

阿拉善左旗土壤盐分空间变异特征研究^①

吴亚坤^{1,3}, 李金彪^{2,3}, 高昊辰^{2,3}, 刘广明^{3*}

(1 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽马鞍山 243002; 2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为了获得内蒙古自治区阿拉善左旗土壤盐分空间变异特征, 本研究以阿拉善左旗为研究区域, 以实地调查采样数据为依据, 运用普通克里格法和径向基函数方法探讨研究区土壤盐分的空间分布特征, 根据两种方法在土壤盐分空间分布及插值精度等方面对比分析, 获得适合评价研究区土壤盐分空间变异特征的研究方法。研究表明: 阿拉善左旗土壤盐分具有强烈的空间自相关性。土壤盐分空间格局上表现为西南部及北部高, 东南部及中部低的趋势。土壤盐分剖面特征表现出明显的区域性, 研究区北部呈现底聚性, 西南部及东部突出部分呈现为表聚性的剖面特点。克里格法与径向基函数法均适用于阿拉善左旗土壤盐分的空间特征解译, 精度验证表明克里格法更适用于对研究区土壤盐分空间变异的探讨。研究区 0~20 cm 和 20~40 cm 两个土层中分别有 97.72% 与 99.89% 的土壤遭受不同程度的盐渍化危害, 各土层中中度盐渍化土壤面积占比例最大, 其次为重度盐渍化土壤和轻度盐渍化土壤, 盐土有一定比例的分布。因此, 需采取有效的治理措施对阿拉善左旗土壤盐渍化加以防控与治理。

关键词: 阿拉善左旗; 土壤盐分; 半方差函数; 克里格法; 径向基函数

中图分类号: S151.9 **文献标识码:** A

阿拉善左旗位于内蒙古自治区西部, 隶属于内蒙古阿拉善盟, 是我国生态环境的重要前沿防线。土壤盐渍化是制约阿拉善左旗农业生产发展的主要因素, 对土壤盐分剖面及空间变异精确评估将有助于揭示土壤盐渍化变化规律, 对于盐渍化土地科学管理和合理利用有着重要指导意义。

应用地统计学探讨土壤盐分空间变异特征目前已经开展了较为广泛的研究^[1-4]。如 Liu 等^[5]利用地统计学中的反距离权重方法(inverse distance weighting, IDW)探讨了黄河三角洲土壤盐分空间变异特征。胡佳楠等^[6]利用克里格法研究了塔里木盆地的克里雅河流域于田绿洲土壤含盐量的空间变异特征。邓凯等^[7]应用自然邻近插值方法获得了渭干河-库车河三角洲绿洲土壤盐分空间分布情况。研究空间变异最有效的手段是地统计学方法^[8-12], 其中最常用的就是普通克里格法(ordinary kriging, OK) 法, 它可以给出有限区域内区域变量的最佳线性无偏估计量。而局部性插值方法径向基函数(radial basis function, RBF),

使用一个大研究区域内较小的空间区域内的已知样点来计算预测值, 对 OK 法是很好的补充。不同的模拟方法在应用上有何差别以及如何具体应用中选择不同的模拟方法等是目前变量空间变异研究的主要问题。

本研究以内蒙古阿拉善左旗为研究区域, 运用地统计学、普通克里格法和径向基函数等方法探讨研究区土壤盐分的空间分布特征, 根据土壤盐分空间特征及插值精度等情况获得适合评价研究区土壤盐分剖面类型、特征及其空间分布的研究方法, 以期对内蒙古阿拉善左旗盐渍化土地的精确改良和合理利用提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

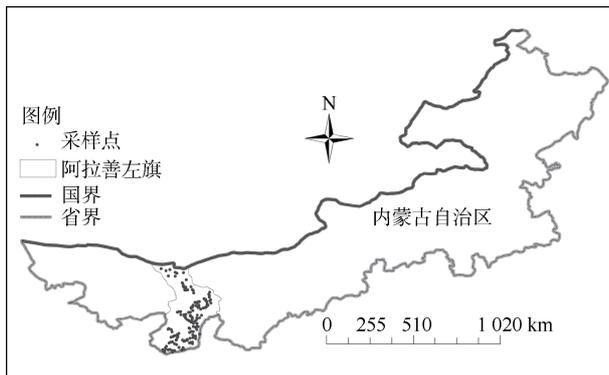
研究区为内蒙古自治区西部阿拉善左旗, 地理位置为 103°21'~106°51' E, 37°24'~41°51' N。研究区在内蒙古自治区的位置如图 1 所示。该区地势东南

