

## 禹城地区土壤铅含量空间分布的指示克里格估值

姚荣江, 杨劲松\*, 杨奇勇, 黄标, 孙维侠

中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008

**摘要:**以鲁西北禹城地区土壤重金属 Pb 含量为例, 针对其存在特异值与偏态分布的特点, 利用指示克里格法研究了土壤 Pb 含量小于特定阈值的条件概率分布, 分析了该地区土壤 Pb 含量的空间分布特征, 并对普通克里格和指示克里格的估值效果进行交叉验证。结果表明: 研究区土壤 Pb 含量总体较低, 未超过国家标准的限值, 但不同部位土壤 Pb 含量差异较大; 普通克里格法和指示克里格法形成的土壤 Pb 含量空间分布格局相似, 但普通克里格法的平滑效果强于指示克里格法; 研究区域土壤环境质量总体良好, Pb 含量高值区主要集中在各乡镇驻地附近的农田; 指示克里格对土壤 Pb 含量空间估值的精度优于普通克里格, 指示克里格法更适用于原始数据呈非正态分布且特异值对估值结果有较大影响的土壤属性。本研究结果为该地区土壤环境质量评价和重金属污染防控提供科学依据。

**关键词:**禹城; 铅; 空间分布; 指示克里格; 条件概率

**中图分类号:** X53

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2011) 12-1912-07

随着城市化进程与工农业的迅速发展, 土壤中出现大量的重金属元素富集, 这不仅会引起土壤甚至耕地污染, 还可通过食物链进入人体, 危害人类健康。因此, 土壤中重金属的含量及其空间分布、环境质量、风险评价等研究都受到了人们的广泛关注, 再加上近年来 GIS 和地统计理论被引入这一研究中, 推动了研究向前发展, 目前这已成为土壤科学的热点问题之一<sup>[1-2]</sup>。然而, 人们在土壤重金属时空变异研究中发现, 由于受来源、形态及控制因素等影响, 区域土壤重金属往往存在特异值, 这些特异值既非分析误差所致, 也非采样方法等人为误差所致, 却往往使观测值偏离正态分布, 影响变异函数的稳健性<sup>[3-4]</sup>。目前解决途径主要有三种: 一种是非线性变换 (如平方根变换, 对数变换, 反正弦变换等), 但目前只有对数变换可以应用对数正态克里格估值并转换回原尺度, 其他变换没有相应的转换方法; 另一个途径是剔除或用估计邻域和影响系数等方法处理特异值<sup>[5-6]</sup>, 但会改变实验数据的原始空间结构; 第三种途径是非参数统计方法或称无分布方法, 常见的如指示克里格法, 是条件普通克里格的非参数形式, 可有效抑制特异值对变异函数稳健性的影响<sup>[7-9]</sup>。指示克里格法自提出以来, 在矿产、石油、水文等领域有广泛应用<sup>[10-11]</sup>。目前, 使用指示克里格法对水土资源条件概率空间分布的研究较多<sup>[12-14]</sup>, 而对区域土壤重金属含量空间分布估值研究鲜有报道。为此, 本文以国家重要粮食生产基

地的鲁西北禹城市为例, 采用指示克里格法对该地区土壤重金属 Pb 含量分布进行估值研究, 揭示土壤中 Pb 含量小于特定阈值的条件概率分布及其含量空间分布特征, 并对普通克里格和指示克里格的估值效果进行交叉验证, 旨在为该地区土壤环境质量评价和重金属污染防控提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

禹城市地处山东省西北部, 徒骇河中游, 地理位置介于 E 116°22'~116°45', N 36°40'~37°12', 属暖温带半湿润季风气候, 多年平均气温 13.1 °C, 降雨量 616 mm, 蒸发量 1379.5 mm, 蒸降比 2.24, 降雨季节性分布不均, 其中 6~9 月的夏季平均为 470.7 mm, 占全年的 76.4%。禹城市属典型的冲积平原地质区, 海拔高度介于 19.2~27.3 m, 微地貌比较复杂, 现有耕地 5.05×10<sup>4</sup> ha, 占全市总面积的 51.01%, 主要有潮土和潮化盐土两大土类, 潮土占总面积的 97.77%。历史上, 禹城市为黄淮海平原典型的盐碱土分布区, 土壤盐碱和瘠薄严重制约农业生产发展, 经过引黄灌溉和多年的盐碱土整治改良, 盐碱地得到综合治理, 耕地地力得到培育。目前, 禹城市已成为国家重要的商品粮生产基地, 耕地种植强度和农田集约化生产水平大幅提升, 耕地环境质量安全越来越受重视。

