

DOI: 10.11766/trxb201912060666

乔学瑾, 石建初, 谭丽丽, 范未华, 轩俊伟, 盛建东, 左强. 新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1202–1213.

QIAO Xuejin, SHI Jianchu, TAN Lili, FAN Weihua, XUAN Junwei, SHENG Jiandong, ZUO Qiang. Multi-scale Spatial Distribution Characteristics of Soil Salinity in Root-zone in Film-mulched Drip-irrigated Cotton Fields in Anjihai Irrigation Zone, Xinjiang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1202–1213.

新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征*

乔学瑾¹, 石建初¹, 谭丽丽¹, 范未华², 轩俊伟², 盛建东², 左强^{1†}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:明晰土壤盐渍化空间分布特征是盐碱地改良的基础。与单一尺度相比, 嵌套多尺度研究可更好地分析土壤盐分的空间变异结构特征, 更精确地表达盐渍化程度的自相关随尺度的变化情况。采用传统统计学和地统计学相结合的方法, 通过野外实地分层采集土样, 分析了 4 km、500 m 和 100 m 三个嵌套尺度条件下, 新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤含盐量的空间分布规律及其变异特性。结果表明, 灌区棉田各尺度根系层土壤含盐量整体水平较低 (平均 1.52~1.87 g·kg⁻¹), 属中等变异, 具有明显的连续变化和底聚特征。轻度盐化土和非盐化土在整个灌区占主导地位并主要分布于地表水矿化度较低、地势较高、排水相对通畅的灌区东南侧, 盐渍化相对较重区域主要位于地下水埋深较浅的泉水溢出带, 以及受平原水库和干渠渗漏影响的区域。受地形地貌等结构性因素与人为活动等随机性因素共同影响, 土壤含盐量呈强空间自相关性: 随尺度加大, 地统计模型的块基比减小, 相关距离增加, 自相关性增强, 结构性因素影响增强, 随机因素影响减弱; 反之随尺度减小, 空间分布更加清晰明确, 随机因素的影响则逐渐增强。对于盐渍化严重区域, 有必要针对整个根系层采用嵌套方式在更小尺度上加密采样, 以充分了解土壤盐分的空间分布规律与变异特性。

关键词:膜下滴灌棉田; 根系层; 土壤盐分; 空间变异; 空间尺度

中图分类号: S275.9 文献标志码: A

Multi-scale Spatial Distribution Characteristics of Soil Salinity in Root-zone in Film-mulched Drip-irrigated Cotton Fields in Anjihai Irrigation Zone, Xinjiang

QIAO Xuejin¹, SHI Jianchu¹, TAN Lili¹, FAN Weihua², XUAN Junwei², SHENG Jiandong², ZUO Qiang^{1†}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

* 国家重点研发计划项目课题 (2016YFD0200303, 2016YFC0501401) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2016YFD0200303 and 2016YFC0501401)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qiangzuo@cau.edu.cn

作者简介: 乔学瑾 (1989—), 男, 山西应县人, 博士研究生, 主要从事干旱区水土资源利用与土壤盐运移研究。E-mail: xjqiao@cau.edu.cn

收稿日期: 2019-12-06; 收到修改稿日期: 2020-03-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-05-18

Abstract: 【Objective】 The knowledge about the spatial distribution characteristics of salinization is the basis for amelioration of saline-alkali soils. Compared with research based on a single scale, nested multi-scale research can be more effectively applied to analyzing structural characteristics of the spatial variation of soil salinity with higher accuracy in describing scale-dependent self-correlated variation of salinization. 【Method】 In the Anjihai Irrigation Zone of Xinjiang, soil samples were collected by soil layer in the film-mulched cotton fields for analysis of rules and variabilities of the spatial distribution of salt content in the root zone of the drip-irrigated cotton field under film mulch with the method combining conventional statistics and geo-statistics, as affected by nested scales of 4 km, 500 m and 100 m. 【Result】 Results show that, for any scale, soil salinity in the root-zone of the cotton fields in the zone is generally low, with the mean being in the range of 1.52–1.87 g·kg⁻¹, moderate in variability, and characterized by continuous variation and accumulation at the bottom of the root zone. Non- and mildly-salinized soils dominate the irrigation zone and are mainly located in the south-east part of the zone, where the surface water is low in salinity and the ground is quite high with unobstructed drainage, while relatively seriously salinized soils are mainly distributed in areas where the ground water is shallow and overflows, and in areas that are affected by the leakage from reservoirs in the plains and trunk canals. As influenced by some structural factors (e.g. terrain landform) and stochastic factors (e.g. artificial activities), soil salt content in this area shows a significant spatial self-correlation in distribution. With increasing scale, nugget-to-sill ratio of the geo-statistical analysis model decreases, and related distance, self-correlation and impact of structural factors increase, but the influence of random factors weakens. On the contrary with declining research scale, spatial distribution becomes more explicit, and the impact of random factors intensifies. 【Conclusion】 For those relatively seriously salinized areas, it is advisable to employ the nested multi-scale root-zone sampling strategy so as to get a full knowledge about characteristics of the spatial distribution and variability of soil salinity in the drip-irrigated cotton fields under film mulch.

Key words: Drip-irrigated cotton field under film mulch; Root-zone; Soil salinity; Spatial variability; Spatial scales

降水稀少、蒸发强烈使得水资源短缺和土壤盐渍化成为制约新疆等干旱区绿洲农业的主要障碍因子。新疆作为我国最主要的产棉区，平均每年因干旱缺水、土壤盐渍化损失近 5 万 t 棉花^[1]。膜下滴灌技术由于具有节水、抑盐、增产等效果^[2]，近些年来已在新疆得到长足发展。目前，膜下滴灌棉花的种植面积已超过 200 万 hm²，且仍保持不断增长的趋势^[3-4]。尤其在北疆的玛纳斯河流域，棉花膜下滴灌技术推广时间最早、应用范围最广，而安集海则是其中典型的绿洲农业灌区之一^[5]。由于受地形地貌、气候以及人为因素（水资源管理和土地利用等）的共同影响，灌区农田土壤盐渍化问题依然十分突出^[6]，其膜下滴灌棉田根系层的盐分分布与演变动态一直广受关注。

短期而言，高频率、低定额的膜下滴灌可使表层土壤脱盐；但就长期变化而言，由于其淋溶作用微弱，随着时间的推移，下部根系层盐分含量可能会明显升高，致使根系层整体含盐量逐渐增加^[7]。显然，膜下滴灌技术的大面积推广应用，必然会导致根系层土壤盐分的时空分布发生较大变化^[8]，从而对土壤次生盐渍化过程产生重要影响。因此，及

