

不同尺度下土壤盐分空间变异的指示克里格评价^①

杨奇勇, 杨劲松*, 姚荣江

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 针对目前黄淮海平原盐渍土改良区存在的土壤盐渍障碍问题, 以该区域典型县域禹城市为研究对象, 综合运用 GIS 和非参数地质统计学的指示克里格法, 对县级和镇级两个采样尺度下 0~20 cm 耕层土壤盐分的空间变异性进行了分析, 并给出了土壤盐分满足一定条件的概率分布图。结果表明, 两个采样尺度下土壤盐分均不符合正态分布且都存在特异值, 但采用指示克里格方法可以获得较为稳健的变异函数; 受结构性因素与随机性因素共同影响, 土壤盐分的指示半方差均表现为中等程度的空间自相关性; 随着研究尺度的增加, 块金值/基台值减小, 变程增加, 说明随着研究尺度的增加, 自相关性增强, 结构性因素影响增强, 随机因素影响减弱; 随着研究尺度的减小, 盐渍化风险增大。

关键词: 不同尺度; 土壤盐分; 空间变异; 指示克里格

中图分类号:

探求区域土壤盐分的空间分布在农业、水资源利用和环境保护等方面均有着重要的意义。对于盐渍土改良区而言, 虽然部分地区盐渍土已经改良好了, 土壤盐分含量很低, 但是尚未改良好的盐渍土土壤盐分含量仍然较高, 呈“插花状”分布。这使得盐渍土改良区土壤盐分存在较大的“异常值”, 数据往往不成正态分布, 影响变异函数的稳健性^[1]。非参数地质统计学中的指示克里格法是处理有偏数据的有力工具, 它可以在不去掉重要的而实际又存在的异常值的情况下处理各种不同的现象, 并能抑制特异值对变异函数稳健性的影响。

有关指示克里格方法的研究与运用, 国内外已有较多详细的报道^[2-6], 但是这些研究都是单元指示克里格法在单一采样尺度下的应用, 而土壤特性的空间变异性是尺度的函数^[7-8], 即在不同尺度下, 同一变量的自相关程度相差很大, 且随样点间的距离加大, 变异函数值的随机成分也在不断增加, 更小尺度下的结构特征将被掩盖, 不利于深入分析土壤特性的空间变异结构特征, 但是在多尺度下进行研究却可以很好地解决此问题。因此, 多尺度分析已成为当今土壤特性空间变异研究中迫切需要研究的重要内容, 引起了越来越多研究者的关注^[9-12]。本文针对黄淮海平原农业生产

发展的土壤盐渍障碍因子, 以该地区典型县域禹城市作为研究对象, 在 GIS 技术支持下, 对禹城市进行县级和镇级两个采样尺度下布点采样, 以 ArcGIS9.2、GS+7.0 为操作平台, 运用指示克里格法对两个采样尺度下土壤盐分的空间异质性进行了探讨, 为科学管理与合理改良利用黄淮海平原地区盐渍土地提供一定的理论基础和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

禹城市位于山东省西北部, 处于徒骇河中游, 地理位置在 116°22'~116°45'E, 36°40'~37°12'N 之间, 全市土地总面积 990 km², 属于暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 13.1℃, 全年平均降雨量 616 mm, 约 76.4% 的降水集中在 6—9 月份。禹城市内皆平原, 但地貌比较复杂, 共有河滩高地、高坡地、平坡地、洼坡地、浅平洼地、决口扇形地和砂质河槽地等 7 种类型(图 1)。受地形、地貌、母质、气候等因素的影响, 全市形成了潮土和盐土两大土类。潮土面积 968.6 km², 占土壤面积的 97.77%, 在全市广泛分布。全市辖 11 个乡镇(图1), 主要农作物为小麦、玉米、棉花。在第二次土壤普查时, 研究区域有机质平均含量

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001)、海洋公益性行业科研专项经费项目(201105020-3, 201105020-4)、国家自然科学基金项目(41171181)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-359)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 杨奇勇(1976—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 助理研究员。主要从事土壤、水资源利用与管理及 GIS 应用研究。E-mail: yangqiyong0739@163.com