#### 1.2 样品采集与分析

于 2008 年 5 月下旬小麦收获前后采集土壤样

**基金项目:**公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001); 国家自然科学基金项目 (41101199); 江苏省自然科学基金项目 (BK2009337、BK2011423); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2011195); 江苏省企业院士工作站项目 (BM2009622); 江苏省科技支撑计划项目 (BE2010313)

**作者简介:**姚荣江 (1980 年生), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为水土资源空间变异与溶质运移。E-mail: rjyao@issas.ac.cn

\*通信作者: 杨劲松 (1959 年生), 男, 研究员, 博士, 博士生导师。E-mail: jsyang@issas.ac.cn

**收稿日期:** 2011-08-26

点。土壤采样方案为规则分层抽样法,采样过程分为3步:首先,以1:5万禹城市地形图、行政区划图、土壤类型图、地形地貌类型图等为底图,通过数字化获得研究区域的边界图、土壤图、地形地貌图等矢量图件,在研究区域边界图上进行1.5 km×1.5 km网格布点;其次,根据预设布点进行野外采样,实际采样过程中对于落在村庄、河流、道路等地的样点,在附近500 m内调整,并记录实际采样点坐标,共采集396个样点;最后,在土地利用类型较为复杂的城郊结合带按照500 m×500 m网格加密采集285个样点。本研究共计采集有效采样点681个。每个样点均按照10 m×10 m正方形4个顶点和中心点分别采样,各取表层(0~20 cm)土壤约1 kg,现场均匀混合后用四分法从中选取1 kg土样作为代表该点的混合样品。为防止样品污染,在采样、样品保存和样品处理过程中,避免与金属器皿直接接触。

采集的土样带回实验室内自然风干,磨碎、过100目尼龙网筛后,进行重金属Pb全量含量的测定,测定方法为石墨炉原子吸收分光光度法,土壤样品的化学分析按照国家标准(GB15618-1995)执行完成。

### 1.3 研究方法

指示克里格方法(Indicator Kriging, IK)是一种非参数估计方法,其主要目的是对随机函数 $Z(u)$ 在非取样点的不确定性作出估计。它首先要对数据作指示变换,然后估计出待估点处的累积分布函数(cdf),以此为基础可解决各种估计和模拟问题。指示克里格方法的具体计算过程与步骤可参考文献[15-17]。

本文采用GS+软件计算各阈值条件下的指示变异函数,计算时以采样点间的平均间距作为步长X、Y方向滞后距,以22.5°作为方向容许偏差,分别计算0°、45°、90°和135°方向指示变异函数以及各向同性下的指示变异函数。利用ArcGIS9.3软件绘制不同阈值条件下土壤Pb含量的概率分布,并进行空间运算,形成土壤Pb含量的指示克里格空间分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 统计检验

研究区土壤Pb含量的统计特征值如表1所示。

表1 研究区表层土壤Pb含量统计特征(n=681)

Table 1 Conventional statistics of soil Pb content across the study area (n=681)

重金属 Heavy Metal	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	中位值 Median	变异系数 CV. (%)	峰度 Kurt.	偏度 Skew.	K-S Z	土壤质量环境标准分级(%)		
									一级	二级	三级
Pb/mg·kg <sup>-1</sup>	1.18	159.43	36.33	37.96	37.42	10.36	1.12	1.62 (0.01)	44.05	55.95	-
ln(Pb)/mg·kg <sup>-1</sup>	0.16	5.07	3.51	3.64	12.97	7.51	-1.81	2.93 (0.000)			

可以看出,土壤Pb含量介于1.18~159.43 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为36.33 mg·kg<sup>-1</sup>,表明研究区土壤Pb含量整体不高,其平均值略高于自然背景值( $\leq 35$  mg·kg<sup>-1</sup>),但不同部位土壤Pb含量差异显著。从图1显示的频率分布与累积频数分布图来看,土壤Pb含量分布均明显呈现向左偏倚的特点,在左侧的低值表现出高频数分布,右侧由于特异值的存在出现长尾现象。单样本K-S正态检验和对数正态检验( $p < 0.05$ , 2-tailed)显示,研究区土壤Pb含量及其对数转换值均不服从正态分布(括号内为对数转换值K-S检验显著性水平)。合理采样数计算结果表明<sup>[18]</sup>,在99%置信水平5%相对误差条件下,土壤Pb的合理采样数目为372,因此研究区土壤Pb采样点密度已满足该置信水平和相对误差条件的合理采样数量要求,即该样点布设模式和样本量能较客观地反映研究区土壤Pb的空间变异特征。