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2015FY110500)和国家重点研发计划项目(2016YFC0501400)资助。

* 通讯作者(gmliu@issas.ac.cn)

作者简介: 吴亚坤(1979—), 女, 黑龙江泰来人, 博士, 讲师, 主要从事土壤盐渍化风险评估与 GIS 方面的研究。E-mail: wuyakun8250@163.com

高、西北低，平均海拔在 800~1 500 m，最高海拔 3 556.10 m；为典型的大陆性气候特征，干旱少雨、蒸发强烈、昼夜温差大。年降水量 116~201 mm，主要集中在夏季，年平均蒸发量 2 350~3 006 mm，主要集中在 4—8 月，年均温 7.8℃。土壤类型主要有灰褐土、亚高山草甸土、棕钙土、灰漠土、灰棕漠土、风沙土、石质土、粗骨土、漠境盐土和盐土等 10 个土类。



(该图基于国家测绘局(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)提供的标准地图审图号：GS(2019)3333 号制作，底图无修改，以下同)

图 1 研究区域位置及采样点布设示意图

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的采集与测定 根据阿拉善左旗的地形地貌、土壤植被类型和土地利用状况等因素，在地形图上进行 20 km × 20 km 均匀方格划分调查区，每个调查区随机调查 3 个样点。取样时兼顾代表性和均匀性，用土钻分层钻取 0~20 cm 和 20~40 cm 的土壤样品，采样时在相邻样点周围重复采集 3~5 个土壤样品混合，以减小误差。全旗共选取 159 个样点，获得 318 份土壤样品，采样点分布如图 1 所示。用 GPS 对每个样点进行定位，并记录样点周围的植被等环境特征。采集的土壤样品经自然风干、磨碎、过筛，采用土水比 1:5 浸提，测定土壤电导率值^[13]；从以上采集的土样中随机选取 60 个土壤剖面，共计 120 个土壤样品，进行土壤离子组成测定，采用常规分析法(土水比 1:5)确定土壤各离子组成含量，计算出相应的土壤全盐含量^[13]。

1.2.2 数据的处理与分析 本研究采用普通克里格插值(OK)和径向基函数插值(RBF)两种方法探讨研究区土壤盐分的空间分布特征。经典的统计分析在 SPSS19.0 中完成，土壤变异函数模拟利用软件 GS+7.0 获得，空间插值及验证利用 ArcGIS 10.2 软件实现。地统计分析的方法及原理详见文献[14]。

1.2.3 精度验证 本研究将 159 个实测剖面分为训练数据集 128 个剖面及验证数据集 31 个剖面，利用均方根误差(root mean squared error, RMSE)及预测值与实测值的相关系数(r)来评价两种方法的预测精度。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分的描述性统计

本研究根据实验得到内蒙古阿拉善盟左旗地区土壤盐分含量 St (g/kg)与 1:5 土水比土壤浸提液电导率 $EC_{1:5}$ (mS/cm)的校正关系公式为 $St=2.520EC_{1:5}+0.761$ ($R^2=0.865$, $P<0.001$)。应用该公式得到各采样点土壤盐分含量及其统计特征(表 1)，由经典统计分析结果可以看出，在 0~20 cm 土层，研究区土壤盐分含量在 0.85~49.70 g/kg，最大值是最小值的 58 倍，土壤盐分分布不均；在 20~40 cm 土层，土壤盐分表现为更强的分布不均性，土壤盐分含量范围在 0.84~88.00 g/kg，最大值是最小值的 105 倍，该层盐分最大值相较于 0~20 cm 土层增加 38.30 g/kg。0~20、20~40 cm 土层土壤盐分含量平均值分别为 6.04、5.67 g/kg，分别属于盐土和重度盐渍土范畴^[15]，土壤盐分的剖面变化特征表现为随着深度的增加，土壤盐分减小的特点。从变异系数看，各层土壤盐分含量的变异系数分别为 1.50 与 1.77，表现为强度空间变异性^[16-17]，并且呈现随着土壤深度的增加，变异系数呈升高的趋势。研究区 0~40 cm 土体土壤盐分表现出强度空间变异性，说明土壤含盐量的空间分布与微地形、气候、地下水性质等自然因素和农田灌溉等人为多因素有关，不同的土地利用方式也是土壤盐分表现空间强度变异性的主要因素。

