

DOI: 10.11766/trxb202010170576

冯春晖, 刘新路, 纪文君, 吴家林, 柳维扬, 彭杰. 基于电磁感应技术的棉田土壤电导率时空异质性研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 999–1011.

FENG Chunhui, LIU Xinlu, JI Wenjun, WU Jialin, LIU Weiyang, PENG Jie. Research on Spatio-temporal Heterogeneity of Soil Electrical Conductivity in Cotton Field Based on Electromagnetic Induction Technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 999–1011.

## 基于电磁感应技术的棉田土壤电导率时空异质性研究\*

冯春晖<sup>1</sup>, 刘新路<sup>1</sup>, 纪文君<sup>2</sup>, 吴家林<sup>1</sup>, 柳维扬<sup>1</sup>, 彭杰<sup>1†</sup>

(1. 塔里木大学植物科学学院, 新疆阿拉尔 843300; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 土壤剖面盐分的分布位置和含量的三维可视化研究, 对于干旱区盐渍化土壤定额灌溉具有重要意义。通过采集 4 个不同时期的土壤表观电导率数据和同步采集的土壤剖面样品的室内测定电导率数据, 利用多元线性回归方法构建了土壤剖面不同土层实测电导率与表观电导率之间的反演模型, 采用三维反距离权重插值法 (3D-IDW) 实现了土壤盐分的三维可视化, 在此基础上研究了新疆干旱区膜下滴灌棉田土壤剖面盐分的时空变化。结果表明: 表观电导率与实测电导率之间具有较好的相关性, 基于表观电导率数据构建的实测电导率反演模型的决定系数 ( $R^2$ ) 在 0.82~0.99 之间; 基于 3D-IDW 的三维可视化技术可高精度地展示出盐分在土壤剖面中的分布位置和含量, 不同时期土壤电导率交叉验证的  $R^2$  均大于 0.75; 土壤电导率的三维数据统计结果表明, 由于灌溉、覆膜和揭膜活动等人因素和气温、蒸发作用、地下水水位等自然因素的作用, 不同时期土壤剖面盐分的分布特征和含量均存在较大的差异, 3 月份土壤剖面盐分分布类型为均匀型, 0~100 cm 土壤剖面的电导率范围为 0.78~0.88  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , 6、7 和 10 月份为表聚型, 6 月和 10 月份的盐分主要集中分布于 0~20 cm, 0~20 cm 的电导率分别为 3.32 和 5.28  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , 7 月份的盐分主要集中于 0~40 cm, 0~40 cm 的电导率为 2.25~2.45  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。研究结果对于精确棉田灌溉时间节点和灌水量具有指导作用。

**关键词:** 土壤剖面; 盐渍化; 时空变异; 电磁感应; 三维可视化

中图分类号: S156.4 文献标志码: A

## Research on Spatio-temporal Heterogeneity of Soil Electrical Conductivity in Cotton Field Based on Electromagnetic Induction Technology

FENG Chunhui<sup>1</sup>, LIU Xinlu<sup>1</sup>, JI Wenjun<sup>2</sup>, WU Jialin<sup>1</sup>, LIU Weiyang<sup>1</sup>, PENG Jie<sup>1†</sup>

(1. College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** 【Objective】Characterizing spatial and temporal variability of soil salinity at field and landscape scales is important for a variety of agronomic and environmental concerns. In arid regions, soil salt content and its distribution position in the profile

\* 兵团中青年创新领军人才项目 (2020CB032)、国家重点研发计划项目 (2018YFE0107000) 和国家自然科学基金项目 (42071068) 共同资助 Supported by the XPCC Young and Middle-aged Innovative Leading Talents Project (No.2020CB032), National Key R&D Project (No.2018YFE0107000) and the National Natural Science Foundation of China (No.42071068)

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

作者简介: 冯春晖, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤盐渍化时空动态变化监测。E-mail: Chunhui.F@outlook.com。

收稿日期: 2020-10-17; 收到修改稿日期: 2021-02-22; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-09-26

are important factors for the calculation of the irrigation quota of salinized soil. Due to the strong spatial variability of soil salinity content, the guiding value of soil surface salinization information for quota irrigation is very limited. A three-dimensional visualization study of the distribution and content of salinity in the soil profile is of great significance to the fixed irrigation of saline soil. The objective of this study was to evaluate apparent electrical conductivity (ECa) directed soil sampling as a basis for monitoring management-induced Spatio-temporal change in soil salinity. 【Method】 A soil salinity assessment study was conducted on an 18 hm<sup>2</sup> saline-sodic field in Alar's Agricultural Science and Technology Park from March to November 2018. The study evaluated the three-dimensional spatio-temporal change that had occurred as a result of irrigation with drainage water over that period. Using geospatial electromagnetic induction (EMI) measurements of ECa and a spatial response surface sampling design 18 soil profile sites were selected and they reflected the ECa measurements every time. At each site soil profile samples were taken at 0.2 m intervals to a depth of 1 m and analyzed for electrical conductivity of the saturation extract (ECe). Also, the soil apparent conductivity data of four different periods and the electrical conductivity data of soil profile samples collected synchronously were analyzed. The inversion model between measured and apparent conductivity of different soil layers in the soil profile was constructed by the multiple linear regression method. Furthermore, the 3D visualization of soil salinity was realized by using 3D-IDW and the spatial and temporal changes of soil salinity in cotton field under mulch drip irrigation of Xinjiang were studied. 【Result】 The results showed that there was a good correlation between the apparent conductivity and the measured conductivity. The determination coefficient ( $R^2$ ) of the measured conductivity inversion model based on the apparent conductivity data was between 0.82 and 0.99. The results of 3D-dimensional data statistics of soil electrical conductivity showed that the distribution characteristics and content of soil salinity in different periods are quite different. These differences were attributed to human factors such as irrigation, film mulching and uncovering, and natural factors such as air temperature, evaporation and groundwater level. Also, the distribution type of soil salinity in March was uniform and the electrical conductivity range of the 0-100cm soil profile was 0.78 to 0.88 dS·m<sup>-1</sup>. The salinity in June and October was mainly concentrated in 0-20 cm and the electrical conductivity was 3.32 to 5.28 dS·m<sup>-1</sup>, respectively. Also, the electrical conductivity of 20-100 cm was 0.99-1.36 to 0.95-1.70 dS·m<sup>-1</sup>, respectively. In July, the salinity was mainly concentrated in 0-40 cm, and the conductivity in 0-40 cm was 2.25-2.45 dS·m<sup>-1</sup> while the conductivity of 40-100 cm was 0.87-0.93 dS·m<sup>-1</sup>. 【Conclusion】 An assessment of three-dimensional spatio-temporal changes in soil salinity was conducted to provide a preliminary evaluation of the sustainability of irrigation quota on the Agricultural Science and Technology Park to ascertain its potential as an alternative for drainage water disposal. The results of this study can be used as guidance for accurate irrigation application in cotton fields.

