

沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价

姚荣江, 杨劲松^{*}, 赵秀芳, 李晓明, 刘梅先

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为揭示滨海滩涂地区土壤盐分三维空间分布特点并提供相关技术方法与思路, 以苏北海涂围垦区典型地块为例, 综合采用三维克里格和随机模拟方法对土体盐分含量的三维空间分布进行估值、模拟与对比分析, 并对土体盐分三维分布的空间不确定性进行评价。结果显示, 由克里格法得到的土壤盐分空间分布具有明显平滑效应, 减小了数据间的空间差异并改变了数据的空间结构; 序贯高斯模拟结果整体分布相对离散, 突出了原始数据分布的波动性; 研究区土壤盐分随深度增加而升高, 存在一定次生盐渍化风险; 围垦后研究区土壤盐渍化的发生概率已有所降低, 轻度盐化土和重度盐化土的高概率区是改良利用的重点区域。该研究表明随机模拟方法能真实地反映土壤属性的三维空间变异特点, 其结果亦为围垦区盐渍障碍耕地的治理利用提供了技术对策。

关键词: 海涂区, 盐分测定, 不确定性分析, 空间分布, 三维随机模拟

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.016

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0091-07

姚荣江, 杨劲松, 赵秀芳, 等. 沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 91-97.

Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 91-97. (in Chinese with English abstract)

0 引言

精确农业中经常对土壤属性进行估值、模拟和制图以描述土壤属性的空间变异情况, 给出土壤属性的空间分布图及未知点的估值。目前, 地统计学的克里格法被广泛用于对土壤属性的空间分布进行预测^[1-2]。然而大量研究发现, 克里格插值空间分布图具有一定的平滑效应, 会使得空间数据变化剧烈区域的重要信息丢失, 且克里格插值存在着由于估计值与实际值之间的偏差导致的不确定性, 往往不能反映隐含在随机场概率模型中的整体相关结构^[3-4]。地统计学的空间随机模拟法被提出以克服克里格法的缺陷^[5]。随机模拟方法将空间数据作为一个整体来复原其整体的空间结构, 其追求的是尽可能地接近真实的空间分布, 并不追求特定点位土壤属性的局部最优估值。同时, 空间随机模拟还可直接用于空间不确定性研究, 这也是克里格插值法欠缺的。因此, 近年来空间随机模拟方法成为地统计学研究主要趋势之一。

空间随机模拟最初主要应用于矿藏勘探评估, 后来

才逐渐应用于土壤学、水文学、环境学等^[6]。如土壤剖面质地层次的模拟^[7]、重金属含量模拟与不确定性评价^[8]、农田土壤饱和导水率的模拟^[9]、土壤养分变异的模拟^[10]等。在研究土壤水盐空间变异性方面, 随机模拟也有一定的应用实例。如屈忠义等对冻土水盐空间变异进行模拟, 并与普通克里格和人工神经克里格结果进行对比^[11]; 陈亚新等进行两种田间尺度水盐空间变异性的模拟, 并与普通克里格法估值进行比较^[12]。本研究以苏北海涂围垦区典型地块为例, 利用序贯高斯模拟方法进行土壤盐分空间分布的三维随机模拟, 将随机模拟结果与克里格插值结果、实测值进行对比分析, 并对土壤盐分三维空间分布进行非盐化土、轻度、中度和重度盐化土的空间不确定性评价, 旨在为海涂区土壤盐分三维空间分布及盐渍障碍耕地治理利用提供研究思路与技术对策。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省大丰市金海农场, 东距黄海约 6 km, 西临大丰麋鹿国家级自然保护区, 于 1999 年围垦。该区地处北亚热带季风气候区, 年均降水量 1 058.4 mm, 主要集中在 6-8 月份的雨季。由于当地缺乏蓄水工程, 农田灌溉一般采用当地微咸水 (主要是上游东台河水)。土壤主要发育于海相沉积物, 地下水埋深 1.5~2.0 m, 矿化度平均 8.5 g/L, 土壤质地以砂壤土为主, 盐渍化是制约该地区农业生产发展的主要障碍因子。本研究选择的典型地块面积为 0.69 hm² (48 m×144 m), 位于该农场的西南侧, 尽管该地块近年来已被连续垦种, 土壤盐分的变异程度仍相当显著, 在整个围垦区具有代表性。

收稿日期: 2009-07-18 修订日期: 2010-10-10

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001); 江苏省企业院士工作站项目 (BM2009622); 江苏省自然科学基金项目 (BK2009337) 和中国科学院南京土壤研究所创新领域前沿项目 (200752010022) 资助

作者简介: 姚荣江 (1980-), 男, 江苏靖江人, 博士, 研究方向为水土资源空间变异与溶质运移。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008。

Email: rjyao@issas.ac.cn.