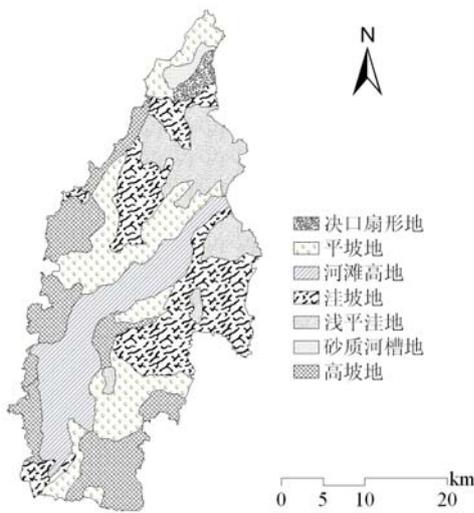


图 1 研究区域地形地貌分布
Fig.1 landform distribution in Yucheng City

只有 7.36 g/kg, 土壤盐分平均含量高达 3.13 g/kg; 2003 年有机质平均含量增加到 12.47 g/kg, 土壤盐分平均含量下降为 0.96 g/kg。可见经长期的盐渍土改良、培肥, 禹城市土壤有机质有了明显的提高, 土壤盐分含量迅速降低。但是, 大量的不合理的引黄灌溉和地下水井的废弃使得部分地区地下水位上升, 土壤次生盐渍化加剧^[13]。

1.2 土壤样品采集

以 ArcMap9.2 为操作平台, 通过屏幕数字化获取了禹城市的土壤图、地形地貌图、行政区划图和镇级

采样尺度下密集采样区的边界图等矢量图。在 GIS 中进行县级尺度和镇级尺度的室内布点工作, 野外样品采集于 2008 年 5 月下旬, 取样土层为 0~20 cm 耕层土壤。

(1) 县级采样尺度下土壤样品采集。以禹城市为边界在 GIS 中进行 2.0 km × 2.0 km 网格布点, 获取网格中心的坐标作为准采样位置, 输入 GPS 进行野外采样导航。实际采样过程中有些样点落在村庄、河流、道路等地, 在附近进行调整, 并用 GPS 记下实际采样点的坐标, 如不能调整, 则该采样点删除。遵照这个原则共得到县级采样尺度下有效采样点 298 个(图 2)。

(2) 镇级采样尺度下土壤样品采集。选取市中办、安仁镇和伦镇镇结合处的典型地块(图 2 中虚线框)为密集采样区域, 面积约为 91.74 km²。样点布设分为两层: ①典型地块进行 0.5 km × 0.5 km 网格布点, ②进行 1.0 km × 1.0 km 嵌套网格布点, 且 1.0 km × 1.0 km 网格点处在 0.5 km × 0.5 km 4 个点的中心。将准采样坐标输入 GPS 进行野外采样导航, 将实际采样过程中落在村庄、河流、道路等地的样点删除, 共得到镇级采样尺度下有效采样点 352 个(图 2)。

1.3 土壤样品测定

土壤样品带回实验室, 风干、研磨、过筛备用。根据项目要求参考《土壤农业化学分析》^[14]一书, 土壤电导率采用电导法(1:5 土水比, 使用去 CO₂ 蒸馏水, 5 min 震荡, 抽滤, 清液待测)进行测定。