**Key words:** Soil profile; Salinization; Spatial and temporal variability; Electromagnetic induction; 3D visualization

土壤盐渍化是威胁土地生产力的全球性问题之一。据统计,约 10%的陆地面积为盐渍土,次生盐渍化土壤主要分布在干旱与半干旱荒漠灌溉农业地区。干旱地区农田土壤次生盐渍化表现突出,已成为严峻的环境与资源问题,也是世界性的生态问题<sup>[1-4]</sup>。干旱地区因强烈的蒸发作用,相对于湿润地区而言,盐分在土壤剖面中的运移周期更短、频率更高,时空变异性强烈,使得田间采样结合室内分析的传统监测方式难以在三维空间上有效获取土壤剖面盐分的详细变化信息,而在田间尺度表征土壤盐渍化的时空变化对于各种农艺和环境问题至关重要。针对农田土壤盐渍化定额灌溉而言,除土壤水分外,高浓度的土壤盐溶液同样会导致作物生理

性干旱,从而影响其生长发育<sup>[5]</sup>。因此,土壤剖面盐分含量也是制定定额灌溉策略的重要依据。对于干旱地区大面积盐渍化与次生盐渍化农田的生产管理而言,迫切需要一种简单、快速、准确且能可视化土壤剖面盐分的监测方法,从而保证盐渍化和次生盐渍化农田安全、高效的生产。

田间尺度往往存在十分复杂的土壤盐分空间变异状况。由于需要大量土壤样本才能准确掌握土壤盐渍化的时空变异特征,而传统监测方法土壤样品的采集多以采挖、土钻钻孔侵入式方法为主,费时费力,且破坏性强,难以满足快速、动态地获取农田盐渍化信息的要求<sup>[6-7]</sup>。电磁感应技术具有原位采集不同深度表观电导率数据的优势,可有效减低采

样成本，能科学、高效、快速获取不同深度土层盐渍化信息等优点，很好地克服了传统取样方式的不足，已成为农田土壤盐渍化监测领域中土壤剖面信息采集的一种先进手段<sup>[8]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来，表观电导率表征土壤盐分的方法在土壤盐渍化监测和评价中已得到了广泛应用<sup>[9-12]</sup>。Jiang 等<sup>[13]</sup>利用电磁感应技术和三维反演模型和算法表征和量化了新疆阿克苏地区 4 种典型土地利用类型下土壤盐分的空间变异性。Guo 等<sup>[14]</sup>利用 EM38 数据进行了土壤盐分时空变异数字制图，并绘制了不同位点特异性区域的土壤时空变化图，对制定适宜的土壤盐渍化管理策略具有重要的意义。

土壤盐分的三维空间可视化是了解盐分动态变化，确定土壤盐渍化程度与制定盐渍化土壤改良方案的可靠手段。地统计方法是研究土壤属性空间变异的有效方法之一，土壤盐分在水平与垂直剖面上的微小变化的精确空间信息对于诸多农业实践均至关重要的，因此使用三维地统计方法研究土壤空间变异性具有重要的意义，同时也可丰富三维空间变异的插值理论，为实施精准农业提供了可能<sup>[15]</sup>。Li 等<sup>[16]</sup>利用三维普通克里格插值方法预测了水稻田土壤盐分的空间变化。Liu 等<sup>[17]</sup>利用三维普通克里格插值方法对黄河三角洲地区土壤盐分空间变化进行了评估。前人在基于电磁感应技术的土壤盐渍化监测领域与三维地统计空间插值方面做了大量的研究，为后续进一步深入研究提供了良好借鉴。目前针对土壤盐渍化三维空间变异的内容已有部分学者进行了研究，但仅仅是利用某一时期（或者不同季节）的数据对土壤盐分空间变异性进行研究，而关于利用多时期数据描述田间土壤盐渍化三维时空变化特征的研究甚少。在干旱与半干旱地区，由于较高的蒸降比，土壤盐分随降水、灌溉水和蒸发作用在土壤剖面中频繁运移并重新分布与集聚，考虑到盐分是否集聚于作物根系的分布位置而造成盐害与否，土壤盐分在剖面中的分布位置及其对应含量的差异又会对作物产生怎样的影响，结果对棉花的高产栽培至关重要。因此，本文以新疆干旱区机采棉田土壤电导率为研究对象，以电磁感应传感器采集的表观电导率数据为先验知识进行土壤剖面建模样本采集方案的优化设计，从而有效提高采样效率，利用多元线性回归模型、三维地统计学空间分析技

术结合不同灌溉时期，研究了新疆干旱区典型地块土壤剖面盐分的三维时空变化特征，旨在为农田定额灌溉提供解决方法和科学决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

新疆生产建设兵团是我国优质棉基地和特色林果基地，2017 年新疆棉花种植面积为 221.75 万  $\text{hm}^2$ ，其棉花产量占全国棉区产量的 80% 以上，其中长绒棉出口占全国的 70%。而南疆因其特殊的地理气候原因，农作物可选性较少，植棉面积基本保持稳定。研究区选择在新疆南疆阿拉尔市国家农业科技园区内（见图 1），地处和田河、阿克苏河与叶尔羌河三河交汇处的塔里木河上游冲积平原与三角洲地带，地势为西南高东北低，坡度为 0.3%~0.7%。研究区位于 40°31'N，81°17'E，多年年均蒸发量为 1 988  $\text{mm}^{[18]}$ ，多年年均降水量为 48.5  $\text{mm}^{[19]}$ ，蒸降比约为 40。该区为塔里木河平原冲积潜水含水层，为地下水径流排泄区，地下水埋深 1.4~1.7 m，最低水位出现在 1—2 月，地下水位年变化幅度为 0.2~0.5 m。地下水径流缓慢，流向为自西向东，其水力坡度为 0.04%~0.06%，地下水类型为河谷性冲击层潜水，属硫酸盐类水，矿化度较高，一般为 1  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ~5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  之间，普遍在 3  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右，局部高达 10  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，水化学类型为  $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$  型或  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$  型。园区内主要作物为棉花，农业生产水平高，体现在作物单产水平高、农业机械化程度高、集约化程度高，人均管理定额远远大于南疆人均 0.20  $\text{hm}^2$  的水平。园区内规模化、标准化、产业化生产经营为师市农业生产提供了示范作用<sup>[20]</sup>。研究区约有 18  $\text{hm}^2$  机采棉田，试验区内棉花品种为新陆中 78 号，春灌和冬灌采用大水漫灌，生育期灌溉模式采用膜下滴灌，棉田整个生育期共滴灌 5 次，分别为 6 月 22 日第一次滴水，滴水 450  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ，7 月 9 日、7 月 25 日、8 月 13 日、8 月 25 日进行第二、第三、第四、第五次滴水，每次滴水 600  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。11 月 20 日进行冬灌，共灌水 59 400  $\text{m}^3$ 。土壤质地为砂壤土，土壤有机质含量在 6.3~13.93  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间，平均含量为 8.76  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究区灌溉用水主要来自塔里木河和水库。

