

基于 Wenner 和 Schlumberger 双组态融合的土壤电导率测量装置

齐江涛, 王凯晨, 包志远, 张伟荣, 郭 慧*, 刘向南, 李 宁

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘 要: 土壤电导率的准确、实时和原位获取可为农业生产精准管理提供有效的数据支撑, 为提高传统电流-电压四端法测量精度, 该研究基于电流-电压四端法 3 种测量组态, 开展土壤电导率主要影响因素(土壤含水率、电极入土深度、土壤坚实度和土壤处理方式)对电流-电压四端法的 3 种测量组态测量精度影响的试验。结果表明, Wenner 和 Schlumberger 两种测量组态可较好的适用于不同土壤环境条件。进一步以 Wenner 和 Schlumberger 两种测量组态所测土壤电导率值为输入量, 基于 BP 神经网络构建了双组态融合的土壤电导率回归模型, 并在此基础上设计了一种土壤电导率测量装置, 该装置主要包括 JESTON nano、STM32 单片机数据采集模块、传感器、激励源及差分放大模块等组件。工作稳定性试验结果显示, 该装置在不同土壤电导率梯度条件下测量数据的标准偏差均小于 $0.43 \mu\text{S}/\text{mm}$, 田间性能对比试验结果显示, 该装置测量数据的均方根误差值为 $0.18 \mu\text{S}/\text{mm}$, 测量精度优于传统单独测量组态和市面常用土壤电导率测量仪, 以上结果表明所研制的土壤电导率测量装置具有较好的工作稳定性和测量精度。该研究可为田间土壤信息的实时原位采集提供一种高精度的检测工具和技术手段。

关键词: 土壤; 电导率; 测量组态; BP 神经网络; 模型; 测量装置

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306199

中图分类号: S15

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0090-10

齐江涛, 王凯晨, 包志远, 等. 基于 Wenner 和 Schlumberger 双组态融合的土壤电导率测量装置[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 90-99. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306199 <http://www.tcsae.org>

QI Jiangtao, WANG Kaichen, BAO Zhiyuan, et al. Measuring soil electrical conductivity using dual-array fusion of Wenner and Schlumberger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 90-99. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306199 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着人口的快速增长、耕地面积的减少和环境的日益破坏, 智慧农业^[1-3]已经成为热点话题。土壤作为农业生产的重要基础环境, 土壤参数的获取对指导农业生产意义重大^[4]。

土壤电导率(EC, soil electrical conductivity)是重要的土壤参数指标^[5], 现有研究表明土壤电导率可不同程度反应土壤盐度、水分、有机质含量、土壤质地和孔隙度等参数^[6]。因此, 土壤电导率作为表征作物产量相关的土壤理化特性指标之一, 其测量也成为了作物产量预测的有效检测手段^[7]。

目前, 常用的测量土壤电导率方法有: 土壤浸出液法^[8]、电流-电压四端法^[9-10]、电磁感应法(EM, electromagnetic induction method)^[11]和时域反射仪法(TDR, time-domain reflectometry)^[12]。通过土壤溶液提

取物测量土壤电导率, 即土壤浸出液法, 虽然可以获得高精度的土壤电导率指标, 但由于人工效率低、成本高而无法适用于田间规模化应用。TDR 测量土壤电导率效率高^[13], 但由于受频带宽度限制需使测试系统置于探头很近的范围内, 进而使其在含水率和电导率规模化空间特征的测量受限。电流-电压四端法和 EM 技术都非常适合规模化原位测量, 而有研究表明 EM 会因漂移影响而使土壤电导率测量误差增大^[11]。电流-电压四端法是一种侵入性技术, 需要土壤和插入土壤的 4 个电极之间接触良好, 除了在干燥或石质土壤中测量结果不稳定外, 因其测量的准确性和灵活性, 在土壤电导率规模化原位测量方面综合表现较好, 应用也最为广泛。

基于电流-电压四端法, 许多学者在土壤电导率检测研究领域取得了一定突破。HAN 等将差分电路引入 ARM (advanced risc machine) 土壤电导率仪中, 以解决土壤质地对电导率读数影响^[14]。SAMSON 等基于电流-电压四端法和时域反射法, 使用了两种不同类型的探头测量土壤电导率, 结果表明基于电流-电压四端法的 GS3 型探头较优^[15]。此外, 在土壤电导率模型研究方面, 徐志闻建立了土壤电导率与含水率和含盐量之间的多元回归模型^[16]。RHOADES 等认为土壤电导率可采用固相、液相、固-液串联耦合通道三个并联通道的电导表示, 并提出

收稿日期: 2023-06-28 修订日期: 2023-12-13

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD2000201); 国家自然科学基金项目(32271988)

作者简介: 齐江涛, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为精准农业与智能农业装备。Email: qjiangtao@jlu.edu.cn

※通信作者: 郭慧, 高级工程师, 博士, 研究方向为农机触土部件及智能农业机械研究。Email: guohui6520@jlu.edu.cn

计算体积电导率和孔隙水电导率的模型^[17]。

目前基于电流-电压四端法测量土壤电导率的研究主要集中在提高其测量精度上，一部分通过改进装置结构，另一部分通过在原有测量模型基础上增加自变量实现精度提高，基于电流-电压四端法的 3 种常用测量组态所适用土壤环境的相关研究未见报道。因此，本文从电流-电压四端法 3 种测量组态在不同作业条件下对土壤电导率测量精度影响出发，优选出不同作业条件下测量精度较高的两个组态，通过 BP 神经网络构建双组态融合的皮肤电导率回归模型，结合 JESTON nano、STM32 单片机、数据采集模块以及差分放大电路等模块设计，以实现高精度土壤电导率测量装置研究，为土壤电导率信息的实时原位获取提供技术和硬件支持。

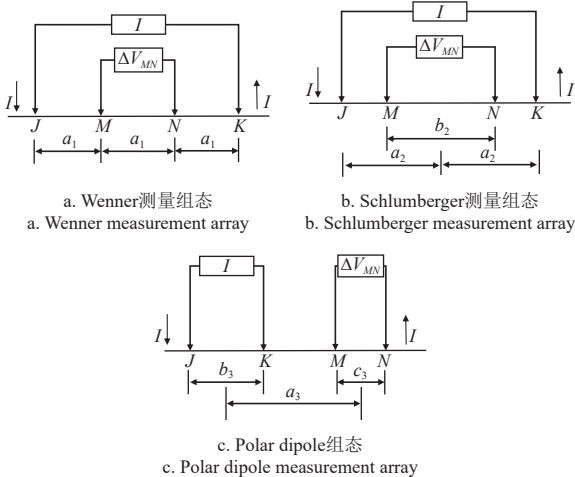
1 三组态土壤电导率测量精度

1.1 土壤电导率测量组态

基于电流-电压四端法测量土壤电导率，由双点源分析可引出 3 种测量组态，如图 1 所示。其中 Wenner^[18]、Schlumberger^[19]、Polar dipole^[20] 组态下土壤电导率 (σ , $\mu\text{S}/\text{mm}$) 模型分别如式 (1)~(3)。

$$\sigma = \frac{1}{2\pi a_1} \frac{1}{\Delta V_{MN}} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\pi \left(\frac{a_2^2}{b_2} - \frac{b_2}{4} \right)} \frac{1}{\Delta V_{MN}} \quad (2)$$



注：J、K 为电流端，M、N 为电压端； ΔV_{MN} 为 M 端与 N 端之间的电位差， μV ；I 为恒流源电流值，mA； a_i ($i=1,2,3$)， b_i ($i=2,3$)， c_i ($i=3$) 为不同端的距离，mm。

Note: J and K are current terminals, M and N are voltage terminals; ΔV_{MN} is the potential difference between M and N, μV ; I is the value of constant current source current, mA; a_i ($i=1,2,3$), b_i ($i=2,3$), c_i ($i=3$) are the distances between different terminals, mm.