*通信作者, 杨劲松 (1959-), 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为土壤和水资源利用与管理。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008。

Email: jsyang@issas.ac.cn

1.2 样品采集与处理

在研究地块进行网格布点采样, 采样点平均间距约 4 m。对每个样点剖面按照 0~20、>20~40、>40~60、>60~80 和 >80~100 cm 进行分层采样, 为保证样品的代表性, 每个样点均在中心点和相邻的 2 个角进行剖面土样采集, 并将同一深度土样混合组成待测样品。本研究采集了 285 个样点剖面土样 (图 1)。采样日期为 2008 年 3 月下旬。

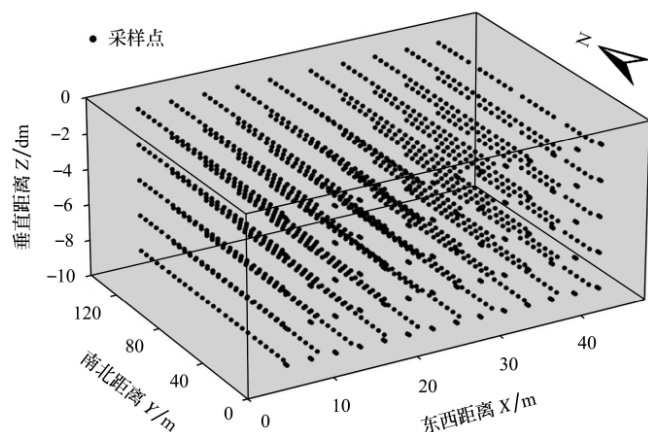


图 1 土壤盐分采样点的三维空间分布图

Fig.1 3-D geographic location of sample sites for soil salinity

采集的土样带回实验室内自然风干, 磨碎、过 2 mm 筛后备用。所有的土样均制备 1:5 土水比浸提液, 并测定其电导率 $EC_{1:5}$ 。具体测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[13]。考虑到滨海滩涂区土壤全盐含量和土壤电导率 $EC_{1:5}$ 之间有极显著的相关性, 本文采用土壤电导率 $EC_{1:5}$ 来表征土壤盐渍化程度。

1.3 研究方法

本文分别采用三维克里格和随机模拟方法进行土体盐分含量三维分布的估值与模拟, 并对估值与模拟结果进行对比分析。

1.3.1 三维克里格

克里格法利用原始数据和半方差函数结构, 对未采样点的区域化变量进行无偏最优估值。三维克里格必须在三维空间上进行采样, 并进行三维方向上的半方差分析。本文首先计算水平 (X-Y 方向) 和垂直 (Z 方向) 半方差并拟合, 然后组合水平、垂直方向半方差建立 3D 半方差函数, 最后采用普通克里格法进行三维空间插值。具体计算原理和步骤参考文献^[14]。

1.3.2 三维随机模拟

随机模拟方法主要有序贯高斯模拟、序贯指示模拟和截断高斯模拟 3 种。序贯高斯模拟是应用高斯概率理论和序贯模拟算法产生连续变量空间分布的一种随机模拟方法。该方法是依据现有数据计算待模拟点值的条件概率分布, 从该分布中随机取一值作为模拟现实。每得出一个模拟值, 就把它连同原始数据, 以及此前得到的模拟数据一起作为条件数据, 进入下一点的模拟。该方法是条件高斯随机模拟中最常用的方法之一^[15]。

1.4 分析软件

本文在数据处理过程中采用了地质统计建模软件 S-GeMS 和 SPSS 软件包, SPSS 进行统计特征值分析, S-GeMS 用于三维半方差函数计算、序贯高斯模拟、克里格插值和三维分布图绘制。考虑到垂直方向 (Z) 的变化范围较小, 为获得最佳的可视化效果, 绘制的三维分布图中垂直方向均扩大 10 倍。

2 结果与分析

2.1 三维随机模拟分析

对研究区 285 个采样剖面的土壤盐分实测数据进行三维随机模拟计算, 生成 100 个序列的随机模拟结果, 图 2 显示其中 7 次模拟获得的研究区土壤盐分随机模拟三维分布图。为对比分析随机模拟方法和克里格方法对土壤盐分模拟和预测结果的差异, 本文在研究区设定了 596 个剖面计 2 980 个模拟与插值点, 所有 100 个序列中模拟点的土壤盐分模拟数据平均值的统计特征见图 3。