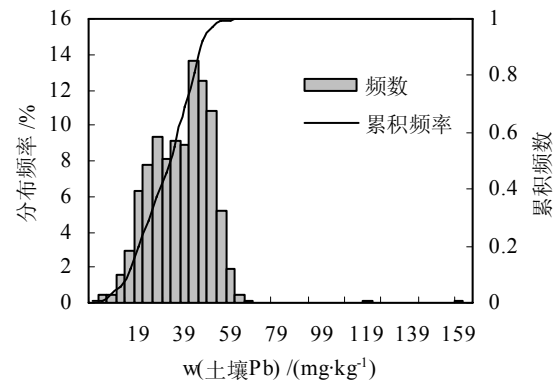


图1 研究区土壤Pb的频率与累积频数分布图  
Fig.1 Frequency and cumulative distribution of soil Pb content across the study area

按照国家GB15618-1995土壤环境质量标准分级可知,土壤全量Pb的44.05%采样点属于一类;参照二类土壤执行标准,即能保证农业生产和维护人体健康为标准,根据研究区土壤调查,该地区土壤pH值在7.52~9.15之间,所以选择国家标准的第二级pH > 7.5的阈值为标准进行评价,其余55.95%样点属于二类。研究区表层土壤Pb含量未超过国家标准的限值( $\leq 350$  mg·kg<sup>-1</sup>)。因此,研究区域总体土壤环境质量状况良好。

### 2.2 指示克里格分析

取土壤Pb含量0.1~0.9分位数共9个值作为阈

值  $T$ , 分别为 18.64、24.23、28.40、33.24、37.96、41.32、44.48、47.51 和 51.19  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 计算小于各阈值条件的指示变异函数。计算时 X、Y 方向滞后距均为 500 m, 分别计算  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  方向指示变异函数以及各向同性下的指示变异函数, 并将所得到的指示变异函数采用球状模型进行拟合。限于篇幅, 图 2 仅列出了部分阈值的指示变异函数及其拟合曲线, 其中图 2 (a)、图 2 (b)、图 2 (c) 和图 2 (d) 的阈值分别为 0.1、0.3、0.5 和 0.7 分位数, 即阈值  $T$  分别为 18.65、28.40、37.96 和 44.48  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从各方向指示变异函数对比可以看出, 尽管研究区域内土壤 Pb 含量在各阈值条件下的概率分布其变化规律趋于一致, 但在不同的方向上存在差异, 即区域化变量表现出一定的各向异性, 尤其是在  $NE 45^\circ$  和  $NE 135^\circ$  方向上。

各阈值条件下的指示变异函数及其拟合参数如表 2 所示。块金值  $C_0$  通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异; 基台值  $C$  通常表示系统内总的变异; 块金值/基台值  $C_0/C$  表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的的比例, 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; 变程  $A$  反映区域化变量的相关程度, 变程越大, 相关性越好, 越小则相关性越差。由表 2 可知, 不同的阈值其指示变异函数拟合参数

表 2 各阈值条件下指示变异函数的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of indicator semivariograms of all cutoffs

分位数	对应阈值/ (mg/kg)	块金值 $C_0$	基台值 $C$	块金值/基 台值 $C_0/C$	变程 $A$ (m)	RSS	$r^2$
0.1	18.64	0.05	0.10	49.51%	17172	6.67E-3	0.64
0.2	24.23	0.09	0.19	49.74%	20528	3.46E-3	0.93
0.3	28.40	0.16	0.23	67.95%	23101	3.62E-3	0.92
0.4	33.24	0.18	0.25	73.41%	14704	1.92E-3	0.90
0.5	37.96	0.20	0.26	77.43%	7198	4.10E-3	0.69
0.6	41.32	0.19	0.25	76.29%	6604	1.52E-2	0.41
0.7	44.48	0.16	0.21	76.10%	7196	3.85E-2	0.20
0.8	47.51	0.14	0.17	80.00%	6597	2.93E-2	0.03
0.9	51.19	0.08	0.09	80.85%	5989	6.12E-3	0.07

差异较大, 阈值为 0.5 分位数条件下, 块金值  $C_0$  和基台值  $C$  达到最大;  $C_0/C$  在 49.51%~80.85% 之间, 随着阈值的不断升高,  $C_0/C$  呈逐渐增加趋势, 其空间依赖性降低; 阈值为 0.1~0.4 分位数条件下, 指示变异函数呈中等变异性, 阈值大于 0.5 分位数其指示变异函数均呈强变异性, 空间结构性减弱, 这一点可从表 2 中拟合残差 RSS 和决定系数  $r^2$  的对比可知。

### 2.3 土壤 Pb 空间分布

利用表 2 中的指示变异函数及其参数进行克里格估值, 获得的土壤 Pb 含量小于各阈值  $T$  的条件概率空间分布如图 3 所示, 其中图 3a~图 3i 分别显