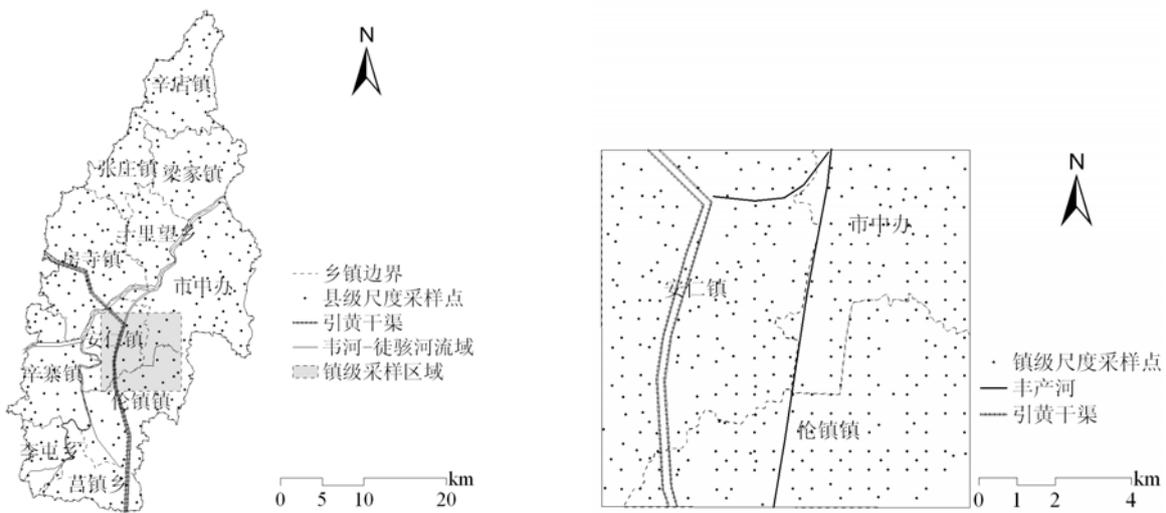


图 2 不同尺度下土壤盐分采样点分布

Fig. 2 Distribution of soil sampling sites at different scales

1.4 数据处理与研究方法

本文采用地统计学方法中的单元指示克里格法对禹城市县级和镇级两个采样尺度下 0 ~ 20 cm 土壤盐分进行研究对比分析, 经典统计分析、地统计分析采用 GS+7.0; 空间插值图、概率计算采用 ArcGIS9.2。单元指示克里格法在文献[2]、文献[5]和文献[6]中已有详细论述, 本文只简单介绍综合运用 GS+ 和 GIS 进行单元指示克里格法分析的步骤: ①根据问题的要求 (如本文中的电导率含量) 确定相应评价指标的阈值。阈值原则上是可任选的, 可以是一个临界值, 也可以是一个区间范围; ②为评价指标确定指示函数, 根据指示函数将相应的采样点数据进行二态指示变换, 得到各样点的指示变换值 (即 1 或 0), 指示变换值可以用来评价相应采样点上土壤盐分的高低状况; ③在 GS+7.0 中利用指示变换值进行变异函数模拟计算, 拟合得到最佳变异函数模型; ④将变异函数模型参数输入到 ArcGIS9.2 中进行普通克里格插值, 得到土壤盐分满足相应标准或要求的概率空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 不同研究尺度下土壤盐分的统计特征分析

禹城市县级和镇级两个采样尺度下耕层土壤盐分

含量实测值的统计分析如表 1 所示。两个采样尺度下土壤盐分含量都较低, 县级采样尺度下均值约为 0.115 dS/m, 镇级采样尺度下约为 0.119 dS/m, 但是变异系数都较大, 部分地区土壤盐分含量仍然较高, 最高值达到 0.716 dS/m。从变异系数看, 两个采样尺度下土壤盐分都为中等强度变异^[15], 随着研究尺度的增加, 变异系数减小。由图 3 所示的频率分布图可以看出, 两个采样尺度下土壤盐分的分布具有相似性, 都呈现明显向左偏倚, 大部分样点电导率主要集中在 0.023 ~ 0.133 dS/m 之间, 说明长期的盐渍土改良取得了很好的效果, 但是部分地区盐渍化仍然存在, 故在频率图右侧由于高值存在出现长尾现象。单样本 K-S 正态检验和对数正态检验结果表明, 两个采样尺度下的土壤盐分既不服从正态分布也不服从对数正态分布。

根据 Cochran^[16]的随机采样公式, 可以求出在 98% 置信水平和 10% 相对误差条件下两个采样尺度下土壤盐分的合理取样数目 (表 1): 县级采样尺度下土壤盐分的合理取样数目为 267, 镇级采样尺度下土壤盐分的合理取样数目为 315。本研究所布置的取样点超过了合理取样数目, 因此满足研究区域盐分分析的精度要求。

表 1 不同研究尺度下土壤盐分的统计特征 (dS/m)

