

DOI: 10.11766/trxb201902190068

刘新路, 彭杰, 冯春晖, 吴家林, 罗德芳, 齐威. 基于电磁感应仪数据的南疆棉田土壤电导率反演模型研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 646–655.
LIU Xinlu, PENG Jie, FENG Chunhui, WU Jialin, LUO Defang, QI Wei. Inversion Model for Soil Conductivity in Cotton Field in South Xinjiang Based on EM38-MK2 Data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 646–655.

基于电磁感应仪数据的南疆棉田土壤电导率反演模型研究*

刘新路, 彭杰[†], 冯春晖, 吴家林, 罗德芳, 齐威

(塔里木大学植物科学学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘 要: 土壤盐渍化是南疆棉田优质高产的主要障碍因素, 定额灌溉可有效改良土壤盐渍化, EM38-MK2 可快速、动态获取土壤盐渍化数据, 适时监测土壤盐渍化, 为棉田定额灌溉提供数字依据。针对电磁感应仪 (EM38-MK2) 的发射圈和接收圈设计了不同采样方案, 在同一条田内采集了 6 个不同时期的土壤表观电导率数据及相应的剖面土样, 分析了不同土壤采样方案及土壤含水量对表观电导率模型精度的影响, 对比了以单一时期数据建模的局部模型和 6 个时期整体数据建模的全局模型的反演精度。结果表明, 由单点采集电磁感应仪发射线圈位置土样所构建的模型精度更高, 稳定性更好, 能有效减少由采样带来的误差。当土壤含水量低于 10% 时, 表观电导率与实测电导率之间的相关性较低, 决定系数为 0.58, 反演模型只具备粗略估计实测电导率的能力; 当土壤含水量高于 10% 时, 表观电导率与实测电导率具有很好的相关性, 决定系数达到 0.80 以上, 反演模型具有较好的预测能力。EMH+EMV 多测定模式下表观电导率与实测电导率之间的模型精度高于 EMH 或 EMV 单一测定模式, 确立 $EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$ 为建模因子, 有效提高了反演模型的精度。不同深度土层的局部模型反演精度均高于全局模型精度, 局部模型的 RPD 均大于 2.0, 具有较好的预测能力。

关键词: 土壤盐分; 土壤表观电导率; 土壤电导率; 反演模型; 棉田

中图分类号: S121 **文献标志码:** A

Inversion Model for Soil Conductivity in Cotton Field in South Xinjiang Based on EM38-MK2 Data

LIU Xinlu, PENG Jie[†], FENG Chunhui, WU Jialin, LUO Defang, QI Wei

(College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: 【Objective】 Soil salinization is the major obstacle restraining high quality and high yield of cotton in South Xinjiang, and rated irrigation can effectively alleviate soil salinization. EM38-MK2 can be used to obtain real-time dynamical soil salinization data, monitor in-situ soil salinization in time, and provide a digital basis for rated irrigation in cotton fields.

【Method】 In this study, different soil sampling schemes were designed in line with the designing of the transmitting coil and receiving coil of the electromagnetic sensor (EM38-MK2), and soil apparent electrical conductivities (EC_a) and soil samples from corresponding soil profiles were collected in the same field in six different time periods for analysis of effects of soil sampling

* 国家重点研发计划项目(2018YFE0107000, 2016FYC0501407)资助 Supported by the National Key Research and Development Program (Nos. 2018YFE0107000, 2016FYC0501407)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: pjzky@163.com

作者简介: 刘新路(1993—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤盐渍化防控和盐渍土资源利用。E-mail: lxzky@163.com

收稿日期: 2019-02-19; 收到修改稿日期: 2019-05-14; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-05

scheme and soil moisture content on accuracy of the apparent EC model, and specification of factors for building apparent EC models for different soil layers. Moreover, comparison was done of the local model based on data of a single period with the model based on overall data of the six periods in inversion accuracy. 【Result】 Results show that the model based on single point sampling at the site of the transmitting coil of the EM38-MK2 was higher in sensing accuracy and stability than the others and hence could effectively minimize the error caused by sampling. When soil moisture content was less than 10%, the correlation between apparent EC and measured EC was low, with determination coefficient being 0.58 and the inversion model could only roughly estimate EC; When it was more than 10%, apparent EC displayed a good relationship with measured EC, with determination coefficient being 0.80 and the inversion model could make an estimation of EC close to the measured one. The EMH+EMV model was built on the equation of $EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$ defined as modeling factor and much higher than the EMH or EMV model in inversion accuracy with predicted apparent EC being very approximate to measured EC. The local models for predicting ECs in various soil layers different in depth were all higher than the overall one in inversion accuracy and their RPDs were more than 2.0, which indicate that they have high prediction ability. 【Conclusion】 All the findings in the study demonstrate that sampling under the transmitting coil is conducive to stability of the sampling, which may guide future utilization of the equipment, and open up new ways of thinking and server as reference for monitoring soil salinization dynamically with the electromagnetic sensor technology on the field scale.