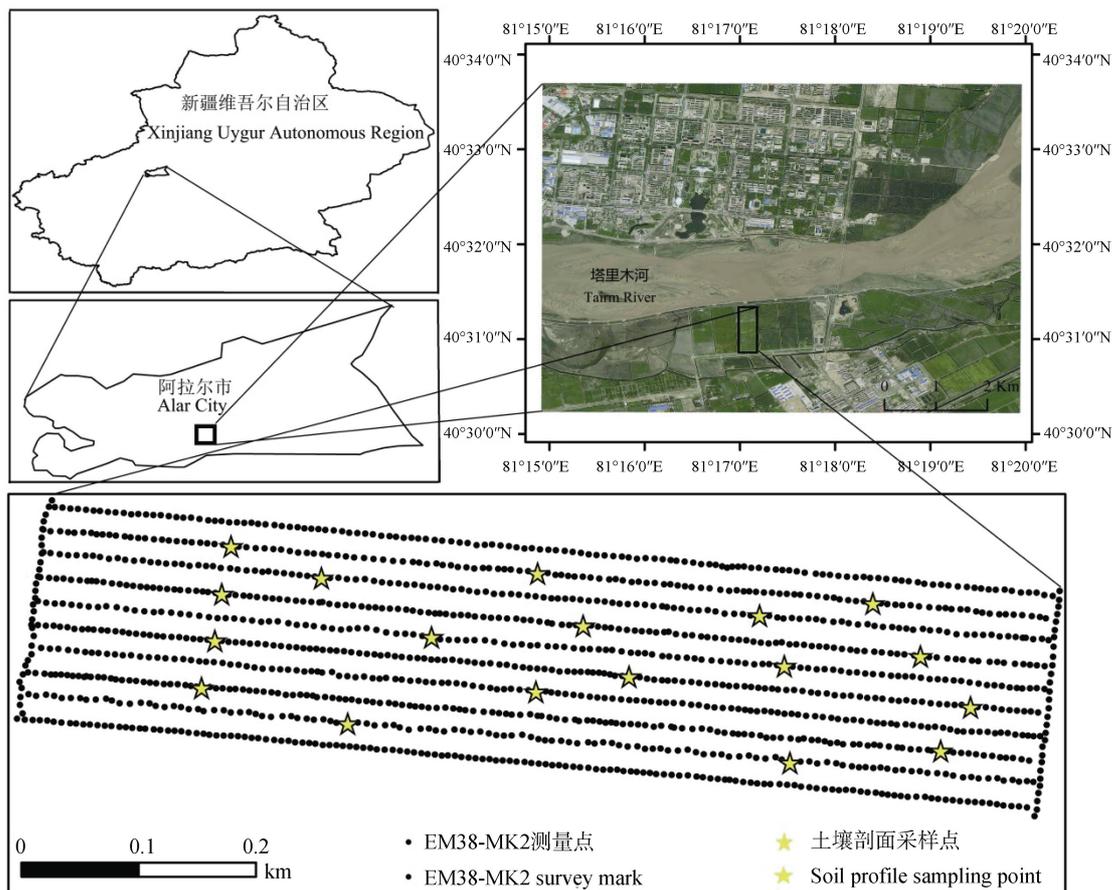


图1 试验区地理位置、EM38-MK2 调查点分布

Fig. 1 Geographical location of experimental area and distribution of EM38-MK2 survey sites

## 1.2 土壤表观电导率采集

试验采用大地电导率仪 EM38-MK2 (Geonics, Canada) 进行表观电导率 ( $ECa$ ,  $mS \cdot m^{-1}$ ) 测定, 根据试验区的宽度, 分为 10 个测量行, 行距为 20 m。将 EM38-MK2 装载入木质推车中, 沿膜间进行表观电导率的测定 (7 月与 10 月沿膜上测定)。于 2018 年 3 月 15 日 (冬灌后) 棉花播种前、6 月 3 日 (第一次滴灌前)、7 月 7 日 (第二次滴灌前)、10 月 27 日 (棉花已收获, 未冬灌) 共进行 4 次表观电导率数据的采集, 每次均采用 EM38-MK2 垂直测量模式由南向北进行, 共采集 10 个测量行, 仪器设置为自动记录模式, 频率为一秒采集一组数据, 垂直测量模式为 EMV, 测量深度分别为 0~1.5 m 与 0~0.75 m, 获得的表观电导率分别表示为  $EC_{V1.5}$  与  $EC_{V0.75}$ , 测点间距为 1 m, 每个时期采集表观电导率数据约 10 000 组。EM38-MK2 测量点与土壤采样剖面点分布见图 1。试验区获取的线状表观电导率数据为土壤剖面点的采集提供了基础, 同时也为线性模型反

演土壤实测电导率与三维地统计插值提供了充足的数据源。

## 1.3 土壤样品采集与测定

构建土壤实测电导率与土壤表观电导率之间的关系模型, 需要实地采集一定数量的土壤剖面样本, 为了保证模型的稳定性和普适性, 通常采用高密度采样来解决这个问题, 这样会导致工作量加大和效率低下。而土壤表观电导率可以大致反映出土壤盐渍化程度, 一般而言, 土壤表观电导率数据越大, 说明土壤盐渍化程度越严重。因此, 土壤表观电导率数据可为土壤盐分含量等级的划分提供先验知识, 可有效降低土壤剖面样品的采集数量, 从而提高土壤剖面建模样本的采集效率。根据不同时期整个试验区采集的土壤表观电导率数据, 分别将其分为低 ( $ECa < 50 mS \cdot m^{-1}$ )、中 ( $50 mS \cdot m^{-1} \sim 100 mS \cdot m^{-1}$ )、高 ( $> 100 mS \cdot m^{-1}$ ) 三组, 从每组土壤表观电导率数据中随机抽取 6 个数据, 并采集该土壤表观电导率测定位置的土壤剖面样本<sup>[21]</sup>。于 2018

年 3 月 15 日、6 月 3 日、7 月 7 日、10 月 27 日共进行了 4 次表观电导率与土壤剖面样品的采集，每次采集 18 个土壤剖面样点（表 1）。土壤剖面按 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 进行分层取样<sup>[22]</sup>，采集的土壤剖面样品装入自封袋并编

号，带回实验室取部分样品用质量烘干法立即测定土壤含水量。剩余土壤样品自然风干后，挑出残膜、石砾、根系等残渣后过 2 mm 筛装入信封袋后备用。通过制备土壤饱和浸提液<sup>[21, 23]</sup>后，采用雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定土壤电导率 E<sub>Ce</sub> (dS·m<sup>-1</sup>)。

表 1 不同时期土壤剖面点位表观电导率特征统计值

Table 1 The statistical characteristic values of geospatial electromagnetic induction measurements of E<sub>Ca</sub> at different periods