Table 1 Statistical characteristics of soil salinity at different scales

采样尺度	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数	合理取样数目
县级采样尺度	0.024	0.716	0.115	0.081	3.283	14.846	0.702	267
镇级采样尺度	0.023	0.669	0.119	0.091	2.866	10.077	0.763	315

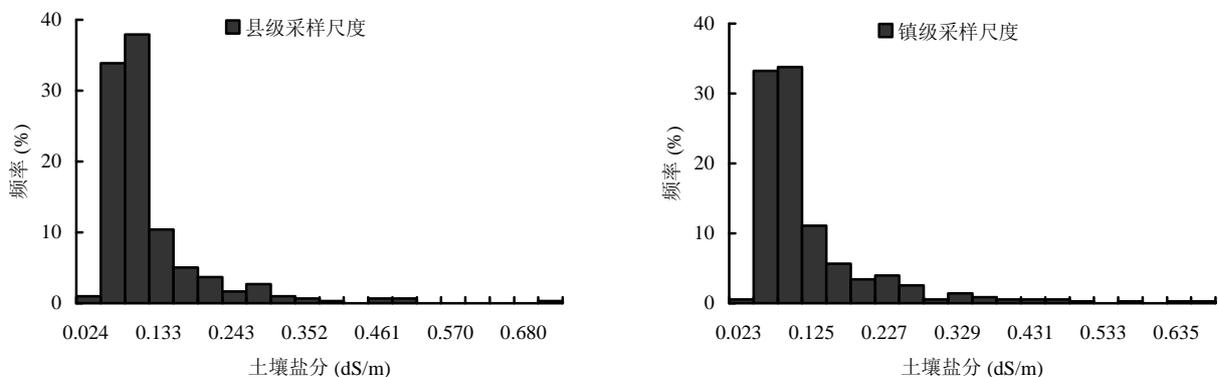


图 3 土壤盐分含量频率分布直方图

Fig.3 Frequency distribution histograms of soil salinity

2.2 不同研究尺度下土壤盐分的指示半方差函数分析

虽然指示克里格方法不能给出土壤盐分含量的空间分布图，但是在盐渍土改良区，人们更感兴趣的不是某一点处土壤盐分的具体值，而是大于某一阈值的土壤盐分在空间上的分布概率。单元指示克里格计算的关键是选择阈值，针对禹城市盐渍土改良区的土壤

盐渍化反复性的特点，参考已有研究^[5]，本研究选择黄淮海平原。轻度盐渍化水平的临界值 1 g/kg（约相当于土壤电导率 $EC_{1.5} = 0.29 \text{ dS/m}$ ）作为阈值。即样点土壤电导率含量大于 0.29 dS/m 时，指示变换值为 1，否则为 0。对指示变换后两个尺度的土壤盐分进行指示半变异函数分析，县级采样尺度下土壤盐分与镇级采样尺度下土壤盐分的指示半方差都符合指数模型（表 2）。

表 2 不同尺度下土壤盐分指示半方差函数

Table 2 Indicator semivariograms of soil salinity at different scales

采样尺度	变异函数模型	块金值 C_0	基台值 $Sill$	块金值 C_0 /基台值 $Sill$	决定系数 R^2	变程 a (km)
县级采样尺度	指数模型	0.036 0	0.064 0	0.562 5	0.569	13 300
镇级采样尺度	指数模型	0.034 2	0.056 4	0.606 4	0.546	1 230

表 2 中，块金值 C_0 通常表示由随机部分引起的空间异质性；基台值 $Sill$ 通常表示系统内总的变异；块基比（块金值 C_0 /基台值 $Sill$ ）表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比，它反映了土壤属性的空间依赖性，常被用作研究变量空间相关的分类依据^[17]。县级采样尺度与镇级采样尺度下土壤盐分的块基比分别为 56.25% 和 60.64%，均体现为中等强度的空间自相关性。这说明在当前阈值条件下，县级采样尺度与镇级采样尺度下土壤盐分条件概率的空间分布是由随机性因素（如灌溉、耕作措施和土壤改良等各种人为活动）和结构性因素（如气候、地形、土壤类型等）共同作用的结果。变程也称为空间最大相关距离，反映了变