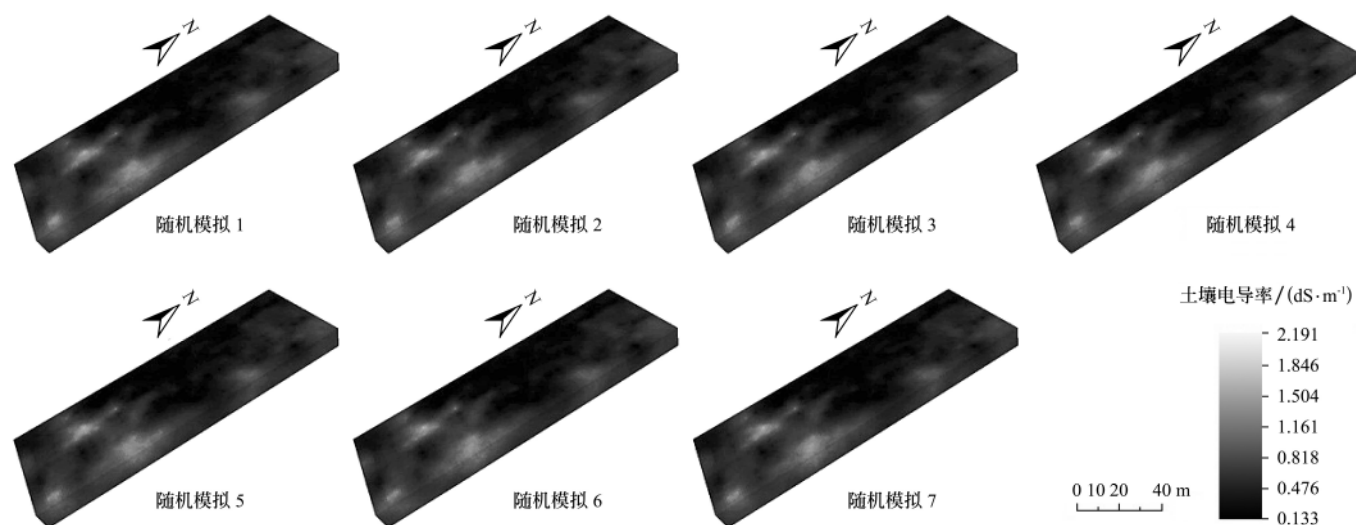


图 2 土壤盐分随机模拟三维空间分布图

Fig.2 3-D spatial distribution of stochastic simulation for soil salinity

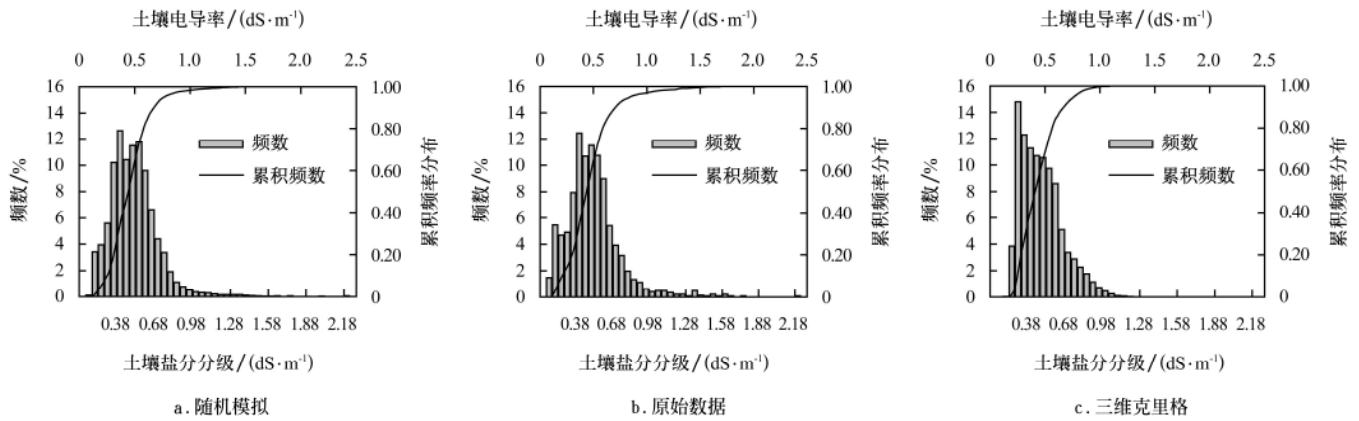


图 3 土壤盐分模拟值、实测值和克里格插值的频数分布与累积频数分布图

Fig.3 Frequency distribution and cumulative frequency distribution of stochastic simulation, measured data and kriging for soil salinity

由图 3 可以看出, 随机模拟结果的三维土壤盐分空间分布基本趋势与实测数据相符。进一步的分析表明: 在采样点上, 模拟值和实测值相等; 在模拟与插值点上, 不同序列的模拟给出略有差异的模拟值。事实上, 由于受到空间总体变化趋势的控制, 模拟与插值点上土壤盐分值是处于某一变化范围内的, 但在各种结构性和随机性因素的影响下, 往往难以确定其唯一值, 这也是模拟与插值的一个重要区别。对于研究区的任一模拟与插值点, 估计值是一定的, 而模拟值的个数没有任何限制。

2.2 随机模拟值、克里格插值和实测值对比分析

为进一步比较各方法间的差异, 本研究分别就统计特征值、半方差函数、空间分布图对随机模拟结果、三维克里格估值结果和原始数据进行对比分析, 其中取 100 个序列模拟数据的平均值作为随机模拟结果进行分析。