图 1 土壤电导率测量组态示意图

Fig.1 Schematic diagram of three measurement arrays of soil electrical conductivity (EC)

$$\sigma = \left(\frac{1}{a_3 + \frac{c_3}{2} - \frac{b_3}{2}} - \frac{1}{a_3 - \frac{c_3}{2} - \frac{b_3}{2}} - \frac{1}{a_3 + \frac{c_3}{2} + \frac{b_3}{2}} + \frac{1}{a_3 - \frac{c_3}{2} + \frac{b_3}{2}} \right) 2\pi \frac{1}{\Delta V_{MN}} \quad (3)$$

式中 σ 为电导率值， $\mu\text{S}/\text{mm}$ 。

由式 (1)~(3) 可以发现，电极间距和恒流源的选取会影响土壤电导率测量准确性，恒流源电流 I 过小或电极间距选取不当会导致传感器的输出电压较小或电压传输不稳定而影响测量精度。根据现有研究^[21]，确定 Wenner、Schlumberger 和 Polar dipole 组态的电极间距为 $a_1=200\text{ mm}$ ， $a_2=300\text{ mm}$ ， $b_2=300\text{ mm}$ ， $a_3=450\text{ mm}$ ， $b_3=200\text{ mm}$ ， $c_3=100\text{ mm}$ 。对于一般采集到的电压信号位数为 2^{16} 位，则有 $\Delta V_{MN} = (\text{实际显示电压位数}/2^{16}) \times 5\text{ V}$ ，根据测试系统显示的 Wenner、Schlumberger 和 Polar dipole 组态位数，可知 ΔV_{MN} 电压信号范围分别为 $1.35 \sim 2.71\text{ }\mu\text{V}$ 、 $2.41 \sim 4.81\text{ }\mu\text{V}$ 、 $1.35 \sim 2.71\text{ }\mu\text{V}$ ，现有研究表明农田土壤的皮肤电导率变化范围约为 $23.9 \sim 65.0\text{ }\mu\text{S}/\text{mm}$ ^[21]，将上述数据分别代入式 (1)~(3) 可得到恒流源 I 的范围为 $81.2 \sim 110.5\text{ mA}$ ，最终确定恒流源 $I=100\text{ mA}$ 。并在此基础上对不同组态下的皮肤电导率测量值的准确性展开研究，以作为皮肤电导率双组态融合回归模型构建依据。

1.2 三组态土壤电导率测量精度对比试验

1.2.1 试验设计

现有研究表明土壤含水率、电极入土深度、土壤坚实度和土壤处理方式会显著影响皮肤电导率^[22-25]，土壤含水率在 $15\% \sim 30\%$ 之间变化时与皮肤电导率变化近似为线性关系，当土壤含水率超过 30% 时，土壤含水率对皮肤电导率影响不显著^[26]。当电极入土深度在 $0 \sim 100\text{ mm}$ 时，传感器输出电压值与电极入土深度成正比，当电极入土深度大于 100 mm 时，传感器输出电压值基本保持不变^[27]。基于此，确定试验方案因素水平见表 1，其中土壤坚实度通过镇压辊作业次数控制，土壤处理方式分为纯土和混埋土，混埋土采用该地区农艺常规使用的 30% 秸秆与土壤混埋^[28]，秸秆粉碎长度 $\leq 10\text{ cm}$ ^[29]。

表 1 试验因素水平
Table 1 Test factor levels

水平 Level	土壤含水率 Soil moisture content(SMC) /%	电极入土深度 Electrode embedded depth (EED) /mm	土壤坚实度 Soil compaction (SC) /kPa	土壤处理方式 Soil treatment (ST)
1	15	50	62.1	纯土 Pure soil (PS)
2	25	100	70.1	30% 秸秆混埋 Straw mixed soil (SMS)
3	35	150	/	/

1.2.2 试验方法

2022 年 9 月下旬在吉林大学生物与农业工程学院农

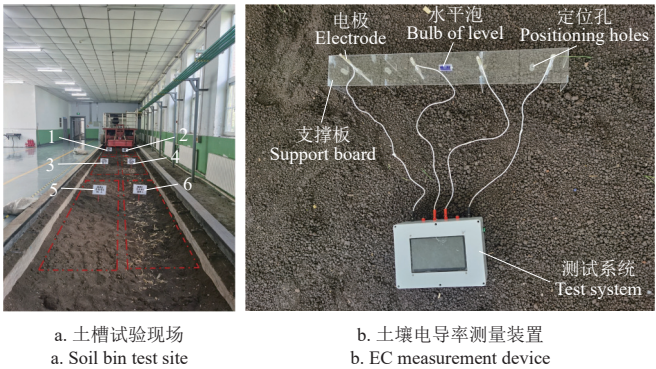
机试验室土槽内对 3 种测量组态在不同土壤含水率、电极入土深度、土壤坚实度和土壤质地条件下的土壤电导率测量精度进行了 3×3×2 的全部随机试验，每组试验随机选取 3 个点重复测量土壤电导率。试验用土槽长 40 m、宽 2.8 m、深 1.8 m，室内温度为 22 ℃。试验用土壤基本参数见表 2。

依据试验方案，将土槽划分成 6 块。如图 2a 所示，左侧 3 块测试地块（1、3 和 5）土壤处理方式为纯土（PS），右侧 3 块测试地块（2、4 和 6）土壤处理方式为混埋土（SMS）。试验前采用土槽试验台车挂接旋耕刀对土壤进行旋耕处理，旋耕深度为 200 mm。之后对土壤表面进行洒水-盖塑料布-静置-监测土壤含水率的往复处理，直至距离地表 50 mm 处的土壤含水率满足预期要求，即

