

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.03.032

# 大田土壤电导率快速检测系统设计与试验

韩长杰<sup>1</sup> 杨文奇<sup>1,2</sup> 窦汉杰<sup>2,3</sup> 王秀<sup>2,3</sup> 胡丽娜<sup>2,3</sup> 翟长远<sup>2,3</sup>

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐830052;2.北京农业智能装备技术研究中心,北京100097;

3.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京100097)

**摘要:**为评价土壤肥力、生产能力及制作精准施肥处方,基于四端法原理设计了一种车载式大田土壤电导率快速检测系统,系统包括交流恒流信号源、信号检测调理电路及GNSS定位系统,可实现土壤田块不同区域内电导率的快速检测。通过试验探究土壤含水率、土壤浸出液电导率、电极入土深度、土壤温度对电极输出信号的影响规律并根据试验结果回归得出预测模型,模型决定系数 $R^2$ 为0.9961。将系统安装到土壤电导率检测装置上进行大田试验,基于回归预测模型对系统检测数据进行计算,并与实验室土壤采样检测的实际值进行比较,试验结果表明,实验室建立的回归模型可用于大田土壤浸出液电导率计算,该系统在相同或相近路径上得到的传感器数据较为稳定,土壤浸出液电导率预测值与该区域系统检测值趋势相似,该系统预测模型可用于大田中快速实时检测电导率。

**关键词:**土壤;电导率;四端法;快速检测;变量施肥

中图分类号:S24

文献标识码:A

文章编号:1000-1298(2022)03-0301-10

OSID:



## Design and Experiment of Rapid Detection System for Field Soil Conductivity

HAN Changjie<sup>1</sup> YANG Wenqi<sup>1,2</sup> DOU Hanjie<sup>2,3</sup> WANG Xiu<sup>2,3</sup> HU Lina<sup>2,3</sup> ZHAI Changyuan<sup>2,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Soil conductivity is an important parameter of soil environment and can be used as an important data to evaluate soil fertility and productivity and make precise fertilization prescriptions. Based on the principle of "four-terminal method", a vehicle-mounted fast detection and acquisition system for soil conductivity in field was designed. The system included AC constant current signal source, signal detection and conditioning circuit, and GNSS positioning system, which can realize fast detection of soil conductivity in different areas. The influence laws of soil water content, soluble salt conductivity, electrode penetration depth and soil temperature on four-terminal electrode output signal were explored through four-factor and five-level center combination experiment, and the predictive regression equation of conductivity of soil solution (EC<sub>w</sub>) was established. The regression coefficient  $R^2$  of the equation was 0.9961. The field tests were carried out with the system installed on the soil conductivity testing device. The system detection data were calculated based on the regression equation and compared with the actual values of the laboratory soil sample testing. The test results showed that the regression model established in the laboratory could be used to calculate the conductivity of field soil solution. The sensor data obtained by the system on the same or similar path were stable. The predicted value of soil solution conductivity had a similar trend with the actual value in this region, and could be used for fast and real-time detection of soil solution conductivity (EC<sub>w</sub>) in field. The research result can lay a foundation for further research on variable fertilization control technology based on soil conductivity.

**Key words:** soil; conductivity; four-terminal method; rapid detection; variable fertilization

收稿日期:2021-03-13 修回日期:2021-07-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701101)、2021年度农业智能装备技术北京市重点实验室建设项目(PT2021-15)和中国烟草总公司云南省公司科技计划重点项目(2020530000241031)

作者简介:韩长杰(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail:hcj\_627@163.com

通信作者:翟长远(1982—),男,研究员,主要从事农业智能装备技术研究,E-mail:zhaicy@nrcita.org.cn

## 0 引言

大田土壤中的各种营养物质和水分是农作物生长的必要条件,为增加农作物的产量而大量使用各种化肥与有机肥料,这样不仅增加了生产成本<sup>[1]</sup>,还危及粮食安全<sup>[2]</sup>与土壤安全<sup>[3-4]</sup>,并且水环境遭受严重污染<sup>[5-6]</sup>。

获取农作物生长的环境因素是精准农业的基础,快速、有效地采集土壤环境可为精准农业提供参考。土壤电导率是精准农业中不可缺少的关键参数<sup>[7]</sup>,在土壤分析测定时土壤浸出液电导率直接体现土壤的含盐量<sup>[8-11]</sup>。土壤电导率会受土壤含水率<sup>[12]</sup>、有机质含量<sup>[13]</sup>、土壤坚实度和质地结构等因素影响<sup>[14-18]</sup>,因此土壤电导率可以作为评价土壤肥力与生产能力、制定精准施肥处方的重要数据<sup>[19-24]</sup>。

土壤电导率分为土壤表观电导率(ECa)与土壤浸出液电导率(ECw)。其中土壤表观电导率(ECa)中包含了多种土壤属性,不同类型的土壤(砂土、黏土等)、土壤含盐量、土壤颗粒半径、有机物含量、水分保持能力等属性<sup>[12-16]</sup>。而土壤浸出液电导率(ECw)则更能体现土壤含盐量,对指导作物精准施肥及土壤改良有重要意义<sup>[19-22]</sup>。

2016年由环境保护部发布的标准HJ 802—2016中规范了土壤电导率的测定方法,并定义了土壤电导率是指土壤传导电流的能力,通过测定土壤浸出液的电导率来表示,即用土壤浸出液电导率(ECw)来表示土壤电导率(Soil conductivity)。

文献[23]以油茶林地的土壤为对象,试验分析了土壤中的N、P、K养分含量与电导率的关系,结果表明N、P、K养分含量与土壤浸出液电导率(ECw)相关性良好且遵循多项式拟合模型,预测模型精度达90%以上,实现实时养分检测,研究表明可以通过检测土壤浸出液电导率来快速获取土壤中N、P、K成分含量,对精准施肥与土壤改良有重要意义。文献[25-26]使用交流“四端法”测量土壤电导率,设计了一种使用电极探针的土壤电导率在线实时检测系统,检测误差在-2.2%~2.4%之间,满足了土壤电导率实时在线测量的要求,可以快速检测土壤电导率(ECa),该研究的设计思路对本文有重要参考作用。文献[27-28]设计了车载式电导率测量装置,该测量装置为国内车载电导率检测系统奠定了基础<sup>[27-28]</sup>。美国Veris公司生产的Veris3100型车载土壤电导率测量设备已经商品化,该设备可以快速测量大面积土地的土壤表观电导率,被广泛用于美国的土壤环境监测。随着国内相关研究的进