2.2.1 统计特征值的对比分析

对随机模拟结果、插值结果以及采样点的实测数据 (图 1) 进行统计特征分析, 其频数分布和累积频数分布如图 3 所示。可以看出, 克里格插值数据的变化范围

(0.148~1.261 dS/m) 比实测数据和模拟值的数据变化范围明显要窄 (0.133~2.191 dS/m), 且随机模拟方法的频数分布与累积频数分布较克里格方法与原始数据更为相似。由进一步统计分析可知, 模拟值、克里格插值与实测值三者的均值和中位值相近, 差异较小, 但克里格插值数据的变异系数明显小于实测值和随机模拟, 这表明克里格插值具有平滑效果。

2.2.2 半方差的对比分析

由图 4 显示的土壤盐分实测值、克里格插值和部分序列随机模拟值的半方差函数 (仅列出水平 X-Y 方向) 比较可知, 尽管各次模拟结果的半方差存在一定差异, 但其总体更接近实测值 (图 4a), 克里格插值的半方差函数明显小于实测值和模拟结果的半方差函数 (图 4b), 这说明插值会一定程度改变变量的空间结构, 垂直 (Z 方向) 半方差函数对比结果亦是如此。这与插值和模拟的区别正好吻合: 插值追求的是一种优化的结果, 而随机模拟其结果不是最优的, 但其主要目的是在模拟值接近真实值的前提下, 再现变量的空间不确定性^[16]。

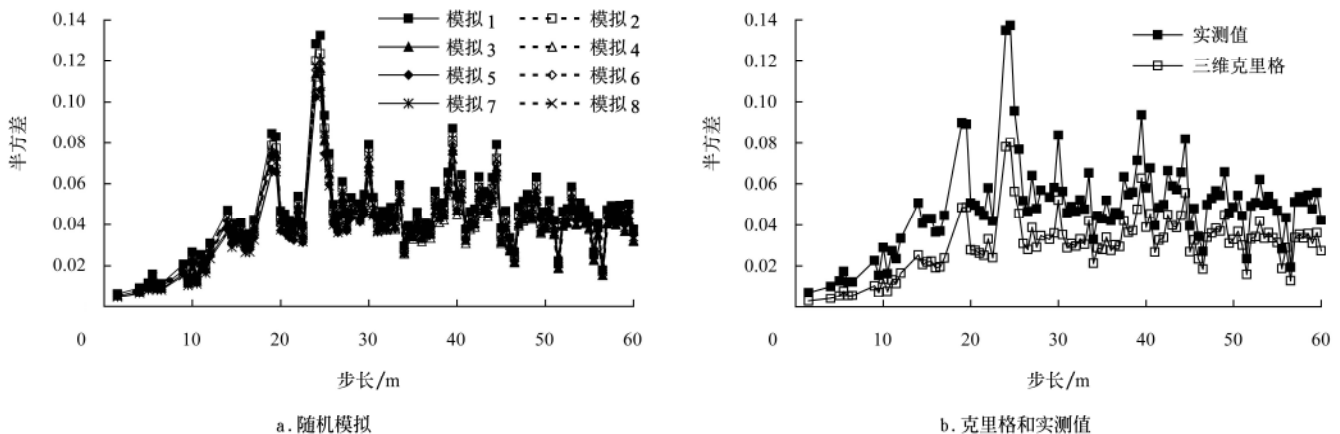


图 4 土壤盐分实测值、克里格插值和随机模拟值的半方差函数图

Fig.4 Semivariogram of measured values, kriging and stochastic simulation for soil salinity

2.2.3 空间分布图的对比分析

图 5 显示了土壤盐分克里格插值和随机模拟的三维空间分布图 (图 5b 取 100 次随机模拟平均值)。无论是插值还是模拟, 都可以看到研究地块东部和南部土体盐

分含量较高, 西部和北部盐分含量总体较低的整体趋势。但是克里格插值结果的数据分布更趋于平缓, 其空间分布图总体比较连续和平滑 (图 5a)。而序贯高斯模拟结果在尊重原始实测数据值情况下, 整体分布相对离散, 突