地块 1 和地块 2 的土壤含水率为 15%，地块 3 和地块 4 的土壤含水率为 25%，地块 5 和地块 6 的土壤含水率为 35%。接着采用土槽试验台车挂接镇压辊对土壤进行第一次镇压，并记录距离地表 50 mm 处的土壤坚实度。随后采用图 2b 所示的测量装置，通过 4 个电极与支撑板上不同定位孔的配合完成 3 种测量组态下每个试验地块 3 个电极入土深度（50、100、150 mm）的土壤电导率的测量。通过环刀法对每个试验地块 3 个电极入土深度下的土壤采样，带回实验室采用浸出液法^[29]测土壤电导率，并以此作为土壤电导率标准值。测量完成第一个坚实度水平条件下的所有数据后，采用土槽试验台车挂接镇压辊对土壤进行第二次镇压，按照上述方式进行数据测量，以完成第二个土壤坚实度水平条件下所有数据的采集。

表 2 土壤基本属性参数
Table 2 Basic soil property parameters

土壤质地 Soil texture	土壤粒径分布 Soil particle size distribution / %			有机质含量 Organic matter / %	pH 值 pH Values	Na / (mol·L ⁻¹)	Ca +Mg / (mol·L ⁻¹)	K / (mol·L ⁻¹)	CaCO ₃ / %
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay						
黏壤土 Clay loam soil	45	35	20	2.54	7.6	143.02	20.28	4.02	4.10



注：1~6 为 6 个地块。
Note: 1 to 6 are 6 plots

图 2 试验方案和设备
Fig.2 Test scheme and equipment

1. 2. 3 测量精度结果

3 种测量组态在不同土壤条件下所测得的土壤电导率和浸出液法测得的标准值关系如图 3 所示。在不同土壤含水率下（图 3a），Wenner、Schlumberger 和 Polar Dipole 组态下的均方根误差值的范围分别为 0.15~0.59，0.17~1.78 和 2.03~2.80 μS/mm。在不同电极入土深度下（图 3b），Wenner、Schlumberger 和 Polar Dipole 组态的均方根误差值的范围分别为 0.07~0.21，0.06~1.59 和 0.60~2.03 μS/mm。在不同土壤坚实度下（图 3c），Wenner、Schlumberger 和 Polar Dipole 组态下的均方根误差值的范围分别为 0.12~0.28，1.30~1.35 和 1.60~1.66 μS/mm。在不同土壤质地下（图 3d），Wenner、Schlumberger 和 Polar Dipole 组态下的均方根误差值的范围分别 0.18~0.31，0.60~1.30 和 0.75~1.66 μS/mm。由

均方根误差值可以看出，土壤电导率测量精度整体上由大到小为 Wenner、Schlumberger、Polar Dipole，但是在纯土、土壤含水率为 25% 和 35% 时，Schlumberger 组态所测土壤电导率精度较优。Okpoli^[30]对基于电流-电压四端法不同测量组态的相关研究显示，Wenner 和 Schlumberger 组态对土壤电导率的垂直变化较为敏感，Polar Dipole 组态对土壤电导率的水平变化较为敏感，这使得对于同一测量点，在电极以不同入土深度进行测量时，Wenner 和 Schlumberger 组态的测量精度要优于 Polar Dipole 组态，研究结果与本文土槽试验结果相符。基于以上分析结果，选取 Wenner 和 Schlumberger 两种测量精度较优的组态用于构建高精度的土壤电导率模型。

2 双组态融合的土壤电导率测量装置

2. 1 双组态融合的土壤电导率回归模型

本文采用 3 层 BP 神经网络（输入层、隐藏层、输出层）创建基于电流-电压四端法的 Wenner 和 Schlumberger 双组态融合的土壤电导率模型。以 Wenner 和 Schlumberger 两种组态所测的土壤电导率值作为 2 个自变量，输入层神经元的数量为 2 个， x_1 、 x_2 分别为 Wenner、Schlumberger 组态测得的土壤电导率值。目标函数为 1 个，输出神经元的个数为 1 个， y_1 为优化后的土壤电导率。隐含层神经元数量依据文献^[31-32]中的方法并经反复测试后，确定其个数为 9 个。

选择层间函数为 Sigmoid，优化后的土壤电导率值（目标函数）与 Wenner 和 Schlumberger 组态测量的土壤电导率值之间的关系，即所构建模型为：