一步拓展,亟需可在大田环境里进行快速检测土壤表观电导率并预测土壤浸出液电导率的车载设备。

本文基于交流四端法<sup>[29]</sup>,设计大田土壤电导率快速检测系统,在车载移动时快速采集土壤电导率传感器信息,以期能够连续快速地预测土壤浸出液电导率(ECw),为后续土壤精准作业奠定基础。

## 1 系统检测原理、组成及设计

### 1.1 检测原理

“电流-电压”四端法是使用最为广泛的土壤电导率快速检测方法,国内外学者对四端法的理论和电极排布方式都进行过深入研究<sup>[30]</sup>。如图1所示,由电流信号源(J、K)和电压测量端(M、N)组成。恒流信号源J、K发射交流恒流信号,在大地中形成交变电场,通过已知的恒流电流与M、N间的电势差计算大地的电导,但由于大地的组成复杂,电流传播不均匀,所以无法直接按照电极间距计算电导率。通常经过实验室标定,拟合该系统电导与电导率的关系。

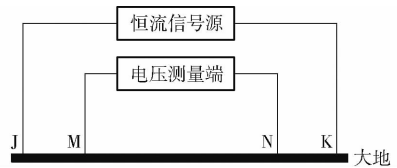


图1 四端法检测电导率原理图

Fig. 1 Principle of four-terminal method to detect conductivity

### 1.2 检测系统硬件设计

检测系统整体原理框图如图2所示,系统主要由交流恒流信号源和信号检测部分组成。

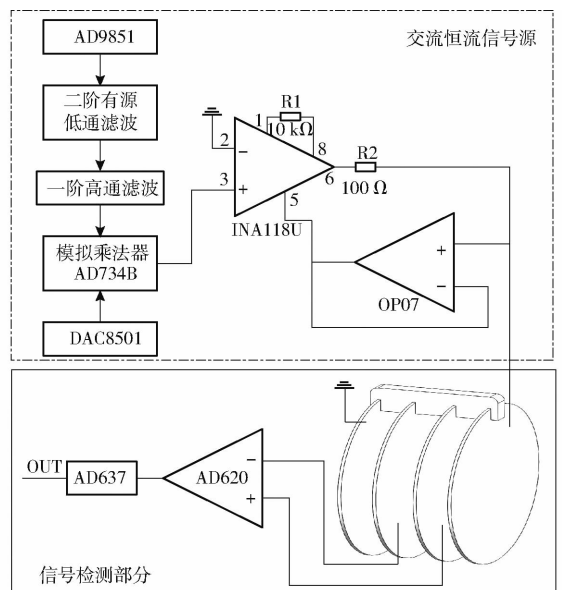


图2 电导率测量原理框图

Fig. 2 Block diagram of conductivity measurement principle

传感器部分由4个圆盘组成,外侧圆盘为恒流

激励电极,内侧圆盘为电压检测电极。交流恒流信号经过外侧2个恒流电极流入大地后,通过检测内侧电压电极的电压有效值可以反映土壤电导率的变化<sup>[30]</sup>,对于长度和面积都不确定的大地来说,Wenner组态排列下<sup>[31]</sup>,其电导率计算公式为<sup>[32]</sup>

$$\sigma = \frac{1}{2\pi a} \frac{I}{V_{IS}} \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——电导率, S/m

$a$ ——电极间距, m

$I$ ——交流恒流信号有效值, A

$V_{IS}$ ——电压检测电极间电压差, V

信号源的正弦波信号直接由 AD9851 产生,该数字频率合成芯片使用单片机编程控制输出,具有输出精度高、使用方便等优点,输出信号经二阶有源低通滤波电路串联一阶高通滤波电路,滤除高频噪声和直流分量的同时提高其带负载能力,该电路低通信号截止频率为 709.2 Hz,高通信号截止频率为 2 Hz。

获得稳定的正弦波信号后,为达到自动调节其幅值的目的,使用单片机编程控制 16 位 D/A 转换芯片 DAC8501 的输出电压,在其 VREF 端输入 2.5 V 基准源信号,使其输出限定于 0 ~ 2.5 V。将正弦波信号与 DAC8501 输出的电压一起输入模拟乘法器 AD734B 中进行运算,得到幅值变化可控的交流电压信号,由于电源功率不高,输出电流小,在后级使用运算放大器与 INA118U 组成恒流源电路即可,本数控恒流信号源设定最大输出电流  $I_{max} = 1\ 000\ \mu\text{A}$ , DAC8501 芯片输出最大电压  $V_{max} = 2.5\ \text{V}$ ,根据运放“虚短虚断”的原则可知,输出电流与负载电阻无关,其只与输入电压和电阻器 R1 的电阻  $R_1$  相关,即

$$I_{OUT} = \frac{V_{IN}}{R_1} G_1 \quad (2)$$

其中  $G_1 = 1 + \frac{5 \times 10^4}{R_1}$

式中  $I_{OUT}$ ——输出电流, A

$V_{IN}$ ——输入电压, V

$G_1$ ——增益系数

本设计选取  $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$ ,实际可输出最大电流为  $I_{max} = 1\ 500\ \mu\text{A}$ ,程序限定为  $I_{max} = 1\ 000\ \mu\text{A}$ ,输出端内置串联  $100\ \Omega$  精密电阻,将其两端电压经过放大和有效值转换后实时反馈控制恒流输出,原理图如图 3 所示。

综上,快速检测系统使用的恒流信号源是电压闭环控制策略,通过电压信号校正控制电流源输出。信号源是 3 ~ 700 Hz 可变频率标准正弦波交流恒流

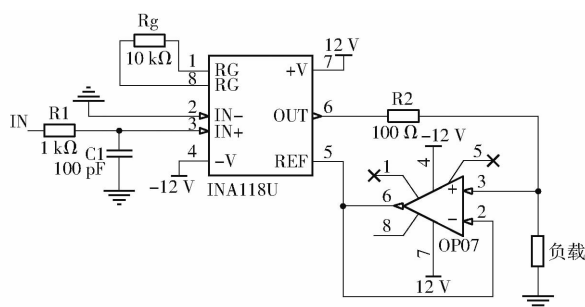


图3 恒流输出电路

Fig. 3 Constant current output circuit

信号源,输出电流  $1\ 000\ \mu\text{A}$  时最大失真阻抗为  $6\ 000\ \Omega$ ,使用圆盘电极时土壤阻抗一般小于  $2\ 000\ \Omega$ <sup>[12]</sup>,满足实际需求,电流有效值可调范围为 0 ~  $1\ 000\ \mu\text{A}$ 。

