

基于近红外光谱信息的土壤电导率预测模型研究

王 懂^{1,2} 杨 玮^{1,2} 曹永研² 孟 超² 李民赞^{1,2}

(1. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670;

2. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用土壤含水率与近红外光谱土壤反射率和土壤电导率三者之间的关系,以土壤含水率为中间变量,间接表达土壤光谱反射率和土壤电导率之间的关系。土壤含水率与土壤光谱反射率存在指数关系,土壤含水率与土壤电导率存在线性关系,消除中间变量(土壤含水率),得到土壤光谱反射率和土壤电导率之间的关系。以土壤水分敏感波段 1 450 nm 作为研究对象,研究土壤电导率的预测模型,分别建立指数预测模型和对数预测模型,并分别对两种模型进行验证。本文实验建模集样本 72 个,验证集样本 48 个,土壤电导率对数预测模型 R^2 达 0.80,土壤电导率指数预测模型 R^2 达 0.85,预测效果均可满足农田电导率估算,但对数模型在土壤电导率较低区间预测效果不理想,因此土壤电导率指数预测模型预测效果优于对数模型的预测效果。研究结果表明,土壤光谱反射率预测土壤电导率的方案可行,并为光谱信息预测土壤电导率提供了新思路。

关键词: 土壤电导率; 土壤含水率; 土壤光谱反射率; 近红外光谱

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0218-06

Prediction Model of Bulk Soil Electrical Conductivity Based on Near-infrared Spectral Information

WANG Dong^{1,2} YNGA Wei^{1,2} CAO Yongyan² MENG Chao² LI Minzan^{1,2}

(1. Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China

2. Key Laboratory of Smart Agriculture Systems Integration,

Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The relationship between soil spectral reflectance and soil electrical conductivity was expressed indirectly by using the relationship between soil water content and NIR spectral soil reflectance and soil electrical conductivity with soil water content as an intermediate variable. There was an exponential relationship between soil water content and soil spectral reflectance, and a linear relationship between soil water content and soil electrical conductivity, and the relationship between soil spectral reflectance and soil electrical conductivity was obtained by eliminating the intermediate variable (soil water content). The exponential prediction model and the logarithmic prediction model were established and validated respectively by taking the soil moisture sensitive band 1 450 nm as the research object to study the prediction model of soil electrical conductivity. There were 72 samples in the experimental modeling set and 48 samples in the validation set, and the R^2 of the logarithmic prediction model of soil electrical conductivity reached 0.80, and the R^2 of the exponential prediction model of soil conductivity reached 0.85, both of which can satisfy the estimation of farmland conductivity, but the prediction effect of the logarithmic model was not satisfactory in the lower range of soil conductivity, so the prediction effect of the exponential prediction model of soil conductivity was better than the prediction effect of the logarithmic model. The results showed that the scheme of soil spectral reflectance prediction of soil conductivity was feasible, which provided an idea for the prediction of soil electrical conductivity by spectral information.

Key words: soil electrical conductivity; soil moisture content; soil spectral reflectance; near-infrared spectroscopy

收稿日期: 2022-06-20 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 烟台市校地融合发展项目(2020XDRHXMPT35)

作者简介: 王懂(1996—),男,硕士生,主要从事土壤电导率研究,E-mail: dongwang@cau.edu.cn

通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

0 引言

土壤是农业生产的基础,快速检测土壤中的各种营养成分可以为大田灌溉、施肥等管理提供数据支持,对智慧农业可持续发展具有重大意义^[1]。在现代化智慧农业耕作中,土壤电导率是土壤理化特性的表现形式,包含了丰富物理和化学信息,体现了土壤导电能力^[2]。土壤电导率的测量方法一般分为实验室测量和现场测量。实验室测量法虽精度高,但操作复杂、耗时长。现场测量法主要包括:电磁感应法^[3]、时域反射法^[4]和电流-电压四端法^[5]。研究表明^[6-7]:土壤电导率可以间接反映多种土壤参数,如温度、土壤孔隙度、含盐量、有机质含量等,但是土壤电导率易受土壤含水率、土壤有机质含量、土壤粒度等因素的影响^[8-9],不易准确获取土壤电导率,不利于指导农作物生产和品质的提高^[10]。