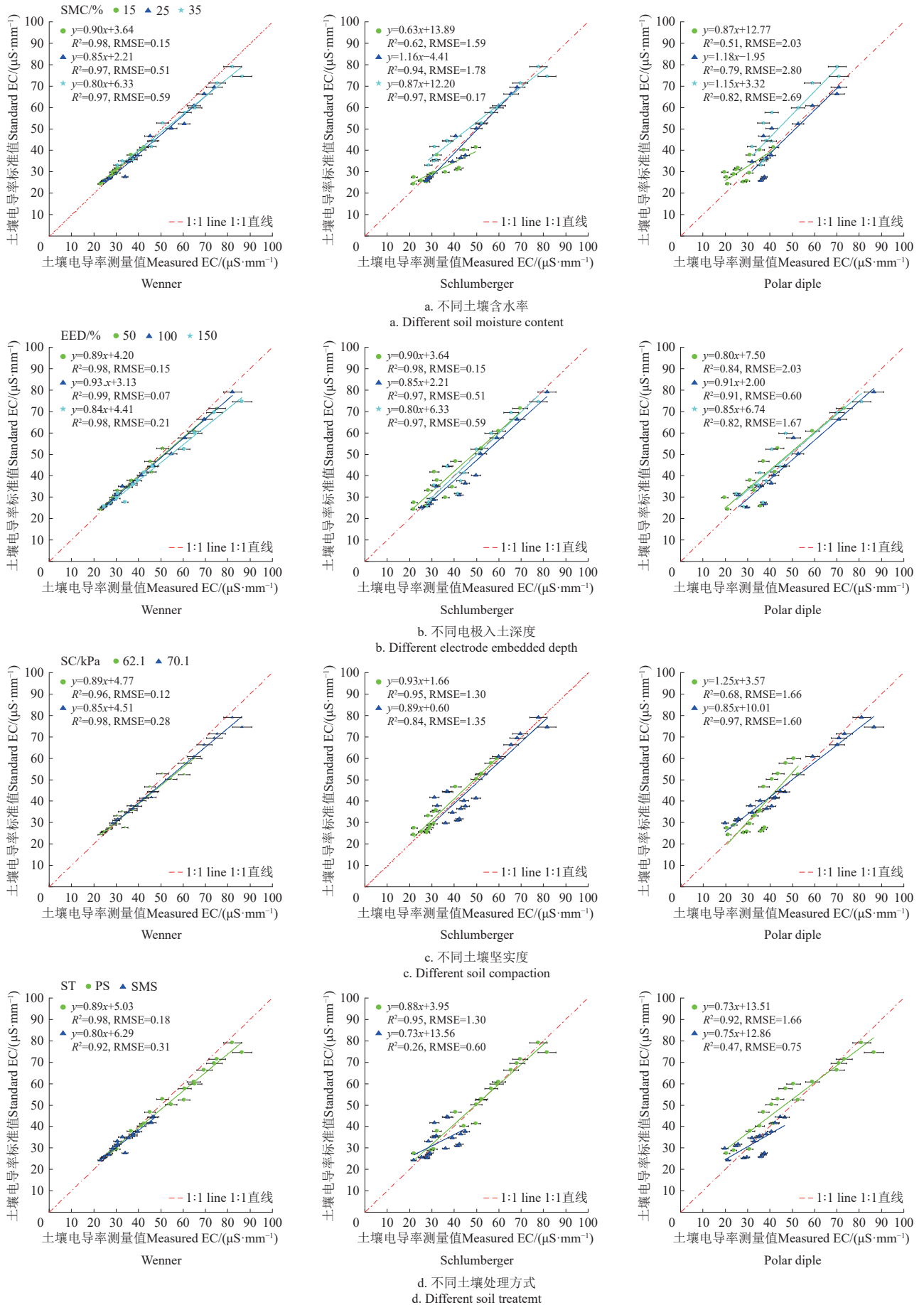


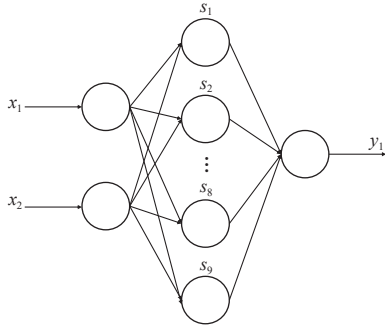
图 3 不同土壤条件下土壤电导率三种测量组态测量精度

Fig.3 Measurement accuracy of three measurement arrays of EC under different soil conditions

$$Y = F(X) = f[V \cdot f(W \cdot X + \theta_1) + \theta_2] \quad (4)$$

式中, $f()$ 为 BP 神经网络输入层到隐含层、隐含层至输出层的传递函数单级 Sigmoid 函数; X 为输入向量, $X=[x_1, x_2]^T$, x_1 、 x_2 分别为 Wenner、Schlumberger 组态测得的土壤电导率值, $\mu\text{S}/\text{mm}$; Y 为输出向量, $Y=[y_1]$, $\mu\text{S}/\text{mm}$; $F(X)$ 为输入与输出之间的关系; W 为输入层与隐含层的权值矩阵; θ_1 为隐含层的阈值; V 为隐含层与输出层的权值矩阵; θ_2 为输出层的阈值^[32]。

本文利用 Matlab R2022a 对 BP 神经网络进行训练, 建模数据来自 1.2.3 节 3 组态土壤电导率测量精度对比试验, 共计 90 组数据, 其中 70 组数据 (Wenner 组态、Schlumberger 组态获取的土壤电导率值以及标准值) 用于训练模型, 20 组数据 (Wenner 组态、Schlumberger 组态获取的土壤电导率值以及标准值) 用于测试模型。Wenner 组态测量的土壤电导率值和 Schlumberger 组态测量的土壤电导率值与优化后的土壤电导率的 BP 神经网络模型采用 2-9-1 网络结构, 归一化区间为 $[0, 1]$, 网络输出误差满足 $\leq 0.000\ 001$ 时, 如图 4 所示。



注: x_1 为 Wenner 组态测得的土壤电导率值, x_2 为 Schlumberger 组态测得的土壤电导率值; $s_1 \sim s_9$ 为隐藏层节点; y_1 为优化后的土壤电导率。
Note: x_1 is the value of soil electrical conductivity measured by Wenner array, x_2 is the value of soil electrical conductivity measured by Schlumberger array; $s_1 \sim s_9$ are the hidden layer nodes; y_1 is the optimized soil electrical conductivity.

图 4 BP 神经网络结构图

Fig.4 Structure chart of BP neural network

训练后的模型参数为:

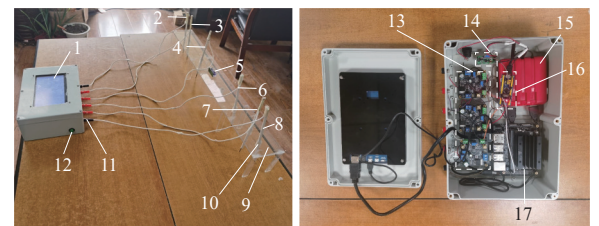
$$W = \begin{bmatrix} 0.1205 & 0.1515 \\ -0.0124 & 0.1726 \\ 0.1560 & 0.3239 \\ 0.3317 & 0.0858 \\ 0.2176 & 0.1309 \\ 0.2655 & -0.0526 \\ 0.1825 & -0.0741 \\ 0.2421 & 0.3485 \\ 0.2255 & 0.3299 \end{bmatrix}, \theta_1 = \begin{bmatrix} 0.3887 \\ -0.0445 \\ 0.2111 \\ 0.2823 \\ 0.3322 \\ -0.0043 \\ 0.0599 \\ 0.3144 \\ 0.3035 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.2330 \\ -0.2078 \\ 0.3923 \\ 0.2777 \\ 0.3512 \\ 0.3079 \\ 0.3734 \\ 0.2511 \\ 0.0866 \end{bmatrix}^T, \theta_2 = [-0.0558]。$$

训练集数据显示模型拟合度 R^2 为 0.997, 测试集数据显示, 基于 BP 神经网络的双组态融合的土壤电导率模型的预测值和标准值的均方根误差值为 $0.12 \mu\text{S}/\text{mm}$, R^2 为 0.990。传统单独 Wenner 组态和 Schlumberger 组态与标准值的均方根误差值分别为 0.30 和 $0.32 \mu\text{S}/\text{mm}$, 重构后的模型均方根误差值均小于单独测量组态结果。以上结果表明采用 BP 神经网络构建的双组态融合的土壤电导率模型测量精度较高, 满足预期目标。

2.2 土壤电导率检测装置

依据所构建的双组态融合的土壤电导率模型, 设计如图 5 所示的土壤电导率测量装置, 主要由可触摸液晶显示屏、电极插座、开关、差分放大模块、恒流源模块、电源、STM32 单片机数据采集模块、JESTON nano 和传感器组件组成, 其中传感器组件由电极 I、电极 II、电极 III、电极 IV、电极 V、电极 VI、水平泡、支撑板和定位孔组成。如图 5 所示, 定位孔上设有圆柱形凸台通孔, 可以保证电极插入土壤过程中沿定位孔轴线方向进行直线移动。实际测量时, 首先要进行支撑板调平, 选取较为平整的地块, 将支撑板放置于待测地块, 通过移动支撑板两侧支撑腿的入土深度, 使水平泡中的气泡位于中央, 此时支撑板处于水平位置, 即可保证所有定位孔的轴心与地表水平面垂直, 该状态下, 将所选组态的电极插入对应的定位孔中进行上下移动时, 可保证电极沿入土深度方向进行直线运动, 进而保证各电极间距的恒定。每个电极均由传感器电极和 PVC 管组成, 传感器电极固接在 PVC 管一端, PVC 管上设有 3 个入土深度标记, 在支撑板完成调平的前提下, 通过将指定组态的电极插入对应的定位孔, 并依照 PVC 管上的深度标记插入土壤中, 即可保证不同组态电极入土深度的一致。