日期 Data	表观电导率 E <sub>Ca</sub>	最小值 Min / (dS·m <sup>-1</sup> )	最大值 Max / (dS·m <sup>-1</sup> )	均值 Mean / (dS·m <sup>-1</sup> )	变异系数 CV/%	峰度 Skew.	偏度 Kunt.
2018/03/15	EC <sub>v1.5</sub>	0.26	2.05	0.77	63.24	1.51	1.34
	EC <sub>v0.75</sub>	0.55	2.61	0.63	96.29	6.21	2.19
2018/06/03	EC <sub>v1.5</sub>	0.20	1.39	0.72	50.63	-1.16	0.29
	EC <sub>v0.75</sub>	0.13	1.73	0.62	75.44	0.18	1.04
2018/07/07	EC <sub>v1.5</sub>	0.19	1.60	0.79	51.99	-0.64	0.22
	EC <sub>v0.75</sub>	0.36	2.21	1.16	56.13	-1.57	0.35
2018/10/27	EC <sub>v1.5</sub>	0.44	1.99	1.00	46.13	-0.29	0.90
	EC <sub>v0.75</sub>	0.49	1.78	1.05	40.59	-1.10	0.46

#### 1.4 基于土壤表观电导率数据的土壤电导率解译模型构建与验证

将每个时期采集的 18 组土壤剖面样本实测的电导率根据数值大小进行排序，建模样本和验证样本按 2:1 的比例进行抽样，即每相邻的 3 个样本中随机抽取 2 个作为建模数据，剩余的 1 个作为验证数据，最后分为 12 个建模数据和 6 个验证数据。采用一元线性和多元线性方法构建土壤电导率与土壤表观电导率之间的反演模型，采用决定系数 (Determination coefficient,  $R^2$ )、均方根误差 (Root mean squared error, RMSE)、相对分析误差 (Relative percent deviation, RPD)、平均误差 (ME) 对模型进行评价。一般认为，当  $RPD \geq 2.0$  时表明模型具有较好的预测能力。 $R^2$  值越接近于 1、RMSE 越接近 0，ME 越接近 0，表示其预测能力越强，稳定性越高，误差越小<sup>[15, 24-25]</sup>。

#### 1.5 空间插值方法与结果验证

反距离权重插值方法 (IDW) 是一种精确性插值方法，具有形式简单和不受维度限制等优点，可用于三维空间插值。IDW 是基于“地理第一定律”的基本假设：即两个物体相似性随它们之间的距离增大而减小。以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均，离插值点越近的样本赋予的权重越大，

该方法简单易行，直观且准确性高，在已知点分布均匀的情况下插值效果较好。本文使用 1980 年 Franke 和 Nielson<sup>[26]</sup>改进后已知点权重系数计算方法，此方法较 Shepard 经典方法可得到精度更高的结果。相关计算公式为：

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (1)$$

$$\text{其中 } w_i = \frac{\left[ \frac{R - h_i}{Rh_i} \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{R - h_i}{Rh_i} \right]^2} \quad (2)$$

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

式中， $F$  为待估点的属性值； $w_i$  为分配对待估点的权重系数； $h_i$  为待估点到插值点的距离； $R$  为插值点到最近待估点的距离； $n$  为待估点的总数； $(x, y, z)$  为每个插值点的坐标； $(x_i, y_i, z_i)$  为每个待估点的坐标； $f_i$  为已知插值点的属性值。

本研究将不同时期总体样本数的 75% 作为训练数据集，25% 作为独立验证数据集。不同时期样本总数为 10 000，其中 7 500 个为插值数据集，2 500 个为验证数据集。并采用均方根误差 (root mean

squared error, RMSE)、平均误差 (ME)、测量值与实测值的决定系数 ( $R^2$ ) 来验证插值结果的精度<sup>[27-28]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤电导率线性模型与交叉验证

以不同时期选定的 12 个土壤剖面所测的土壤电导率及 EM38-MK2 垂直模式测得的土壤表观电导率  $EC_{V0.75}$  与  $EC_{V1.5}$  为建模样本, 分别采用单变量线性和多变量线性方法构建不同时期土壤电导率反演模型, 通过对模型的评价, 优选出每个时期不同土层土壤电导率  $E_{Ce}$  最佳模型, 每个时期的具体模型和决定系数见表 2。由表 2 可知, 不同时期各个土层的模型均为多变量模型优于单变量模型, 模型均具有较高的精度,  $R^2$  在 0.70~0.96 之间。

利用剩余的 6 个样本对模型进行验证, 验证结果如表 3 所示。由表 3 可知, 不同时期各层土壤电导率的实测值与验证集的  $R^2$  均大于 0.80, ME 的范围在 -0.45~0.32 之间, RMSE 均小于 1.30  $dS \cdot m^{-1}$  之间, RPD 均大于 2.0, 表明模型具有较好的预测能力, 与 Liu 等<sup>[17]</sup>、吴亚坤等<sup>[29]</sup> 研究结果相似。验证结果表明利用 EM38-MK2 表观电导率能高精度地反演水平与垂直剖面中的土壤电导率

数据。鉴于交叉验证的良好结果, 将不同时期各土层的模型应用于整个测点, 反演出不同时期各个土层的电导率, 再结合 3D-IDW 插值法对整个地块进行插值与三维可视化, 进而分析棉田土壤盐渍化时空变异特征。

### 2.2 土壤盐渍化的时间变异

通过不同时期各土层多元线性回归模型计算出各土层的土壤电导率, 并对每个时期的土壤电导率进行统计。表 4 展示了不同时期不同深度土层的土壤电导率特征统计值。由表 4 可知, 不同时期的土壤盐分在土壤剖面中的分布特征和含量存在明显差异, 3 月份的土壤盐分在剖面中呈现均匀分布特征, 且盐分含量较低, 不同深度土层电导率的平均值为 0.78~0.88  $dS \cdot m^{-1}$ , 这主要由于冬灌采用大水漫灌的方式, 将 0~100 cm 土壤剖面的盐分淋洗至 100 cm 以下, 且冬灌后由于气温低于 0℃, 土壤处于冰冻状态, 盐分在土壤中无法从深层向表层运移。6、7 和 10 月份的土壤盐分呈现出明显的表聚特征, 其中 6 月份和 10 月份的土壤剖面盐分主要聚集于 0~20 cm, 该土层在 6 月份和 10 月份对应的电导率平均值分别为 3.32 和 5.28  $dS \cdot m^{-1}$ , 而分布于 20~100 cm 深度范围内的 4 个土层 6 月份和 10 月份的电导率平均值范围分别为 0.99~1.36 和 0.95~1.70  $dS \cdot m^{-1}$ ,