出了原始数据分布的局部波动性。显然, 克里格插值在一定程度上减小土壤盐分空间分布的变异性。克里格插

值主要是对某一空间属性进行估计和预测, 而随机模拟是通过随机建模来考察变量的不确定性。

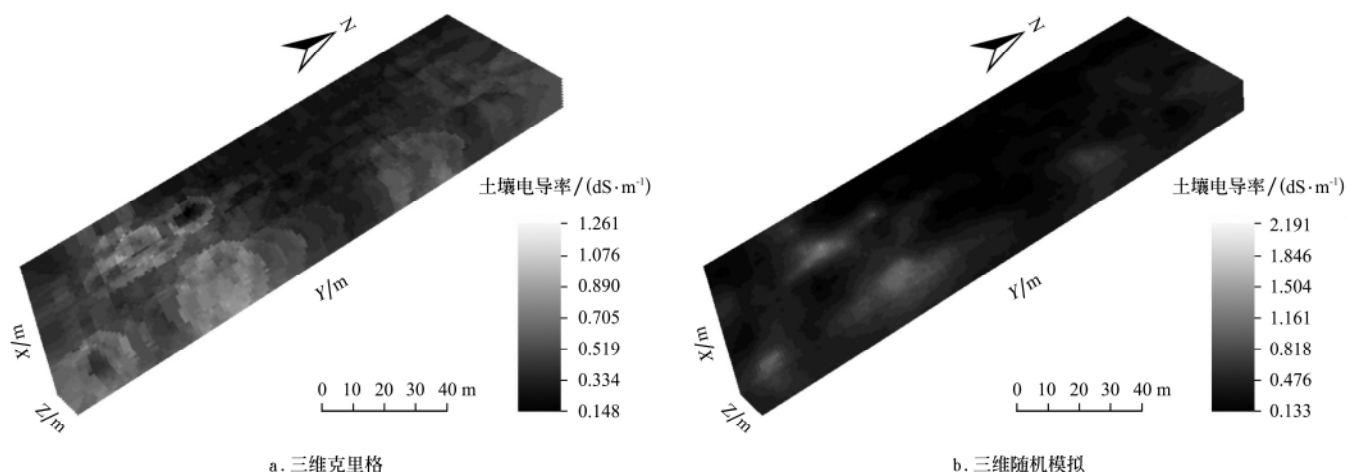


图 5 土壤盐分克里格插值和随机模拟三维分布图

Fig.5 3-D spatial distribution of kriging and stochastic simulation for soil salinity

2.3 土体盐分统计分析

研究地块土体盐分三维分布如图 6 所示 (100 次模拟平均值)。可以看出, 盐分的空间分布在不同土壤深度具有相似性, 即表层盐分含量的斑块状分布特点在深层土壤仍然得到延续和体现, 其空间格局总体接近; 随着土壤深度的不断增加, 盐分含量较高的斑块逐渐减弱, 变异强度逐渐降低, 表明深层土壤盐分趋于均一化, 这与滨海滩涂地区土壤盐分剖面分布实际情况是一致的, 其原因可能在于滨海地区地下水埋深较浅, 同时采样期正

值滨海地区春季积盐期。事实上, 从研究区不同土体深度土壤含盐量的统计结果来看 (数据略), 1 m 土体内土壤盐分平均值随深度增加而升高, 考虑到在采样期滨海滩涂地区正值干燥少雨的春季, 受高蒸降比的影响, 此时土壤盐分向上运移的强度大于向下, 因此研究区目前存在次生盐渍化风险, 有必要采用适当改良措施控制盐分表聚。各层土壤含盐量的变异系数随深度增加逐渐降低, 进一步证明了深层土壤盐分分布的均一化特点。