量空间自相关范围的大小。在县级采样尺度下，土壤盐分的变程较大，为 13.3 km；在镇级采样尺度下，土壤盐分的变程明显变小，只有 1.2 km。可见随着研究尺度的增大，地形、母质、土壤类型等大尺度结构因素对土壤性质的影响逐渐增强，而随机因素影响逐渐减弱，从而使土壤盐分的块基比变小、变程明显增加。

2.3 不同尺度下土壤盐分的空间插值分析

为了更直观地反映土壤盐分的空间分布情况，利用 ArcMap 对两个采样尺度下的土壤盐分指示变换值进行 Kriging 插值，绘制了禹城市县级采样尺度和镇级采样尺度下耕层土壤盐分含量 $>0.29 \text{ dS/m}$ 的概率空间分布图（图 4）。

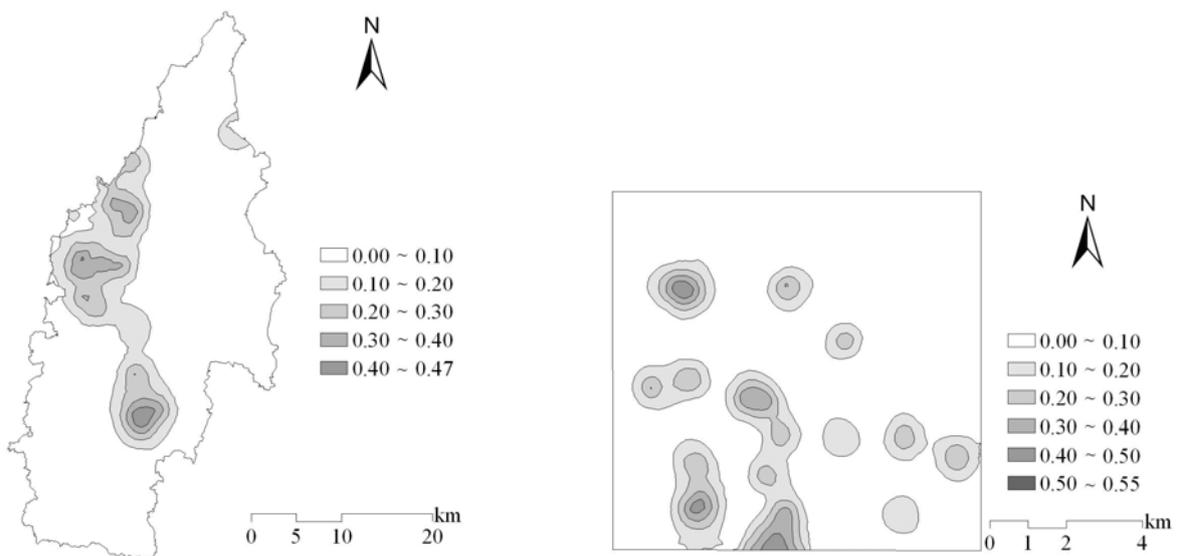


图 4 不同尺度下土壤盐分概率 ($>0.29 \text{ dS/m}$) 的空间分布图

Fig. 4 Probability maps of soil salinity higher than 0.29 dS/m at different scales

从图 4 中可以看出,在县级采样尺度下,禹城市耕层土壤盐分含量高概率区域主要分布在西北部的张庄镇、西部的房寺镇以及中南部的安仁镇和伦镇镇,其他乡镇是低概率分布区。镇级采样尺度下,土壤盐分含量概率分布呈斑块状,低概率主要分布在区域的东北部,高概率呈插花状分布在中西部、南部。对比两个采样尺度下土壤盐分的概率分布,镇级采样区域在县级采样尺度概率分布图中,概率区间为 $0 \sim 0.47$,图形呈一个高值中心,图斑平滑,信息量较少;在镇级采样尺度概率分布图中,概率分布区间为 $0 \sim 0.55$,图形呈多个高值中心的“插花状”分布,图斑破碎,信息量较多。