由于信号源是电流很小的交流恒流源,所以检测电压信号也较小,故在传入微处理器前需要进行信号放大和有效值转换等预处理。

将电压检测电极上的信号进行差分放大是信号处理的第一步,也是整个系统精度的保障,需要设计很稳定的检测放大环节。为满足精度要求使用集成芯片 AD620,该芯片可以实现最大 1.0 nA 的低输入偏置电流。在信号入口与输出口都加入低通滤波电路,滤除高频杂波,原理如图 4 所示,根据 AD620 电气特性,可知电阻器 Rg 电阻  $R_g$  为

$$R_g = \frac{49\ 400}{G_2 - 1} \quad (3)$$

其中  $G_2$  是差分放大电路的放大倍数,在本设计中  $R_g$  取  $5.4\ \text{k}\Omega$ ,实际放大倍数为 10.2 倍。

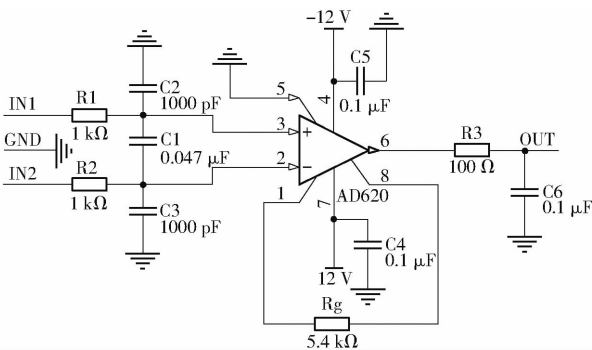


图4 差分放大电路

Fig. 4 Differential amplifier circuit

经过差分放大的信号依旧是交流信号,不方便进行数据的读取与保存,需要进行有效值转换,考虑到系统精度要求高,选取高性能集成芯片 AD637 进行均方根直流转换。最后将输出的直流电压信号输入 16 位模数转换集成芯片 ADS1115 中,使用单片机读取电压信号,保存土壤电导率的同时读取当前 GNSS 数据与红外温度传感器值并记录于储存卡中。

### 1.3 检测系统的嵌入式设计

土壤电导率快速检测系统设计包括硬件电路与

软件程序控制,硬件电路包括恒流源电路、信号检测及处理电路,软件程序控制包括程控恒流源电路的正弦信号、调幅输出电压、采集读取电导率信号以及获取定位信息和温度信息。按软件功能将整个系统分为3部分,恒流信号源的嵌入式系统、电导率信号检测及多参数整合嵌入式系统和上位机系统。

恒流信号源嵌入式系统功能是产生稳定的交流恒流信号,作为传感器系统检测的基础,硬件控制方案选取全数字控制方式,因此嵌入式软件在其中至关重要,嵌入式系统控制器选取英特尔居里(Curie)32位单片机,嵌入式系统构成如图5所示。

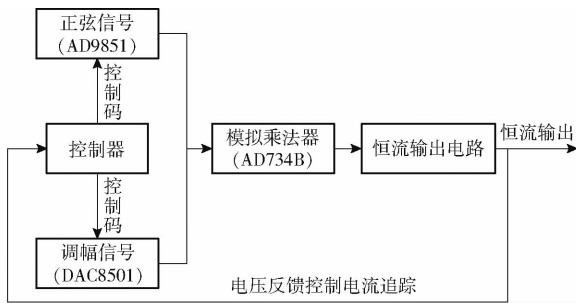


图5 恒流信号源嵌入式系统构成

Fig.5 Constant current signal source embedded system composition

电导率信号检测及多参数整合嵌入式系统功能是:检测并记录恒流信号源在土壤中产生的电压信号、GNSS模块的定位信息和红外温度传感器的温度信息,同时该嵌入式系统也负责与上位机进行串口通信。嵌入式系统控制器选取英特尔居里(Curie)32位单片机,嵌入式系统构成如图6所示。

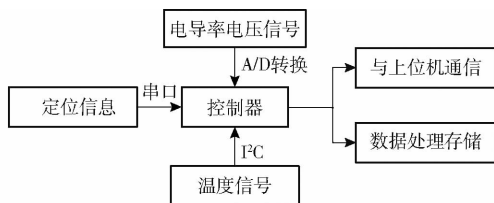


图6 电导率信号检测及多参数整合嵌入式系统构成

Fig.6 Conductivity signal detection and multi-parameter integration embedded system configuration

## 2 土壤电导率室内试验

### 2.1 自制检测装置性能试验

#### 2.1.1 交流恒流源电流稳定度

使用“电流-电压”四端法原理检测土壤电导率,实现的关键是要保证恒流源的稳定性,即输出电流在负载变化的情况下仍能保持恒定,本文设计的恒流源是由程控数字芯片实现的,设定电流输出范围是0~1000 μA。有研究表明四端法测量土壤的大地电阻一般小于10 kΩ<sup>[25]</sup>,且使用圆盘电极测量土壤的大地电阻一般小于2 kΩ<sup>[12]</sup>,故为检验本设计

的交流恒流源稳定性,采用可变电阻来模拟大地电阻。具体检测方式为逐渐增加负载电阻,同时利用示波器观察交流恒流源输出的电压与正弦波型,直到恒流源输出的正弦波到达失真的临界点,试验时设定输出电流为500 μA,记录的试验数据如表1所示。

表1 交流恒流源稳定度测试结果

Tab.1 AC constant current source stability test results

电压/V	电阻/kΩ	电流/μA
0.494	0.990	498.98
0.987	1.973	500.25
1.490	2.982	499.66
1.978	3.956	500.00
2.477	4.953	500.10
2.985	5.972	499.83
3.483	6.963	500.21
3.990	7.983	499.81
4.265	8.532	499.88

从表1可以看出,当电阻变化时,电流变化的最大相对误差为0.204%,具有较好的稳定性。随着负载电阻的逐渐增大,大于9 kΩ时正弦波达到失真临界点,故硬件系统的检测范围满足四端法测量大地电阻的要求。

#### 2.1.2 红外温度传感器

为验证红外温度传感器的准确性,设计了温度检测试验,对比分析同时使用红外温度传感器和红水温度计检测出的温度。试验时将土壤装入土盒中放入加热箱中加热至50℃,将土盒取出后在土壤表层使用红水温度计(量程-30~100℃、精度0.1℃),同时使用红外温度传感器测量土壤温度,直至土盒温度降至室温,将红外传感器检测的温度作为纵坐标,红水温度计测量值作为横坐标进行对比,如图7所示。