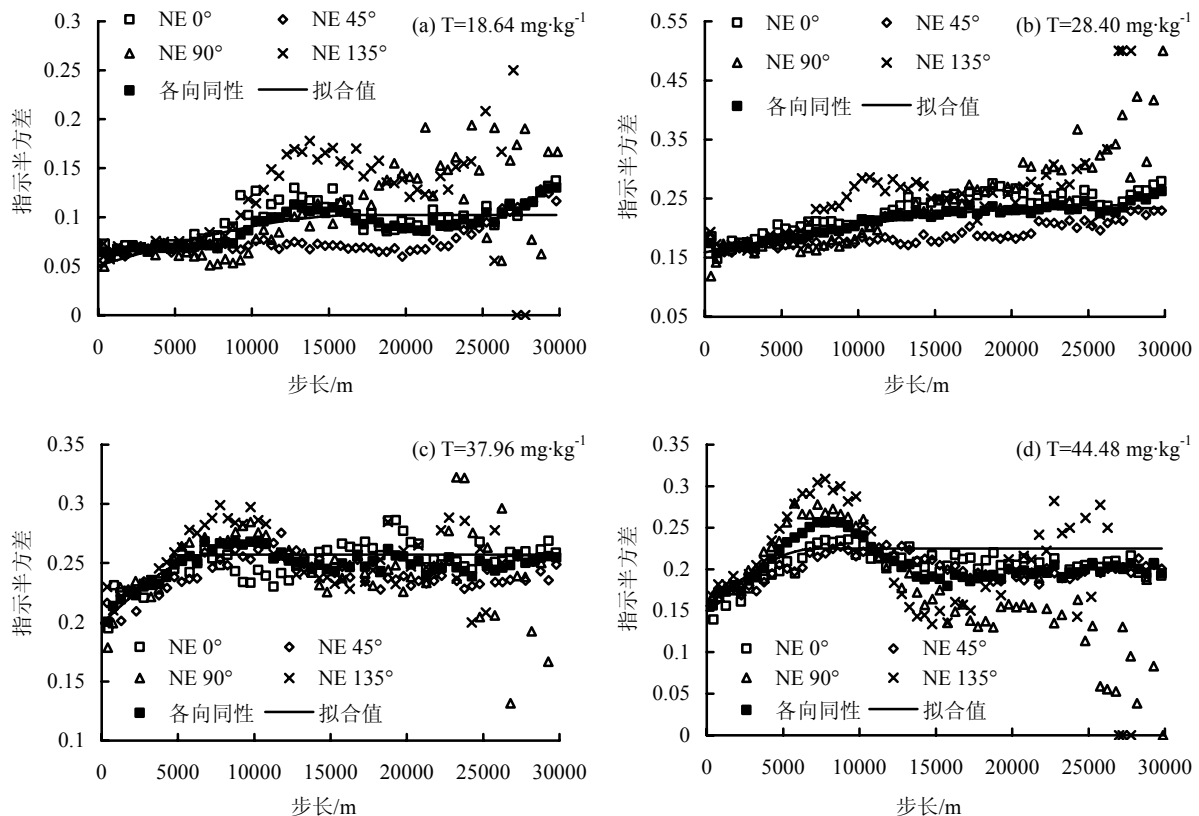


图 2 部分阈值条件下的指示半方差函数及其拟合曲线

Fig.2 Indicator semivariograms and their fitting models of some cutoffs

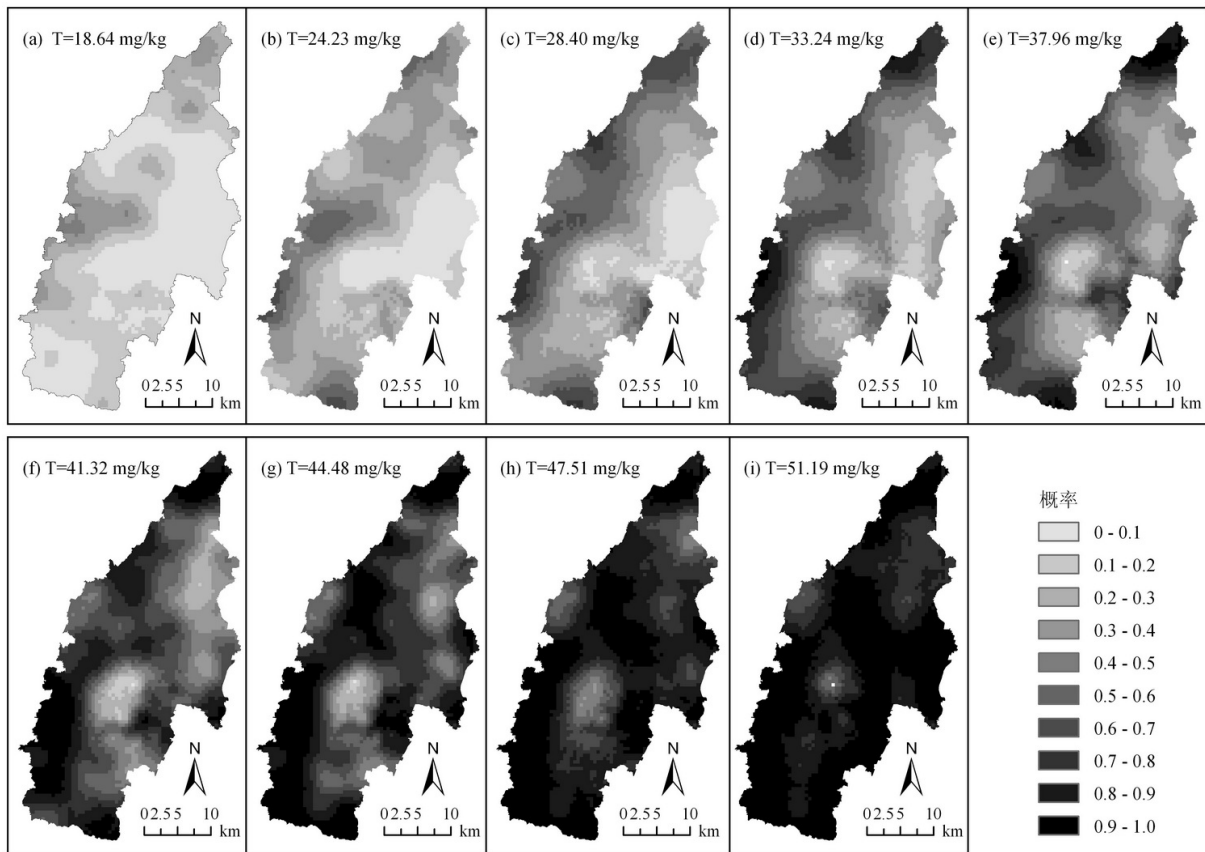


图3 各阈值条件下土壤Pb含量的概率分布图

Fig. 3 Probability map of soil Pb content of all cutoffs

示阈值为 0.1~0.9 分位数的条件概率分布。为了便于根据条件累积分布函数利用指示克里格法对研究区域各部位的土壤 Pb 含量进行估算, 须将研究区域各阈值的条件概率分布划分为规则的网格单元。综合考虑研究区土壤采样方案与实际指导性, 将各条件概率分布图转换为 500 m×500 m 栅格数据, 整个研究区域共有 3922 个栅格参与计算。根据表 2 中各设定阈值和图 3 的条件累积概率分布图, 利用式 (6) 计算各网格单元土壤 Pb 含量指示克里格估计值, 获得的研究区土壤 Pb 含量空间分布见图 4 (图 4b)。

图 4 分别显示了研究区土壤 Pb 含量分别采用普通克里格 (OK) 和指示克里格 (IK) 估值形成的空间分布图。从空间分布特点来看, 普通克里格法和指示克里格法分别形成的空间分布具有相似的格局, 在局部平滑区和斑块部位具有一致性; 从分布规律来看, 研究区土壤 Pb 含量高值区主要集中在各乡镇驻地附近的农田, 如图 4 中, 安仁镇、伦镇、张庄镇等乡镇附近的土壤 Pb 含量均呈明显的斑块状分布; 从整个研究区域统计结果来看, 由普通克里格法获得的土壤 Pb 空间分布图中 (图 4a), Pb 含量符合土壤环境质量二级标准值 ( $35\sim350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的分布面积占研究区 49.06%, 该区域平均