禹城市土壤盐分条件概率分布是受到自然因素和人为因素等两个方面因素共同作用的结果。自然因素方面,张庄镇属微咸水型土壤区,土质以轻壤为主,地下埋深一般在 2 m 以内,地下水矿化度较高,土壤盐渍化风险大,历来是禹城市重盐碱土的集中带;房寺镇位于禹城市西部的高坡地和浅平洼地上,土壤质地多为轻壤,土壤肥力低,水利条件差;伦镇镇、安仁镇属盐化潮土区,是禹城市著名的盐碱土改良实验区,地貌以平坡地、洼坡地为主,多为轻壤,土壤贫瘠,地势低洼,内外排水不畅,是盐化潮土的集中分布带;徒骇河从禹城市西南辛寨镇的北部沿房寺镇、十里望乡和梁家镇等乡镇的南部边界流向东北,地形地貌以河滩高地为主,地势较高,地下水埋深多在 3 m 以下,土壤多为褐土化潮土,土体构型良好,土壤肥力较高,是全市著名的高产区,土壤肥力较高,土壤盐分含量低,基本为无盐渍化。人为因素方面,1958 年位山引黄,一度打乱了原来的自然流势,导致地下水位上升,次生盐渍化面积增加到 2.36 万 hm^2 ;1962 年后,随着田间沟网工程逐步配套,地下水位下降,禹城市盐碱地面积又下降到 0.83 万 hm^2 ;1972 年潘庄引黄灌区的修建,长期蓄水使得灌区地下水位较高,全市盐碱化面积剧增 1.59 万 hm^2 ;1978 年后,注意了排灌结合,合理控制蓄水水位,禹城市盐碱地面积下降很快,全市盐碱地面积减少为 0.75 万 hm^2 。但是,近年来大量的引黄灌溉和地下水井的废弃导致地下水位上升,次生盐渍化有上升趋势。在引黄主干渠流经的伦镇镇、安仁镇、房寺镇的南部都是盐渍化风险较高的区域(图 2,图 4)。

2.4 不同采样尺度下土壤盐渍化风险评价

为了进一步了解研究区域土壤盐分含量的空间分布特点,在 ArcGIS 技术支持下,对土壤盐分 >0.29

dS/m 的概率分布做了风险性评价。从整体上看,县级采样尺度下土壤盐分 >0.29 dS/m 的平均概率为 0.165,其概率区间以 $0.0 \sim 0.1$ 的分布最广(图4),面积约为 795.20 km^2 ,占总面积的 79.45%,而 $0.3 \sim 0.4$ 的高概率分布面积约为 21.82 km^2 ,占总面积的 2.18%,盐渍化概率在 0.40 以上的面积只有 4.12 km^2 ,占总面积的 0.41%;镇级采样尺度下土壤盐分 >0.29 dS/m 的平均概率为 0.195,其概率区间以 $0.0 \sim 0.1$ 的分布最广(图 4),面积约为 72.99 km^2 ,占镇级采样区面积的 79.57%,而 $0.3 \sim 0.4$ 的概率分布面积约为 15.99 km^2 ,占总面积的 1.74%,有一定的盐渍化风险;盐渍化概率在 0.4 以上的面积只有 2.10 km^2 ,占总面积的 2.29%,盐渍化风险较高。

对照两个采样尺度下的概率区间分布特征,发现随着采样尺度的减小,土壤盐渍化风险概率增大,而且低概率面积分布的百分比减小,而高概率面积分布的百分比增加。可见,不同研究尺度下土壤盐分含量空间分布规律明显不同,小尺度下观测到了中、大尺度不能观测到的细微变化。因此,开展研究区域不同采样尺度下的土壤盐分风险性评价研究,能从区域尺度上发现农田土壤改良过程中可能存在的问题,这为整个黄淮海平原盐渍土改良治理提供理论基础,将有助于区域土壤资源的可持续利用。

3 结论

(1) 在土壤属性的数据分析中,往往由于特异值的存在使数据偏离正态分布,而不能得到稳健的变异函数,影响克里格估计精度,指示克里格法是处理有偏数据的有效工具。在农业水土资源与区域土壤环境的调查、分析以及风险评价中有广阔的应用前景。但是如何结合专业知识确定最佳阈值还有待深入探讨。