Key words: Soil salinization; Soil apparent electrical conductivity (EC_a); Soil electrical conductivity; Inversion models; Cotton field

据我国第二次土壤普查表明,新疆是我国最大的盐土区,盐渍土面积达 1 100 万 hm^2 , 约占全国盐渍土面积的 1/3 和新疆土地面积的 6.6%。新疆现有耕地面积约 416.4 万 hm^2 , 新疆棉花种植面积约为 197.8 万 hm^2 , 其中盐碱地约占耕地面积的 31%。南疆是新疆棉花的主产区,其棉花产量约占新疆棉区产量的 80%。土壤盐渍化可造成农田土壤肥力衰退、作物生产力下降、生态环境恶化,是制约南疆棉田高产栽培可持续发展的主要因素之一^[1-5]。对农田土壤盐渍化进行治理、改良,其基本前提是快速、准确、动态地获取农田土壤盐分信息。传统的土壤盐渍化监测采用野外定点调查方法,土壤剖面盐分数据的采集多以采挖、土钻钻孔侵入式等方法为主,既费时费力,且破坏性强、测点少、代表性差^[6],难以满足快速、动态地获取农田盐渍化土壤盐分数据的要求。高光谱卫星遥感和近地高光谱技术虽能大面积监测农田土壤盐渍化状况,但仅仅局限于表层土壤盐分的监测,难以获取深层次的土壤盐分信息。随着高新技术的飞速发展,为农田土壤盐渍化监测提供了更多的选择方法和途径。电磁感应仪 EM38-MK2 具有可原位采集不同深度土层的表观电导率数据集,可有效降低成本,更加科学、高效、快速地获取农田土壤盐渍化信息等优点,很好地克服了传统人工地面监测与高光谱卫星遥感和近地高

光谱监测的不足,已成为农田土壤盐渍化监测领域中的一种先进手段。EM38-MK2 移动系统高效、准确的空间变量测定方法与土壤理化特性研究相结合对精准农业具有重要意义。电磁感应仪 EM38-MK2 表观电导率的快速测量技术已经在国内外测量土壤属性(土壤水分、盐分、质地、有机质等)得到了广泛的研究与应用^[7-12]。中国目前对此方面的研究较广,主要包括三维土壤盐分、有机质的空间变异研究^[13-15]、高光谱协同电磁感应对土壤含水量的反演研究^[16]、电磁感应快速测评地下水矿化度^[17]、电磁感应技术在堤坝隐患探测中的应用等^[18]。

前人基于电磁感应技术在土壤属性监测领域的报道为后续进一步深入研究提供了良好的基础与借鉴。但目前针对农田土壤盐分所建立的精确解译模型,是基于某一特定时期数据所建,而不同时期的农田土壤盐分在剖面中的分布具有明显差异会引起模型参数的变化。因此,某一特定时间所建立的盐分电磁感应解译模型很难应用于同一地区作物不同生育期。此外,关于如何合理采集表观电导率与实测电导率的建模土样及土壤含水量对土壤盐分电磁感应解译模型精度影响的报道甚少。因此,在田间尺度上,探明土样采集位置、土壤含水量对反演模型精度的影响,以及不同时期反演模型参数的差异性,确定科学的建模思路,是电磁感应技术应用于

农田土壤盐渍化监测所必须解决的关键问题。利用6次采集的不同时期棉田土壤表观电导率及剖面土样,通过局部模型与全局模型精度的对比,提出了构建棉田不同时期土壤盐渍化电磁感应定量反演模型的思路与方法,以期在EM38-MK2在大尺度农田土壤盐渍化的监测应用中提供参考,为农田定额灌溉提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆阿拉尔市十二团科技园区内,地处阿克苏河、和田河与叶尔羌河三河交汇之处的塔里木河上游冲积平原与三角洲地带(见图1),介于 $80^{\circ}30' \sim 81^{\circ}58'E$ 、 $40^{\circ}22' \sim 40^{\circ}57'N$ 之间。该区位于天山南麓,塔克拉玛干大沙漠北缘,受塔克拉玛

干沙漠影响,属典型大陆气候,全年干旱少雨,蒸发量大。该区水土资源充沛,光照时间长,年平均气温 $10.7^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 $4\ 113^{\circ}C$,无霜期220 d,年日照2 900余小时,4—10月平均日照9.5 h,适宜长绒棉、细绒棉的栽培。灌溉水源主要引自阿克苏河和塔里木河,地下水位1.5~2.0 m,年平均蒸发量为 $1\ 988\ mm^{[19]}$,年平均降水量为 $48.5\ mm^{[20]}$,蒸降比约为41倍。高蒸降比使得该地区极易产生盐渍化土壤,土壤盐渍化严重影响了农田产量。本研究共选取 $18\ hm^2$ 的机采棉田作为调查对象,地面平坦开阔,有利于电磁感应仪EM38-MK2大面积的测量。研究区内棉花品种为新陆中78号和源棉5号,籽棉产量高于 $4\ 350\ kg \cdot hm^{-2}$,灌溉模式均采用膜下滴灌,棉花整个生育期共灌水6次,每公顷棉田用水 $5\ 850\ m^3$,土壤质地主要以砂壤土为主,土壤有机质平均含量为 $4.0 \sim 5.1\ g \cdot kg^{-1}$ 。