值为  $42.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而指示克里格法获得的分布图中 (图 4b), 二级标准分布面积占 62.57%, 其平均值为  $47.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 普通克里格法的平滑效果强于指示克里格法, 这是由于在土壤 Pb 含量空间结构分析和空间估值过程中, 尽管普通克里格和指示克里格都限制了特异值的影响范围, 但指示克里格仍然以概率的方式考虑了特异值的存在。总体上, 研究区域土壤环境质量良好, 但对于土壤 Pb 含量相对较高的城郊结合部、工矿企业集中区和乡镇驻地附近, 应重视土壤环境质量的监测监控, 加强土壤重金属含量的时间变异性研究。

由表 3 列出了指示克里格和普通克里格对研究区土壤 Pb 含量空间估值的交叉验证结果。可以看出, 指示克里格法的平均误差 ME (Mean Error)、均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 和平均标准误 ASE (Average Standard Error) 均要小于普通克里格法, 指示克里格法的均方标准误 RMSSE (Root mean-Square Standardized Error) 较普通克里格法更接近 1, 且指示克里格估计值与实测值间的相关系数亦明显高于普通克里格法, 这表明指示克里格对土壤 Pb 含量空间估值的精度优于普通克里格, 指示克里格法较普通克里格法更适用于原始数据呈非正态分布且特异值对估值效果有较大影响