表 2 不同时期各土层土壤电导率的反演模型

Table 2 Inversion models of soil electrical conductivity in different periods

土层 Soil layer/cm	2018/03/15		2018/06/03	
	模型 Model	$R^2$	模型 Model	$R^2$
0~20	$E_{Ce}=0.178X_1-0.003X_2+0.275$	0.91	$E_{Ce}=0.101X_1-0.085X_2+3.368$	0.94
20~40	$E_{Ce}=-0.007X_1+0.026X_2-0.556$	0.80	$E_{Ce}=0.025X_1-0.011X_2+0.296$	0.77
40~60	$E_{Ce}=0.003X_1+0.012X_2-0.194$	0.90	$E_{Ce}=0.003X_1+0.018X_2-0.318$	0.79
60~80	$E_{Ce}=0.004X_1+0.011X_2-0.135$	0.91	$E_{Ce}=0.001X_1+0.017X_2-0.188$	0.82
80~100	$E_{Ce}=-0.001X_1+0.013X_2-0.064$	0.86	$E_{Ce}=-0.00X_1+0.021X_2-0.045$	0.78
土层 Soil layer/cm	2018/07/07		2018/10/27	
	模型 Model	$R^2$	模型 Model	$R^2$
0~20	$E_{Ce}=0.045X_1-0.028X_2+0.981$	0.75	$E_{Ce}=-0.001X_1+0.055X_2-0.170$	0.93
20~40	$E_{Ce}=0.007X_1+0.017X_2-0.516$	0.81	$E_{Ce}=0.020X_1-0.004X_2+0.886$	0.96
40~60	$E_{Ce}=0.002X_1+0.011X_2-0.075$	0.76	$E_{Ce}=0.0004X_1+0.012X_2+0.607$	0.96
60~80	$E_{Ce}=0.003X_1+0.022X_2-0.895$	0.82	$E_{Ce}=0.013X_1-0.002X_2+0.327$	0.90
80~100	$E_{Ce}=-0.001X_1+0.012X_2-0.002$	0.70	$E_{Ce}=0.008X_1-0.001X_2+0.352$	0.93

注:  $X_1$  与  $X_2$  分别为自变量  $EC_{V0.75}$  与  $EC_{V1.5}$ 。Note:  $X_1$  and  $X_2$  are independent variables  $EC_{V0.75}$  and  $EC_{V1.5}$  respectively.

表 3 不同时期土壤电导率反演模型的交叉验证结果

Table 3 Cross-validated results of models for soil electrical conductivity at different periods

日期 Date	土层 Soil layer/cm	决定系数 $R^2$	平均误差 ME	均方根误差 RMSE	相对分析误差 RPD
2018/03/15	0~20	0.82	-0.24	0.51	2.01
	20~40	0.85	0.02	0.41	2.51
	40~60	0.93	-0.06	0.26	3.03
	60~80	0.87	-0.25	0.48	2.02
	80~100	0.85	-0.16	0.46	2.02
2018/06/03	0~20	0.85	-0.09	0.86	2.47
	20~40	0.91	-0.15	0.33	2.48
	40~60	0.96	0.32	0.36	2.13
	60~80	0.89	-0.04	0.23	2.86
	80~100	0.82	0.04	0.22	2.25
2018/07/07	0~20	0.89	-0.12	1.22	2.23
	20~40	0.91	-0.02	0.50	2.50
	40~60	0.98	-0.15	0.35	2.01
	60~80	0.98	0.20	0.40	2.09
	80~100	0.96	-0.01	0.10	4.78
2018/10/27	0~20	0.99	-0.45	0.56	4.56
	20~40	0.92	0.05	0.21	3.35
	40~60	0.95	0.04	0.17	3.73
	60~80	0.94	-0.02	0.13	3.97
	80~100	0.98	-0.02	0.04	6.77

这两个时期土壤盐分聚集于 0~20 cm 的原因和长时间未进行灌溉有关,自 2017 年 11 月份冬灌后至 2018 年 6 月 3 日之间,未进行人为灌溉,8 月 25 日滴灌完之后也未进行灌溉,再加上这两个期间降水稀少,同时本区域自 4 月初以后,气温均在 20℃ 以上,蒸发强烈,所以盐分随着土壤水分的蒸发聚集于 0~20 cm。7 月份的土壤剖面盐分主要聚集于 0~40 cm,0~40 cm 范围内的 2 个土层的电导率平均值为 2.45 和 2.25  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ,40~100 cm 范围内的 3 个土层的电导率平均值范围为 0.87~0.93  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ,7 月份的土壤盐分聚集于 0~40 cm 深度的原因和滴灌的水量大小有关,最大滴灌水量仅为 600  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,该水量的最大湿润深度为 40 cm,因此,前期聚集

于 0~20 cm 的盐分仅能在 0~40 cm 的土层深度内进行运移。若按一般对变异系数 CV 的评估,当  $\text{CV}<10\%$  时,为弱变异性,  $10\%\leq\text{CV}<100\%$  为中等变异性,  $\text{CV}\geq 100\%$  为强变异性<sup>[30]</sup>。不同时期土壤电导率主要属中等变异性,而 6 月 3 日 0~40 cm 土层电导率属强变异性,主要原因是 6 月温度达到了最高,蒸发量较其他月份也达到了最高<sup>[23]</sup>,造成表层土壤水盐的强变异性,此时表层土壤电导率出现极值,为 20.40  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。土壤盐分具有高度的时空异质性,在气象、地形、人为因素、土壤性质和生物因素复杂的相互作用下,共同造成了作物根系范围内繁杂的盐分三维空间分布模式,其变异系数往往大于 60%<sup>[31]</sup>。

表 4 不同时期不同土层土壤电导率统计特征值

Table 4 The statistical characteristic values of soil electrical (ECe) attributes at different periods

日期 Date	土层 Layer/cm	最小值 Min / (dS·m <sup>-1</sup> )	最大值 Max / (dS·m <sup>-1</sup> )	平均值 Mean / (dS·m <sup>-1</sup> )	标准差 SD	变异系数 CV/%	偏度 Skew.	峰度 Kurt
2018/03/15	0~20	0.35	3.19	0.88	0.48	54.80	1.63	2.48
	20~40	0.06	3.72	0.87	0.61	70.10	0.86	1.14
	40~60	0.13	2.76	0.78	0.45	58.30	1.08	1.01
	60~80	0.21	2.82	0.88	0.44	50.00	1.01	0.94
	80~100	0.23	2.39	0.81	0.35	43.20	0.93	0.92
2018/06/03	0~20	0.85	20.40	3.32	5.33	161.50	-0.01	-0.19
	20~40	0.01	5.99	1.28	1.38	108.10	0.21	-0.34
	40~60	0.05	4.51	1.36	0.69	50.80	0.40	0.06
	60~80	0.06	4.11	1.09	0.64	58.80	0.45	0.17
	80~100	0.12	3.51	0.99	0.52	53.10	0.51	0.29
2018/07/07	0~20	0.26	6.89	2.45	1.22	49.80	0.97	0.03
	20~40	0.58	8.55	2.25	1.54	68.60	0.46	-0.04
	40~60	0.04	2.92	0.87	0.50	57.30	0.46	-0.03
	60~80	0.16	3.52	0.93	0.59	63.30	0.45	0.10
	80~100	0.05	3.63	0.88	0.48	54.50	0.47	0.96
2018/10/27	0~20	1.40	18.69	5.28	1.76	33.30	0.89	3.63
	20~40	0.15	5.17	1.41	0.80	56.70	0.20	-0.44
	40~60	0.78	4.83	1.70	0.425	25.10	0.78	2.99
	60~80	0.09	3.30	0.95	0.45	46.80	0.26	-0.11
	80~100	0.74	2.77	1.19	0.20	16.50	1.11	5.04