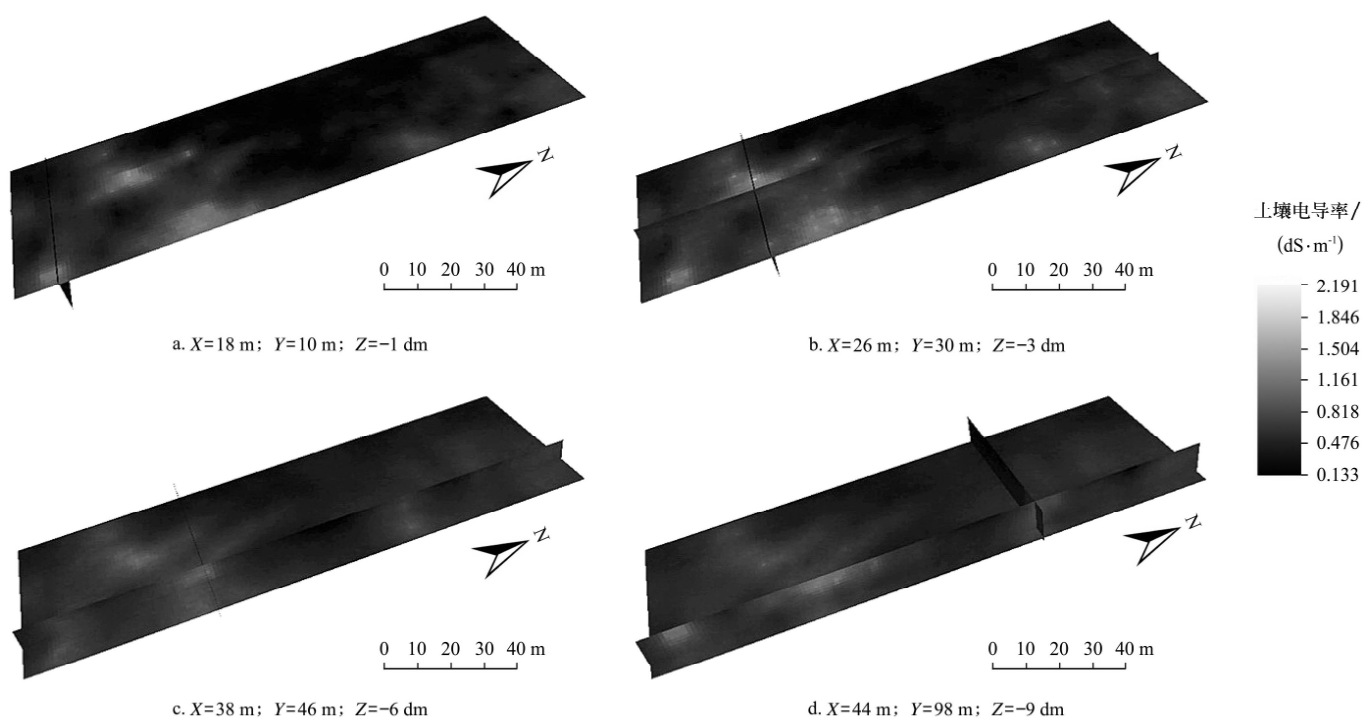


图 6 土体内不同部位土壤盐分三维分布图

Fig.6 3-D spatial distribution of soil salinity at various locations in soil solum

2.4 空间不确定性评价

在现代农业中往往依据土壤盐分克里格插值的估计值来进行作物布局 and 确定合理的治理改良措施。但是，由于土壤盐分的插值空间分布图存在不确定性，导致据此提出的作物布局和管理措施可能与实际情况差异较大。事实上，获取空间位置任意处土壤盐分低于（或超过）作物生长要求的临界值，或处于某一盐分范围的概率比获取土壤盐分空间分布图更有意义。

令 $Z(x)$ 为采样区内空间任一位置 x 处的随机模拟结果， Z_k 为盐分的阈值或临界值，则空间位置 x 处不超过临界值的概率 $P\{Z(x) \leq Z_k\}$ 按下式计算

$$P\{Z(x) \leq Z_k\} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{N\{Z(x) \leq Z_k\}}{L} \quad (1)$$

式中， $N\{Z(x) \leq Z_k\}$ 为 x 处一系列随机模拟值中不超过临

界值的个数； L 为随机模拟系列的个数，实际应用中要求 $L \geq 100$ 。同样，任一个空间位置 x 处土壤盐分超过临界值 Z_k 的概率 $P\{Z(x) > Z_k\}$ 为

$$P\{Z(x) > Z_k\} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{N\{Z(x) > Z_k\}}{L} \quad (2)$$

综合考虑滨海滩涂地区作物生长状况以及土壤盐分与 $EC_{1:5}$ 之间的显著相关性，本文将土壤盐渍化程度划分为^[17]：重度盐化，含盐量 $4 \sim 10$ g/kg ($1.40 \sim 3.50$ dS/m)；中度盐化，含盐量 $2 \sim < 4$ g/kg ($0.70 \sim < 1.40$ dS/m)；轻度盐化， $1 \sim < 2$ g/kg ($0.35 \sim < 0.70$ dS/m)；非盐化，含盐量 < 1 g/kg (< 0.35 dS/m)。根据上述标准，利用式 (1) 和 (2) 对 100 个序列土壤盐分模拟结果进行统计，绘制出整个研究土体内非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土和重度盐化土的三维概率分布图 (图 7)。