a. 外观
a. Appearance

b. 内部
b. Inside details

1.可触摸液晶显示屏 2.电极 I 3.电极 II 4.电极 III 5.水平泡 6.电极 IV 7.电极 V 8.电极 VI 9.支撑板 10.定位孔 11.电极接口 12.开关 13.差分放大模块 14.恒流源模块 15.电源 16.STM32 单片机最小系统 17.JESTON nano
1.Touchable LCD screen 2.Electrode I 3.Electrode II 4.Electrode III 5. Bulb of level 6.Electrode IV 7.Electrode V 8.electrode VI 9.Support plate 10.Positioning hole 11. Electrode interface 12.Switch 13.Differential amplifier module 14.Constant current source module 15.Power supply 16.STM32 MCU minimum system 17.JESTON nano

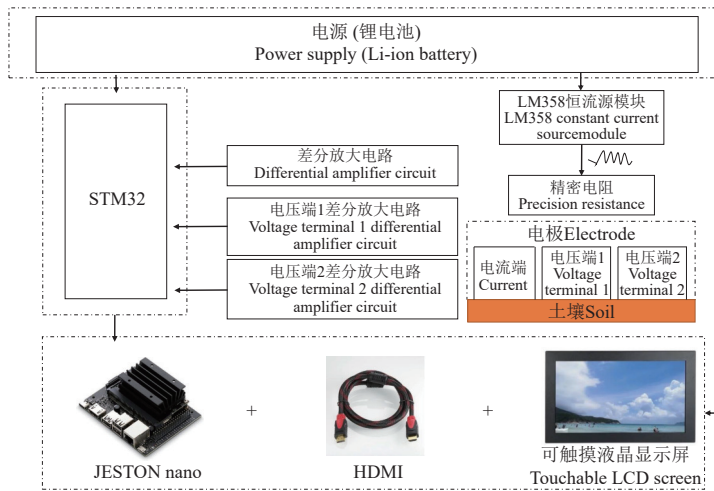
图 5 土壤电导率检测装置实物图

Fig.5 Photo of EC testing device

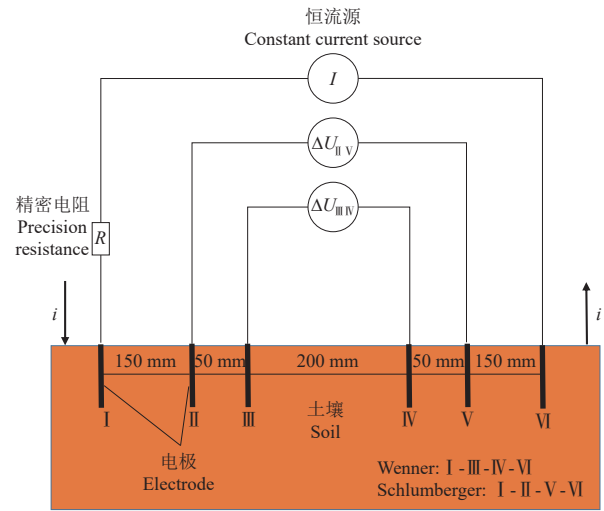
土壤电导率测量装置电路如图 6。硬件电路总体结构如图 6a 所示, 主要由 JESTON nano、可触摸液晶显示屏、STM32 单片机数据采集模块、传感器电极、电极接口、恒流源模块、差分放大模块、电源模块、外接串口

端、外壳等组成。采用 JESTON nano 作为处理数据的核心单元，采用 STM32 单片机作为数据采集的核心单元，通过数据总线传输至 JESTON nano 进行数据处理，可触

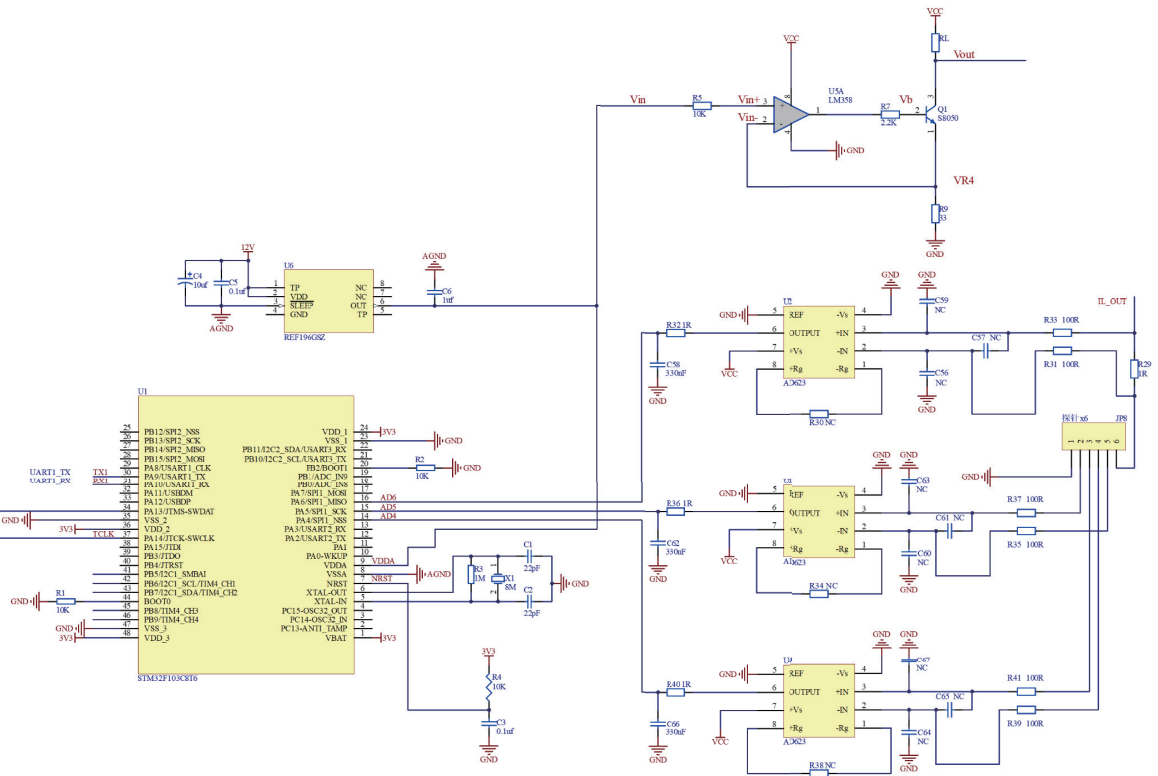
摸液晶显示屏用于实时显示测量装置的土壤电导率值。电源（锂电池）分别为各模块进行单独供电，可有效避免不同模块间的信号干扰。



a. 土壤电导率传感器电路结构图
a. Schematic diagram of EC sensor



b. 土壤电导率测量原理图
b. Schematic diagram of EC



c. 双组态融合的土壤电导率测量装置电路原理图
c. Schematic circuit diagram of a dual-array fusion EC measurement device

注： i 为恒流源 1 提供的电流。

Note: i is the current supplied by the constant current source 1.