在干旱地区, 由于盐分一直在土壤中聚集, 土壤盐分在作物根系范围内积累对农业的发展会产生各种问题。土壤盐渍化影响作物正常的生长发育, 严重时还会导致作物减产。

### 2.3 不同时期土壤电导率三维分布特征

不同时期土壤剖面电导率散点数据由表 2 的模型重建, 计算三维插值时, 平面直角坐标系的 X 轴长为 200 m, Y 轴为 1 000 m, Z 轴的深度为 1 m, 插值栅格单元尺寸为 10 m×10 m×0.1 m, 共计得到 20×100×10=20 000 个栅格单元。不同时期不同土层土壤剖面电导率数据均整理成 X-Y-Z 格式进行 3D-IDW 插值。进行 3D-IDW 插值时, 将 Z 轴扩大了 300 倍, 同时将搜索点数设为 6<sup>[28]</sup>, 得到了土壤电导率的时空分布图 (图 2)。经交叉验证得到了不同时期 3D-IDW 插值结果的精度 (表 5)。不同时期

的 ME 范围在 -0.02~0.01 之间, RMSE 在 0.21~0.56 之间, 不同时期的预测值和实测值之间的决定系数在 0.76~0.77 之间, R<sup>2</sup> 均大于 0.75。由此可见, 3D-IDW 插值方法在预测多时期土壤电导率三维时空变异上均得到了较好的精度。

图 2 直观地展现了不同时期土壤盐分的三维时空分布, 通过实验数据的分析与参考值的评价, 可以有效减少棉田灌水实践选择的主观性<sup>[32]</sup>。根据美国盐分实验室定义土壤盐渍化的分级标准<sup>[23]</sup>, 将试验区土壤饱和电导率 (ECe) 分为 5 级, 即 0~2 dS·m<sup>-1</sup> 为非盐渍化土壤, 2~4 dS·m<sup>-1</sup> 为轻度盐渍化土壤, 4~8 dS·m<sup>-1</sup> 为中度盐渍化土壤, 8~16 dS·m<sup>-1</sup> 为重度盐渍化土壤, >16 dS·m<sup>-1</sup> 为盐土的土壤盐分分级标准。如图 2 所示, 冬灌后 3 月份的试验区大部分区域土壤含盐量较低, 土壤电导率平均含量为 0.84

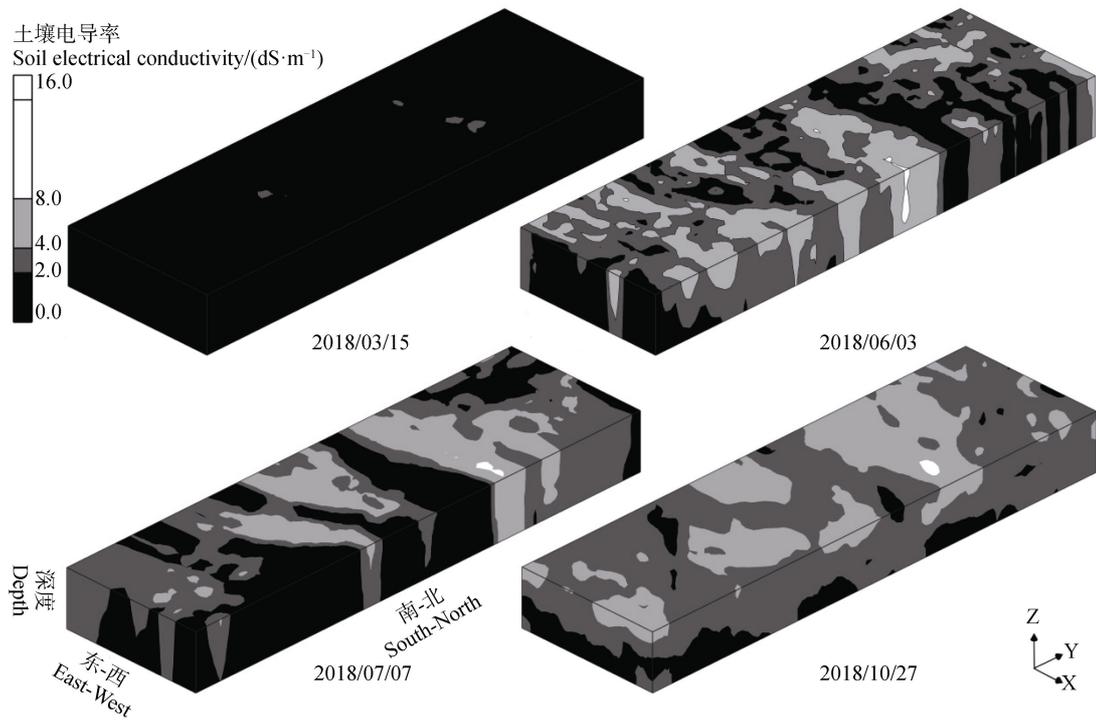


图 2 不同时期土壤盐分三维分布图

Fig. 2 Three-dimensional distribution of soil salinity in different periods

表 5 不同时期 3D-IDW 插值结果交叉验证

Table 5 Cross-validated results of 3D-IDW interpolation at different periods

日期 Date	决定系数 $R^2$	预测均方根误差 RMSE	平均误差 ME
2018/03/15	0.77	0.21	-0.02
2018/06/03	0.76	0.27	-0.02
2018/07/07	0.76	0.40	-0.03
2018/10/27	0.77	0.56	0.01

$\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ，以非盐渍化土壤为主，仅有极少数轻度盐渍化土壤呈现点状分布。棉花播种后的 6—10 月，中度、重度盐渍化和盐土的土壤面积明显增加，但分布特征具有一定差异，其中 6 月份重度盐渍化土壤的分布较分散，而 7 月份和 10 月份的分布较集中。相对而言，10 月份的土壤盐渍化程度要重于其余几个月份，主要以中度和重度盐渍化为主，非盐渍化土壤面积所占比重很低，而 6 月份和 7 月份的非盐渍化和轻度盐渍化土壤面积所占比重明显比 10 月份高。

根据试验区南北走向的地形特征，重点选取了

试验区不同方向典型截面来分析土壤剖面盐分的分布特征，4 个截面的土壤盐分分布情况如图 3 所示。其中，A-A'与 B-B'截面从试验区的东北方向横贯至西南方向，C-C'与 D-D'截面从试验区东北方向横贯西南方向。由图 3 可以看出，在 3—10 月份期间，0~100 cm 的土壤剖面整体呈现一种盐分累积的趋势，但针对于土壤剖面的具体点位的土壤盐分而言，并不是一种简单的持续累积状态。如试验区北部，3—6 月份期间由非盐渍化为主的土壤转变为轻度和中度盐渍化为主，而在 6—7 月份期间，试验区中部中、重度盐渍化土壤向试验区北部转移，试验区北部中、重度盐渍化土壤面积有所增加，但 7—10 月份期间，轻度、中度和重度盐渍化土壤面积显著增加，非盐渍化土壤面积锐减，且盐渍化程度明显重于 6 月份。