土壤光电特性是指土壤在外界光照和电场的作用下所表现出来的一些特性参数,这些参数不仅包含了大量的土壤物理信息,同时包含丰富的化学信息^[8],在一定程度上可以反映土壤中各种营养成分的含量,为促进现代精细农业的发展提供了新支持^[11-13]。在土壤光学特征方面,光谱技术作为一种快速、非破坏性的检测方法,已经广泛用于土壤全氮^[14]、有机质^[15]等土壤养分含量的检测。国内外一些学者通过研究土壤含水率和土壤反射率之间的关系,提出两者的关系可以用指数模型描述,且模型相关性较高^[16-20]。另一部分学者通过研究土壤含水率和土壤电导率的关系,提出两者之间存在线性关系^[21-24],但目前没有学者利用这两者关系去研究土壤光谱反射率与土壤电导率之间的关系,本文以土壤含水率为中间变量,研究土壤光谱反射率和土壤电导率之间的关系,并建立两者相关联的模型,从而得到土壤光谱反射率预测土壤电导率的理论模型,并对模型进行验证。

1 实验材料与方法

1.1 模型

1.1.1 土壤含水率与土壤光谱反射率指数理论模型

ETIENNE 等^[16]于 2001 年提出土壤含水率与土壤光谱反射率的指数模型为

$$\rho_{s(\lambda)} = \rho_{so(\lambda)} e^{a_{s(\lambda)} M}$$

(1)

式中 $\rho_{s(\lambda)}$ ——湿土土壤光谱反射率
 $a_{s(\lambda)}$ ——土壤反射率衰减系数(与土壤质地有关)

$\rho_{so(\lambda)}$ ——空气干燥时土壤光谱理论反射率
 M ——土壤含水率

孙越君等^[18]于 2015 年证明土壤含水率通过镜面反射和吸收对土壤光谱反射率产生影响,认为反射光由两部分组成:①土壤颗粒表面水膜的镜面反射。②光子进入土壤内部能量被吸收之后的反射光,其建立的表达式为

$$R = f_w \rho_w + (1 - f_w) \rho_s e^{da_w}$$

(2)

式中 R ——湿土反射率
 f_w ——镜面反射所占的比例系数(与土壤含水率有关)
 ρ_w ——水镜面反射率
 ρ_s ——干土反射率
 d ——光子入土深度(与土壤含水率有关)
 a_w ——不同波长处水对光子的吸收系数
由式(1)、(2)可得

$$R = ae^{b\theta_v + c}$$

(3)

式中 θ_v ——土壤体积含水率
 $a、b、c$ ——建模可确定的待定系数
陈祯^[20]于 2010 年提出土壤光谱反射率与土壤含水率的关系为指数模型,即

$$\theta_v = me^{-gR - kB}$$

(4)

式中 B ——体积质量
 $m、g、k$ ——建模可确定的待定系数
式(4)变形简化

$$R = m \ln \theta_v + n$$

(5)

式中 n ——建模可确定的待定系数
综合以上学者的研究成果,可以得出土壤含水率与土壤反射率存在指数关系。

1.1.2 土壤含水率与土壤体电导率的线性理论模型

RHOADES 等^[21]1989 年提出土壤电导率(包含电解质)可用 3 种通道的并联表示:土壤粒子表面直接相联的通道(固体通道)、土壤粒子和土壤粒子孔隙间的水形成的交替通道(固液通道)、土壤水溶液通道(液体通道),土壤电导率 EC_a 可以根据电阻串并联定理来求得,表达式为

$$EC_a = EC'_s + T\theta_s EC_w$$

(6)

$$T = \frac{\theta_v - \theta_{vs}}{\theta_v}$$

(7)

$$\theta_v = \theta_m \frac{\rho_b}{\rho_m}$$

(8)