时掌握膜下滴灌棉田根系层土壤盐分空间分布规律及其变异特性，对于当地水资源利用与管理、精准农业的推广应用、绿洲可持续发展及生态环境保护等均有着极为重要的意义^[9]。

土壤盐分的空间分布及变异规律具有地质结构特性和统计学的随机特性，可利用地统计学进行研究^[10]。迄今，基于地统计学的土壤盐分演变研究已积累了大量成果^[11-14]，其中有关干旱-半干旱区绿洲土壤盐分空间变异的研究尽管从前相对较少，但正在逐步成为受关注的对象，目前的相关研究多集中于表层土壤且尺度相对较为单一^[13-14]。土壤盐分在膜下滴灌棉田根系层的分布特性使得研究不能仅停留于关注其表层土壤，更应该关注盐分在整个根系层（尤其是下部根系层）的分布规律。另一方面，土壤作为复杂的自然综合体，影响其盐分空间变异的主导因子在不同尺度上呈现出显著差异^[11-14]，这种差异是空间尺度效应产生的根本原因^[15]。随着样点间的距离增大，变异函数值的随机成分减少，小尺度上的变异信息可能被遗漏，特别是部分盐渍化严重的区域；同样，小尺度研究可能会将大尺度上的空间变异规律作为“随机变异”而忽略^[11]。可见

单一尺度下的土壤空间变异研究,不利于深入分析土壤盐分的空间变异结构特征,而多尺度下的研究能够更精确地表达变量的自相关随尺度的变化情况。所以,本研究拟针对新疆玛纳斯河流域安集海灌区的长期膜下滴灌棉田,采用地统计学和地理信息系统相结合的方法,研究空间嵌套多尺度根系层土壤盐分的空间变异特征,以期为灌区水盐动态的遥感监测以及水土资源可持续利用和精准农业发展提供参考依据。

1 材料与方法

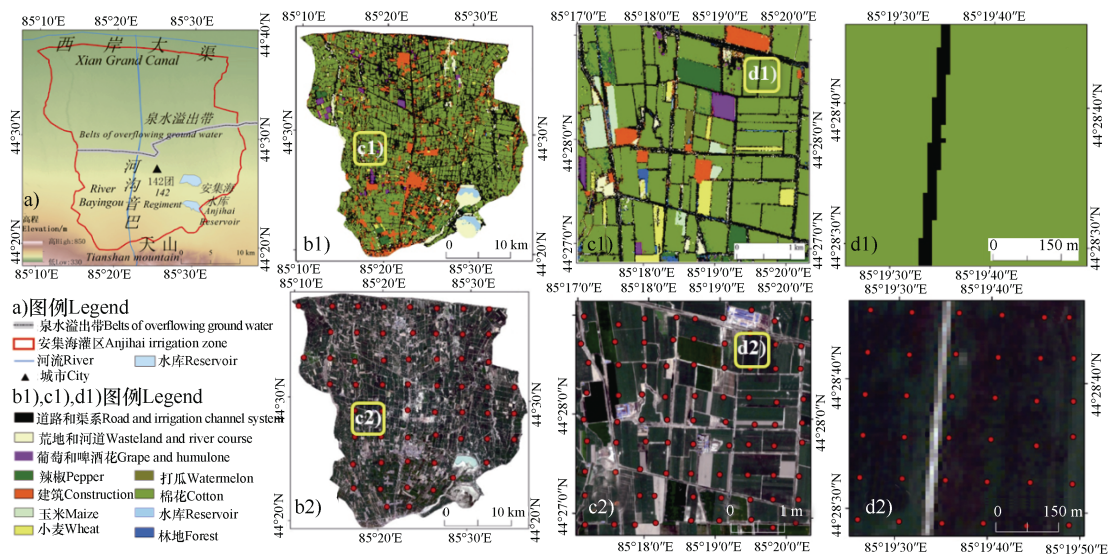
1.1 研究区概况

安集海灌区(85°09'E~85°36'E, 44°19'N~44°38'N)位于天山北麓、准噶尔盆地南缘、玛纳斯河流域西北部(图1a),总面积880.1 km²,其中作物种植面积550.4 km²,为冲洪积扇和冲洪积细土平原。当地多年平均降水量177.5 mm、蒸发量1547 mm、相对湿度65%,年均气温6.6℃、最高

41℃,多西风,光热资源丰富,属于典型的大陆性干旱气候^[6]。灌区南北长约40 km(图1a、图1b1和图1b2),仅南部少量农田位于玛纳斯河流域上游,该区域地下水埋深较大(约3~5 m)、矿化度较低,盐渍化程度较轻,多数农田处于地下水埋深较小(约1~3 m)、盐渍化程度相对较重的流域中游区域^[17],盐渍化最为严重的区域主要集中于地下水埋深仅在1.2 m左右的泉水溢出带附近^[5-6],安集海水库分布于灌区东南侧。当地农作物以棉花为主,膜下滴灌技术自1999年起在当地得到大面积推广应用,目前灌区已基本实现膜下滴灌和农业机械化生产。虽然膜下滴灌使得上部根系层短期脱盐效果明显,但由于底土含盐量高,部分地段仍处于脱盐-不稳定或脱盐-积盐反复型状态^[14]。

1.2 采样点布局

本研究主要针对当地长期膜下滴灌棉田,涉及的野外调查采样工作包括两项:遥感影像地物分类(棉田识别)的地面验证和不同尺度膜下滴灌棉田根系层土壤采样,分别在2017年和2018年7—8月间开展。



注: a. 安集海灌区位置; b1. 灌区土地利用分布; b2. 灌区4 km尺度样点分布; c1. 500 m网格土地利用分布; c2. 500 m尺度样点分布; d1. 100 m网格土地利用分布; d2. 100 m尺度样点分布。Note: a. Location of the Anjihai Irrigation Zone; b1. Land use classification of the irrigation zone; b2. Distribution of sampling sites on the 4 km scale; c1. Land classification on the 500 m scale; c2. Distribution of sampling sites on the 500 m scale; d1. Land use classification on the 100 m scale; d2. Distribution of sampling sites on the 100 m scale.