#### 2.4 不同时期土壤盐渍化面积统计

3D-IDW 插值后，每个栅格单元生成一个土壤电导率值，本文以栅格为基本单位，分别统计不同时期各土层 5 个等级盐渍化土壤所占的面积比例（表 6）。由表 6 可知，不同时期试验区的非盐渍化土壤面积均表现为随着土壤剖面深度的增加而增

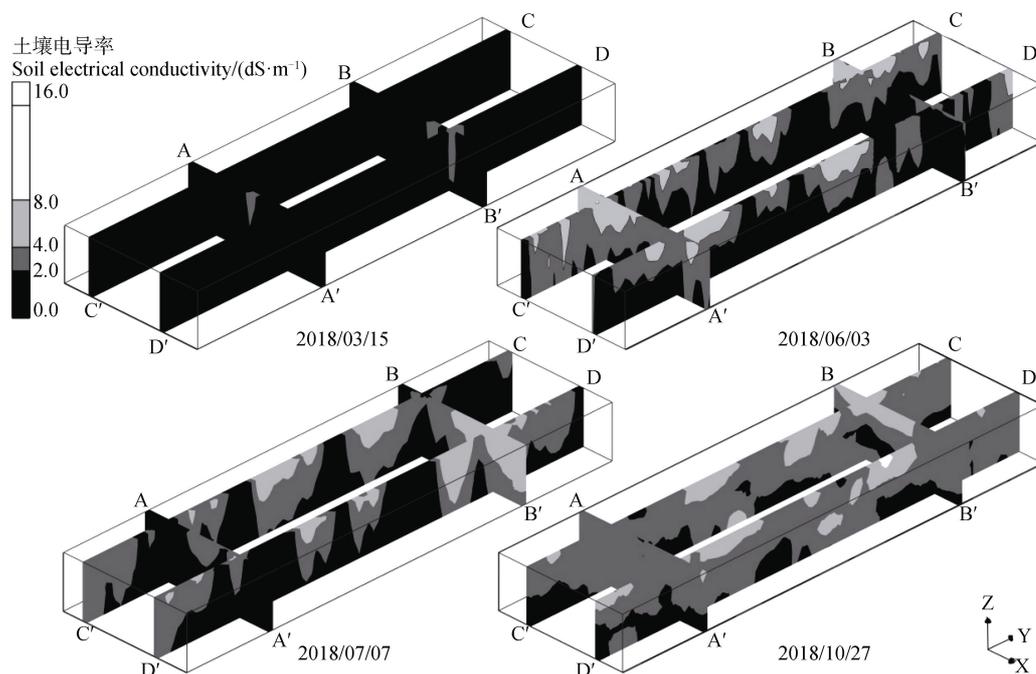


图3 研究区不同时期三维土壤典型截面盐分分布图

Fig. 3 Distribution of salinity of typical cross-section of three-dimensional soil in different periods of the study area

表6 试验区不同时期土壤盐渍化等级所占比例

Table 6 Proportion of soil salinization grades in different periods of the test area

日期 Date	土层 Layer/cm	非盐渍化 Non-saline	轻度盐渍化 Slightly saline	中度盐渍化 Moderately saline	重度盐渍化 Strongly saline	盐土 Saline
2018/03/15	0~20	98.6	1.4	0	0	0
	20~40	99.0	1.0	0	0	0
	40~60	99.3	0.7	0	0	0
	60~80	99.5	0.5	0	0	0
	80~100	99.6	0.4	0	0	0
2018/06/03	0~20	30.9	41.0	27.0	1.1	0
	20~40	41.6	45.9	12.4	0.2	0
	40~60	56.3	36.5	7.1	0.2	0
	60~80	69.3	25.3	5.3	0.2	0
	80~100	78.1	17.6	4.3	0.1	0
2018/07/07	0~20	36.0	39.1	24.2	0.7	0
	20~40	42.8	42.8	14.2	0.2	0
	40~60	53.8	40.3	5.9	0	0
	60~80	65.1	32.1	2.8	0	0
	80~100	75.5	23.0	1.6	0	0
2018/10/27	0~20	7.8	62.3	29.7	0.2	0
	20~40	18.6	72.8	8.5	0	0
	40~60	35.1	61.4	3.6	0	0
	60~80	56.0	41.3	2.7	0	0
	80~100	69.1	28.5	2.4	0	0

加, 而盐渍化土壤(轻度、中度、重度)面积随着土壤剖面深度的增加而减少, 呈现出土壤盐分为表聚现象。因其土壤含盐量的不同, 盐分表聚现象有所不同。其中 6 月 3 日、7 月 7 日、10 月 27 日轻度盐渍化面积有所不同, 0~20 cm 到 20~40 cm 土层表现为轻度盐渍化面积呈现上升状态, 而其他土层随着深度的增加表现为轻度盐渍化面积下降趋势。3 月 15 日冬灌后, 试验区 99.0% 的面积为非盐渍化土壤, 仅有部分面积为轻度盐渍化土壤, 从 3 月 15 日冬灌后到 6 月 3 日棉花花铃期内, 此阶段为干旱区棉田季节性返盐的高发区, 大面积裸露的土壤在蒸发与蒸腾共同作用下, 深层地下水中携带的可溶性盐基离子随着土壤毛细血管作用上升, 造成土壤表层盐分富集现象。随着时间的增加非盐渍化土壤所占比例均逐渐降低。对于盐渍化土壤面积比例(中度、重度), 随着多次降雨与滴灌, 表层土壤(0~20 cm)表现为升高-降低-升高的规律。中度与重度盐渍化土壤经淋洗过后均有轻微降低, 而不同土层轻度盐渍化土壤面积均在逐渐增加。研究区位于新疆南疆极端干旱区, 年蒸发量为年降雨量的 40 倍<sup>[28]</sup>。研究区北部直线距离塔里木河不足 1 km, 研究区地下水深受塔里木河汛期的影响, 随季节的变化而变化, 逐渐升高。造成研究区不同时期土壤盐分三维分布的原因主要受人为因素和自然因素的影响。3—10 月份土壤盐分三维空间分布受到人为与自然因素共同作用, 3 月份为非盐渍化土壤, 主要是因为冬灌将土壤盐分洗至 1 m 土层深度以下, 冬季受气温影响形成冻土层, 阻止了土壤盐分的向上聚集的过程。6 月份盐渍化程度最高的主要原因是受气温的影响, 加上试验区均采用膜下滴灌的种植方式, 膜与膜之间大面积裸露在外的土壤受气温的影响, 深层地下水受毛细血管的作用, 向上流动, 土壤盐分逐渐向表层聚集, 在土壤表面形成盐结壳。研究区土壤质地多为砂壤土, 保水性差, 造成试验区土壤次生盐渍化的形成。引起盐分在土壤中积累水平取决于流经土壤以外的灌溉水或降水的比例, 称为浸出比例。随着浸出比例的减小, 土壤盐分逐渐在土壤中聚集<sup>[5]</sup>。7—9 月为塔里木河汛期, 试验区地下水位小于 1.5 m。此时, 试验区仅经过一次滴灌, 最大湿润深度仅为 0~40 cm, 膜下滴灌仅对滴灌处的土壤进行润洗, 而膜与膜之间的土壤盐分依旧存在, 造成土壤盐分主要聚集在 0~40 cm 处。10 月份, 此时棉花

