟合分析, 其拟合程度较差, 相关系数变化于 0.012 2~0.935 4 之间 (6 个处理的相关系数分别为 0.579 2、0.593 7、

0.012 2、0.820 2、0.935 4、0.832 1)。在同样含水率条件下,土壤含盐量的变化会导致电容介电常数的变化,即土壤盐分对传感器测定含水率有影响。为此,本研究在土壤水分测试率定曲线函数中引入电导率。利用测试数据进行单个传感器的土壤含水率率定分析,对式(6)、式(7)和式(8)3个关系分别进行计算,得到相关系数,结果见表3。

从表3可以看到,对于每个传感器,3个模型的

相关系数(R^2)均不相同,式(6)、式(8)和式(7)的相关系数(R^2)平均值分别为0.783 9、0.782 4、和0.765 4;式(7)的拟合精度最低,式(6)和式(8)的拟合精度相近,但是,式(6)有3个参数,式(8)有4个参数,且式(6)的相关系数的 C_v 值与式(8)相近,因此选择式(6)作为土壤含水率率定的模型,率定参数及统计参数见表4。

表3 考虑盐分影响的土壤含水率率定相关系数

Table 3 Correlation coefficient of soil moisture content considering the effect of salinity

模型 Model	处理 Treatments						平均	C_v
	1	2	3	4	5	6		
式(6)	0.706 4	0.601 9	0.756 3	0.854 6	0.940 4	0.843 7	0.783 9	0.154 1
式(7)	0.531 6	0.623 3	0.832 4	0.842 8	0.933 8	0.828 5	0.765 4	0.200 4
式(8)	0.700 6	0.602 2	0.832 4	0.775 0	0.940 4	0.843 7	0.782 4	0.151 7

表4 基于二元线性函数的土壤含水率率定

Table 4 Determination of soil moisture content based on binary linear function

处理 Treatments	系数 Coefficient			统计参数 Statistical parameters			土壤含盐量 Soil salinity/(g kg ⁻¹)
	a_2	b_2	c_1	R^2	F	P	
1	0.136 8	11.717 8	1.740 3	0.706 4	8.419 9	0.013 7*	0.89
2	0.916 6	0.479 7	-28.630 2	0.601 9	5.292 5	0.039 7*	3.15
3	0.279 2	5.544 0	2.247 3	0.756 3	10.862 7	0.007 1**	8.80
4	1.954 3	0.924 6	-93.730 3	0.854 6	20.570 4	0.001 1**	12.19
5	1.211 7	-3.490 2	-5.656 1	0.940 4	55.241 7	0**	0.89
6	1.235 7	-3.861 6	-1.365 0	0.843 7	18.894 2	0.001 5**	0.89
综合 Comprehensive	0.554 4	-0.083 6	1.004 4	0.387 9	18.062 8	0**	-

注 $P<0.01$ (极显著, **); $0.01<P<0.05$ (显著, *)。Note $P<0.01$ (Highly significant, **); $0.01<P<0.05$ (Significant, *).

从表4可以看出,6个传感器土壤含水率的率定结果有所不同,其相关系数最大为0.940 4,最小为0.601 9,均达到了显著或极显著水平。将6个传感器的数据组合在一起率定也达到了极显著水平,但是相关系数较低,仅为0.387 9,拟合精度较差。还可以看出,模型的参数变化范围较大, a_2 最大可达1.954 3,最小为0.136 8, b_2 最大为11.717 8,最小为-3.861 6, c_1 值的变化幅度更大,最大为2.247 3,最小达-93.730 3,因此,对于土壤含水率,需要对每个传感器都进行参数率定。

对于土壤含水率的率定,本研究得出土壤盐分对传感器测定含水率有一定影响,与谭秀翠^[3]的研究结果一致,其利用5种TDR传感器(TDR100、Trime-HD、Mini-Trase、高精度土壤水分测量仪ML2x、便携式点土壤水分测量仪),共5种仪器进行了盐分浓度对土壤含水率测试结果影响的研究,认为这5种传感器的含水率的测试结果均受盐分影

响。对于土壤电导率的率定,本研究得出传感器测得的电导率值随矿化度的增加而增大,该结果与有关学者的研究结果一致^[12-13]。只是本研究中二者呈指数关系,其他学者研究结果为线性关系^[14-16],主要原因是本研究的矿化度梯度范围较大(0~25 g/L),其他文献中矿化度范围较小(0~5 g/L)。由于非饱和土壤电导率真实值没有准确的测试方法,因而对于非饱和土壤电导率的率定尚需进一步研究。

3 结论

1) 电容式土壤温度、水分、盐分三参数传感器(SMEC 300)有其对应的参数,应对每个传感器进行参数率定。

2) 土壤盐分显著影响传感器测定土壤含水率的精度,因此在土壤含水率的率定模型中引入土壤电导率,显著地提高了率定精度,并拓宽了传感器的适用范围。

3) 传感器测定的电导率随着矿化度的增大而增大, 当矿化度变化范围较大时, 电导率与矿化度呈显著的指数关系。

参考文献:

- [1] 刘炳忠, 张鑫. 国内外土壤墒情监测技术及应用[J]. 山东水利, 2008(12): 13-15, 17.
LIU Bingzhong, ZHANG Xin. Monitoring technology and application of soil moisture at home and abroad[J]. Water Conservancy of Shandong, 2008(12): 13-15, 17.
- [2] 时新玲, 王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2003(10): 84-86.
SHI Xinling, WANG Guodong. Research advances in measuring method of soil water content[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(10): 84-86.
- [3] 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.
- [4] 杨鹏举, 伍靖伟, 黄介生. 时域反射仪测定高含盐土壤盐分研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 71-74.
YANG Pengju, WU Jingwei, HUANG Jiesheng. A method of measuring salinity for high saline soil by time domain reflectometry[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 71-74.
- [5] ERFANI AGAH A, MEIRE P, DE DECKERE E. Laboratory calibration of TDR probes for simultaneous of measurements soil water content and electrical conductivity[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50(13): 1 525-1 540.
- [6] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1): 45-70.
- [7] BREVIK E C, FENTON T E, HORTON R. Effect of daily soil temperature fluctuations on soil electrical conductivity as measured with the geonics EM-38[J]. Precision Agriculture, 2004, 5(2): 145-152.
- [8] ZHANG R, WIENHOLD B J. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2): 251-254.
- [9] MOJID M A, WYSEURE G C L, ROSE D A. The use of insulated time-domain reflectometry sensors to measure water content in highly saline soils[J]. Irrigation Science, 1998, 18(2): 55-61.
- [10] 车政, 王仰仁, 王永红, 等. 农田土壤水分特征曲线参数拟合及其剖面变异特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 22-27.
CHE Zheng, WANG Yangren, WANG Yonghong, et al. Research on parameter fitting of soil water characteristic curve and its variation property with depth of farmland soil profile[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 22-27.
- [11] 龚雨田. 不同矿化度微咸水灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响研究[D]. 天津: 天津农学院, 2017.
GONG Yutian. Study on the impact of saline water with different degree of materialization on growth[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2017.
- [12] 刘静妍. 不同灌溉模式的微咸水入渗特性和土壤盐分布特征[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
LIU Jingyan. Soil infiltration and water salt distribution under the saline water supply conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [13] 张安琪, 郑春莲, 李宗毅, 等. 棉花成苗和幼苗生长对咸水滴灌的响应特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 16-22.
ZHANG Anqi, ZHENG Chunlian, LI Zongyi, et al. Responsive growth of seedling and matured cotton to drip irrigation with saline water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 16-22.
- [14] 张启新, 李洁, 丛稳. 地下水电导率与矿化度相关关系分析: 以甘肃省河西走廊张掖盆地为例[J]. 地下水, 2010, 32(6): 46-48.
ZHANG Qixin, LI Jie, CONG Wen. Correlation between groundwater conductivity and salinity: A case study of Zhangye Basin in Hexi Corridor, Gansu Province[J]. Groundwater, 2010, 32(6): 46-48.
- [15] 刘中业, 徐建国, 祁晓凡, 等. 地下水电导率与矿化度相关关系分析: 以鲁北平原为例[J]. 山东国土资源, 2013, 29(9): 57-60, 64.
LIU Zhongye, XU Jianguo, QI Xiaofan, et al. Analysis on groundwater conductivity and salinity correlation—setting lubei plain in Shandong Province as an example[J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(9): 57-60, 64.
- [16] 陈素平. 天然水中电导率与矿化度的关系探讨[J]. 山西水利科技, 2011(2): 78-80.
CHEN Suping. Study on the correlation between conductivity and mineralization degree of natural water[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2011(2): 78-80.

Calibrating Soil Temperature, Water and Salt Measured Using Capacitive Sensor

YAO Li, WANG Yangren^{*}, WANG Hao, LI Yonglin, FAN Xinrui

(College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: 【Background】 Soil water content is important for irrigation and is a parameter for designing automatic irrigation. Traditional method for measuring soil moisture content is soil drying. Although accurate, it was tedious and laborious, unable to provide real-time soil moisture measurement. As a result, numerous alternative methods have been proposed, including neutron probe method, γ -ray transmission method, electromagnetic wave method, electrical resistance method, capacitance method and photoelectric method. Sensors able to simultaneously measure soil moisture, soil electrical conductivity (EC_a) and electrical conductivity (EC_w) are essential for better managing irrigation water and monitoring and controlling soil salinity. 【Objective】 The purpose of this paper is to test the accuracy of a capacitive sensor (three-parameter sensor) that can concurrently measure soil moisture, as well as soil electrical conductivity and salinity. The experiment was conducted in pots each packed with 8.86 kg of dry soil 10 cm thick. 【Method】 The three-parameter sensor used in the experiment was the SMEC 300 model. The experiment was conducted at the water-cycling experiment station at the west campus of Tianjin Agricultural University. We tested three water levels by adding 2.65, 3.25 and 3.80 kg of water to the pots, and four salt levels by adding 0, 20, 70 and 100 to the pots. There were six salinity concentration: 1, 5, 10, 15, 20 and 25 g/L. The sensors were buried 5 cm below the soil surface. During the test the pots were regularly weighed to measure the change in soil moisture content. The electrical conductivity test was conducted in plastic pots, each filled with 8L of water with four sensors in it. Each test lasted 40 minutes. The soil moisture and electrical conductivity measured from the sensors were calibrated against the results directly measured from pot weighting and the pots filled with water only. 【Result】 The electrical conductivity measured by the sensor increased exponentially with salinity, and their correlation coefficient was higher than 0.92. Soil salinity affected accuracy of the soil moisture measurement and the real moisture was linearly related to soil moisture content and electrically conductivity measured by the sensor at significant level or above, with the correlation coefficient varying from 0.601 9 to 0.940 4. It also found that the calibration parameters varied with individual sensors. 【Conclusion】 Calibration parameters of the capacitive sensors are not unique, and thus each sensor should be calibrated individually. Soil salinity affected accuracy of the sensors, and accuracy of the soil moisture measured by the sensor could be improved by including the electrical conductivity measured by it in the calibration.

Key words: soil; moisture content; electrical conductivity; capacitive sensor

责任编辑: 陆红飞