式中 EC'_s ——土壤粒子表观电导率
 EC_w ——土壤水电导率
 T ——土壤水分迁移系数
 θ_m ——土壤质量含水率
 θ_{vs} ——固液通道体积含水率

ρ_b ——土壤容重 ρ_m ——水的密度

由式(6)可以看出,土壤体积含水率与土壤电导率呈线性关系,由于本研究所提到的土壤含水率皆为土壤质量含水率,由式(6)~(8)可得其简化模型为

$$EC = q\theta_m + p$$

(9)

式中 q 、 p ——建模可确定的待定系数

1.1.3 土壤光谱反射率与土壤体电导率理论模型

本文两种土壤光谱反射率与土壤电导率理论模型建立如下。通过实验数据验证理论模型精度的高低,两个模型均以土壤质量含水量 θ_m 作为中间变量,模型 1 为

$$EC_1 = \frac{q}{b} \ln \left(\frac{1}{a} R - \frac{1}{a} \right) + p$$

(10)

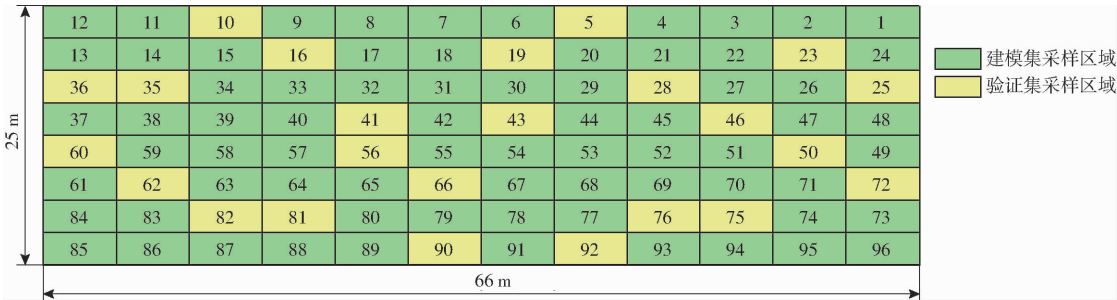


图 1 96 个雨前采样点
Fig. 1 96 sampling points before rain

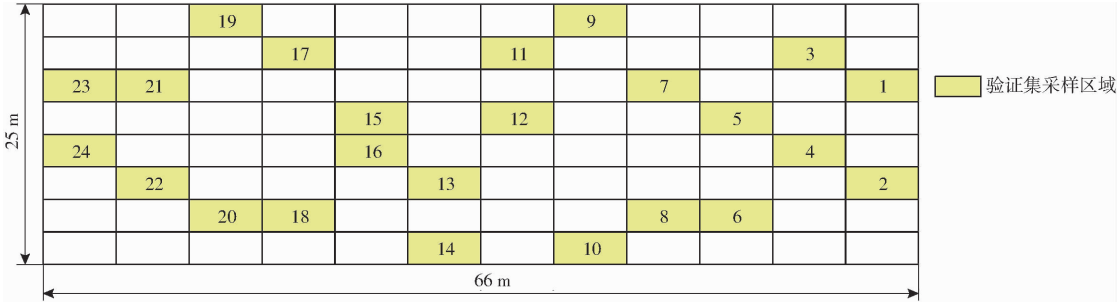


图 2 24 个雨后采样点
Fig. 2 24 sampling points after rain

1.2.2 土壤样本预处理

随机选取雨前 96 个土壤样本中的 72 个样本作为建模集(图 1 中绿色区域),雨前剩余的 24 个和雨后的 24 个样本作为验证集(图 1、2 橙色区域)。分别对建模集样本和验证集样本进行不同的预处理。建模集样本预处理过程:①过孔径 0.9 mm 筛,去除杂质。②105℃ 恒温干燥 12 h。③将 72 个样本分为 6 组,每组 12 个样本,④使用去离子水将 6 组样本配置成质量含水率分别为 1%、5%、10%、15%、20%、25% 的样本。验证集样本预处理过程为①过孔径 0.9 mm 筛。②将过筛样本平均分 2 份。③第 1 份样本放入 105℃ 恒温箱逐步干燥,分别在放入干燥箱后 0.5、1、2、3、5、8、12 h 计算其质量含