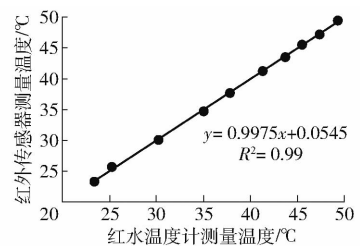


图7 温度拟合曲线

Fig.7 Temperature comparison

从图7可以看出,将温度传感器和红水温度计温度测量值使用最小二乘法拟合的趋势项决定系数可达到0.99,二者具有显著线性关系,故红外温度传感器的检测精度达到温度检测精度要求。

#### 2.1.3 传感器标定

本文设计的车载式土壤电导率检测系统可通过

输出电流与电极间的电压计算出电导  $G$ , 电导与电导率间存在关系

$$\sigma = kG \quad (4)$$

式中系统测量的电导  $G$  与实际电导率  $\sigma$  间存在一个系数  $k$ , 该系数由测量系统结构决定, 可以使用配置的标准电导率溶液来进行标定。

试验于 2020 年 10 月在北京农业智能装备技术研究中心实验室进行, 室温 25.2℃, 选用 5 L 烧杯、100 mL 烧杯、KCl 试剂(国药集团化学试剂有限公司)、无离子水(红荒之力牌, 电导率小于 0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )和电子天平(赛多利斯公司, BS323D 型, 最大量程 320 g, 精度 0.001 g)配置质量分数 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 的 KCl 溶液; 选用电导率测量仪(上海仪电科学仪器股份有限公司, DDS-307A 型, 量程 0~100 mS/cm, 精度  $\pm 1.0\%$  FS)检测配置的 KCl 溶液电导率。自制系统测量的溶液电导为纵坐标, DDS-307A 型电导率测量仪检测的溶液电导率作为横坐标, 进行线性拟合, 得出标定函数, 绘制拟合曲线如图 8 所示, 拟合曲线  $R^2$  为 0.985 7。

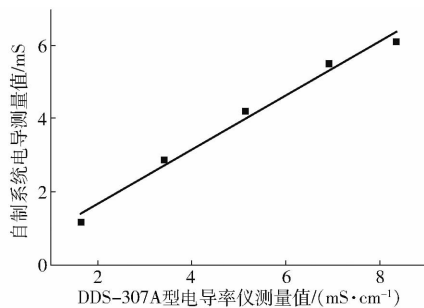


图 8 电导率标定曲线

Fig. 8 Conductivity calibration curve

由试验可知, 本文设计的检测系统可以有效地对电导率进行检测。

#### 2.1.4 检测性能对比试验

试验地点为北京小汤山国家精准农业示范基地, 试验时划定 100 m 的试验区域, 首先使用自制系统采集 40 个数据点的电导率, 然后在同样采集路径上使用 TR-6D 型(北京顺科达科技有限公司)手持式便携土壤电导率检测仪进行数据采集。数据采集方式是在圆盘电极留下的轨迹上进行 5 点梅花状采集, 取其 5 点平均值代表该处土壤电导率。将 2 种方式检测的电导率测量值作为纵坐标, 各采样点序号作为横坐标, 使用三阶多项式做 2 组数据的趋势线, 如图 9 所示, 经计算 2 组数据的相关系数  $R$  为 0.849 5。

根据性能对比试验数据可以看出车载测量值与手持仪器的检测值有很好的相关性。试验时便携式手持电导率检测耗费时间为 140 min, 而车载检测仅耗时 3 min, 根据检测数据分析, 车载系统的检测精

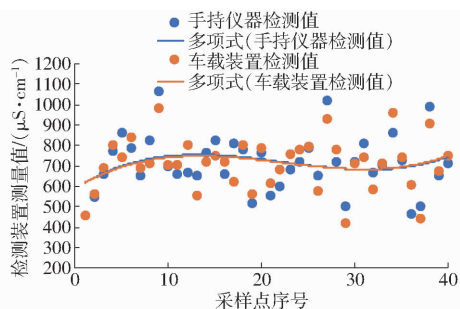


图 9 趋势对比

Fig. 9 Trend comparison

度满足要求并且检测效率较高。

#### 2.2 试验准备

为获取土壤可溶性盐电导率与电导率检测系统之间的关系, 设计了一种中心组合试验。该试验的 4 个因素为土壤可溶性盐电导率、土壤含水率、传感电极入土深度与土壤温度, 这 4 个因素皆是土壤表面电导率的主要影响因素<sup>[18,33]</sup>。试验使用的土壤取自后续进行大田试验的试验地, 试验时将土壤装入 5 L 的烧杯, 根据每次试验土壤的质量来压缩土壤体积, 控制土壤容重为 1.2~1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。土壤经鼓风干燥箱 105℃ 干燥后分装, 3 kg 每份, 试验中添加的水为无离子水, 添加的盐为纯 KCl。将第 1 次干燥后分装的土壤, 分别加入 3、6、9、12、15 g KCl。添加方式是将 KCl 溶于无离子水中, 使用喷壶, 配合搅拌将 KCl 溶液均匀混合于土壤中, 将混合盐后的土壤继续放回 105℃ 恒温鼓风干燥箱中干燥, 混合盐后土壤的可溶性盐电导率按照 HJ 802—2016 标准测量。

对加入 KCl 并充分搅拌干燥后的土壤进行均匀性检测试验, 如图 10 所示, 在土盒 1、2、3 位置分别称取 20 g 土壤。按照 HJ 802—2016 标准检测电导率, 判断同一土盒中电导率是否均匀, 并比较加入不同 KCl 土盒的电导率关系, 不同土盒电导率分布试验结果如图 11a 所示, 将 3 个点取平均值后可以看到, 不同 KCl 含量的土盒中电导率基本呈线性关系, 该方式可用于试验样本的制备, 如图 11b 所示。

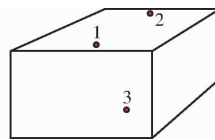


图 10 取样位置

Fig. 10 Sampling location

二次干燥后的土壤根据不同试验条件, 采用上文中混合盐的方法添加无离子水, 使其充分混合, 得到不同含水率的土壤。含水率按照 NY/T 52—1987 标准中的干基计算。