图 6 土壤电导率测量装置电路图

Fig.6 Circuit diagram of EC measurement device

6 个电极长度均大于 150 mm，其中传感器电极为直径 3.17 mm 的不锈钢实心材质，传感器电极（电极 I、II、III、IV、V、VI）在工作时与土壤接触，外侧两电极（电极 I、VI）为输入端，由恒流源提供激励信号，中间电极（电极 II、III、IV、V）为输出端，当电极 I、

II、V、VI 分别经定位孔插入土壤时为 Schlumberger 组态，当电极 I、III、IV、VI 分别经定位孔插入土壤时为 Wenner 组态，分布示意图如图 6b 所示。工作时，电源为各个单元模块提供有效的电源输入，首先选择 Schlumberger 组态的传感器电极插入土壤，STM32 单片

机采集经过放大后的电压信号,通过串行通讯接口与 JESTON nano 进行数据交换, JESTON nano 根据式(2)处理数据,并通过可触摸液晶显示屏读取;再次选择 Wenner 组态的传感器电极插入土壤,入土深度与 Schlumberger 组态一致,步骤同上;最后 Schlumberger 组态和 Wenner 组态获取的土壤电导率值作为 JESTON nano 中构建好的 BP 神经网络模型的输入,通过可触摸液晶显示屏读取该模型优化后的土壤电导率值。由于采集的电压信号较小,故采用 AD623 及其外围电路组成的差分放大电路对流经精密电阻 R29 和传感器电极的信号进行放大,可通过改变 R30 阻值调节差分放大电路增益,双组态融合的土壤电导率测量装置电路原理图如图 6c 所示。

3 试验验证

3.1 材料与方

为验证双组态融合的土壤电导率测量装置的实际作业性能,2022 年 10 月上旬于吉林省长春市吉林大学农业试验基地 (125.25°E, 43.95°N) 对其工作稳定性和田间性能进行对比试验,土壤电导率标准值通过环刀法采集农田区域内 0~20 cm 土样,按照 HJ 802-2016《土壤-电导率的测定-电极法》相关要求,制备土壤浸出液,并采用 HI98331 型土壤电导率仪测量,该仪器选自汉纳仪器(上海)有限公司,采用主机与内置温度传感器可穿透式不锈钢电极镶嵌式设计,测量范围为 0~400 $\mu\text{S}/\text{mm}$,可进行自动温度补偿,精度较高。

3.1.1 工作稳定性试验

依据 HJ802-2016 制备 6 组土壤电导率梯度 (24.37、37.90、46.83、59.90、69.50、79.2 $\mu\text{S}/\text{mm}$) 的土壤样本,在室内温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,采用所研制的双组态融合的土壤电导率测试装置对每组土壤样本在静态条件下连续测量 50 次并记录数据,通过计算每组 50 个数据的标准偏差,以衡量测量装置的工作稳定性,即标准偏差越小、数据波动越小、工作稳定性越佳。

3.1.2 田间性能对比试验

作业地块及现场试验如图 7 所示。针对试验田纯土和 30% 秸秆混埋土两种作业地,每个地块随机选择 4 点,每个测量点分别采用 TDR-350 型土壤电导率仪和双组态融合的土壤电导率测量装置进行 50、100 和 150 mm 入土深度的土壤电导率测量,同时采用浸出液法^[33]对测量位置处土壤电导率标准值进行检测。通过计算 TDR-350 型土壤电导率仪、双组态融合的土壤电导率测量装置、Wenner 组态和 Schlumberger 组态测得的土壤电导率值与标准值的误差,以评价不同仪器和方法下的土壤电导率测量精度,其中 Wenner 组态和 Schlumberger 组态测得的土壤电导率值可由双组态融合的土壤电导率测量装置导出。

3.2 结果与分析

3.2.1 工作稳定性

双组态融合的土壤电导率测量装置在对不同土壤电导率梯度下土壤样本的测量结果如图 8 所示。可以看出,

该装置对 6 组土壤样本进行连续检测时,数据波动较小,每组数据的标准偏差均小于 0.43 $\mu\text{S}/\text{mm}$ 。试验结果表明,设计的双组态融合的土壤电导率测量装置在检测不同土壤电导率梯度的土壤时,可以保持良好的工作稳定性。

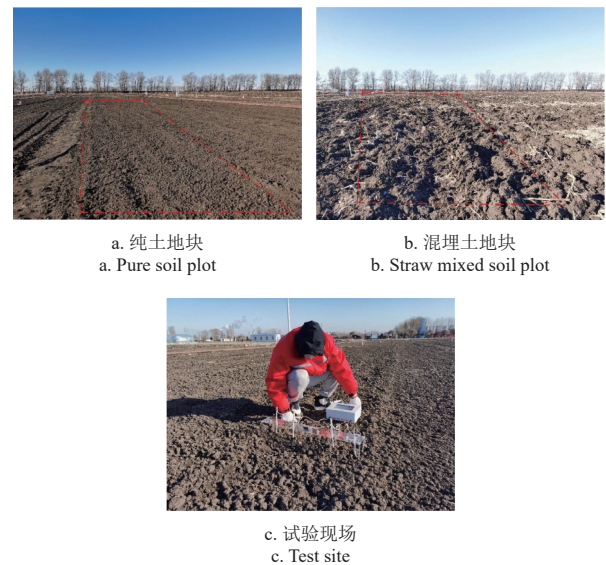
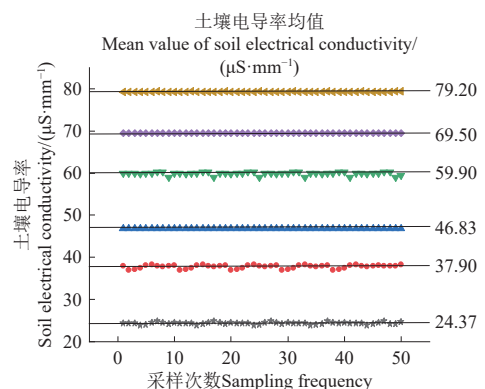


图 7 作业地块以及现场试验
Fig.7 Operational plots and test site



注: 数值为土壤电导率均值, 各点为试验值。
Note: Values are mean soil electrical conductivity, and points are test values.