图1 安集海灌区多尺度样点与地类分布

Fig. 1 Distributions of multi-scale sampling points and land use classification for the Anjihai Irrigation Zone

合理采样数量目前多采用 Cochran^[18]提出的最佳采样数公式计算,该公式主要针对区域纯随机采

样模式构建,须基于一定的先验信息,如样本均值、标准差等。但实际过程中,采样前通常难以获得研

研究区的这些先验信息，在先验样本信息缺失的情况下，本文拟采用李梅等^[19]推荐的方法来确定采样点数 n ：选用 3 个不同尺度嵌套模式（I、II、III 级网格）、采用规则网格法布点进行采样，采样点数与间距按尺度大小逐级顺序确定，通过遥感影像解译，以棉花种植（均为膜下滴灌）面积占研究区面积的比例为基准来估算 n ：

$$n = \frac{z^2 p(1-p)}{d^2} \quad (1)$$

式中， n 为样点数， d 为允许误差（本研究取 10%^[19]）， z 为可靠性指标（90%置信水平下， $z = 1.64$ ^[20]）， p 为棉花种植面积占研究区总面积的比例。各级网格采样点数的具体确定方法如下：

I 级网格：对灌区尺度作物识别（比例 p 确定）的具体过程如下：基于 2017 年 8 月 10—20 日玛纳斯河流域各类地物的实地标定和 8 月 22 日经大气校正后的哨兵 2 号 L1C 级（Sentinel-2 L1C，经几何精校正的大气表观反射率产品）多光谱数据，通过随机森林模型^[21]和谷歌地球专业版（Google Earth Pro）目视解译相结合的方法对灌区地物进行分类^[22]，并对棉田进行提取，得 $p = 50.93\%$ （图 1b1）。据式（1）得灌区样点总数 $n = 67$ ，每点的控制面积约 13.14 km²，为方便布点取样，取整得灌区 I 级网格样点的间距为 4 km。进而基于地理信息系统软件 ArcGIS10.3 中的创建渔网（create fishnet），按照空间等间距原则布设单元宽度和高度均为 4 km 的网格，去除灌区边界以外的点后，获得最终样点数为 58（图 1b2）中的红色点位处）。

II 级网格：对于多尺度条件下土壤特性的采样布局，应根据研究区特点进行相应的设计^[23]。本研究主要针对长期膜下滴灌棉田根系层土壤含盐量，故应重点关注盐渍化较为严重、耕地和棉田面积占比较大的区域。因此，首先确定其中盐渍化较为严重的区域为待选区域，就安集海灌区而言，主要分布在流域中游地下水埋深较浅的泉水溢出带^[5-6]；其次从待选区域中选择若干耕地面积占比最大的 I 级网格单元（4 km×4 km）作为下一级嵌套采样区（II 级网格）。基于 2017 年灌区地物分类结果和上述方法，确定待选区域各 4 km 网格中最大棉田占比位于灌区中西部（图 b1、图 1b2），相应的 $p = 62.58\%$ （图

c1）。最后同样根据式（1）估算得样点数 $n = 63$ ，平均各点控制面积约为 0.25 km²，此时样点间距为 500 m，进而基于创建渔网得 II 级网格样点数 $n = 81$ （图 1c2）。

III 级网格：最小嵌套尺度（III 级网格）样点间距按地统计常采用的最小样点间距选择为 100 m^[24]，相应地样点数 $n = 36$ ，采样的具体位置仍按上述方法选在 II 级网格（图 1c2）中耕地占比较大、棉田占比最高的网格（图 1d1 和图 1d2）。

1.3 样品采集

基于以上规则，按空间等间距分别布设拟定的 I、II、III 级网格，间距分别为 4 km、500 m 和 100 m（图 1b1、图 1c2 和图 1d2）。在数字地图上获得多尺度网格样点的经纬度信息后，利用 GPS 定位技术进行野外采样。不同尺度土壤采样于 2018 年 7 月 14 日—8 月 3 日在安集海灌区进行（图 1），此时棉花正处于花铃期，其生长最为旺盛、蒸腾最为强烈、根系已基本扎至最大深度（1 m 左右）^[25]，因而可获得较为完整根系层的盐分分布状况。实际采样时若遇采样点不在棉田中，则在勘察校准的基础上重新选择临近棉田采集土样，并用 GPS 重新记录采样点坐标，如确实无法调整，则删除该采样点。

受灌区东南侧安集海水库影响，I 级网格的样点个数调整为 57；因 II 级网格组的四个顶角与 I 级网格点重合，故 II 级网格实际采样点数为 77；为提高测量精度，采用 GPS 定位与 100 m 皮尺测距相结合的方法来确定 III 级网格组的 36 个点。最终全区的采样点位共 170 个（如图 1b2、图 1c2、图 1d2 中的红色点位处）。点位确定后，详细记录采样点周围的地形地貌、植被类型、植被覆盖度、灌溉系统等要素。各样点均选择膜内与膜间裸地的中间位置，用土钻分 6 层分别采样，采样深度从上到下依次为：0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm，共采集土样 2 040 个，密封后运回实验室进行后续处理分析。

1.4 样品处理与分析

将采集的土样自然风干、研磨，过 1 mm 筛后备用，按 1:5 土水质量比浸提，测定其电导率 EC_{1:5}（梅特勒-托利多 S230 型电导率仪，瑞士）。此外，为了准确标定研究区土壤可溶性全盐含量 SSC（g·kg⁻¹）与 EC_{1:5}（dS·m⁻¹）的关系，从采集的土样中随机选择灌区南部、中部和北部共 60 个样点、360

个土样, 采用残渣烘干——质量法测定其 SSC^[26], 最终得灌区 SSC 与 EC_{1:5} 的回归关系如下:

$$SSC = 1.999EC_{1:5} \quad (R^2 = 0.97, P < 0.001, n = 360) \quad (2)$$

其他未直接测定 SSC 的土样, 则通过浸提液的 EC_{1:5} 经式 (2) 换算获得。由于本研究主要关注研究区膜下滴灌棉田根系层整体含盐量的空间分布特性, 尽管棉田中膜下与膜间以及不同层次土壤的含盐量不同, 但研究过程中不再考虑这些细微差异, 每个样点 (包括膜下与膜间两个位置及各自相应的 6 个土层) 均取为一个统一的 SSC 值, 即做整体均一化处理, 具体方法如下: 对每个样点膜间与膜下根系层含盐量先分别根据 6 层土样的含盐量实测值按采样深度加权平均; 之后, 每个样点根系层的含盐量 SSC 则根据所获得的膜间与膜下含盐量按照当地覆膜棉田膜间裸地 (60 cm, 占比 22.64%) 和覆膜宽度 (205 cm 超宽膜, 占比 77.36%)^[3] 进行加权平均, 即:

$$SSC = \frac{\sum_{i=1}^6 SSC_{膜间i} \Delta H_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta H_i} \times 22.64\% + \frac{\sum_{i=1}^6 SSC_{膜下i} \Delta H_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta H_i} \times 77.36\% \quad (3)$$