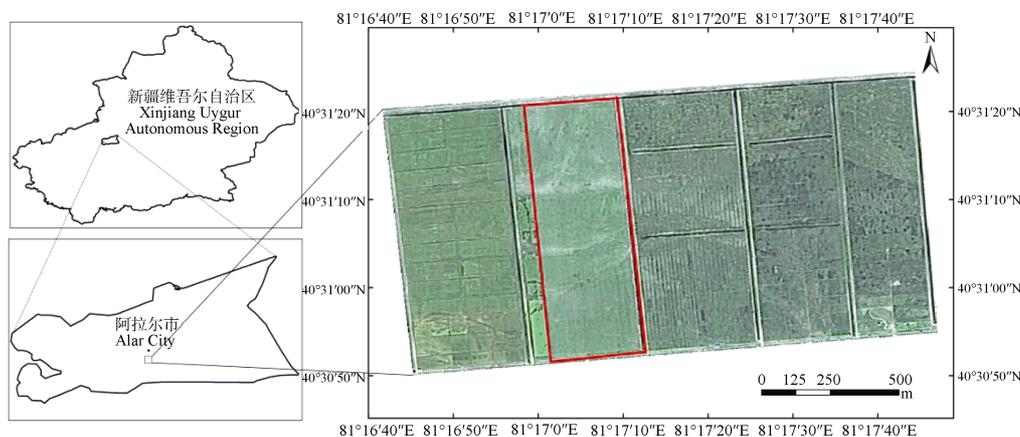


图1 研究区相对位置图

Fig. 1 Geographic location of the study area

1.2 EM38-MK2 结构与原理

本研究采用新式EM38-MK2大地电导率仪进行表观电导率的快速测定。标准EM38-MK2包括两个接收线圈,一个发射线圈,接收线圈与发射线圈的距离分别为1 m和0.5 m,如图2所示,A点为发射线圈,B点为0.5 m接收线圈,C点为1 m接收线圈,在垂直偶极定向时分别提供1.5 m和0.75 m的有效深度数据,在水平偶极定向时分别提供0.75 m和0.375 m的有效深度数据。EM38-MK2可以测量3种不同深度范围内的表观电导率和磁化率数据^[21]。测量时,发射线圈用交流电供电,在土壤中产生一个原生磁场。这个磁场使电流在土壤中流动,

产生二次磁场。这个次级电磁场的强度与土壤的EC成正比,可表示为: $EC_a = 4(H_s/H_p) / (\omega\mu_0 S^2)$,式中: H_s 为信号接收线圈处次生磁场强度; H_p 为信号接收线圈处原生磁场强度; μ_0 为空间磁场传导系数; ω 为 $2\pi f$; EC_a 为表观电导率($mS \cdot m^{-1}$); S 为不同线圈之间的间距。

1.3 样品采集与处理

根据研究区棉田出苗状况,土壤盐渍化与次生盐渍化状况等因素选取不同盐渍化程度的典型样点。2018年4月采集EM38-MK2表观电导率数据共63个,仪器前端设置为A点,仪器中间设置为B点,仪器后端设置为C点(图2),共采集A、B、

C 点下土壤表层样品 (0~20 cm) 各 63 个。同时将 A、B、C 点土壤样品各自分成四份, 混合之后共得到 A、B、C、AB、AC、BC、ABC 土壤样品各 63 个。在不同条田范围内采集不同土壤含水量表层 0~20 cm 样品共 216 个。于 2018 年 5—10 月共进行了 6 次表观电导率与土壤剖面样品的采集, 每次采集 18 个样点。在土壤剖面样品采集前, 先采用 EM38-MK2 仪器在同一方向上水平模式和垂直模式贴地各测量两次。H 为线圈处于水平模式, V 为线圈处于垂直模式。两种测定模式有效深度分别为 0.375 m、0.750 m、0.750 m、1.500 m, 测量模式分别为 EMH 与 EMV, 获得的表观电导率相应表示为 $EC_{h0.375}$ 、 $EC_{h0.75}$ 、 $EC_{v0.75}$ 、 $EC_{v1.5}$ 。测定完表观电导率后, 在每个采样点用土钻法采集 EM38-MK2 仪器 A 点不同深度土壤剖面样品, 按 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 分层取样。采集的土壤样品装入自封袋中, 编号, 带回实验室用烘干法立即测定土壤含水量^[22]。剩余土壤样品经自然风干、磨碎、过 2 mm 筛后装入信封后备用。所有样品采用饱和泥浆法测定土壤电导率^[23]。