模型 2 为

$$EC_2 = qe^{\frac{1}{m}R - \frac{n}{m}} + p$$

(11)

1.2 实验材料采集与处理

1.2.1 土壤样本采集

选取中国农业大学上庄实验站(116.191762E; 40.144081N)的土壤样品作为实验对象。土壤样本采自实验站小麦田地,土壤类型属于壤土。采样深度为去除表层土壤后 3~15 cm,每个采样点采样质量约为 2 kg,土壤样本共采集两次:第 1 次为雨前采集,采集样本 96 个;第 2 次为雨后采集,采集样本 24 个,两次采集时间间隔为 2 d,采样区域如图 1、2 所示,每个土壤样本均在采样区域的中间获取。

水率、检测电导率和光谱反射率。④另一份样本在原有含水率的基础上用去离子水任意配置不同梯度含水率(最大质量含水率不超过 30%),并测量其体积电导率和光谱反射率。

如表 1 所示,5 h 之后,质量含水率的变化率很小,所以 8、12 h 的实验数据不参与模型验证。

1.2.3 土壤样本数据采集

利用美国 Ocean Insight 公司的 NIRQuest512 型光谱仪采集土壤光谱反射率数据(波段为 900~1 700 nm,分辨率为 1.5 nm),光谱数据采用 10 次平滑扫描后取平均。利用 2266FS 型便携式土壤原位电导率计检测土壤电导率数据,电导率数据采集 6 次取平均,土壤质量含水率计算式为

表 1 不同干燥时间的土壤含水率

Tab.1 Soil moisture content at different drying times

样本	干燥时间/h						
	0.5	1	2	3	5	8	12
1	10.1	8.3	4.7	2.4	1.4	0	0
2	8.8	6.8	3.9	1.9	0.9	0	0
3	7.2	5.2	3.6	1.7	0.8	0	0
4	12.3	9.7	4.2	2.9	1.1	0	0
5	11.5	8.5	4.1	2.19	1.3	0	0
6	9.9	6.6	3.5	1.6	0.7	0	0

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_a} \times 100\%$$
 (12)

式中 m_w ——土壤干燥前后质量之差
 m_a ——干土质量

1.2.4 模型性能评价指标

采用均方差、决定系数和均方根误差作为评价指标。

1.3 实验数据建模与模型验证

1.3.1 实验数据统计学分析

建模集样本土壤电导率随含水率变化而变化，主要分布在 49.56 ~ 746 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间，平均值为 331.12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，标准差为 224.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，数据范围分布良好，梯度明显，适合建模。模型验证集样本土壤电导率分布在 26.73 ~ 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间，平均值为 342.50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，标准差为 243.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，说明数据比较离散，梯度良好，适合模型验证。

1.3.2 实验数据建模分析

由图 3 可知，土壤光谱反射率随着含水率的增大光谱反射率逐渐减小，且减小的速率呈变慢趋势，在波长 1450 nm 处是土壤水分的吸收峰谷，吸收峰谷随着含水率的增加而变深、变宽，这种变化趋势为土壤光谱预测土壤含水率提供了可能。

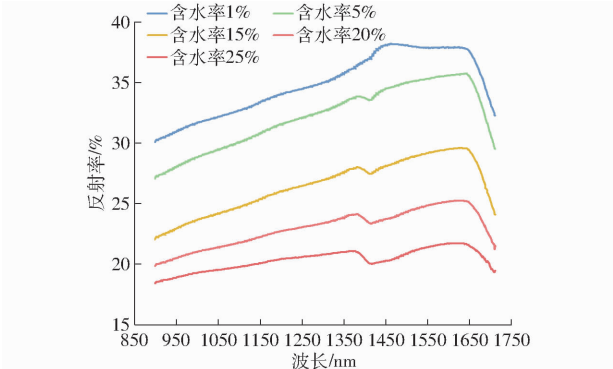


图 3 不同含水率的土壤光谱反射率原始曲线

Fig.3 Original graph of soil spectral reflectance with different moisture contents