式中, $SSC_{膜间i}$ 、 $SSC_{膜下i}$ 分别为膜间和膜下第 i 层土 ($i = 1, 2, \dots, 6$) 实测含盐量, $g \cdot kg^{-1}$; ΔH_i 为采样深度 (取 10 或 20 cm)。

1.5 统计与地统计方法

分别采用传统统计学和地统计学方法来分析不同尺度根系层含盐量的空间分布特征。其中传统统计分析选用 SPSS23 软件完成, 应用单样本 K-S

(Kolomogorov-Semirnov) 方法检验数据是否呈正态分布, 对于不服从正态分布的数据集, 经对数变换或博克斯-考克斯 (Box-Cox) 变换转换为正态分布, 供地统计分析进一步使用。

地统计研究采用地统计学软件 GS+9.0 进行半方差函数分析: 以决定系数 R^2 最大、残差平方和 RSS 最小为目标, 对不同尺度网格点根系层土壤含盐量采用多组不同有效滞后距离和步长进行拟合优化^[27], 从而获得最优模型及相应的拟合参数。为了对不同点位含盐量 SSC 的取值进行线性无偏最优估算, 同时给出其估值方差并提高制图精度, 将 GS+9.0 计算所得的最优变异函数模型及模型参数导入地理信息系统软件 ArcGIS10.3, 通过普通克里格对不同尺度各样点根系层含盐量进行插值, 并进行交叉验证^[28]。最终, 根据盐渍化等级^[29] 绘制土壤含盐量空间分布图、统计各级土壤含盐量图斑面积。

2 结果与讨论

2.1 根系层土壤含盐量的传统统计特征

安集海灌区三个采样尺度下根系层土壤含盐量的统计特征参数差异明显 (表 1), 说明在不同研究尺度下, 土壤盐分分布不均, 变化幅度较大。整体而言 (4 km 尺度), 受多年膜下滴灌影响, 灌区根系层土壤含盐量不高, 总平均约 $1.52 g \cdot kg^{-1}$, 最高达 $5.01 g \cdot kg^{-1}$, 根据王遵亲等^[29] 有关干旱和荒漠地区盐渍化土壤的分类标准, 介于非盐化 ($< 2 g \cdot kg^{-1}$) ~ 中度盐化 ($4 \sim 6 g \cdot kg^{-1}$) 之间。由于两个较小嵌套尺度 (500 m 和 100 m 尺度) 采样区域选择在含盐量相对较高的泉水溢出带上, 故其含盐量的均值及最大值均高于 4 km 尺度, 最大值出现在 500 m 尺度, 为 $6.38 g \cdot kg^{-1}$, 已达重盐渍化 ($6 \sim$

表 1 不同尺度根系层土壤含盐量统计特征

Table 1 Statistics of soil salt content in the root-zone layer relative to scale

尺度 Scale	样点数 Number of sampling points/n	最小值 Minimum value/ ($g \cdot kg^{-1}$)	最大值 Maximum value/ ($g \cdot kg^{-1}$)	平均值 Mean value/ ($g \cdot kg^{-1}$)	标准差 SD Standard deviation/ ($g \cdot kg^{-1}$)	变异系数 CV Coefficient of variation/%
4 km	57	0.15	5.01	1.52	1.24	81.58
500 m	81 ¹⁾	0.10	6.38	1.87	1.54	82.35
100 m	36	0.21	5.56	1.60	1.45	90.63

注: ¹⁾ 其中 4 个 (II 级) 网格角点与 4 km 尺度 (I 级) 网格实测样点重合。Note: ¹⁾ In the graph, the four corners of a grid (Grade II) coincide with the actual sampling points in a grid on the 4 km scale (I grid).

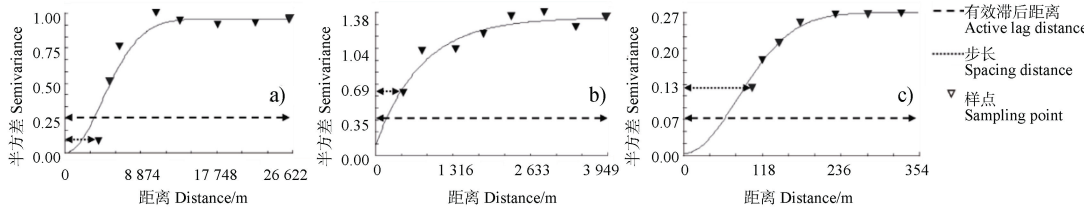
10 g·kg⁻¹) 水平。尽管 500 m 尺度的样区主要位于泉水溢出带, 但还包括部分地势较高和地下水埋深相对较大的地块, 故根系层土壤含盐量的最小值也出现在 500 m 尺度, 仅为 0.10 g·kg⁻¹。从标准差 (SD) 来看, 两个小尺度样本集合各样本点到均值的平均距离更远, 其中仍以 500 m 尺度的标准差为最大, 即该尺度下根系层土壤含盐量的分布最为离散。

变异系数 (CV) 反映了土壤特性的变异程度。就变异系数而言, 三个采样尺度下根系层土壤含盐量均为中等强度变异 (CV 介于 10%~100%, 表 1), 辛明亮等^[30]有关玛纳斯河流域灌区膜下滴灌棉田表层土壤盐分的空间变异性分析也呈现出类似的研究结果, 但也有研究表明^[13, 31], 玛纳斯河流域绿洲区或农田中的土壤盐分达强变异水平, 这可能是由于其研究对象除膜下滴灌棉田外, 还包括其他作物、荒地等更多复杂的地物。此外, 表 1 结果还表明, 随着研究尺度降低, 土壤含盐量的稳定性趋于下降, CV 值逐渐增加, 显然, 将 II 级网格选择在泉水溢出

带附近是必要及合理的^[5-6]。由此可见, 较大采样尺度 (如 4 km) 可能会屏蔽或遗漏部分较为重要的局部信息, 对于研究区内部分盐渍化相对严重区域, 有必要采用嵌套方式在更小尺度上加密采样, 以充分了解土壤盐分的空间分布与变异特性。

2.2 根系层土壤含盐量的空间变异函数

经比较优化, 最终确定 4 km 和 100 m 尺度的半方差函数为高斯模型 (图 2, 表 2), 有效滞后距离为样区网格 x 轴、 y 轴两者中最大距离的 70%, 分别为 26 622 m 和 354 m, 步长分别为 4 050 m 和 110 m; 500 m 尺度为指数模型, 有效滞后距离为样区网格对角线最大距离的 70%, 即 3 949 m, 步长为 500 m。不同尺度根系层土壤含盐量半方差函数最优模型的 R^2 在 90.30%~99.99% 之间, 相应的 RSS 则不高于 0.04 g²·kg⁻², 说明经优化获得的半方差函数能够较好地表达当地不同尺度根系层土壤盐分的空间结构特性。



注: a. 4 km 尺度; b. 500 m 尺度; c. 100 m 尺度。Note: a. 4 km scale; b. 500 m scale; c. 100 m scale.