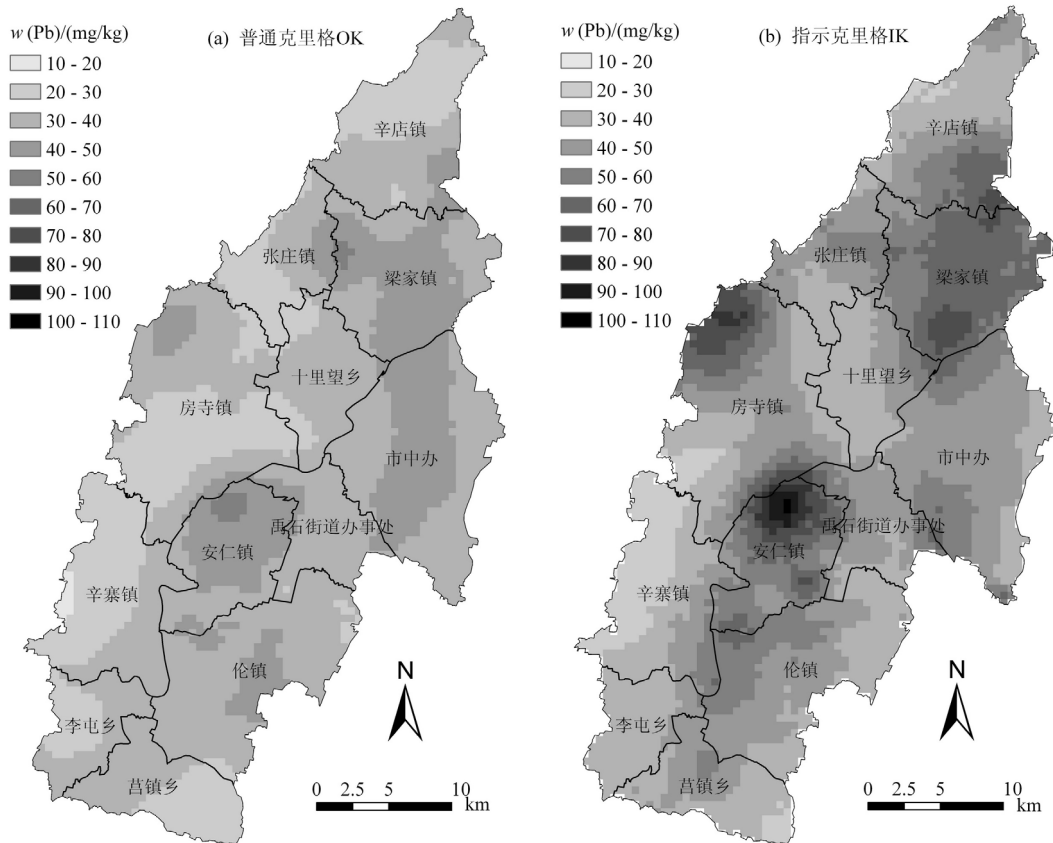


图4 研究区土壤Pb含量的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil Pb content across the study area

表3 指示克里格和普通克里格对土壤Pb含量空间估值的交叉验证结果

Table 3 Cross-validation results of spatial estimation of soil Pb content for ordinary kriging and indicator kriging

	平均误差 ME	均方根误差 RMSE	平均标准误差 ASE	均方标准误差 RMSSE	相关系数 <i>r</i>
普通克里格 OK	-0.014	12.57	11.09	1.33	0.43**
指示克里格 IK	0.012	8.60	8.18	1.04	0.58**

\*\*显著性水平  $p < 0.01$ 

的土壤属性。因此,指示克里格法在该区域尺度范围内进行土壤Pb含量空间估值是可行的。

### 3 讨论

参数地质统计学针对不同的土壤属性提出了不同的研究方法。在平稳条件下,可使用简单克里格和普通克里格;在土壤属性具漂移或趋势变化特点时,可采用泛克里格或趋势克里格;若各土壤属性之间具有一定相关性时,则可应用各种协克里格。参数地质统计学往往对样点均匀分布和样本量充足有一定要求,且数据须服从正态分布。有些土壤属性由于受区域内多种因素的控制与影响,其分布常出现拖尾现象,如本文的土壤Pb含量,这种分布特征会影响数据的整体分布规律及估值的精度,采用普通的克里格法往往稳健性较差。目前常采用的解决方法包括特异值剔除、数据平滑、进行