图 2 EM38-MK2 大地电导率仪构造

Fig. 2 Scheme of the EM38-MK2 conductivity meter

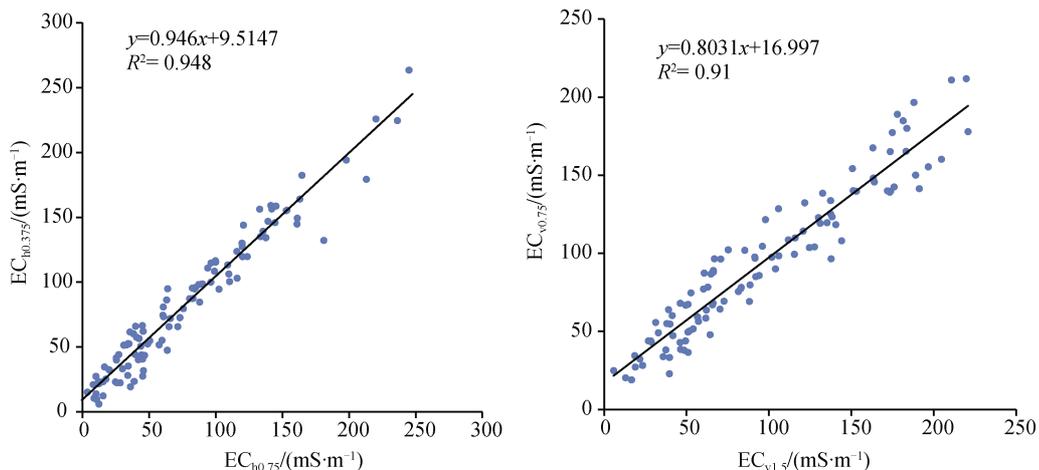


图 3 EM38-MK2 表观电导率的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of apparent EC of EM38-MK2

1.4 模型的思路与模型评价指标与验证

采用全局模型与局部模型两种思路进行建模。全局模型是将 5—10 月的土壤样品汇总, 建立统一的反演模型, 局部模型针对单一月份土壤样品建立单独的反演模型。模型稳定性和预测精度的评价指标为决定系数 (Determination coefficient, R^2)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE)、相对分析误差 (Relative percent deviation, RPD)。相对于 RPD 而言, 预测精度分为 5 级, 当 $RPD < 1.5$ 时表明模型没有预测能力。当 $1.5 < RPD < 2.0$ 时表明模型只能对样品的高低进行粗略估测, 当 $2.0 \leq RPD < 2.5$ 时表明模型具有较好的预测能力, 当 $2.5 \leq RPD < 3.0$ 时表明模型具有很好的预测能力, 当 $RPD \geq 3.0$ 时模型具有极好的预测能力^[24]。 R^2 值越大、RMSE 越小, 表示其预测能力越强, 稳定性越高。

2 结果

2.1 不同深度土层电导率反演模型

2.1.1 表观电导率的可信度 通过分析 EM38-MK2 表观电导率水平模式下 $EC_{h0.375}$ 与 $EC_{h0.75}$ 的相关性与垂直模式下 $EC_{v0.75}$ 与 $EC_{v1.5}$ 的相关性来确定表观电导率数据的准确度^[25-26]。图 3 可以看出表观电导率 $EC_{h0.375}$ 与 $EC_{h0.75}$, $EC_{v0.75}$ 与 $EC_{v1.5}$ 具有较好的相关性, 相关系数大于 0.95, 说明 EM38-MK2 测

量准确, 表观电导率数据具有较高的可信度。表观电导率数据质量满足农田土壤电导率反演模型的建立。

本研究采用饱和泥浆电导率 EC_{sp} 来反映农田土壤盐渍化特征, 一方面是土壤盐分与饱和泥浆电导率 EC_{sp} 具有较高的相关性, 另一方面 EM38-MK2 测量值反映的是土壤空间范围内游离态电解质的含量, 采用饱和泥浆电导率 EC_{sp} 更能真实准确地反映农田土壤盐渍化状况。

2.1.2 电导率建模因子的确定 局部模型以 2018 年 8 月数据为例, 为进一步提高表观电导率与

实测土壤电导率的反演模型精度, 对于不同的土层深度, 建模因子的选取充分考虑了 EM38-MK2 表观电导率不同测量模式下的感应深度范围^[27]以及对不同深度土层的响应程度, 单一测量模式下, 以 $EC_{h0.375}$, $(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2$, $EC_{v1.5}$ 为自变量, 其中 $(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2$ 为水平模式下 $EC_{h0.75}$ 和垂直模式下 $EC_{v0.75}$ 的平均值, 以各土层深度为因变量进行回归分析。多测量模式下, 分别以 $EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2$, $(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$ 和 $EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$ 为自变量, 以各土层深度为因变量进行多元线性回归分析(表 1)。

表 1 不同建模因子下各土层的决定系数

Table 1 Determination coefficients of the model for a soil layers relative to soil depth and modeling factors

土层 Soil layer/cm	建模因子 Modeling factors					
	$EC_{h0.375}$	$(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2$	$EC_{v1.5}$	$EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2$	$(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$	$EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$
0~20	0.75	0.69	0.54	0.79	0.71	0.80
20~40	0.87	0.85	0.69	0.87	0.87	0.87
40~60	0.84	0.85	0.66	0.85	0.87	0.89
60~80	0.80	0.84	0.80	0.84	0.84	0.85
80~100	0.70	0.79	0.87	0.82	0.80	0.89