图 2 不同尺度根系层土壤含盐量的半方差函数图

Fig. 2 Semivariogram of soil salt content in the root-zone layer relative to scales

表 2 不同尺度根系层土壤含盐量的半方差函数模型

Table 2 Semivariogram models for soil salt content in the root-zone layer relative to scale

尺度 Scale	模型 Model	块金值 Nugget, $C_0/$ (g ² ·kg ⁻²)	基台值 Sill, $S/$ (g ² ·kg ⁻²)	块基比 Proportion $C_0/S/\%$	变程 Range/m	决定系数 Determinate coefficient /%	残差平方和 Residual sum of squares / (g ² ·kg ⁻²)	分形维数 Fractal dimension, D
4 km	高斯 ^①	0.001	0.957	0.10	9 734	96.20	8.99×10^{-3}	1.21
500 m	指数 ^②	0.103	1.337	7.70	2 352	90.30	0.04	1.06
100 m	高斯 ^①	0.004	0.266	1.50	198	99.99	3.82×10^{-6}	1.85

① Gaussian, ② Exponential.

本研究三种尺度条件下根系层土壤含盐量的变程分别为: 9 734 m、2 352 m 和 198 m, 均高于相应的采样间隔 (4 km、500 m 和 100 m), 表明空间内插和制图是有效的^[32]。不同尺度含盐量的块金值 C_0

均较小, 在 0.001~0.103 g²·kg⁻² 范围内, 表明实验误差和较小尺度变量变异引起的根系层含盐量变异较小^[13]。此外, 各尺度的块基比 (C_0/S) 均小于 25%, 属于空间强相关^[33]。土壤盐分的空间分布主要受随

机性因素（如灌溉、种植和施肥等各种人为活动）和结构性因素（如气候、地形、成土母质和土壤类型等）的共同影响^[11]，随机性因素会减弱土壤含盐量的空间相关性，而结构性因素对土壤含盐量的影响则与之相反^[21]。显然，研究区内各尺度盐分的空间分布主要受结构性因素影响^[31]，其中 500 m 尺度受结构性因素影响最小，而 4 km 尺度最大。综合上述 3 个不同尺度的块基比和变程发现，随着采样尺度增大，地形地貌、母质、土壤类型等结构因素对根系层土壤含盐量的影响逐渐增强，而灌溉、施肥等人为活动随机因素的影响会逐渐减弱。

本研究中土壤含盐量存在局部自相关性结构，分形维数 (D) 在 1.06~1.85 之间，其中，100 m 尺度的 D 值最高，说明其空间自相关部分引起的空间变异性最高，而 500 m 尺度的 D 值最小，仅为 1.06，表明土壤含盐量的均一程度较差，与上述传统统计和块基比分析结果是一致的^[34]。

2.3 根系层土壤含盐量的空间分布特征

半方差函数模型及其参数是否合适通常可依据交叉验证结果予以评价^[35]，经普通克里格插值后，通过交叉验证评价的模型精度见表 3。总体而言，各尺度模型的插值精度及相关的误差指标均表现良好，表明本研究所采用的普通克里格插值是合理有效的。就各尺度的插值效果而言，除均方根误差 RMSE（越小越好）外，4 km 尺度的各项误差指标均优于 500 m 和 100 m 尺度，其中，500 m 和 100 m 尺度 $|RMSE-ASE|$ （即 RMSE 与平均标准误差 ASE 之差的绝对值，越小越好）的结果明显高于 4 km 尺度，标准均方根误差 RMSSE（越接近 1 越好）均大于 1，同时 ASE 均小于 RMSE，即 500 m 和 100 m 尺度模型的预测值被低估。导致这种现象的原因可能在于：对数转换会“压缩”原始数据、减弱趋势效应，而插值则会产生明显的“平滑效应”，从而改变数据的空间结构、减小其变异性，进而低估预测值^[35]。

表 3 不同尺度条件下根系层土壤含盐量普通克里格插值的交叉验证结果

Table 3 Cross validation of the Ordinary Kriging interpolation of soil salt content in the root-zone layer relative to scale

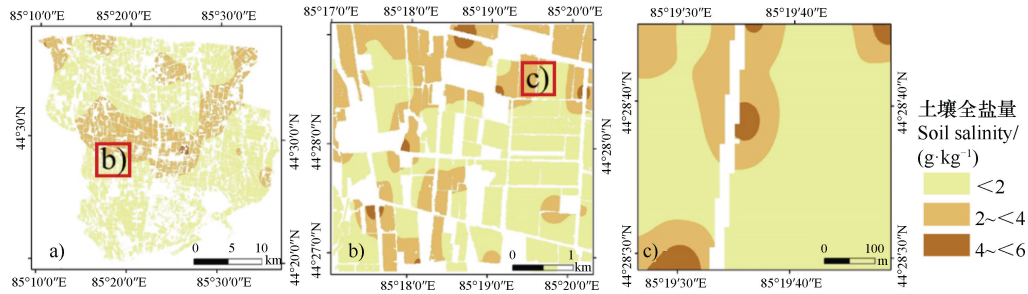
误差指标 Error index/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	尺度 Scale		
	4 km	500 m	100 m
ME	0.0055	0.0159	0.0121
RMSE	0.4889	0.4872	0.4864
$ MSE $	0.0094	0.0275	0.0206
RMSSE	0.9970	1.0152	1.0242
ASE	0.4919	0.4812	0.4764
$ RMSE-ASE $	0.0030	0.0060	0.0100

注：ME：平均误差；RMSE：均方根误差； $|MSE|$ ：标准化平均误差；RMSSE：标准均方根误差；ASE：平均标准误差。Note: ME: Mean error; RMSE: Root-mean-square error; $|MSE|$: Mean standardized error; RMSSE: Root-mean-square standardized error; ASE: Average standard error.