分别对 72 组实验数据进行土壤含水率和土壤光谱反射率、土壤含水率和土壤电导率建模。土壤

含水率和土壤光谱反射率有两种模型(式(3)、(5)),式(3)模型建模效果如图 4 所示,式(5)模型建模效果如图 5 所示,仅从模型决定系数 R^2 上看,式(5)建模精度比式(3)的精度略高。因此,本文土壤含水率与光谱反射率的理论模型采用式(5),由图 6 可知,土壤含水率和土壤体电导率呈线性关系,且决定系数达 0.9779,实验结果验证了土壤含水率与土壤电导率的线性理论模型的正确性。

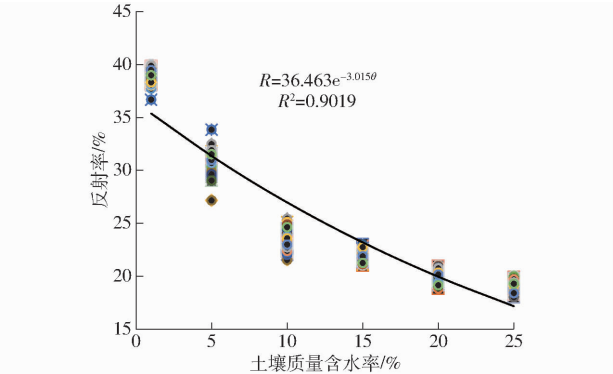


图 4 以式(3)为基础的建模效果

Fig.4 Modeling effect based on formula (3)

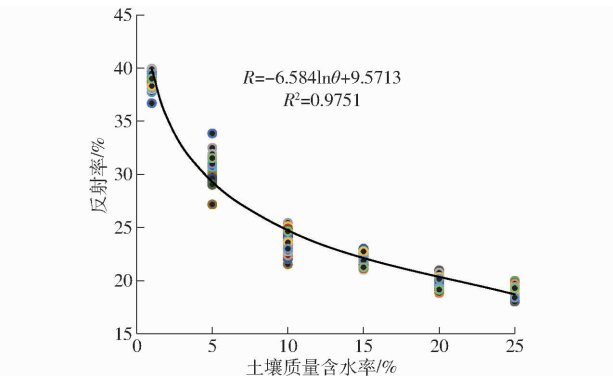


图 5 以式(5)为基础的建模效果

Fig.5 Modeling effect based on formula (5)

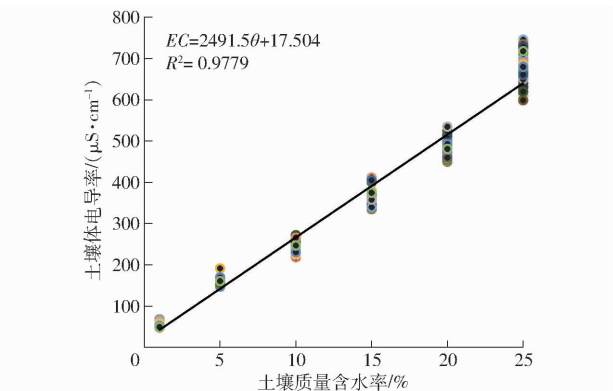


图 6 土壤质量含水率与土壤电导率建模分析

Fig.6 Modeling analysis of soil mass water content and soil conductivity

1.3.3 模型验证

将图 4、5 中的两个公式分别代入图 6 中的公式可间接推导出土壤电导率的预测模型为

$$EC_1 = -826.37\ln(0.027R) + 17.51 \quad (13)$$

$$EC_2 = 2491.5e^{-0.15R+1.45} + 17.51 \quad (14)$$

预测模型预测精度如图 7、8 所示。从图中可以看出,式(13)预测模型的 R^2 和 RMSE 分别 0.805 和 93.589 $\mu\text{S}/\text{cm}$,式(14)预测模型的 R^2 和 RMSE 分别 0.855 4 和 67.562 $\mu\text{S}/\text{cm}$,模型预测精度基本可以满足大田土壤电导率估算,但达不到精确检测精度。实验结果表明,以式(5)为基础推导的土壤电导率预测模型(式(14))具有更好的预测效果。