图 8 土壤电导率测量装置的工作稳定性试验结果

Fig.8 The stability test results of EC measurement device

3.2.2 田间性能对比

4 种测量方式所测土壤电导率与标准值的关系如下文所述,分别在纯土地块和混埋土地块随机选择 4 点进行测量,且每点分别测 50、100 和 150 mm 入土深度处的土壤电导率,前 12 个数据的测量位置为纯土地块,后 12 个数据的测量位置为混埋土地块。其中, Wenner 组态、Schlumberger 组态、TDR-350 型土壤电导率仪和双组态融合的土壤电导率测量装置所测土壤电导率与浸液法所测数据变化趋势一致,且在同一地块同一测量位置,土壤电导率最大值均出现在电极入土深度为 100 mm 或者 150 mm 时,土壤电导率最小值均出现在电极入土深度为 50 mm 时,同一因素水平条件下土壤电导率均随电极入土深度的增加而增加,大于 100 mm 后增加趋势变缓,可能是由于随着电极入土深度的增加,土壤阻力也随之增加,电极尺寸和土壤阻力的综合影响导致了这

种现象^[34]。

由表 3 中 4 种测量方式所测土壤电导率与标准值的绝对误差、相对误差和 RMSE 值可以看出，两种作业土壤条件下 Wenner 组态所测土壤电导率的绝对误差范围为-2.6~3.6 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，相对误差范围为-10.1%~10.8%，RMSE=0.41 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ；Schlumberger 组态所测土壤电导率的绝对误差范围为-3~5 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，相对误差范围为-12%~14.9%，RMSE=0.55 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ；TDR-350 型土壤电导率仪所测土壤电导率的绝对误差范围为-1.8~2.6 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，

相对误差范围为-7.4%~8.3%，RMSE=0.25 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ；双组态融合的土壤电导率测量装置所测土壤电导率的绝对误差范围为-2.1~1.8 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，相对误差范围为-8%~5.5%，RMSE=0.18 $\mu\text{S}/\text{mm}$ 。

以上结果可以得出，双组态融合的土壤电导率测量装置所测土壤电导率的绝对误差、相对误差和 RMSE 值均小于其他测量方法或装置，表明本文研制的双组态融合的土壤电导率测量装置具有较高的测量精度，并可适用于不同土壤条件和不同电极入土深度。

表 3 田间试验数据

测量方式 Measurement method	纯土地块 PS plot			秸秆混埋土地块 SMS plot		
	绝对误差范围 Absolute error range /($\mu\text{S}\cdot\text{mm}^{-1}$)	相对误差范围 Relative error range/ %	RMSE /($\mu\text{S}\cdot\text{mm}^{-1}$)	绝对误差范围 Relative error range /($\mu\text{S}\cdot\text{mm}^{-1}$)	相对误差范围 Absolute error range/ %	RMSE /($\mu\text{S}\cdot\text{mm}^{-1}$)
Wenner 组态 Wenner array	-2.6~3.6	-7.6~10.8	0.78	-2.5~1.7	-10.1~6.3	0.52
Schlumberger 组态 Schlumberger array	2.2~5.0	7.3~14.9	0.58	-3.0~2.7	-12.0~10.9	0.46
TDR-350 测量仪 TDR-350 meter	-1.8~2.6	-4.0~7.9	0.35	-1.8~2.0	-7.4~8.3	0.52
双组态融合装置 Device with dual-array fusion	-2.1~1.8	-6.8~5.8	0.26	-1.9~-0.8	-8.0~-3.2	0.43

4 结 论

本文在电流-电压四端法三种测量组态适用土壤环境试验研究的基础上，以提高土壤电导率实时原位测量精度为目的，基于 BP 神经网络构建了双组态融合的土壤电导率回归模型，并依据模型设计了一种土壤电导率测量装置，通过工作稳定性和田间性能对比试验对装置的性能进行了验证，主要结论如下：

- 1) 土壤含水率、电极入土深度、土壤坚实度和土壤处理方式对三种测量组态测量土壤电导率精度影响的试验结果表明，不同土壤环境条件下每个组态测量精度不同，且以 Wenner 和 Schlumberger 两种测量组态表现较优。
 - 2) 以 Wenner 和 Schlumberger 两种测量组态测得的土壤电导率值为自变量，构建的基于 BP 神经网络的双组态融合的土壤电导率回归模型，训练集数据显示模型拟合度 R^2 为 0.997，测试集数据显示均方根误差为 0.12 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，模型测量精度优于单独测量组态。
 - 3) 依据构建模型所设计的土壤电导率测量装置，工作稳定性和田间性能对比试验结果表明，不同土壤电导率梯度条件下所测数据的标准偏差均小于 0.43 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，田间试验所测数据的绝对误差范围为-2.1~1.8 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，均方根误差为 0.18 $\mu\text{S}/\text{mm}$ ，该装置在不同土壤环境下实现高稳定性和高精度的土壤电导率测量。
- 后续计划通过进一步扩展土壤质地类型以验证模型的合理性，以扩大模型和测量装置的适用范围，为田间土壤电导率的实时原位采集提供一种高精度的检测工具和技术手段。

tillage and seed sowing methods of pearl millet based cropping systems on productivity and soil quality in dryland area[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 212: 105069

[2] WASHIZU A, NAKANO S. Exploring the characteristics of smart agricultural development in Japan: Analysis using a smart agricultural kaizen level technology map[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107001.

[3] 时国龙, 沈心怡, 辜丽川, 等. 面向智慧农业的无芯片射频跨域感知研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 10-23. SHI Guolong, SHEN Xinyi, KU Lichuan, et al. Research progress on chipless RF cross-domain sensing for smart agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 10-23. (in Chinese with English abstract)

[4] MILEUSNIC Z I, SALJNIKOV E, RADOJEVIC R L, et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact[J]. Journal of Terramechanics, 2022, 100: 51-60.

[5] REN J, CHEN Q, MA D, et al. Study on a fast EC measurement method of soda saline-alkali soil based on wavelet decomposition texture feature[J]. Catena, 2021, 203: 105272.

[6] FARAHANI E, EMAMI H, FOTOVAT A, et al. Soil available water and plant growth in relation to K: Na ratio[J]. Geoderma, 2020, 363: 114173.

[7] TIAN Z, REN T, HORTON R, et al. Estimating soil bulk density with combined commercial soil water content and thermal property sensors[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196: 104445.