已经采摘完毕, 受田间管理揭膜与温度的影响, 造成试验区大面积土壤盐分向上运移, 表层土壤形成次生盐渍化状况。然而, 土壤盐分高于阈值的有害影响会随着作物种类、气候、土壤肥力、土壤物理条件和土壤水分状况的不同而不同<sup>[33]</sup>。由于这些因素对作物的耐盐阈值的影响, 对确定影响作物产量阈值之间产生较大的不确定性。基于极端干旱区土壤盐分空间变异的特殊性, 如果考虑到不同时期土壤盐分三维空间分布的不确定性, 对科学制定田间管理措施具有重要的指导作用。

### 3 结 论

通过不同时期表观电导率地理空间测量, 指导有限土壤剖面样品的采集与表观电导率建立的分层模型精度较高, 反演模型均具有较好的预测能力。试验区不同时期土壤剖面电导率变异性差异较大, 3 月 15 日至 7 月 7 日为土壤剖面电导率为强变异性。7 月 7 日为棉花花铃期, 由于蒸腾与根系作用逐渐大于蒸发作用, 表现为表层(0~20 cm)土壤电导率为中等变异强度, 其他土层均为强变异性。至 10 月 27 日棉花收获后, 此时土壤电导率变异性呈现稳定状态。冬灌后, 土壤盐分含量均较低, 土壤剖面盐分为均匀型, 棉花播种后, 土壤盐分含量主要集中在 0~40 cm 土层, 土壤剖面盐分主要为表聚型。影响试验区不同时期土壤盐分含量与分布位置的主要因素是灌溉、地下水埋深、地下水矿化度、温度、揭膜作用。3D-IDW 插值方法在预测多时期土壤电导率三维时空变异上均取得了较好的精度。本研究通过对不同灌溉时间节点土壤剖面盐分的分布位置和含量的三维可视化研究, 为干旱区棉田精准灌溉的实施提供一定的指导作用。

### 参考文献 (References)

- [1] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 837—845. [杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 837—845.]
- [2] Butcher K, Wick A F, DeSutter T, et al. Soil salinity: A threat to global food security[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108 (6): 2189—2200.
- [3] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348

- (6235): 647—647.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Corwin D L, Scudiero E. Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors[J]. *Advances in Agronomy*, 2019, 158: 1—130.
- [ 6 ] Chang C W, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. *Soil Science*, 2002, 167 ( 2 ): 110—116.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Lesch S M. Sensor-directed response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46 ( 1/2/3 ): 153—179.
- [ 9 ] Rhoades J D, Ingvalson R D. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, 35 ( 1 ): 54—60.
- [ 10 ] Rhoades J D, van Schilfgaarde J. An electrical conductivity probe for determining soil salinity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40 ( 5 ): 647—651.
- [ 11 ] Rhoades J D, Lesch S M, LeMert R D, et al. Assessing irrigation/drainage/salinity management using spatially referenced salinity measurements[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 35 ( 1/2 ): 147—165.
- [ 12 ] Yao R J, Yang J S, Liu G M. Calibration of soil electromagnetic conductivity in inverted salinity profiles with an integration method[J]. *Pedosphere*, 2007, 17 ( 2 ): 246—256.
- [ 13 ] Jiang Q S, Peng J, Biswas A, et al. Characterising dryland salinity in three dimensions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 682: 190—199.
- [ 14 ] Guo Y, Zhou Y, Zhou L Q, et al. Using proximal sensor data for soil salinity management and mapping[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 ( 2 ): 340—349.
- [ 15 ] Liu W Q, Xu X Y, Lu F, et al. Three-dimensional mapping of soil salinity in the southern coastal area of Laizhou Bay, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29 ( 10 ): 3772—3782.
- [ 16 ] Li H Y, Shi Z, Webster R, et al. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil[J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 31—41.
- [ 17 ] Liu G M, Li J B, Zhang X C, et al. GIS-mapping spatial distribution of soil salinity for Eco-restoring the Yellow River Delta in combination with Electromagnetic Induction[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 306—314.
- [ 18 ] 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.]
- [ 19 ] 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.]
- [ 20 ] Liu X L, Peng J, Feng C H, et al. Study on spatial and temporal variation characteristics of soil profile salt in cotton field based on EM38-MK2 data[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020 ( 1 ): 17—23. [刘新路, 彭杰, 冯春晖, 等. 基于电磁感应数据棉田土壤盐分割面时空变异特征研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2020 ( 1 ): 17—23.]
- [ 21 ] Amakor X N, Jacobson A R, Cardon G E, et al. A comparison of salinity measurement methods based on soil saturated pastes[J]. *Geoderma*, 2014, 219/220: 32—39.
- [ 22 ] Liu X L, Peng J, Feng C H, et al. 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. [刘新路, 彭杰, 冯春晖, 等. 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.]
- [ 23 ] Thorne D W. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[J]. *Agronomy Journal*, 1954, 46 ( 6 ): 290.
- [ 24 ] Meirvenne M, Maes K, Hofman G. Three-dimensional variability of soil nitrate-nitrogen in an agricultural field[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37 ( 3 ): 147—153.
- [ 25 ] Saeyns 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.
- [ 26 ] Franke R, Nielson G. Smooth interpolation of large sets of scattered data[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1980, 15 ( 11 ): 1691—1704.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Yun A P, Ju Z S, Hu K L, et al. Three-dimensional spatial interpolation of soil salinity based on inverse distance weighting method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 ( 12 ): 148—156.

172. [云安萍, 鞠正山, 胡克林, 等. 基于距离反比法的土壤盐分三维空间插值研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46 ( 12 ): 148—156, 172.]
- [ 29 ] 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.]
- [ 30 ] Robinson T P, Metternicht G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50 ( 2 ): 97—108.
- [ 31 ] Corwin D L, Kaffka S R, Hopmans J W, et al. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil[J]. Geoderma, 2003, 114 ( 3/4 ): 231—259.
- [ 32 ] Shi Z, Li Y, Wang R C, et al. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field[J]. Environmental Geology, 2005, 48 ( 2 ): 171—178.
- [ 33 ] Grieve C M, Grattan S R, Maas E V. Plant salt tolerance[M]//Agricultural Salinity Assessment and Management. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011: 405—459.

(责任编辑: 檀满枝)