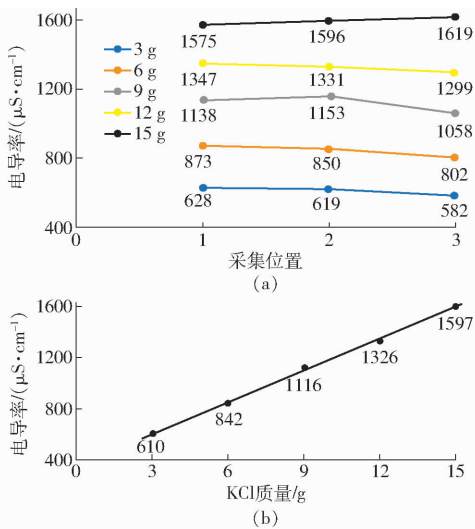


图 11 电导率分布

Fig. 11 Conductivity distribution

## 2.3 试验设计

试验采用中心组合试验方法,选取土壤可溶性盐电导率、土壤含水率、传感电极入土深度、土壤温度为试验因素,传感器得到的土壤表观电导率原始数据为试验结论,期望以此得出回归模型,找到传感数据与4种试验因素的关系,共进行36组试验。

实验室试验传感器使用1 mm冷轧Q235钢板,边缘打薄便于切入土壤,将其安装于尼龙座上固定间距,使用5 L带刻度的烧杯盛装土壤并控制土壤容重,电极片直径为136 mm,间距22 mm。将其放入5 L烧杯中,模拟大田环境。使用烧杯作为土壤容器是为了按照烧杯上的体积刻度控制土壤体积,从而控制土壤容重。

根据已有研究,土壤含水率对土壤表观电导率的影响主要在14%~30%,当含水率超出这个范围时对土壤表观电导率影响不大<sup>[16,18]</sup>,故试验时选取土壤含水率为14%~30%;根据农作物生长特性可知,一般农作物在含盐量低于0.5%的土壤中可以正常生长,但由于使用四端法进行测量时,土壤中存在盐饱和现象,即随着含盐量的增大土壤表观电导率并不会一直增大,根据赵燕东等<sup>[25]</sup>研究结果,试验使用的土壤电导率低于1 600 μS/cm;圆盘电极需稳定地滚动切割土壤,其入土深度应限制在直径的1/4以下,故在本试验系统中最大入土深度是35 mm;最大温度选取40℃。最终设计试验因素编码如表2所示。

按照试验表要求,试验时选择相应的干燥土壤,采用喷水拌土的方式制作相应含水率土壤。将制作好的土壤称量并装入5 L烧杯中,使用切割的圆片将土壤压缩,确保每次试验土壤容重保持1.2~1.3 g/cm<sup>3</sup>,土壤容重计算公式为

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Test factors and codes

编码	因素			
	土壤含水率 A/%	电导率 B/(μS·cm <sup>-1</sup> )	电极入土深度 C/mm	温度 D/℃
-2	14	610	7	0
-1	18	842	14	10
0	22	1 116	21	20
1	26	1 326	28	30
2	30	1 597	35	40

$$r_s = \frac{m}{v} \quad (5)$$

式中  $r_s$ ——土壤容重, g/cm<sup>3</sup>

$m$ ——烧杯中试验土壤的质量, g

$v$ ——烧杯中试验土壤的体积, cm<sup>3</sup>

土壤容重确定后将烧杯用保鲜膜密封放入恒温箱中改变土壤温度,土壤中插入温度计测量土壤温度,当温度稳定在试验所需温度时将烧杯取出,将圆盘电极插入相应试验所需深度,设定传感电极电流800 μA,频率500 Hz,快速记录电压传感器电极的数值,试验环境温度24.6℃,检测时响应速度较快,试验检测前后温度下降不足0.5℃,故可忽略环境温度对测量结果的影响,试验过程如图12所示。

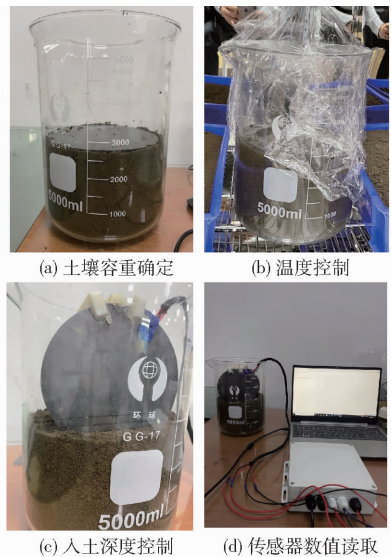


图 12 试验装置与试验过程

Fig. 12 Test device and test process

## 2.4 试验与结果分析

试验方案与结果如表3所示( $Y$ 表示16位模数转换集成芯片ADS1115输出的数字量),使用数据处理软件辅助处理数据,方差分析结果如表4所示。

通过对试验中各个因素以及各因素交互项的显著性进行拟合和分析, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $AB$ 、 $AC$ 、 $AD$ 、 $BC$ 、 $A^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$ 是显著的模型项,对试验指标影响极显著( $P < 0.01$ ); $BD$ 、 $CD$ 、 $B^2$ 对试验指标影响不显著

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Test results

序号	因素				传感器检测值 $Y$
	$A/\%$	$B/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$C/\text{mm}$	$D/^\circ\text{C}$	
1	18	842	14	10	5 825
2	26	842	14	10	630
3	18	1 326	14	10	4 260
4	26	1 326	14	10	652
5	18	842	28	10	4 350
6	26	842	28	10	508
7	18	1 326	28	10	2 953
8	26	1 326	28	10	722
9	18	842	14	30	4 091
10	26	842	14	30	569
11	18	1 326	14	30	2 515
12	26	1 326	14	30	615
13	18	842	28	30	2 478
14	26	842	28	30	403
15	18	1 326	28	30	1 125
16	26	1 326	28	30	689
17	14	1 116	21	20	5 632
18	30	1 116	21	20	296
19	22	610	21	20	2 317
20	22	1 597	21	20	979
21	22	1 116	7	20	1 956
22	22	1 116	35	20	643
23	22	1 116	21	0	3 061
24	22	1 116	21	40	1 242
25	22	1 116	21	20	1 640
26	22	1 116	21	20	1 773
27	22	1 116	21	20	1 540
28	22	1 116	21	20	1 633
29	22	1 116	21	20	1 720
30	22	1 116	21	20	1 566
31	22	1 116	21	20	1 622
32	22	1 116	21	20	1 732
33	22	1 116	21	20	1 543
34	22	1 116	21	20	1 724
35	22	1 116	21	20	1 634
36	22	1 116	21	20	1 531