2.2 土壤盐分的空间结构

进行克里格插值必须检验数据的正态分布性，通过对各层土壤盐分含量数据进行正态检验发现，0~

表 1 各土层土壤盐分的统计特征值($n=159$)
Table 1 Statistical information of soil salinities in different layers

土层(cm)	分布类型	最小值 (g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差	变异系数
0~20	LN	0.85	49.70	6.04	9.03	1.50
20~40	LN	0.84	88.00	5.67	10.05	1.77

注：LN 表示对数正态分布(Log-normal distribution, LN)。

20 cm 与 20 ~ 40 cm 土壤盐分含量均不符合正态分布,经自然对数转化后均呈近似的正态分布,可满足地统计学分析的要求,因此变异函数计算采用数据为经对数转化后的数据。各土层土壤盐分(包括经对数转化后)的 P-P 正态概率图见图 2。

拟合研究区土壤盐分的半方差函数,得到半方差函数的具体参数(表 2)及半方差图(图 3)。拟合 0 ~ 20 cm

与 20 ~ 40 cm 土层土壤盐分最优半方差函数均为指数模型,拟合精度较高,决定系数分别为 0.732 与 0.846。土壤各层盐分块金效应,即块金值(C_0)/基台值(C_0+C)的比值,分别为 14.0% 与 12.3%,均低于 25%,表示变量具有强空间自相关性^[14]。说明各层土壤盐分含量的空间分布主要是由气候、土质、地形、土壤结构等结构性因素作用的结果。

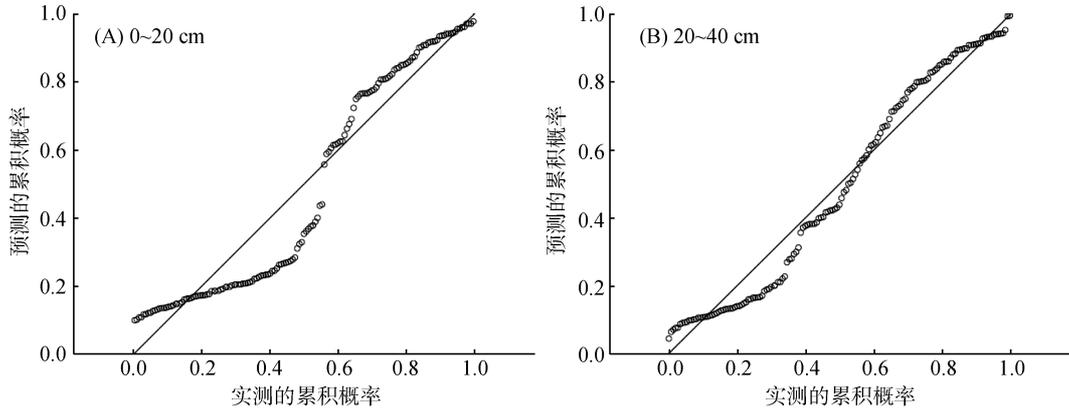


图 2 各土层土壤盐分的正态分布性检验

Fig. 2 Normal distribution test of soil salinities of different soil layers

表 2 土壤盐分半方差函数参数

Table 2 Semi-variance parameters of soil salinities of different layers

土层(cm)	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 C_0/C_0+C	变程(m)	决定系数 R^2
0 ~ 20	指数	0.520	3.717	0.140	33 000	0.732
20 ~ 40	指数	0.358	2.912	0.123	18 900	0.846