从表 1 可以看出垂直模式下 $EC_{v1.5}$ 的决定系数随着深度的增加而增加。水平模式下 $EC_{h0.375}$ 的 R^2 随着深度的增加而增加, 到达 40 cm 处, R^2 达到最大, 之后开始减小。在 50 cm 以上土层, EM38-MK2 水平模式 $EC_{h0.375}$ 的灵敏度优于垂直模式 $EC_{v1.5}$ 的灵敏度, 在 50 cm 以下土层反之。分析结果符合 EM38-MK2 两种测量模式电导率随深度变化的响应函数模型, 与 Heil 和 Schmidhalter^[27]、李洪义^[28]、宋江辉等^[25]分析相同。由 EM38-MK2 的非线性响应函数可知, $EC_{h0.375}$ 85% 的信号来自 60 cm 土层以上, $EC_{h0.75}$ 73% 的信号来自 60 cm 土层以上, $EC_{v0.75}$ 70% 的信号来自 60 cm 土层以上, $EC_{v1.5}$ 67% 的信号来自 90 cm 土层以上^[27]。多测量模式下表观电导率与不同土层实测电导率模型的精度普遍高于单一测定模式下的反演精度。说明多模式联用下表观电导率可以有效提高模型的反演精度。因此, 以 $EC_{h0.375}+(EC_{h0.75}+EC_{v0.75})/2+EC_{v1.5}$ 为自变量, 确定为表观电导率与不同深度土层实测电导率的最佳变量参数,

以下模型均用此表观电导率为自变量。

2.2 不同采样方案的电导率反演精度对比

为了探明不同采样方案对 EM38-MK2 表观电导率与土壤电导率之间反演模型精度的影响, 将各点位 63 个土壤样品按 2:1 的比例随机分成建模集与预测集。表 2 为不同采样方案下 A、B、C、AB、BC、AC、ABC 点电导率反演模型的精度。由表 2 可以看出从 A 点到 B 点再到 C 点 RMSE 在逐渐升高, 到达 C 点时 RMSE 达到最高为 0.64, 混合点位 AB 点到 ABC 点 RMSE 在逐渐升高, ABC 点位达到最高, RMSE 为 0.70, 说明单点采样方案下的 RMES 较混合点位采样方案下的 RMSE 普遍较低, ABC 点 RPD 为 1.60, R^2 为 0.80, AB 点 RPD 为 1.89, R^2 为 0.83, B 点 RPD 为 1.92, R^2 为 0.81, A 点 RPD 为 2.15, R^2 为 0.85, 说明单点采样方案较混合采样方案模型的精度更高。说明单点采样方案下模型的预测能力和稳定性较好。A 点的 R^2 为 0.85, 预测集与实测集的拟合度较高, 由 EM38-MK2 非线性响应

表 2 不同采样方案下电导率反演精度

Table 2 EC inversion accuracy relative to sampling scheme

采样方案	决定系数	均方根误差	相对分析误差
Sampling scheme	R^2	RMSE	RPD
A	0.85	0.37	2.15
B	0.81	0.42	1.92
C	0.62	0.64	1.45
AB	0.83	0.45	1.89
AC	0.73	0.50	1.74
BC	0.72	0.51	1.51
ABC	0.80	0.70	1.60

函数可知^[28], EMH 预测表层土壤能力大于 EMV 的预测能力。0.5 m 线圈预测表层土壤的能力大于 1m 线圈的预测能力^[29]。故 EM38-MK2 预测 A 点的拟合度高于其他点位, 而 A 点模型的稳定性更高, 实测电导率与表观电导率的误差小, 说明 A 点下的模型具有很好的预测能力。由 EM38-MK2 构造与原理可知(图 2), A 点为发射线圈, 原生磁场的强度随接收线圈距离的增加而逐渐降低^[30], 故取 B、C 点接收线圈的实测电导率会降低模型精度。因此 A 点采样方案为最佳采样方案, 模型具有很好的预测能力, 稳定性越高。

2.3 局部模型与全局模型的精度对比

为进一步提高 EM38-MK2 应用效果, 本研究对比了局部模型与全局模型的反演精度(表 3)。全局模型以 5—10 月共采集 108 个土壤剖面为总体, 以 2:1 分成建模集与预测集, 预测集 36 个土壤剖面

覆盖了研究区内总体样本电导率的变化范围。局部模型以每月 18 个剖面为总体, 分别以 2:1 分成建模集与预测集, 局部模型 5—10 月总体样本数累加。由表 3 可知, 局部模型所得的实测值与预测值的 R^2 、RPD 均大于全局模型的对值, 而 RMSE 则低于全局模型的对值。局部模型与全局模型相比, RPD 为 2.01~2.88, 表明局部模型有较好的预测能力。对于全局模型而言, 在 20~40 cm 土层模型下有较好的精度, R^2 与 RPD 分别达到了 0.73、1.89, 其他土层模型的 RPD 均未达到 2.0, 最高值仅为 1.81, 最低值为 1.35, 表明全局模型只能对电导率高值与低值进行一个粗略的预测甚至不能预测电导率值。通过对比, 说明局部模型的 R^2 、RMSE、RPD 要优于全局模型的对值。由于 EM38-MK2 测量值反映的是土壤空间范围内游离态电解质的含量, 局部模型同一时期下土壤含水量的变化较为稳定, 局部模型有较高的预测能力, 稳定性强。全局模型考虑到不同时期土壤含水量变化范围较大, 含水量变化剧烈, 降低了全局模型的精度, 只能粗略地估计实测电导率的高低值。