( $P>0.1$ )。将不显著因素剔除后,得到回归方程为

$$Y = 43\ 895.54 - 2\ 201.48A - 11.21B - 284.04C - 333.45D + 0.42AB + 12.59AC + 10.85AD + 0.031BC + 20.80A^2 - 1.86C^2 + 1.22D^2 \quad (6)$$

式中  $Y$ ——传感器检测值,每单位 0.188 mV

由回归模型的方差分析可知,该模型显著,组成该模型的 4 个因素土壤含水率、土壤电导率、电极入土深度、温度都是非常显著的模型项,模型的失拟误差项  $P=0.8659$ ,不显著,因此试验因素和指标与该模型存在显著的关系。

表 4 回归模型方差分析

Tab.4 Regression model analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
模型	$6.95 \times 10^7$	14	$4.96 \times 10^6$	941.13	$<0.0001$
$A$	$4.75 \times 10^7$	1	$4.75 \times 10^7$	9 007.35	$<0.0001$
$B$	$2.66 \times 10^6$	1	$2.66 \times 10^6$	504.34	$<0.0001$
$C$	$3.08 \times 10^6$	1	$3.08 \times 10^6$	584.03	$<0.0001$
$D$	$5.08 \times 10^6$	1	$5.08 \times 10^6$	963.79	$<0.0001$
$AB$	$2.62 \times 10^6$	1	$2.62 \times 10^6$	497.05	$<0.0001$
$AC$	$1.99 \times 10^6$	1	$1.99 \times 10^6$	377.04	$<0.0001$
$AD$	$3.01 \times 10^6$	1	$3.01 \times 10^6$	571.17	$<0.0001$
$BC$	45 195.11	1	45 195.11	8.57	0.0081
$BD$	1 134.59	1	1 134.59	0.2151	0.6476
$CD$	4 257.56	1	4 257.56	0.8071	0.3792
$A^2$	$3.53 \times 10^6$	1	$3.53 \times 10^6$	669.78	$<0.0001$
$B^2$	1 996.63	1	1 996.63	0.3785	0.545
$C^2$	$2.66 \times 10^5$	1	$2.66 \times 10^5$	50.47	$<0.0001$
$D^2$	$4.74 \times 10^5$	1	$4.74 \times 10^5$	89.90	$<0.0001$
残差	$1.11 \times 10^5$	21	5 274.82		
失拟项	34 027.59	10	3 402.76	0.4877	0.8659
纯误差	76 743.67	11	6 976.70		
总和	$6.96 \times 10^7$	35			

实际使用该预测模型时,将模型中的  $B$  项,土壤浸出液电导率放至等式左边,得到土壤浸出液电导率预测模型公式为

$$B = (Y - 43\ 895.54 + 2\ 201.48A + 284.04C + 333.45D - 12.59AC - 10.85AD - 20.80A^2 + 1.86C^2 - 1.22D^2) / (0.42A + 0.031C - 11.21) \quad (7)$$

该模型  $R^2$  为 0.9983,预测  $R^2$  为 0.9961。

### 3 大田试验

#### 3.1 大田试验准备

2020 年 10 月于北京市小汤山国家精准农业示范基地开展了大田土壤电导率快速检测试验,试验时电流传感电极幅值 800  $\mu\text{A}$ ,频率 500 Hz,试验主要目的为:

(1)重复性验证。使用标尺在试验地中量取长度 20 m 的试验区域,将土壤电导率快速检测系统在相同路径上重复进行 6 次试验,记录传感器信号和 GNSS 数据,对比分析后,再选取路径最接近的 2 次试验进行具体分析。

(2)可行性验证。试验地块如图 13a 所示,在地块上打点进行土样获取后,在实验室中使用雷磁 DDS-307A 型电导率测量仪,按照 HJ 802—2016 标准进行电导率检测,绘制插值图,表示试验地的电导率变化,见图 13b。使用土壤电导率快速检测系统,在试验地行走采集电导率信号、GNSS 信息与地表温度,检测系统电极入土深度通过限深轮限制。试验前使用土壤含水率检测装置对整块试验地的含水

率分布进行记录。通过“土壤电导率-土壤含水率-电极入土深度-温度”模型得出电导率数据,绘制插值图,与土壤采样获得的电导率差值图进行对比。

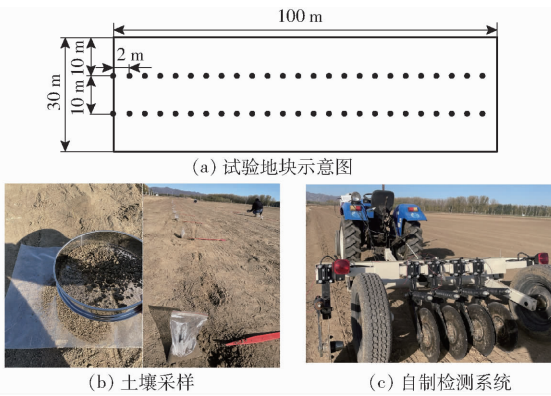


图 13 大田试验

Fig. 13 Field test

试验系统实物如图 13c 所示,电极直径 430 mm,间距 220 mm,电极面积与电极间距都在实验室系统的基础上放大了 10 倍,当电极面积与电极间距同时增加时电导率不发生改变,即

$$\sigma = G \frac{l}{s} \quad (8)$$

式中  $l$ ——间距, m

$s$ ——横截面积,  $m^2$

进行车速影响试验,通过不同车速检测同一路径的土壤电导率,当车速越快时传感器数值的离散越大且呈整体上升趋势,综合分析试验数据,选取前进车速为 0.29 m/s 左右进行试验,在该速度时传感器数值较为稳定。

### 3.2 重复性试验

为确保电导率快速检测系统在相同或相近的路线上传感器信号相对稳定,需要进行系统重复性试验。在检测系统静止时传感器信号稳定,只需试验其移动时的稳定性与重复性。检测试验装置使用纽荷兰 SNH350 型拖拉机牵引,在试验区域采集 6 次传感器输出电压,6 次电压数据使用线性趋势线表示趋势,其趋势基本相同,如图 14a 所示。6 次采集路径轨迹如图 14b 所示。