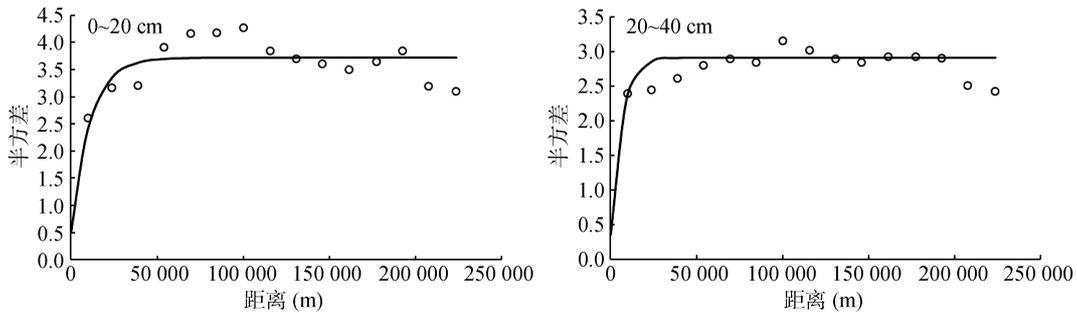


图 3 各土层土壤盐分的半方差图

Fig. 3 Semi-variograms of soil salinities of different layers

2.3 土壤盐分的空间变化特征

利用图 3 及表 2 中的模型和参数进行土壤盐分的 OK 插值,同时利用 RBF 插值方法,分别得到研究区域各层土壤盐分空间插值图(图 4)。从 0 ~ 20 cm 土层土壤盐分的空间分布可以看出(图 4A、B),OK 与 RBF 两种方法得到的研究区域土壤盐分空间分布趋势总体一致,研究区大部分土壤盐分都比较高,盐分含量基本大于 1 g/kg,土壤盐分的高值区域主要集中在研究区的西南部,低值区域主要集中在东南部及

研究区的中部。但在局部区域,两种方法插值图具有明显的差异。OK 插值相较于 RBF 插值的高值区域面积更广,程度更深,盐分 > 6 g/kg 的面积 OK 法明显大于 RBF 插值方法。两种方法在 20 ~ 40 cm 土层土壤盐分的空间分布(图 4C、D)的总体趋势相似,同样大部分区域土壤盐分含量大于 1 g/kg,研究区的北部和西南部土壤盐分比较高,研究区的东南部及中部土壤盐分比较低。OK 预测方法比 RBF 插值法的盐分高值区域更广并且程度更深。