2.4 土壤含水量对电导率反演模型精度的影响

为进一步明确不同时期土壤含水量对电导率反演模型精度的影响, 通过获取不同梯度下的土壤表层样品, 将土壤含水量共设置为 4 个梯度, 分别为 <10%、10%~15%、15%~20%、>20%, 每个梯度共有 54 个土壤表层样品, 以 2:1 的比例分为建模集与预测集, 预测集样品覆盖了含水量的变化范围, 不同梯度下的实测电导率的模型精度见表 4。

表 3 局部模型与全局模型电导率反演精度

Table 3 EC inversion accuracies of the local models and overall model

土层 Soil layer/cm	局部模型 Local model			全局模型 Overall model		
	决定系数	均方根误差	相对分析误差	决定系数	均方根误差	相对分析误差
	R^2	RMSE	RPD	R^2	RMSE	RPD
0~20	0.80	0.81	2.06	0.58	1.61	1.55
20~40	0.90	0.44	2.88	0.73	0.56	1.89
40~60	0.85	0.45	2.12	0.70	0.53	1.81
60~80	0.83	0.31	2.10	0.66	0.49	1.63
80~100	0.81	0.27	2.01	0.56	0.70	1.35

表 4 不同土壤含水量下电导率反演模型精度对比

Table 4 Accuracy of the EC inversion models relative to soil moisture content

含水量 Water content/%	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	相对分析误差 RPD
<10	0.58	1.23	1.53
10~15	0.83	0.72	2.01
15~20	0.82	0.60	2.02
>20	0.82	0.53	2.04

从表 4 可以看出土壤含水量低于 10% 的情况下, 表观电导率与实测电导率之间的模型精度较低, 模型的预测能力较差。当土壤含水量高于 10% 时, 表明模型具有较好的预测能力。且不同土壤含水量 R^2 之间趋于稳定, RMSE 差异不大, RPD 变化幅度较小, 说明当土壤含水量高于 10% 时, 土壤水分差异对电导率模型精度影响不大。表 5 为局部模型不同时期下电导率反演模型精度。棉花整个生育期共滴水 5 次, 分别为 6 月 22 日第一次滴水, 7 月 9 日第二次滴水, 7 月 25 日第三次滴水, 8 月 13 日第四次滴水, 8 月 25 日第五次滴水。通过表 4 与表 5 对比可知, 5—6 月棉花处于苗期、蕾期, 棉田尚无滴水, 土壤含水量较低, 2018 年 5 月 5 日土壤样品含水量平均值为 11.09%, 土壤含水量小于 10% 的样本数占总样本数的 33.3%。2018 年 6 月 3 日土壤样本含水量平均值为 12.38%, 土壤含水量小于 10% 的样本数占总样本数的 38.9%。表观电导率与实测电导率之间的反演模型精度较差, 模型稳定度较低, 与表 4 的结论相同。2018 年 7—10 月土壤样本含水量平均值分别为 17.32%、15.39%、15.96%、20.08%, 小于 10% 的样本数为 0。EM38-MK2 表观电导率与实测电导率之间的反演模型精度较高, 模型稳定度高。总体而言, 局部模型能较好地预测土壤电导率, 模型稳定性较好。

3 讨 论

目前通过电磁感应技术利用多元线性回归方法建立的不同土层土壤含盐量的解译模型, 多以单一时期或不同季节之间数据进行建模, 并考虑到土壤含水量、土壤质地、pH 及地下水矿化度等因素对模

型精度的影响。本研究在此基础上, 利用多元线性回归方法建立棉田 6 个不同时期不同土层土壤电导率的反演模型, 对比了局部模型与全局模型的精度, 不同含水量梯度对模型精度的影响, 并确立最佳的多时期土壤盐渍化电磁感应定量反演模型的思路与方法。

本研究表明了全局模型不同时期 EM38-MK2 表观电导率与实测电导率之间的反演模型具有明显的差异性。不同时期之间的反演模型精度差异较大的原因可能在于, 一是不同时期土壤含水量不同, 土壤湿度越高, 土壤电导率越大, 表观电导率读数越大, 土壤含水量与降水量的大小、地下水埋藏深度、灌溉模式有关^[30]。阿拉尔垦区灌溉水源主要引自阿克苏河和塔里木河, 5—6 月为塔里木河的枯水期, 地下水位较深, 土壤含水量较低, 表观电导率读数相对其他月份较小, 造成不同时期电导率反演模型的精度差异较大。二是不同时期 EM38-MK2 测定温度差异较大, 造成全局模型预测能力较差^[31], 局部模型同一时期测定 EM38-MK2 采用新的线圈技术可进行温度补偿, 从而修正因为温度导致的电路温度漂移, 减小了因温度引起的数据漂移性^[27], 局部反演模型精度可得到大幅度提升。三是由于棉田采用滴灌模式, 膜下滴灌棉田的计划湿润深度通常设定为 40~60 cm^[32], 水盐运移的深度小于 0.75 m。EM38-MK2 有效测定深度可达 1.5 m, 灌水过后, 水盐运移仅仅局限于 0~60 cm 土层, 说明不同时期 $EC_{h0.375}$ 的数据变化较大, 而 $EC_{v1.5}$ 的数据较为稳定, 造成不同时期电导率反演模型参数的不同, 从而造成全局模型精度的差异较大。