基于随机森林模型提取的棉田分布情况（图 1b1、图 1c1 和图 1d1），对插值结果进行裁剪，获得不同尺度棉田根系层土壤含盐量的空间分布如图 3 所示，统计得棉田不同盐渍化等级图斑面积及所占比例见表 4。研究区三种采样尺度下土壤含盐量并非随机分布，而是具有明显的连续变化特征，存在局部聚集现象。

4 km 尺度（图 3a，I 级网格）膜下滴灌棉田基本以非盐化土为主，占比在 70%以上（表 4），主要分布在灌区南部及北部部分区域，灌区南部邻近玛纳

斯河流域上游地区，地表水矿化度较低，地势较高，排水相对较为通畅，所以主要为非盐化土，而北部也存在部分微地形地势相对较高之处，非盐化土则主要集中分布在这类区域；其余少量轻度盐化土主要以条带状沿地下水埋深较浅的泉水溢出带分布在灌区中部，以及受干渠渗漏影响的北侧和地势低洼的西北侧，此外，受灌区东南部安集海水库渗漏影响，其下游局部地区也有些许轻度盐化土分布；灌区内最高含盐量呈中度盐化水平（表 1），但占比极低，仅以“盐岛”形式出现在中部泉水溢出带和安集海水库下游低



注：a. 4 km 尺度；b. 500 m 尺度；c. 100 m 尺度。Note: a. 4 km scale; b. 500 m scale; c. 100 m scale.

图 3 不同尺度根系层土壤含盐量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of soil salt content in the root-zone layer relative to scale

表 4 不同尺度根系层土壤各盐渍化等级所占面积及比例

Table 4 Areas and percentages of salinized root-zone soil relative to grade and scale

尺度 Scale	非盐化土 Non-salinized soil		轻度盐化土 Mildly salinized soil		中度盐化土 Moderately salinized soil		合计 Total		
	棉田面积 Cotton field area/km ²		棉田面积 Cotton field area/km ²		棉田面积 Cotton field area/km ²		棉田面积 Cotton field area/km ²	网格面积 Grid area/km ²	棉田占比 Ratio of cotton field /%
	比例 Ratio/%	比例 Ratio/%	比例 Ratio/%	比例 Ratio/%	比例 Ratio/%	比例 Ratio/%			
4 km	315.8	70.45	131.4	29.31	1.06	0.24	448.2	880.1	50.93
500 m	6.13	59.78	3.94	38.43	0.18	1.79	10.25	16.39 ¹⁾	62.58
100 m	0.182 3	74.26	0.054 4	22.15	0.008 8	3.59	0.245 5	0.255 8 ¹⁾	95.98

注：¹⁾ 因采样过程不可避免出现样点偏移，而内插和制图需覆盖全部样点，故 500 m 和 100 m 网格合计面积略大于 16 km² 和 0.25 km² 的设计值。Note: ¹⁾ The total area of the 500 m and 100 m grids are slightly larger than the 16 km² and 0.25 km², the designed area, as during sampling it was inevitable to have the sampling points deviating slightly, while all samples needed to be covered in interpolation and mapping.

洼地交汇点处。可见，在灌区尺度上，水盐动态与均衡主要受所处位置、地势高低及成土母质等结构性因素（亦即形成条件）的影响，即地形、地貌是影响根系层土壤含盐量空间分布的主导因素。

与 4 km 尺度相比，500 m 尺度（图 3b，II 级网格）由于整体处于泉水溢出带，其非盐化土的面积占比大幅降低（表 4），整体已不足 60%，主要分布于所选 I 级网格单元（4 km×4 km）中部及东南区域，这部分区域地处泉水溢出带上游南侧，且临近 142 团团部（图 1a、图 1b），因生活用水较多而使局部地下水位较低，故根系层盐分积累受潜水蒸发影响相对较小而呈较低水平；轻度盐化土的面积占比则大大高于 4 km 尺度，接近 40%，在 3 个尺度中占比最高，其分布尽管被非盐化土分割，但在网格北部和西南局部仍呈集中连片的形式；中度盐化土面积占比尽管高于 4 km 尺度，但仍然较低，尚不足 2%，

零星分布于轻度盐化土范围内的地势低洼处，形成几个明显的“盐岛”。表 1 显示该尺度含盐量最大值为 6.38 g·kg⁻¹，已达重度盐化水平，但仅涉及个别点，因而在克里格插值过程中作为异常值被平滑剔除，故相应的等级分类中未出现重度盐化土（图 3b，表 4）。

由于选择的是棉田占比最大的 II 级网格单元，故 100 m 尺度（图 3c，III 级网格）的非盐化土面积占比又较 500 m 尺度得到显著提升，为 3 个尺度中最高，达 74% 以上（表 4），集中连片分布在所选上级网格单元（500 m×500 m）中的绝大部分区域，主要为应用膜下滴灌技术较久的棉田；轻度盐化土则从网格西南至正北呈间断性带状分布，占比 22% 左右，其中棉田应用膜下滴灌技术的时间相对较短，且北部靠近排碱渠（随着膜下滴灌的大面积推广应用，目前已基本被废弃）；与另两个尺度类似，中度

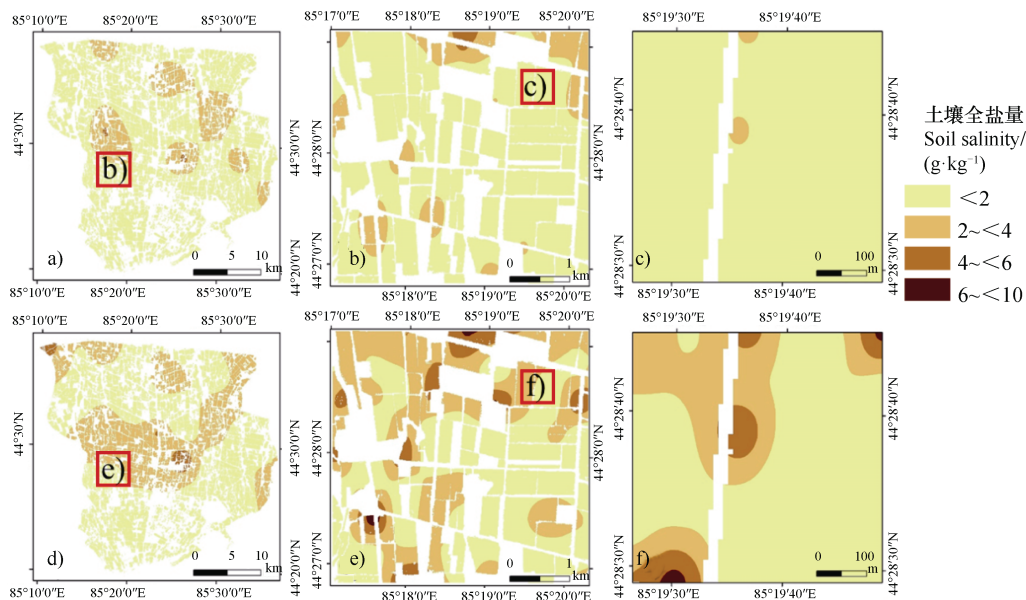
盐化土仍以“盐岛”形式分布于轻度盐化土范围内，但总体占比已升高至近4%。100 m尺度上，地形高程差较小，又因为深耕、平地等农业措施，使地形地貌等结构性因素的影响减小，而灌溉、施肥、耕作等随机性人为因素则成为影响这种田间尺度条件下水盐分布最主要的因素。综上，安集海灌区土壤盐渍化无疑是自然条件和人为活动综合作用的产物，大尺度范围的分布规律主要受地形地貌等结构性因素的影响，而中小尺度则受人为活动等随机性因素的影响较大。