对数转换或某些线性转换等,所有这些都是根据数据的分布特点进行变换,使数据分布特征满足估值方法要求。

然而在实际应用中,被研究的土壤属性常存在样本数量有限且分布不均的现象,特异值的存在使得变异函数不稳健,数据的分布假设无法检验等一系列问题使得参数地质统计学的应用受到一定的限制。为此 Journel 于 1983 年提出了指示克里格法,它不要求数据服从正态分布,且不受特异值的影响,是处理有偏数据的有力工具。本文正是针对土壤Pb含量的特异值和非正态特点,采用指示克里格法对区域土壤Pb含量空间分布进行估值,并与普通克里格法的估值精度进行对比。张新宇等(2006)对阿舍勒铜矿体进行了指示克里格可视化储量估算,表明基于指示克里格法的储量计算能够取得较理想的预测结果<sup>[19]</sup>;尚晓颖等(2007)利用普通克里格和指示克里格对水环境模拟参数的空间分布进行估值,结果显示指示克里格较普通克里格更好地描述水环境模拟参数随机场的空间分布规律<sup>[20]</sup>;赵玉杰等(2009)探讨了普通克里格法及指示克里格法在农产品产地禁产区筛选中应用的可行性,结果表明指示克里格法的误判率显著低于普通克里格法,指示克里格法较普通克里格法更适用于研究区水稻禁产区的筛选<sup>[21]</sup>;这与本文的研究

结果也是一致的,因而指示克里格法为呈非正态分布的水土属性的空间分布估值提供了一种新的可行性方法。

此外,基于均值和中位值的稳健变异函数估算亦是处理有偏分布数据的有效手段,它可以在不必剔除或修改特异值的条件下进行分析,常用的方法有克瑞西-豪金斯法、中位调节法、中位数中位偏差法等,目前已在水文水资源、土壤属性空间变异研究中得到一定程度应用<sup>[22]</sup>。在下一阶段研究中,作者将探讨非参数地质统计法(指示克里格)与变异函数稳健估计法应用效果的对比。

#### 4 结论

1) 研究区表层土壤 Pb 含量总体较低,平均值为  $36.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,但不同部位土壤 Pb 含量差异较大,其频数分布明显左偏;研究区土壤 Pb 含量的 44.05% 采样点属于一类,其余 55.95% 样点属于二类,未超过国家标准的限值。

2) 普通克里格法和指示克里格法分别形成的土壤 Pb 含量空间分布具有相似的格局,但普通克里格法的平滑效果强于指示克里格法;研究区域土壤环境质量总体良好,Pb 含量高值区主要集中在各乡镇驻地附近的农田,应加强对土壤重金属含量时空变异的监测监控。

3) 指示克里格对土壤 Pb 含量空间估值的精度优于普通克里格,指示克里格法较普通克里格法更适用于原始数据呈非正态分布且特异值对估值效果有较大影响的土壤属性。指示克里格法为区域土壤重金属污染风险评价提供了新的方法,也为区域土壤环境质量的决策管理提供了指导。

#### 参考文献:

- [1] 曹尧东,孙波,宗良纲,等. 丘陵红壤重金属复合污染的空间变异分析[J]. 土壤, 2005, 37(2): 140-146.  
CAO Yaodong, SUN Bo, ZONG Lianggang, et al. Spatial variation of combined heavy metal pollution of red soils in a hill region [J]. Soils, 2005, 37(2): 140-146.
- [2] 霍霄妮,李红,张微微,等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 223-229.  
HUO Xiaoni, LI Hong, ZHANG Weiwei, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 223-229.
- [3] 胡大伟,卞新民,李思米,等. 基于神经网络的农田土壤重金属空间分布分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 216-223.  
HU Dawei, BIAN Xinmin, LI Simi, et al. Analysis of spatial distribution of soil heavy metals in farmland based on artificial neural networks [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 216-223.
- [4] 王天巍,蔡崇法,李朝霞,等. 道路边际土壤重金属分布格局的神经网络模拟——以现代黄河三角洲为例[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3154-3162.  
WANG Tianwei, CAI Chongfa, LI Zhaoxie, et al. Simulation of distribution pattern of heavy metals in road verge soils using neural network: a case study of modern Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3154-3162.
- [5] 陈亚新,徐英,史海滨,等. 基于稳健统计学的水盐变差函数逼近方法[J]. 水利学报, 2004, (9): 44-49.  
CHEN Yaxin, XU Ying, WEI Zhanmin, et al. Approximation method for spatial variogram of water and salinity in soil based on Robust statistics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (9): 44-49.
- [6] 刘全明,陈亚新,魏占民. 土壤水盐时空变异数据中特异值处理方法与调控技术[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 26-229.  
LIU Quanmin, CHEN Yaxin, WEI Zhanmin. The outlier handling method and adjusting or dominating technic of the soil water-salt spatial variability data [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 26-29.
- [7] 肖斌,潘懋,赵鹏大,等. 时空多元指示克里格法的理论研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 94-98.  
XIAO Bin, PAN Mao, ZHAO Pengda, et al. Indicator kriging study of multivariate information in Temporal-spatial domain [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(1): 94-98.
- [8] 蔡守华,徐英,王俊生,等. 土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 26-31.  
CAI Shouhua, XU Ying, WANG Junsheng, et al. Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 26-31.
- [9] 孙刚,徐兵,韩燕. 限制性克里格法在地质学中的研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 617-621.  
SUN Gang, XU Bing, HAN Yan. Research and application on the method of restricted keiging in geology [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 617-621.
- [10] 张琦伟,宋刚,万力,等. 裂隙岩体渗透性空间分布的指示克里格估值[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 246-251.  
ZHANG Qiwei, SONG Gang, WAN Li, et al. Indicator kriging of spatial distribution of permeability of aquifer [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 246-251.
- [11] KAZIANKA H, PILZ J. Copula-based geostatistical modeling of continuous and discrete data including covariates [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(5): 661-673.
- [12] 蒋小伟,万力,杜强,等. 基于地质统计学的 NDVI 图像估值技术[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 71-80.  
JIANG Xiaowei, WAN Li, DU Qiang, et al. Geostatistics-based technique for NDVI image estimation [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 71-80.
- [13] 徐英,陈亚新,王俊生,等. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克里格分析评价[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 477-482.  
XU Ying, CHEN Yaxin, WANG Junsheng, et al. Using indicator Kriging to analyze and evaluate spatial distributions of soil water and salt in field [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 477-482.
- [14] 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[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 585-593.  
YANG Jingsong, YAO Rongjiang, LIU Guangming. Analysis and evaluation on spatial variability of soil salinity by indicator kriging with an electromagnetic induction gauge [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(4): 585-593.
- [15] 吴蓉,周志芳. 基于指示克里格方法的裂隙介质渗透性参数空间分布规律分析[J]. 水利学报, 2004, (6): 104-108.  
Wu Rong, ZHOU Zhifang. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (6): 104-108.
- [16] TAVAREAE M T, SOUSAA A J, ABREU M M. Ordinary kriging and