[8] KREMER C, DIAZ J, SEGUEL O, et al. Preliminary use of a fulvic acid, as a strategy to improve water use in saline soils[J]. Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias, 2021, 53(1):

[参 考 文 献]

[1] SINGH Y P, TOMAR S S, SINGH S. Effect of precise levelling,

- 164-75.
- [9] BU C F, WU S F, YANG K B. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2014, 29(4): 491-500.
 - [10] HASAN M F, ABUEL-NAGA H, LEONG E C. A modified series-parallel electrical resistivity model of saturated sand/clay mixture[J]. *Engineering Geology*, 2021, 290: 106193.
 - [11] BARNARD J H, DU PREEZ C C. Spatial characterization of total salt in non-saline soil solutions through electromagnetic induction[J]. *Catena*, 2022, 216: 106395.
 - [12] WANG Z, TIMLIN D, KOJIMA Y, et al. A piecewise analysis model for electrical conductivity calculation from time domain reflectometry waveforms[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106012.
 - [13] MORET-FERNANDEZ D, LERA F, LATORRE B, et al. Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and electrical conductivity[J]. *Catena*, 2022, 218: 106540.
 - [14] HAN Y, YANG W, LI M, et al. Comparative Study of Two Soil Conductivity Meters Based on the Principle of Current-Voltage Four-Terminal Method; proceedings of the 6th International-Federation-of-Automatic-Control (IFAC) Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture (AGRICONTROL)[C]// Sydney, 2019.
 - [15] SAMSON M E, CARON J, PEPIN S, et al. Precision and accuracy of time-domain reflectometry and capacitive probes to determine soil electrical conductivity in cranberry production - Technical note[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2017, 97(1): 31-37.
 - [16] 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. Model for estimating salt content of saline soils in Xining Basin based on moisture and in situ electrical conductivity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(5): 148-154. (in Chinese with English abstract)
 - [17] RHOADES J, MANTEGHI N, SHOUSE P, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(2): 433-439.
 - [18] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting [J]. 1966. 123 - 133 .
 - [19] BARTNIKAS R, MCMOHON E J. Electrical properties of solid insulating materials: measurement techniques[M]. USA: ASTM International, 1987. 221 - 234 .
 - [20] TELFORD W M, TELFORD W, GELDART L, et al. Applied geophysics[M]. Cambridge : Cambridge university press, 1990.
 - [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(1): 51-55.
LI Minzan, WANG Qi, WANG Maohua. Experimental study of a real-time soil electrical conductivity analyzer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004(1): 51-55. (in Chinese with English abstract)
 - [22] BAÑÓN S, ÁLVAREZ S, BAÑÓN D, et al. Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 285: 110171.
 - [23] BAI W, KONG L, GUO A. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, 5(5): 406-411.
 - [24] BO-SEONG S, JEONG Y-J, NU-RI B, 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.
 - [25] MUNNAF M A, HAESAERT G, VAN MEIRVENNE M, et al. Site-specific seeding using multi-sensor and data fusion techniques: A review[J]. *Advances in agronomy*, 2020, 161: 241-323.
 - [26] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2000(04): 39-41.
Sun Yurui. Effects of soil water content and salinity on soil electrical conductivity[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000(04): 39-41. (in Chinese with English abstract)
 - [27] 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 Lina, WANG Xiu, et al. Design and test of vehicle-mounted on-line soil electrical conductivity detection system for field soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 274-285. (in Chinese with English abstract)
 - [28] SONG X, SUN R, CHEN W, et al. Effects of surface straw mulching and buried straw layer on soil water content and salinity dynamics in saline soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2019, 100(1): 58-68.
 - [29] 陈天佑, 贾洪雷, 李名伟, 等. 保压/保型抑制压后切碎玉米秸秆块回弹机理[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 51-58.
CHEN Tianyou, JIA Honglei, LI Mingwei, et al. Mechanism of pressure/shape retention to inhibit the rebound of chopped corn stover blocks after pressing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1): 51-58. (in Chinese with English abstract)
 - [30] Cyril Chibueze Okpoli. Sensitivity and Resolution Capacity of Electrode Configurations[J]. *International Journal of Geophysics*, 2013, 2013: 1 - 12.
 - [31] 王洪波, 马哲, 乌兰图雅, 等. 采用 BP 神经网络和 Burgers 模型的细观参数标定[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 152-161.
WANG Hongbo, MA Ze, ULANTUYA, et al. Fine-scale parameter calibration using BP neural network and Burgers model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(23): 152-161 (in Chinese with English abstract)
 - [32] 王福林, 董志贵, 吴志辉, 等. 基于 BP 神经网络的玉米种植密度和施肥量优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 92-99.

- WANG Fulin, DONG Zhigui, WU Zhihui, et al. Optimization of corn planting density and fertilizer application based on BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 92-99. (in Chinese with English abstract)
- [33] 冯思敏. 土壤电导率测定的影响因素探索[J]. 广东化工, 2019, 46(23): 2.
- [34] 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 test of in situ rapid detection sensor for soil electrical conductivity by four-terminal method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 90 - 99. (in Chinese with English abstract)

Measuring soil electrical conductivity using dual-array fusion of Wenner and Schlumberger

QI Jiangtao, WANG Kaichen, BAO Zhiyuan, ZHANG Weirong, GUO Hui^{*}, LIU Xiangnan, LI Ning

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Accurate, real-time, and in-situ acquisition of soil electrical conductivity can provide effective data support for the precise management of agricultural production. The current-voltage four-terminal approach as an invasive technology has considerable performance in the in-situ measurement of soil electrical conductivity on a large scale. This study aims to improve the accuracy of soil electrical conductivity measured by the traditional current-voltage four-terminal approach. A systematic analysis was made to determine the constant current source and electrode spacing in the three measurement arrays. The soil bin test was carried out to explore the influence of the main factors (soil moisture content, electrode embedded depth, soil compaction, and soil texture) on the measurement accuracy of three measurement arrays at different levels. The results showed that two measurement arrays of Wenner and Schlumberger were better applied to different soil environmental conditions. The measured values of soil electrical conductivity were further used as the inputs into the model. The regression model of soil electrical conductivity was constructed using the BP neural network. The R^2 of the model fit was 0.99762 in the training set, and the RMSE of the model between the calculated and standard value was 0.12 $\mu\text{S}/\text{mm}$ in the testing set, indicating the smaller than that of individual measurement. All RMSE values were smaller than those in the individual array measurements. The measurement device of dual-array fusion soil electrical conductivity was designed using a regression model. The components of the device included the touchable LCD display, electrode sockets, switches, differential amplifier module, constant current source module, power supply, STM32 microcontroller data acquisition module, JESTON nano, and sensor. The soil electrical conductivity was then optimized using the measured values. The working stability test showed that the standard deviation of measured data was less than 0.43 $\mu\text{S}/\text{mm}$ under different soil electrical conductivity gradient conditions. The comparative field-site performance test showed that the absolute, relative, RMSE and error range of measured soil electrical conductivity were -2.1-1.8 $\mu\text{S}/\text{mm}$, -8%-5.5%, 0.18-1.8 $\mu\text{S}/\text{mm}$, and -8%~5.5%, respectively. The RMSE of 0.18 $\mu\text{S}/\text{mm}$ was smaller than that of the traditional individual measurement array and the commonly used soil conductivity meters in the market. The measurement device can be expected to rapidly and accurately detect the soil's electrical conductivity, indicating better working stability and higher accuracy. The finding can provide high-precision detection and technical means for the real-time in situ collection of soil information in the field.

Keywords: soil; electrical conductivity; measurement array; BP neural network; model; measurement device