总体而言，4 km尺度从整体上反映了根系层土壤含盐量在区域上的空间分布趋势，随着膜下滴灌技术的不断推广应用，除少部分有潜在盐渍化危险的区域外，安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤的盐渍化已得到较好的控制（表4，图3a）。但这种较大的尺度可能会模糊局部细节，因此本文在充分考虑研究区特点从而设计不同尺度的情况下，进一步在较小尺度（500 m和100 m尺度）上探索了根系层土壤盐分的分布及变异状况。随着空间尺度的降低，根系层土壤含盐量的空间变异增大，土壤盐渍化在典型网格中更为突出，比如由于地处盐渍化较

为严重的泉水溢出带，所选择采样的500 m尺度网格根系层土壤盐渍化最为严重，变异系数和空间变异程度最大，分布最为复杂（表4，图3b）；100 m尺度上，“盐岛”的分布特征更加清晰（图3c）。当然，若仅考虑小尺度的采样，除增加成本和工作量外，还极易使宏观分布特征破碎化，不足以反映整体的分布趋势，在实际过程中也是不可取的。所以，通过多尺度研究识别不同尺度的特点，才可能真正认识根系层土壤盐分的空间分布规律与变异特性。

以上分析针对的是根系层整体，而以往相关研究多数关注的仅是表层（常取为0~20 cm）土壤^[11, 30]。为了充分展示土壤含盐量在不同层次根系层上的分布规律，特将上述0~100 cm根系层土壤分为表层（0~20 cm）和深层（20~100 cm），同样通过克里格插值分别获得不同尺度两个不同层次土壤含盐量的空间分布如图4所示。

长期膜下滴灌的结果使得含盐量在不同层次土层中呈现出较大差异，表层土壤受滴灌水分的不断淋洗，绝大部分处于非盐化状态（图4a）~图4c），轻度盐化土呈零星状分布在两个较大尺度（4 km和500 m尺度）网格中，在100 m小尺度上的占比几



注：a. 0~20 cm 土层 4 km 尺度；b. 0~20 cm 土层 500 m 尺度；c. 0~20 cm 土层 100 m 尺度；d. 20~100 cm 土层 4 km 尺度；e. 20~100 cm 土层 500 m 尺度；f. 20~100 cm 土层 100 m 尺度。Note: a. 0~20 cm soil layer on the 4 km scale; b. 0~20 cm soil layer on the 500 m scale; c. 0~20 cm soil layer on the 100 m scale; d. 20~100 cm soil layer on the 4 km scale; e. 20~100 cm soil layer on the 500 m scale; f. 20~100 cm soil layer on the 100 m scale.

图4 不同尺度不同深度层次根系层土壤含盐量空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of soil salt content in the root-zone layer relative to scale and layer

乎可忽略不计。相应地，由于次灌水定额较低且缺少排盐通道，被从上部土层淋洗的盐分仅能逐步在下部根系层累积，导致深层土壤含盐量增大，故 20~100 cm 土层各尺度条件下的非盐化土所占比例均急剧减小，而轻度盐化土占比则急剧增加（图 4d~图 4f），在 500 m 和 100 m 两个小尺度上中度盐化土所占比例已不可忽略，尤其在 500 m 尺度出现的重度盐化土“盐岛”已较为明显。可见无论在何种尺度上，仅通过表层土壤调查，并不能客观、准确地反映膜下滴灌棉田根系层土壤盐渍化的分布规律与变异特性，从而可能会导致区域水土资源管理与生态环境治理的错误决策。

3 结 论

本文以安集海灌区为研究区，采用经典统计学和地统计学相结合的方法，探索了 4 km、500 m 和 100 m 三个不同尺度条件下膜下滴灌棉田根系层（0~100 cm）土壤含盐量的空间变异特征与分布规律，得到主要结果如下：（1）灌区根系层土壤含盐量分布不均，变幅较大（含盐量介于 $0.10 \sim 6.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），但总体水平较低，主要为非盐化土和轻度盐化土，仅少部分区域达中度水平，无重度盐化土分布；（2）灌区土壤盐渍化是自然条件（结构性因素）和人为活动（随机性因素）综合作用的产物，不同研究尺度根系层的土壤含盐量均具有明显的空间结构特征，可用半方差函数模型较好地表征，相应半方差函数的变程均大于采样间距，样点内插和制图有效，伴随尺度的增大，根系层土壤含盐量的变异程度减弱、空间自相关性和结构性因素影响增强；（3）不同研究尺度下根系层土壤含盐量的统计特征与空间分布规律差异明显，大尺度（4 km）可较好地展现土壤盐渍化在灌区上的整体分布状况，中、小尺度则可观测到大尺度不能观测到的细微变化，由于较小尺度采样网格主要选在盐渍化相对更为严重区域，因而较 4 km 尺度而言，两个较小尺度（500 m 和 100 m）的土壤盐渍化稍显严重。此外，以往常采用的表层土壤采样无法真实表征膜下滴灌棉田根系层土壤的盐渍化状况。因此，针对盐渍化严重区域，应结合不同嵌套尺度并进行完整根系层采样，以更加清晰准确地阐明膜下滴灌棉田根系层土壤含盐量的空间分布规律和变异特性。土壤

盐分演变是众多影响因素在空间和时间上相互作用的结果，本研究仅探讨了土壤含盐量在空间上的分布规律和变异特性，有必要充分利用遥感技术和手段，进一步开展长期膜下滴灌棉田根系层土壤含盐量的时空演变规律研究，从而为当地区域性水土资源管理和生态环境建设及可持续发展提供合理可靠的依据。

参考文献 (References)