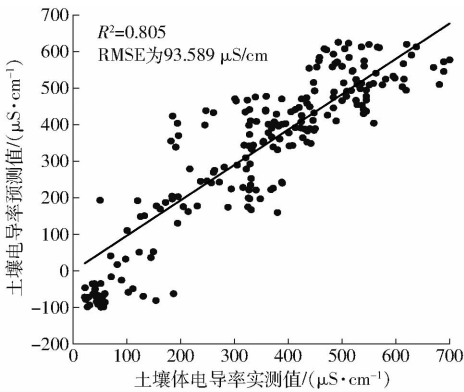


图 7 式(13)土壤电导率预测相关性分析
Fig. 7 Equation (13) correlation analysis diagram of soil conductivity prediction

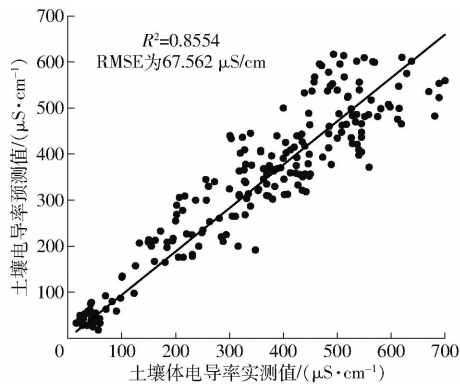


图 8 式(14)土壤电导率预测相关性分析
Fig. 8 Equation (14) correlation analysis diagram of soil conductivity prediction

2 结果与讨论

由图 7、8 可知,指数模型 R^2 比对数模型 R^2 略高,说明指数模型和对数模型在某种程度上都可以用来预测土壤电导率,式(13)得到的预测模型在土壤电导率 0 ~ 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的区间内的预测值偏小,且出现负值,这与实际情况不符,说明对数模型在该区间的预测能力较差,即对数模型不适合土壤电导率含量低的农田。

两个模型的 R^2 偏低的原因有:①由实验过程可知,在土壤含水率 15% ~ 20% 区间内,土壤含水率过高,但又没达到饱和,由于土壤黏性增大使得土壤粒度变大,甚至呈现块状,进而影响土壤反射率。②当土壤含水率超过 25% 后,土壤基本达到了田间持水率最大值,使得土壤变成土壤泥溶液,由于土壤胶体颗粒具有很好的导电性,使得土壤体电导率真值偏高。

土壤中离子种类和浓度变化,会引起土壤胶粒互相凝聚,形成微团粒或黏团,再互相结合形成较大的团粒^[25]。在土壤胶粒团体形成或分解过程中的某些运动吸收了 1 450 nm 波长的能量,并且随着含水率的增大,能量被吸收的速率呈先增大后变小的趋势。

3 结论

(1)实验验证了土壤含水率与土壤光谱反射率存在的指数和对数关系,两者决定系数 R^2 达 0.9,并且验证了式(5)比式(3)更适合本文研究内容。

(2)实验验证了土壤含水率与土壤电导率的线性关系,其决定系数 R^2 达到 0.977 9,充分说明在一定的区间范围内,土壤体电导率随着含水率的增加而增大。

(3)间接确定土壤光谱反射率和土壤电导率的对数和指数模型,并验证两种模型精度,决定系数 R^2 达 0.80 以上,指数模型在整体上的预测精度比对数模型高。

参 考 文 献

[1] 齐美娟. 精细农业的实践助推智慧农业创新发展——访中国工程院院士、国际欧亚科学院院士汪懋华[J]. 中国国情国力,2018(7):6-7,5.
QI Meijuan. The practice of precision agriculture fuels the innovative development of smart agriculture[J]. China National Conditions and Strength,2018(7):6-7,5. (in Chinese)

[2] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(10):220-228,201.
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(10):220-228,201. (in Chinese)

[3] HEIL K, SCHMIDHALTER U. Theory and guidelines for the application of the geophysical sensor EM38[J]. Sensors (Basel, Switzerland),2019,19(19):4293.