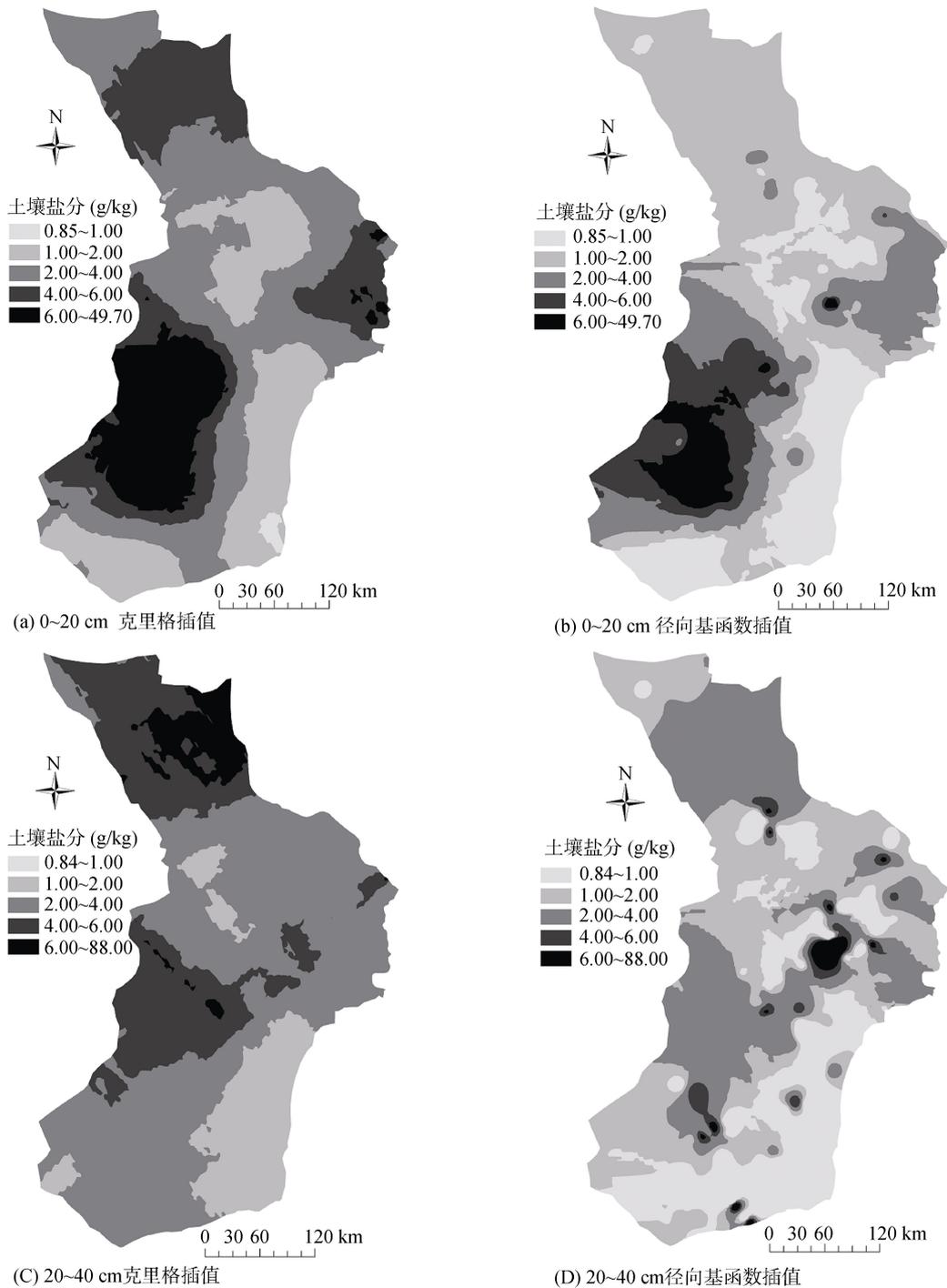


图 4 各层土壤盐分空间插值图
 Fig.4 Spatial interpolation of soil salinities of different layers

整个剖面土壤盐分分布特征表现出了明显的区域性特点，研究区北部土壤盐分剖面特征表现为底聚性，即随着土壤深度增加，土壤盐分含量增加；研究区的西南部及东部突出部分土壤盐分剖面特征表现为表聚性，即随着土壤深度增加，土壤盐分含量逐渐减小。

2.4 土壤盐分的空间插值精度评价

经精度验证分析(表 3)，从预测均方根误差

(RMSE)可以看出，0~20 cm 与 20~40 cm 土层 OK 插值方法 RMSE 值分别比 RBF 插值方法降低 0.016、0.025，说明整个土层 OK 插值方法相较于 RBF 插值方法 RMSE 值都相对较低。对于整个土层预测值和实测值之间的相关系数(r) 在 0.602~0.780，OK 插值方法和 RBF 插值方法都具有良好的精度，0~20 cm 与 20~40 cm 土层 OK 插值方法相关系数分别较 RBF

插值方法提高了 0.129、0.163。这与 OK 插值的本身特点有关,因为 OK 插值方法是从变量相关性和变异性出发,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的方法,比 RBF 插值方法更适用于大量点数据进行插值计算获得平滑表面。

由此可见,基于 OK 与 RBF 插值方法的阿拉善左旗土壤盐分空间变异特征探讨均具有较高的精度,从土壤盐分空间分布图及精度验证结果来看,OK 插值方法相较于 RBF 插值方法更适合阿拉善左旗土壤盐分空间变异特征研究。

表 3 各土层两种插值方法精度比较
Table 3 Precision comparison between different interpolation methods for different layers

土层 (cm)	RMSE		r	
	RBF	OK	RBF	OK
0~20	0.164	0.148	0.651	0.780
20~40	0.157	0.132	0.602	0.765

2.5 土壤盐渍化面积分布

根据土壤盐渍化分级标准^[15],应用 OK 插值法获得的研究区土壤盐分分布图,统计了研究区域不同土层的盐渍化等级,即非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化和盐土 5 个等级盐渍化土壤所占比例(表 4)。研究区总面积 155 055.00 km²,其中 0~20 cm 和 20~40 cm 土层非盐渍化土壤所占比例分别只有 2.28%、0.11%,两个土层分别有 97.72%、99.89% 的土壤遭受不同程度的盐渍化危害,并且有随着土壤深度的增加盐渍化土壤面积增加的趋势。整个剖面土层中度盐渍化土壤所占比例最大,两个土层分别达到 36.82%、45.50%,其次为重度盐渍化土壤和轻度盐渍化土壤。值得注意的是研究区域两个土层有 9.85% 和 8.71% 的土壤已演化为盐土,即盐分含量>6 g/kg。根据以上阿拉善左旗盐渍土面积情况,需采取有效的治理措施对盐渍化土壤加以防控与治理。

表 4 研究区各土层土壤盐渍化等级所占比例(%)
Table 4 Proportion of soil salinization grades of different layers in study area

土层(cm)	非盐渍化	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
0~20	2.28	22.72	36.82	28.33	9.85
20~40	0.11	18.72	45.50	26.96	8.71