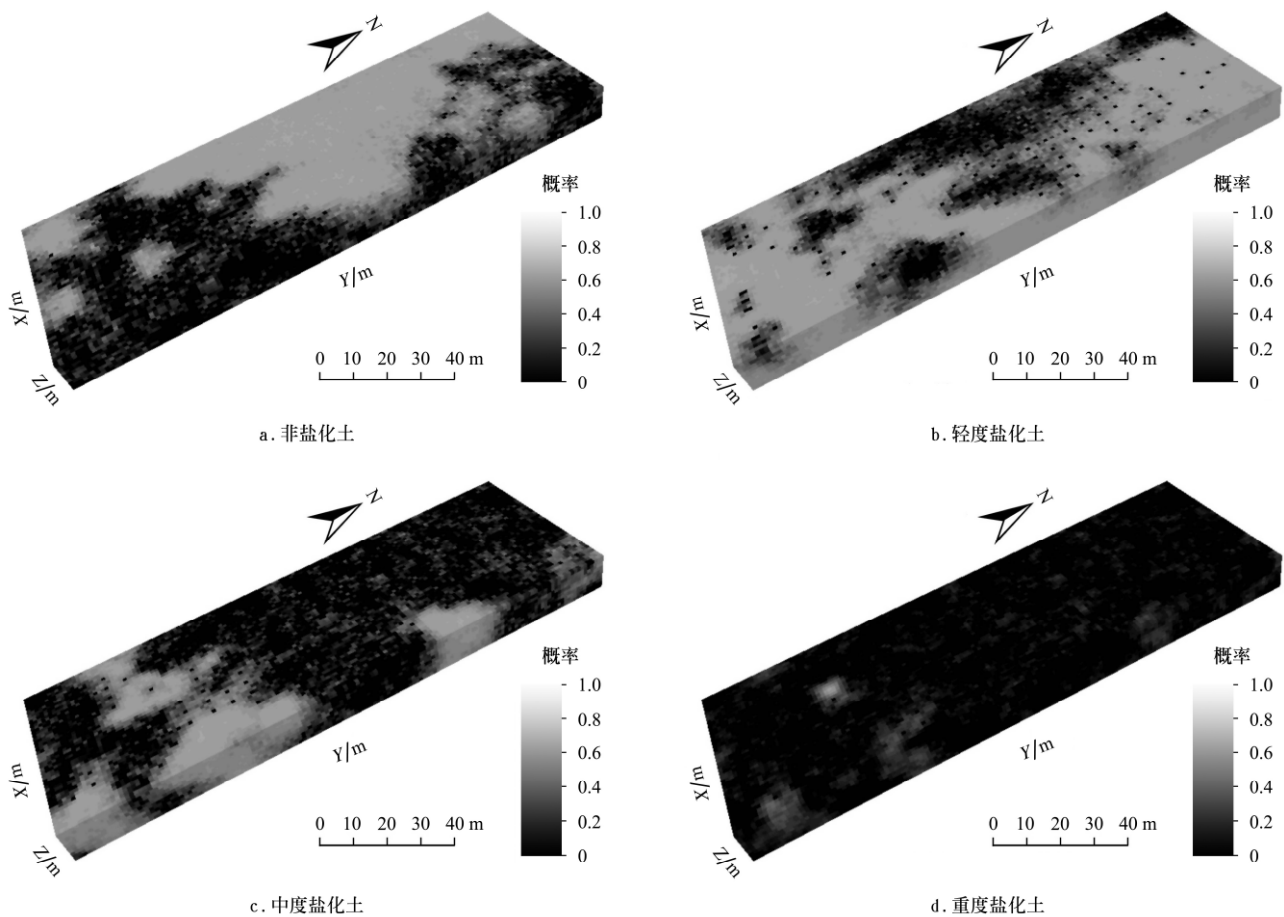


图 7 非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土和重度盐化土的三维概率分布图

Fig.7 3-D probability distribution of non-saline soil, light salinized soil, medium salinized soil and heavy salinized soil

研究土体内非盐化土的高概率区 (> 0.5) 主要连片分布于地块西部和中部，这也是分布面积较大的斑块，这表明经过近 10 a 的围垦利用，研究地块土壤盐渍化程度降低，盐渍土分布面积和体积均减少。轻度盐化土的高概率区呈现条带状分布特点，这是整个研究土体分布体积最大的斑块，其发生概率平均达 52.21%，考虑到采样期滨海滩涂地区土壤返盐强烈且正值春播，宜采用苗期地膜覆盖、增施有机肥等农艺控盐措施，抑制盐分上

行表聚，适合该地块种植的滩涂常见的大田作物有棉花、大麦、油菜等。中度盐化土的高概率区主要呈斑块状分布于研究地块的南部和东部，平均发生概率 16.61%，其改良治理应以优化灌排管理为主，促进土壤洗盐、排盐并在此基础上进行种稻洗盐或种植菊芋、油葵等具有一定耐盐能力的沿海滩涂特色经济植物。研究地块重度盐化土的发生概率平均仅 3.35%，面积小且分布散，呈现顽固性盐斑特点，种植具有高耐盐性的滩涂盐生植物或进

行客土种植, 是较为高效的改良利用途径。

3 结论与讨论

随机模拟能最大程度保留土壤盐分数据的空间差异性, 突出原始数据分布的波动性, 较三维克里格方法更真实地反映土壤盐分的三维空间变异特点。

研究地块东部和南部土体盐分含量较高, 土壤盐分分布在不同深度具有空间相似性, 且土壤盐分随深度增加而升高, 存在次生盐渍化风险。整个研究土体非盐化土、轻度、中度和重度盐化土的发生概率平均分别为 27.83%、52.21%、16.61%和 3.35%, 轻度盐化土和中度盐化土的高概率区是改良利用的重点区域。

本文系统分析了三维克里格和随机模拟方法对田块尺度土体含盐量三维空间分布预测结果的差异, 评价了土壤盐分三维分布特点与空间不确定性, 并提出了相应的治理利用对策。本研究突破了以往利用二维分布进行土壤盐渍化评估的缺陷, 综合考虑了土壤盐分在水平与垂直空间上的规律, 在水盐迁移活跃的滨海滩涂地区更具实用性。须说明的是, 本文旨在为土壤属性三维空间分布的量化评估提供技术范例, 对象为小范围的田块, 在较大尺度下, 结果可能会存在差异; 此外, 本研究提出了适合不同风险类型的盐渍障碍地治理利用对策, 事实上滨海滩涂地区盐分变动剧烈, 本文仅考虑了土壤盐分空间上的规律, 对时间上的变异特点有待进一步探讨。