如何有效提高全局模型电导率的反演精度, 从而降低不同土壤含水量对模型精度的影响, 对提高 EM38-MK2 监测大范围农田土壤盐渍化的效率有重要意义。对于消除不同土壤含水量对模型精度的影响能否成功应用于跨度更大, 面积更广区域农田土壤盐渍化 EM38-MK2 监测的相关研究, 还有待进一步研究。

4 结 论

由单点采集电磁感应仪发射线圈位置土样所构建的模型较多点采样方案下表观电导率与实测电导

表 5 不同时期电导率反演模型精度

Table 5 Accuracy of the EC inversion models relative to sampling period

日期 Date	土层 Soil layer/cm	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	相对分析误差 RPD
2018/5/5	0~20	0.78	1.94	1.55
	20~40	0.82	0.55	1.92
	40~60	0.85	0.85	1.50
	60~80	0.72	0.80	1.52
	80~100	0.88	0.53	1.61
2018/6/3	0~20	0.70	1.21	1.80
	20~40	0.82	0.35	1.84
	40~60	0.81	0.48	1.58
	60~80	0.80	0.22	1.98
	80~100	0.71	0.28	1.82
2018/7/7	0~20	0.79	1.76	1.93
	20~40	0.92	0.45	2.76
	40~60	0.89	0.43	1.95
	60~80	0.87	0.32	1.85
	80~100	0.88	0.26	2.09
2018/8/18	0~20	0.77	0.98	2.00
	20~40	0.92	0.55	2.10
	40~60	0.95	0.30	3.05
	60~80	0.95	0.22	3.19
	80~100	0.84	0.33	1.93
2018/9/9	0~20	0.80	0.55	2.06
	20~40	0.95	0.45	2.95
	40~60	0.77	0.60	1.73
	60~80	0.76	0.31	1.85
	80~100	0.70	0.41	1.96
2018/10/27	0~20	0.78	0.42	2.03
	20~40	0.87	0.23	2.99
	40~60	0.86	0.14	2.44
	60~80	0.89	0.08	2.41
	80~100	0.85	0.09	2.50

率之间模型的精度更高，单点采样方案可有效提高模型的精度，模型的稳定性更高。通过单点采样可以消除采样误差对模型精度的影响。表观电导率数据可信度较高，可用于模型的建立。EMH+EMV 多测量模式下表观电导率与实测电导率之间的模型精

度高于 EMH 或 EMV 单一测定模式，采用 $EC_{h0.375} + (EC_{h0.75} + EC_{v0.75})/2 + EC_{v1.5}$ 为建模因子，可以提高反演模型的精度。局部模型较全局模型的反演精度高，局部模型可以有效地反演农田不同时期的土壤电导率，可为农田土壤盐渍化监测提供一定的理论基础。

当土壤含水量低于 10% 时, 表观电导率只能对实测电导率的高低进行粗略预测; 当土壤含水量高于 10% 时, 电导率模型精度受土壤水分影响减弱, 表观电导率与实测电导率之间的反演模型精度较高, 模型稳定度增加。

参考文献 (References)