- [1] Chen X B, Yang J S, Zhang F D, et al. Control of soil water-salinity variations based on crop-saltwater production function in Tarim irrigation area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26 (4): 75—78. [陈小兵, 杨劲松, 张奋东, 等. 基于水盐生产函数的绿洲灌区水盐调控研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26 (4): 75—78.]
- [2] Meng C R, Yan L, Zhang S J, et al. Variation of soil salinity in plow layer of farmlands under long-term mulched drip irrigation in arid region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1386—1394. [孟超然, 颜林, 张书捷, 等. 干旱区长期膜下滴灌农田耕层土壤盐分变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (6): 1386—1394.]
- [3] Wang Z H, Yang P L, Zheng X R, et al. Variation characteristics of soil salinity and ion in root zone by long-term drip irrigation under mulch in typical oasis irrigation area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (3): 158—165. [王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 典型绿洲灌区长期膜下滴灌棉田根区土壤盐分及离子变化特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28 (3): 158—165.]
- [4] 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.]
- [5] Cheng W M, Zhou C H, Liu H J, et al. Oasis 50-year expansion and evolution of the ecological environment in Manas River basin[J]. *Science in China, Series D: Earth Science*, 2005, 35 (11): 1074—1086. [程维明, 周成虎, 刘海江, 等. 玛纳斯河流域 50 年绿洲扩张及生态环境演变研究[J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2005, 35 (11): 1074—1086.]
- [6] Lü N N, Luo G P, Ding J L, et al. Spatio-temporal variation of soil salinity in wastelands inside and outside of oasis in Manas River watershed in the context of dripping irrigation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (9): 1542—1553. [吕娜娜, 罗格平, 丁建丽, 等. 滴灌背景下玛纳斯流域绿洲内外荒地土壤盐分时空变化趋势分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32 (9): 1542—1553.]

- [7] Mu H C, Hudan·Tumaerbai, Su L T, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (7): 18—22. [牟洪臣, 虎胆·吐马尔白, 苏里坦, 等. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 18—22.]
- [8] Ji L, Liu B, He X L, et al. Changing characteristics and influencing causes of groundwater depth in irrigation areas in the lower reaches of the Manas River[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34 (9): 59—65. [吉磊, 刘兵, 何新林, 等. 玛纳斯河下游灌区地下水埋深变化特征及成因分析[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(9): 59—65.]
- [9] Florinsky I, Eilers R, Manning G, et al. Prediction of soil properties by digital terrain modelling[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17 (3): 295—311.
- [10] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89 (1/2): 1—45.
- [11] Yang Q Y, Yang J S, Yao R J. Evaluation on spatial distribution of soil salinity by indicator Kriging at two sampling scales[J]. *Soils*, 2011, 43 (6): 998—1003. [杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江. 不同尺度下土壤盐分空间变异的指示克里格评价[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 998—1003.]
- [12] Yao R J, Yang J S, Liu G M, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (6): 61—66. [姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61—66.]
- [13] Liu G M, Lü Z Z, Yang J S, et al. Spatial variation characteristics of soil salinity in typical oasis region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (16): 100—107. [刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 100—107.]
- [14] Yan A, Jiang P A, Sheng J D, et al. Spatial variability of surface soil salinity in Manas River basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 410—414. [颜安, 蒋平安, 盛建东, 等. 玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 410—414.]
- [15] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review[J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9 (3/4): 251—290.
- [16] Gao C Y. The cause of high mineralization of diving water quality in Anjihai irrigation area [J]. *Xinjiang Water Resources*, 1996 (2): 26—29. [高长远. 安集海灌区潜水水质高矿化成因[J]. *新疆水利*, 1996 (2): 26—29.]
- [17] Luo J X. Amelioration of saline-alkali soil in Xinjiang irrigation district [M]. Beijing: Press of Water Conservancy and Electric Power, 1985. [罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.]
- [18] Cochran W G. Sampling techniques[M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 1977.
- [19] Li M, Zhang X L, Wu J C. Sampling point arrangement based on GIS in eastern Henan Province[J]. *Soils*, 2011, 43 (3): 459—465. [李梅, 张学雷, 武继承. GIS支持下豫东地区土壤野外采样布点方法探索[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 459—465.]
- [20] Xu J H. Mathematical methods in contemporary geography[[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996. [徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.]
- [21] Thanh Noi P, Kappas M. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery[J]. *Sensors*, 2017, 18 (2): 18.
- [22] Wang W J, Zhang X, Zhao Y D, et al. Cotton extraction method of integrated multi-features based on multitemporal Landsat 8 images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21 (1): 115—124. [王文静, 张霞, 赵银娣, 等. 综合多特征的 Landsat 8 时序遥感图像棉花分类方法[J]. *遥感学报*, 2017, 21(1): 115—124.]
- [23] Utset A, Ruiz M E, Herrera J, et al. A geostatistical method for soil salinity sample site spacing[J]. *Geoderma*, 1998, 86 (1/2): 143—151.
- [24] Stenger R, Priesack E, Beese F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale[J]. *Geoderma*, 2002, 105 (3/4): 259—275.
- [25] Ning S R, Shi J C, Zuo Q, et al. Generalization of the root length density distribution of cotton under film mulched drip irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2015, 177: 125—136.
- [26] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [27] Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999. [王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [28] Xie Y F, Chen T B, Lei M, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis[J]. *Chemosphere*, 2011, 82 (3): 468—476.
- [29] Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. Salt-affected soil in China [M]. Beijing: Science Press, 1993. [王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [30] Xin M L, Lv T B, He X L, et al. Spatial variation of surface soil salinity in under-film drip irrigating of cotton field in irrigated areas of Manas River Basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35 (4): 74—79. [辛明亮, 吕廷波, 何新林, 等. 玛河灌区膜下

- 滴灌棉田表层土壤盐分空间变异性[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (4): 74—79.]
- [31] Shen H, Jilili Abuduwaili. Spatial distribution of soil moisture and salinity and their influence factors in the farmland of Manas River catchment, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (3): 769—776. [沈浩, 吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (3): 769—776.]
- [32] Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GISA case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557—563. [郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11 (4): 557—563.]
- [33] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 (5): 1501—1511.
- [34] Zhang F S, Liu Z X. Fractal theory and its application in the analysis of soil spatial variability: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (5): 1351—1358. [张法升, 刘作新. 分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1351—1358.]
- [35] Hu K L, Li B G, Lü Y Z, et al. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2004, 25 (3): 132—137. [胡克林, 李保国, 吕贻忠, 等. 非平稳型区域土壤汞含量的各种估值方法比较[J]. 环境科学, 2004, 25 (3): 132—137.]

(责任编辑：陈荣府)