[参 考 文 献]

- [1] Cattle J A, McBratney A B, Minasny B. Kriging method evaluation for assessing the spatial distribution of urban soil lead contamination[J]. *J Environ Qual*, 2002, 31(5): 1576—1588.
- [2] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(3): 463—468.
Hu Kelin, Zhang Fengrong, Lü Yizhong, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing county, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3): 463—468. (in Chinese with English abstract)
- [3] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*[M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [4] Wang G, Gertner G, Parysow P, et al. Spatial prediction and uncertainty analysis of topographic factors for the revised soil losses equation (RUSLE)[J]. *J Soil Water Conserv*, 2000, 55(3): 374—384.
- [5] Deutsch C V, Journel A G. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [6] Journel A G. Geostatistics for conditional simulation of ore bodies[J]. *Econ Geol*, 1974, 69(5): 673—687.
- [7] 贺勇, 胡克林, 李卫东, 等. 华北冲积平原区土壤剖面质地层次空间分布的三维随机模拟[J]. *土壤学报*, 2008, 45(2): 193—200.
He Yong, Hu Kelin, Li Weidong, et al. Stochastic simulation of three-dimensional spatial distribution of soil profile textural layers in alluvial plain, North China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 193—200. (in Chinese with English abstract)
- [8] 史舟, 李艳, 程街亮. 水稻土重金属空间分布的随机模拟和不确定评价[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 209—214.
Shi Zhou, Li Yan, Chen Jieliang. Stochastic simulation of spatial distribution and uncertainty assessment of heavy metal in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 209—214. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡克林, 李保国, 陈研. 表层土壤饱和导水率的空间变异对农田水分渗漏的影响[J]. *水利学报*, 2006, 37(10): 1217—1223.
Hu Kelin, Li Baoguo, Chen Yan. Effect of spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity on water drainage at field scale[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(10): 1217—1223. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈翠英, 江永真. 土壤养分空间变异性的随机模拟及其应用[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(12): 67—71.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen. Stochastic simulation of spatial variability of soil nutrient property and its application[J]. *Transactions of the CSAM*, 2006, 37(12): 67—71. (in Chinese with English abstract)
- [11] 屈忠义, 陈亚新, 杨靖宇. 人工神经网络在冻土水盐空间变异与条件模拟中的应用比较[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 48—53.
Qu Zhongyi, Chen Yaxin, Yang Jingyu. Application and comparison research of artificial neural network on conditional simulation and space variability of water-salt for frozen earth[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈亚新, 史海滨, 田圃德, 等. 水盐空间变异性监测的条件模拟[J]. *水利学报*, 2000, 31(6): 67—73.
Chen Yaxin, Shi Haibin, Tian Pude, et al. Study on conditional simulation of soil water-salt spatial variability monitoring[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(6): 67—73. (in Chinese with English abstract)
- [13] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [14] 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.
Li Hongyi. Three-dimensional Variability and Visualization of Soil Electrical Conductivity in Coastal Saline Land[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [15] Pendrel J, Leggett M, Mesdag P, et al. Geostatistical simulation for reservoir characterization[C]//2004 CSEG National Convention, Calgary: Canada and Beyond, 2004.
- [16] Olea R A, Pawlowsky. Compensation for estimation smoothing in Kriging[J]. *Mathematical Geology*, 1996, 28(4): 407—417.
- [17] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. *中国盐渍土*[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region

Yao Rongjiang, Yang Jingsong^{*}, Zhao Xiufang, Li Xiaoming, Liu Meixian

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to illustrate the three-dimensional spatial pattern of soil salinity in coastal zones and provide relevant practical method and technical route, ordinary kriging and stochastic simulation method were applied to the estimation, simulation, comparison and uncertainty analysis of the three-dimensional spatial distribution of coastal soil salinity. The study was performed in typical farmlands of coastal reclamation zone in north Jiangsu Province, China. The results indicated that the spatial distribution of soil salinity generated by ordinary kriging was continuous and smooth, and the spatial variability of the kriging salinity data was reduced with the spatial structure changed, while the spatial distribution of soil salinity generated by the SGS (sequential gaussian simulation) was discrete and fluctuant. Soil salinity increased with the depth in soil solum across the study area and the risk of secondary-salinization was observed. The probability of soil salinization risk decreased since reclamation, and high probability region of slightly and medium salinized soil was the main area for amelioration and utilization. The study showed that stochastic simulation method revealed the three-dimensional spatial variability of soil attributes more truly than ordinary kriging method, and the research results can provide countermeasures to the management and utilization of salt-affected land in coastal reclamation zone.

Key words: coastal zones, salinity measurement, uncertainty analysis, spatial distribution, three-dimensional stochastic simulation