- [1] Peng J, Biswas A, Jiang Q S, et al. Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in southern Xinjiang Province, China[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1309—1319.
- [2] Sun Y F, Niu L C, Song F Q. Progress on salinization soil restoration method[J]. *International Journal of Ecology*, 2014, 3: 30—36. [孙玉芳, 牛丽纯, 宋福强. 盐碱土修复方法的研究进展[J]. *世界生态学*, 2014, 3: 30—36.]
- [3] Dong Q G, Yang Y C, Zhang T B, et al. Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 268—277.
- [4] Liang L C, Liu W T, Zhang X, et al. Research progress in phytoextraction of heavy metal contaminated saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (7): 1233—1241. [梁丽琛, 刘维涛, 张雪, 等. 盐土植物提取修复重金属污染盐土研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35 (7): 1233—1241.]
- [5] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24 (5): 943—960.
- [6] Shepherd K D, Walsh M G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (3): 988—998.
- [7] Altdorff D, Galagedara L, Nadeem M, et al. Effect of agronomic treatments on the accuracy of soil moisture mapping by electromagnetic induction[J]. *Catena*, 2018, 164: 96—106.
- [8] Abdu H, Robinson D A, Boettinger J, et al. Electromagnetic induction mapping at varied soil moisture reveals field-scale soil textural patterns and gravel lenses[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2017, 4 (2): 135—145.
- [9] García-Tomillo A, Mirás-Avalos J M, Dafonte-Dafonte J, et al. Estimating soil organic matter using interpolation methods with a electromagnetic induction sensor and topographic parameters: A case study in a humid region[J]. *Precision Agriculture*, 2017, 18(5): 882—897.
- [10] Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies[J]. *Geoderma*, 2014, 224: 33—45.
- [11] Jiang Z Y, Li X Y, Wu H W, et al. Linking spatial distributions of the patchy grass *Achnatherum splendens* with dynamics of soil water and salt using electromagnetic induction[J]. *Catena*, 2017, 149 (1): 261—272.
- [12] Jiang Z Y, Li X Y, Wu H W, et al. Using electromagnetic induction method to reveal dynamics of soil water and salt during continual rainfall events[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 152: 3—13.
- [13] Yao Y, Ding J L, Zhang F, et al. Monitoring the spatial variability of soil salinity and composite in dry and wet seasons in North Tarim Basin monitored with electromagnetic induction instruments[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34 (3): 765—772. [姚远, 丁建丽, 张芳, 等. 基于电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分空间变异特性[J]. *中国沙漠*, 2014, 34 (3): 765—772.]
- [14] Wu Y K, Liu G M, Su L T, et al. Response of three-dimensional spatial variability of soil salinity to change of season of Xinjiang based on electromagnetic induction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (14): 173—178. [吴亚坤, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于电磁感应研究新疆土壤盐分三维空间变异对季节的响应[J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (14): 173—178.]
- [15] Sun Y P. Spatial variability of soil salinity and organic based on GIS in Kenli county[D]. Yantai, Shandong: Ludong University, 2014. [孙运朋. 基于 GIS 的垦利县土壤盐分、有机质空间变异特征研究[D]. 山东烟台: 鲁东大学, 2014.]
- [16] Ning J, Ding J L, Yang A X, et al. Inversion of soil moisture content in the oasis of arid areas using hyperspectral and electromagnetic induction instruments[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36 (3): 258—265. [宁娟, 丁建丽, 杨爱霞, 等. 基于高光谱与电磁感应技术的干旱区绿洲土壤含水量反演研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36 (3): 258—265.]
- [17] Liu G M, Yang J S. Technique for rapid measurement and assessment of coastal groundwater salinity based on electromagnetic inducing theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23 (9): 76—80. [刘广明, 杨劲松. 基于电磁感应原理的沿海滩涂地下水矿化度快速测评技术[J]. *农业工程学报*, 2007, 23 (9): 76—80.]
- [18] Liu G M, Yang J S, Li D S. Based on electromagnetic sensing technology of hidden dyke safety problems and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25 (2): 196—200. [刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 基于电磁感应原理的堤坝隐患探测技术及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25 (2): 196—200.]
- [19] Wang J X, Hu Y X, Zhu J W. Characteristics of pan evaporation from 1961 to 2000 in Alar irrigated area of Xinjiang Province[J]. *Journal of Meteorology and*

- Environment, 2008, 24 (5): 29—31. [王建勋, 胡云喜, 朱建雯. 1961—2000 年新疆阿拉尔垦区蒸发量的变化特征[J]. 气象与环境学报, 2008, 24 (5): 29—31.]
- [20] Niu J L, Peng J, Wang J Q, et al. Analysis of climate changing characteristics in Alar area from 1961 to 2013[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30 (1): 72—77. [牛建龙, 彭杰, 王家强, 等. 新疆阿拉尔地区近 53 年气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30 (1): 72—77.]
- [21] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Determining soil salinity and plant biomass response for a farmed coastal cropland using the electromagnetic induction method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 119: 241—253.
- [22] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [23] Richards L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[J]. Soil Science, 1954, 64 (3): 290.
- [24] Saeys W, Mouazen A M, Ramon H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91 (4): 393—402.
- [25] Song J H, Zhu Y Q, Chen J H, et al. Interpretation of soil profile salinization characteristics based on electromagnetic inductor[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48 (3): 552—559. [宋江辉, 朱永琪, 陈建华, 等. 基于电磁感应仪的土壤盐渍化剖面特征解译研究[J]. 土壤通报, 2017, 48 (3): 552—559.]
- [26] Lü Z Z, Yang J S, Liu G M. Accurate models of interpreting soil electrical conductivity based on EM38-MK₂[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32 (10): 894—900. [吕真真, 杨劲松, 刘广明. 基于 EM38-MK₂ 的滨海土壤电导率精确解译模型[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32 (10): 894—900.]
- [27] Heil K, Schmidhalter U. Comparison of the EM38 and EM38-MK₂ electromagnetic induction-based sensors for spatial soil analysis at field scale[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110: 267—280.
- [28] Li H Y. Three dimensional variability and visualization of soil electrical conductivity in coastal saline land[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. [李洪义. 滨海盐土三维土体电导率空间变异及可视化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.]
- [29] Grellier S, Florsch N, Camerlynck C, et al. The use of Slingram EM38 data for topsoil and subsoil geoelectrical characterization with a Bayesian inversion[J]. Geoderma, 2013, 200/201: 140—155.
- [30] Zhao J W, Jiang P A, Sheng J D, et al. Analysis on the factors affecting the soil salt contents measured with electromagnetism generator EM38[J]. Arid Land Geography, 2005, 28 (3): 362—366. [赵军伟, 蒋平安, 盛建东, 等. EM38 电磁发生仪测定结果的影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28 (3): 362—366.]
- [31] 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.
- [32] Ning S R, Zuo Q, Shi J C. Advances in studying soil water and salt transport in the cotton filed with drip irrigation under film in Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33 (2): 121—125. [宁松瑞, 左强, 石建初. 新疆膜下滴灌棉田水盐运移特征研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33 (2): 121—125.]

(责任编辑: 檀满枝)