选取其中路径最为接近的 2 次数据,并删除其中采样间距大于 0.3 m 的点,最终选择 23 组数据点进行对比。其中试验 A 电压均值为 171.29 mV,试验 B 电压均值为 168.33 mV,2 次试验传感器均值 169.81 mV。试验 A 与试验 B 最接近位置电压差均值为 25.5 mV,占 2 次试验电压均值的 15%,但考虑到行进过程中机具的振动、测量位置偏差,土壤电导率检测系统基本稳定,2 次试验数据及数据点相对位置如图 15 所示。

综上,通过在同一路径上 6 次传感器输出电压

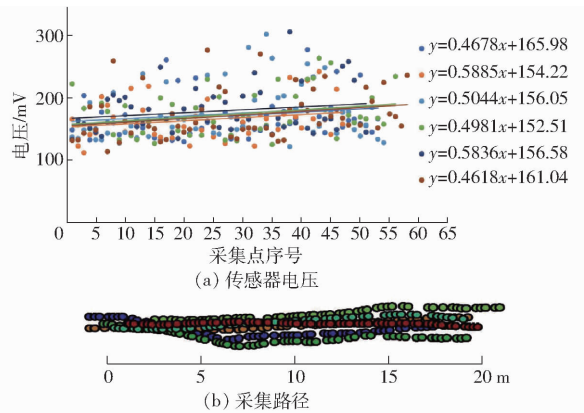


图 14 重复性试验

Fig. 14 Repeatability tests

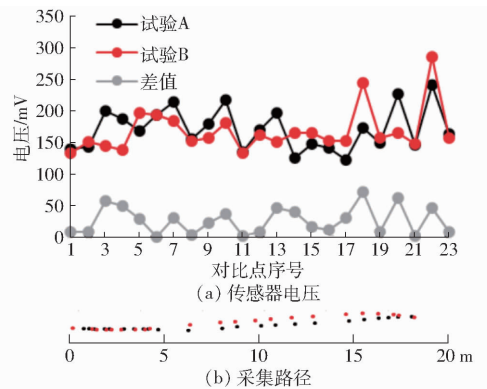


图 15 试验数据及数据点位置

Fig. 15 Test A and B data and data point location

值对比,可知传感器信号在每次试验中都有不同,造成的原因可能是每次行进路径不能保证完全一致,数据采集点存在差异,且机具的振动也会使传感器产生一些噪声,这些因素都会对数据采集产生影响。尽管重复试验数据有一些差异,但其趋势相同且差异不大,因此可以认为系统在移动测量时是稳定且可重复的。

### 3.3 田间试验

在试验地上使用该试验系统,限制圆盘入土深度为 22 mm,使用 TR-6D 型土壤含水率检测装置对试验区域的土壤含水率分布进行记录。车载系统实时记录电导率圆盘电压、地表温度及采集点的 GNSS 信息。在试验地上每间隔 2 m 进行采样,按照 HJ 802—2016 标准进行实验室土壤浸出液电导率 (EC<sub>w</sub>) 检测,如图 16 所示。



图 16 实验室土壤浸出液电导率检测

Fig. 16 Laboratory soil solution conductivity detection



通过“土壤电导率-土壤含水率-电极入土深度-温度”与传感器信号模型得出电导率数据,绘制插值图如图 17a 所示,土壤采样后在实验室测量获得的土壤浸出液电导率(EC<sub>w</sub>)绘制差值图如图 17b 所示。

图 17a 中绿色点表示车载系统检测时的路径及采样点,填充的颜色代表此采样点的车载系统预测

土壤电导率,图 17b 中红色点表示实验室检测时的土壤采样点,通过克里金插值法绘制插值图数据,对比图 17a 和图 17b 数据的电导率变化趋势,两者变化趋势相对一致,说明此车载土壤电导率检测系统可以有效并快速预测土壤浸出液电导率的分布趋势,为后续土壤作业提供参考。

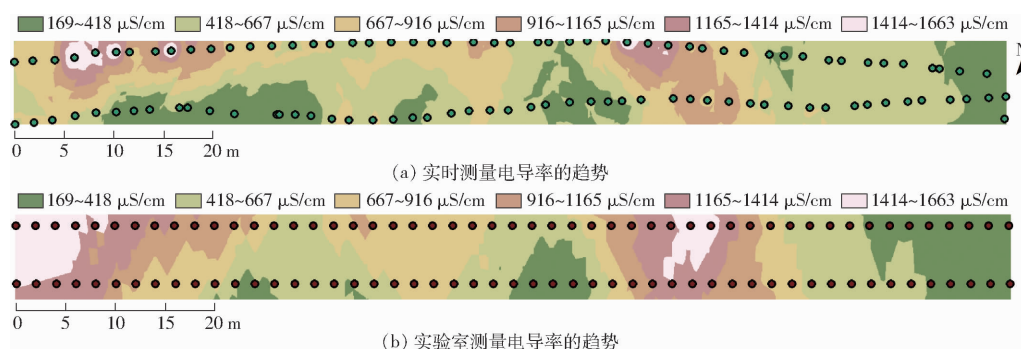


图 17 自制系统电导率数据与土壤采样数据对比

Fig. 17 Comparison of conductivity data of self-made system with soil sampling data

## 4 结论

(1) 基于四端法原理设计了一种车载式大田土壤电导率快速检测采集系统,系统包括交流恒流信号源、信号检测调理电路及 GNSS 定位系统,恒流源输出电流可调范围 0 ~ 1 000  $\mu\text{A}$ ,输出频率可调范围 3 ~ 700 Hz,1 000  $\mu\text{A}$  电流下最大负载阻抗 6 k $\Omega$ ,满足土壤电导率测量要求。

(2) 通过四因素五水平中心组合试验探究了土壤含水率、可溶性盐电导率、电极入土深度、土壤温度对土壤浸出液电导率影响规律并建立了土壤浸出

液电导率(EC<sub>w</sub>)计算回归模型,用于预测土壤浸出液电导率(EC<sub>w</sub>)。该模型  $R^2$  为 0.998 3,预测  $R^2$  为 0.996 1。

(3) 采用车载土壤电导率快速检测系统进行了大田土壤电导率检测试验,根据土壤浸出液电导率(EC<sub>w</sub>)计算回归模型获取试验田块土壤电导率变化。试验结果表明,在行进路径相似时测量结果平均误差小于 15%,其测量结果稳定且具有重复性。大田环境下系统的检测值与实验室仪器检测土壤溶液电导率变化趋势相对一致,故此车载系统可实现大田土壤浸出液电导率的快速预测。