[4] AGAH M, DE D. 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):1525–1540.
- [5] 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)
- [6] MARCELO M C, DANIEL M Q, FRANCISCO A P, et al. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes[J]. *Acta Scientiarum Agronomy*,2014,36(4):395–401.
- [7] SHMULIK P, FRIEDMA N. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2004,46(1):11–43.
- [8] WEI Bai, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*,2013,5(5):406–411.
- [9] YONGJIN C, KENNETH A, CHUNG S. Soil physical property estimation from soil strength and apparent electrical conductivity sensor data[J]. *Biosystems Engineering*,2016,152(SI):68–78.
- [10] NAHUEL R P, JOSÉ L C. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2013, 99: 218–226.
- [11] 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. *农业工程学报*,1999,15(1):1–8.
WANG Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. *Transactions of the CSAE*,1999,15(1):1–8. (in Chinese)
- [12] 罗锡文, 臧英, 周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. *农业工程学报*,2006,22(1):167–173.
LUO Xiwen, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture[J]. *Transactions of the CSAE*,2006,22(1):167–173. (in Chinese)
- [13] 汪懋华, 李民赞. 精细农业[M]. 北京:中国农业大学出版社,2011.
- [14] WANG Weichao, YANG Wei, ZHOU Peng, et al. Development and performance test of a vehicle-mounted total nitrogen content prediction system based on the fusion of near-infrared spectroscopy and image information[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2022,192:106613.
- [15] 崔玉露, 杨玮, 王炜超, 等. 基于光谱学原理的便携式土壤有机质检测仪设计与实验[J]. *农业机械学报*,2021,52(增刊):323–328,350.
CUI Yulu, YANG Wei, WANG Weichao, et al. Design and experiment of portable soil organic matter detector based on spectroscopy principle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(Supp.):323–328,350. (in Chinese)
- [16] ETIENNE M, HENRI D. Modeling soil moisture-reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*,2001,76(2):722–727.
- [17] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. *生态学报*,2010,30(22):6264–6277.
YANG Tao, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(22):6264–6277. (in Chinese)
- [18] 孙越君, 郑小坡, 秦其明, 等. 不同质量含水量的土壤反射率光谱模拟模型[J]. *光谱学与光谱分析*,2015,35(8):2236–2240.
SUN Yuejun, ZHENG Xiaopo, QIN Qiming, et al. Modeling soil spectral reflectance with different mass moisture content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2015,35(8):2236–2240. (in Chinese)
- [19] YANG Xiguang, YU Ying, LI Mingze. Estimating soil moisture content using laboratory spectral data[J]. *Journal of Forestry Research*,2019,30(3):1073–1080.
- [20] 陈祯. 不同土壤含水率、体积质量及光谱反射率的关系模型[J]. *农业工程学报*,2012,28(4):76–81.
CHEN Zhen. Relationship model among water content, bulk density and reflectivity of different soil[J]. *Transactions of the CSAE*,2012,28(4):76–81. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 孙玉龙, 郝振纯, 陈启慧, 等. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系[J]. *河海大学学报*,1997(6):71–75.
SEN Yulong, HAO Zhenchun, CHEN Qihui, et al. Relation among logic strength and electrical conductivity of soil solution and soil bulk conductivity[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,1997(6):71–75. (in Chinese)
- [23] GEORGE K, MAGNUS P, GEORGE K, 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):0001210.
- [24] CHUNG Chihchung, LIN Chihping, YANG Shihui, et al. Investigation of non-unique relationship between soil electrical conductivity and water content due to drying-wetting rate using TDR[J]. *Engineering Geology*,2019,252:54–64.
- [25] 周建民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京:科学出版社,2013.