- indicator kriging in the cartography of trace elements contamination in São Domingos mining site (Alentejo, Portugal) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 98(1-2): 43-56.
- [17] LEE J J, JANG C S, WANG S W, et al. Evaluation of potential health risk of arsenic-affected groundwater using indicator kriging and dose response model [J]. 2007, 384(1-3): 151-162.
- [18] Cochran W G. *Sampling Techniques* (3rd Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [19] 张新宇, 肖克炎, 刘光胜, 等. 阿舍勒铜矿可视化储量计算的指示克里格法应用研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(2): 305-308.  
ZHANG Xinyu, XIAO Keyan, LIU Guangsheng, et al. The applied research of indicator kriging method in visualized reserve computing of Ashele copper mine [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(2): 305-308.
- [20] 尚晓颖, 张征, 池志森, 等. 水环境模拟参数随机场的指示克里格研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(1): 118-121.  
SHANG Xiaoyin, ZHANG Zheng, CHI Zhimiao, et al. Indicator kriging of random parameters fields in water environment simulation [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(1): 118-121.
- [21] 赵玉杰, 唐世荣, 李野, 等. 普通及指示克里格法在水稻禁产区筛选中的应用[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(8): 1780-1787.  
ZHAO Yujie, TANG Shirong, LI Ye, et al. Application of ordinary and indicator Kriging methods for screening non-rice-cropping areas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8): 1780-1787.
- [22] 徐英. 土壤水盐时空变异的稳健性分析和条件模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003, 131-151.  
XU Ying. *Conditional simulation and robust analysis of time-space variability of soil water-salt* [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 131-151.

## Indicator Kriging of spatial distribution of soil Pb content in Yucheng city

YAO Rongjiang, YANG Jingsong, YANG Qiyong, HUANG Biao, SUN Weixia

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

**Abstract:** Considering the outliers and skew distribution of heavy metal Pb content in Yucheng soils, indicator kriging method was introduced to study the conditional probability of soil Pb content less than some cutoffs. The spatial variability of soil Pb content across the study area was analyzed, and the estimation precision was compared and cross-validated for ordinary kriging (OK) and indicator kriging (IK) methods. Results indicated that soil Pb content in Yucheng city is generally low and less than the limit value of national standards, while the Pb content varies greatly at various locations. The Pb spatial distribution generated by OK method shows the similar pattern to that generated by IK method, and the former is smoother than the latter. The soil environmental quality of Yucheng city is totally in favorable condition, and the regions of high value of Pb content are largely situated in the field nearby the town residents. The Pb spatial estimation precision of IK method is superior to that of OK method, and the IK method is more applicable to soil properties with innormal distribution and outliers than OK method. The research results provide scientific reference to environmental quality assessment and prevention of soil heavy metal contamination for Yucheng city.

**Key words:** Yucheng city; Pb; spatial distribution; indicator kriging; conditional probability