## 参 考 文 献

- [1] 陈学庚,温浩军,张伟荣,等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(4): 1-16. CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong, et al. Development status and direction of agricultural machinery and information technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1-16. (in Chinese)
- [2] BRANCA G, LIPPER L, MCCARTHY N, et al. Food security, climate change, and sustainable land management. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(4): 635-650.
- [3] OBERHOLZER H R, LEIFELD J, MAYER J. Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 177(5): 696-704.
- [4] ZHU X, ZHU B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146: 39-46.
- [5] IKEDA S, SASAKI K, OKUBO T, et al. Low nitrogen fertilization adapts rice root microbiome to low nutrient environment by changing biogeochemical functions[J]. Microbes & Environments, 2014, 29(1): 50-59.
- [6] 同延安, EMTERYD OVE, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1239-1244. TONG Yan'an, EMTERYD OVE, ZHANG Shulan, et al. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in Shaanxi Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1239-1244. (in Chinese)
- [7] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005, 46(1): 45-70.
- [8] SUDDUTH K A, DRUMMOND S T, KITCHEN N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 239-264.
- [9] 黄亮亮, 张慧琴, 劳丽燕, 等. 电导率在土壤盐分检测中的研究进展[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(11): 77-78, 91. HUANG Liangliang, ZHANG Huiqin, LAO Liyan, et al. Research progress of electrical conductivity in soil salt detection[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(11): 77-78, 91. (in Chinese)
- [10] 刘梅先, 杨劲松. 土壤盐分的原位测定方法[J]. 土壤, 2011, 43(5): 688-697. LIU Meixian, YANG Jinsong. In-situ determination of soil salinity[J]. Soils, 2011, 43(5): 688-697. (in Chinese)

- [11] 吴迪,张卓栋,陈思宇,等. 基于 EC-Probe 仪器的土壤盐分原位测定及其在河北坝上地区的应用研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(16): 201-206.  
WU Di, ZHANG Zhuodong, CHEN Siyu, et al. In-situ determination of soil salt based on EC-Probe instrument and its application in Bashang area of Hebei Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(16): 201-206. (in Chinese)
- [12] STADLER A, RUDOLPH S, KUPISCH M, et al. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 64(5): 8-20.
- [13] HE Y, DESUTTER T, HOPKINS D, et al. Predicting ECE of the saturated paste extract from value of EC<sub>1:5</sub>[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(5): 585-594.
- [14] FORTES R, MILLAN S, PRIETO M H, et al. A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning[J]. Precision Agriculture, 2015, 16(4): 1-14.
- [15] 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.
- [16] PEDRERA-PARRILLA A, VAN DVE, VAN MEIRVENNE M, et al. Apparent electrical conductivity measurements in an olive orchard under wet and dry soil conditions: significance for clay and soil water content mapping[J]. Precision Agriculture, 2016, 17(5): 531-545.
- [17] 姚世庭, 芦光新, 王军邦, 等. 模拟增温对土壤电导率的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 598-606.  
YAO Shiting, LU Guangxin, WANG Junbang, et al. Effects of simulated warming on soil conductivity[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 598-606. (in Chinese)
- [18] 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, 5(4): 39-41.  
SUN Yurui. Effect of soil water content and salt on soil conductivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 39-41. (in Chinese)
- [19] NADERI-BOLDAJI M, SHARIFI A, HEMMAT A, et al. Feasibility study on the potential of electrical conductivity sensor veris 3100 for field mapping of topsoil strength[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126(1): 1-11.
- [20] 张建旗, 张继娜, 杨虎德, 等. 兰州地区土壤电导率与盐分含量关系研究[J]. 甘肃林业科技, 2009, 34(2): 21-24, 30.  
ZHANG Jianqi, ZHANG Jina, YANG Hude, et al. Research on relationship between soil conductivity and salt content in Lanzhou[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2009, 34(2): 21-24, 30. (in Chinese)
- [21] ALAN R S, JOSE M, PAULO M, et al. A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils[J]. Sensors, 2015, 15(10): 25546-25563.
- [22] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.  
HUANG Shaowen, WANG Yujun, JIN Jiyun, et al. Soil salinity, acidity, alkalinity and fertility in main vegetable areas of China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(4): 906-918. (in Chinese)
- [23] 许逸林, 朱雯, 戚嘉敏, 等. 油茶林地土壤电导率与其养分含量的相关性[J]. 经济林研究, 2016, 34(3): 126-129.  
XU Yilin, ZHU Wen, QI Jiamin, et al. Correlation between soil conductivity and nutrient content in *Camellia oleifera* forest land [J]. Non-wood Forest Research, 2016, 34(3): 126-129. (in Chinese)
- [24] 张健, 李敏, 李玉娟, 等. 江苏沿海盐碱地土壤电导率与 pH 值的关系[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 357-358.  
ZHANG Jian, LI Min, LI Yujuan, et al. Relationship between soil conductivity and pH value in saline-alkali land along Jiangsu [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(1): 357-358. (in Chinese)
- [25] 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. On line real time detection system of soil conductivity based on AC “four terminal method”[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 299-307. (in Chinese)
- [26] 赵燕东, 李宁, 皮婷婷. 土壤多参数复合测试系统研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 289-298.  
ZHAO Yandong, LI Ning, PI Tingting. Research on soil multi parameter composite testing system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 289-298. (in Chinese)
- [27] 张梦龙, 李民赞, 赵勇. 车载式土壤电导率测量系统开发 [C] // 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011: 1073-1077.
- [28] 曾庆猛, 马道坤, 林剑辉, 等. 面向车载式测量的土壤含水量与电导率复合传感器设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 163-167.  
ZENG Qingmeng, MA Daokun, LIN Jianhui, et al. Design of soil water content and conductivity composite sensor for vehicle-mounted measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 163-167. (in Chinese)
- [29] TADAOMI S, HARUYUKI F, MITSUHIRO I. Calibration and simultaneous monitoring of soil water content and salinity with capacitance and four-electrode probes[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2008, 4(6): 1564-1570.
- [30] 孙宇瑞, 汪懋华. 一种土壤电导率测量方法的数学建模与试验研究[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)
- [31] LI M, WANG M, WANG Q. Development and performance test of a portable soil EC detector[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 301-307.
- [32] 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)
- [33] 魏鸿怡, 孟繁佳. 基于四端法和时域反射法的土壤电导率测量研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 237-242.  
WEI Hongyi, MENG Fanjia. Soil electrical conductivity measurement based on four-terminal method and time domain reflectometry method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 237-242. (in Chinese)