(2) 在给定的盐分阈值下,研究区域两个采样尺度下土壤盐分都表现为中等强度的空间变异性。随着采样尺度的增加,土壤盐分的变异系数减小,块基比减小,而变程增大。说明随着采样尺度的增加,气候、地形、土壤类型等结构性因素影响在增强,而灌溉、耕作措施和土壤改良等随机性因素影响在减弱。从空间分布图上看,镇级采样尺度下的插值图要破碎些,图形层次要丰富些;而县级采样尺度下的插值图要平滑些,图形层次简单些;镇级采样尺度下满足一定条件的概率比县级采样尺度下相应区域的概率明显高些,能观测到中、大尺度不能观测到的细微变化。

(3) 研究区域土壤盐分盐渍化风险随着采样尺度

的减小而增大。盐渍化的空间分布与地形地貌和引黄灌溉有一定的关联性。受地形地貌和引黄灌溉的影响, 土壤盐分高的区域呈插花状分布, 主要集中在研究区的西北部、西部和中南部。在这些区域宜应加强水资源管理, 加大水利工程建设, 适当进行引黄灌溉, 实行农业生物措施为辅的综合治理方案。

参考文献:

- [1] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 65-132
- [2] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲典型地区地下水位与土壤盐分空间分布的指示克里格评价. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2118-2124
- [3] James R, Carr Z, Bailey RE. An indicator Kriging Model for investigation of seismic hazard. *Mathematical Geology*, 1986, 18(4): 409-428
- [4] Goovaerts P, Webster R, Dubois JP. Assessing the risk of soil contamination in the Swiss Jura using indicator geostatistics. *Environmental and Ecological Statistics*, 1997, 4: 31-48
- [5] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异性的指示克里格分析评价. 土壤学报, 2008, 45(4): 585-593
- [6] 徐英, 陈亚新, 王俊生, 刘全明. 农田土壤水分和电导率空间分布的指示克里格分析评价. 水科学进展, 2006, 17(4): 477-482
- [7] Bloschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling—A review. *Hydrology Processes*, 1995, 9: 251-290
- [8] 赵军, 刘焕军, 隋跃宇. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析. 水土保持学报, 2006, 20(1): 41-45
- [9] 李敏, 李毅, 曹伟, 张江辉. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析. 水利学报, 2009, 40(10): 1210-1218
- [10] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕地土壤水分空间变异的尺度性研究. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11-16
- [11] Yemefack M, Rossiter DG, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, 2005, 125: 117-143
- [12] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 候振安, 冶军, 鲍柏杨. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. 土壤, 2004, 36(4): 376-381
- [13] 李志杰, 谢承陶, 林治安. 禹城引黄灌区土壤次生盐渍化的发生与防治. 土壤肥料, 1992, 5: 36-39
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 90-99
- [15] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数. 水科学进展, 2007, 21(2): 214-220
- [16] Cochran WG. *Sampling Techniques*: 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977
- [17] Wang YQ, Zhang XC, Huang CQ. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2009, 150: 141-149
- [18] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 邹平. 苏北海涂围垦区表层土壤体积分量的空间异质性研究. 土壤, 2009, 41(4): 659-663

Evaluation on Spatial Distribution of Soil Salinity by Indicator Kriging at Two Sampling Scales

YANG Qi-yong, YANG Jing-song, Yao Rong-jiang

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

State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract: Taking into account the problem of soil salinization existing in the current Huanghuaihai Plain, spatial distribution of soil salinity at depth of 0–20 cm layer at different scales was analyzed in a typical country of Yucheng City with the application of GIS and indicator Kriging of nonparametric geostatistics, and probability maps of soil salinity were provided. The results indicated that neither soil salinity of country scale nor of town scale followed normal distribution because of the existence of outliers, but robust semivariogram could be obtained by using indicator Kriging. Soil salinity of the both scales exhibited moderate spatial autocorrelation due to compound impacts of structural and stochastic factors. The $C_0/Sill$ decreased, but range increased as the enlargement of research-scale, which indicate that the self-correlation of soil salinity increased, the influences of random factors weakened while these of structural factors increased. Salinization risk increased with the decrease of scale.

Key words: Different scales, Soil salinity, Spatial variability, Indicator Kriging