3 结论

1) 阿拉善左旗土壤盐分具有强烈的空间自相关性,空间格局上表现为西南部及北部高,东南部及中

部低的趋势,剖面特征表现出明显的区域性,研究区北部呈现底聚性,西南部及东部突出部分呈现表聚性的剖面特点。

2) 克里格法与径向基函数法对于阿拉善左旗土壤盐分的空间特征均有较好的解译精度,进一步精度验证表明克里格法更适合于对研究区土壤盐分空间变异的探讨。

3) 阿拉善左旗 0~20 cm 和 20~40 cm 两个土层中分别有 97.72% 与 99.89% 面积的土壤存在不同程度的盐渍化危害,各土层中度盐渍化土壤所占比例最大,其次为重度盐渍化土壤和轻度盐渍化土壤,盐土有一定比例的分布。因此,需采取有效的措施对阿拉善左旗土壤盐渍化加以防控与治理。

参考文献:

- [1] 李彬, 史海滨, 妥德宝, 等. 节水改造前后土壤盐分剖面特征及其空间分布——以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 663-673
- [2] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Geostatistical monitoring of soil salinity for precision management using proximally sensed electromagnetic induction (EMI) method[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(20): 1362
- [3] Neely H L, Morgan C L S, Hallmark C T, et al. Apparent electrical conductivity response to spatially variable vertisol properties[J]. Geoderma, 2016, 263: 168-175
- [4] 蒋名亮, 陈小兵, 单晶晶, 等. 黄河三角洲县域尺度的盐渍化土壤化学参数特征研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 992-1000
- [5] 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
- [6] 胡佳楠, 塔西南拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦提, 等. 于田绿洲土壤含盐量的空间异质性研究[J]. 土壤, 2017, 49(1): 162-170
- [7] 邓凯, 丁建丽, 杨爱霞, 等. 基于电磁感应技术的土壤剖面盐分空间分布建模研究[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6387-6396
- [8] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 伊犁河谷察南灌区土壤盐分空间变异研究[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 980-985
- [9] Piotrowska-Długosz A, Siwik-Ziomek A, Długosz J, et al. Spatio-temporal variability of soil sulfur content and arylsulfatase activity at a conventionally managed arable field[J]. Geoderma, 2017, 295: 107-118
- [10] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Digital mapping of soil salinity and crop yield across a coastal agricultural landscape using repeated electromagnetic induction (EMI) surveys[J]. Plos One, 2016, 11(5): 1-20
- [11] Yi Z, Chen X, Wenqi M A, et al. Elucidating variations in nitrogen requirement according to yield, variety and

- cropping system for Chinese rice production[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 358–363
- [12] 张越, 杨劲松, 姚荣江. 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 388–400
- [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: 90–99
- [14] 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: 65–132
- [15] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. *中国盐渍土*[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [16] 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
- [17] 唐梦迎, 丁建丽, 夏楠, 等. 干旱区典型绿洲土壤有机质含量分布特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3): 759–766

Study on Spatial Variability of Soil Salinity in Alxa Zuoqi

WU Yakun^{1,3}, LI Jinbiao^{2,3}, GAO Haochen^{2,3}, LIU Guangming^{3*}

(1 *School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China*; 2 *Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*; 3 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: The spatial variability of soil salinity was studied using the methods Ordinary Kriging (OK) and Radial Basis Function (RBF) in Alxa Zuoqi of Inner Mongolia, and the optimal method of assessment on the spatial variability of soil salinity was determined by comparing OK and RBF on the spatial distribution trend of soil salinity and interpolation accuracy. The results showed that soil salinity had a strong spatial autocorrelation in Alxa Zuoqi. Soil salinity of high levels was mainly distributed in the south-west and north areas of Alxa Zuoqi, while the low level was mainly in the southeast and central areas. Profile distribution of soil salinity showed obvious regional characteristics, the salinity in bottom soil was the greatest in north area and the salinity in surface soil was the greatest in southwest and eastern areas. OK method had better interpolation accuracy and spatial distribution than RBF method. The 97.72% and 99.89% of areas suffered from different degrees of salinization in 0–20 cm and 20–40 cm layers. The proportion of moderately salinity was the largest in the study area, followed by heavy salinity and slightly salinity. There was a certain proportion of solonchak soil in Alxa Zuoqi. The above results indicate that the effective measures should be taken to prevent and control soil salinization in in Alxa Zuoqi.

Key words: Alxa Zuoqi; Soil salinity; Semi-variances; Kriging; Radial basis function