

不同尺度下耕地土壤Cr含量的空间自相关性分析*

杨奇勇 杨劲松** 余世鹏 黄标 孙维侠

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘要 以山东省禹城市耕地土壤重金属铬(Cr)元素为例,采用Moran's I 统计量对县级和镇级两个不同取样尺度下Cr含量的空间自相关关系、空间相关尺度和空间分布规律进行了对比研究. 结果表明: 1) 随着研究尺度的增大, Cr含量的变异系数增加, 块基比($C_0/Sill$)减小, 空间结构性增强; 2) 两个尺度下Cr含量Moran's I 指数都大于0, 表明研究区内两个尺度下的Cr含量都存在空间正自相关, 且Moran's I 指数随着研究尺度的增加而增大; 3) Lisa聚类图表明, 两个尺度下Cr含量都存在空间聚集区和空间孤立区, 其中“高一高”空间聚集和“低一高”空间孤立区域存在潜在Cr污染风险. 研究表明小尺度下能够观察到大尺度下观察不到的细微差别, 研究可为土壤重金属环境质量评价和重金属污染防治提供重要参考. 图4表2参23

关键词 土壤; 重金属; 空间自相关; 不同尺度

CLC X825

Spatial Autocorrelation Analysis of Cr Content in Cultivated Soil at Different Scales*

YANG Qiyong, YANG Jinsong**, YU Shipeng, HUANG Biao & SUN Weixia

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

Abstract A case study done in Yucheng, Shandong, China was presented. Using Moran's I statistics, the spatial autocorrelation coefficients, correlation distances and spatial patterns of heavy metal Cr contents in cultivated topsoil were compared at different scales (county scale and town scale). The following results were obtained: 1) At the higher scale, the variation coefficient of Cr content increased, while $C_0/Sill$ decreased, indicating spatially structure enhanced; 2) Moran indexes of Cr content of the two scales were greater than 0, suggesting that the Cr contents at the two scales possessed spatial autocorrelation, and the Moran's I indexes became larger at higher scale; 3) Lisa cluster maps showed that there were spatial aggregation areas and spacial isolated areas of the Cr contents at two scales, and in “high – high” spatial aggregation areas and “low – high” spatial isolation areas potential Cr pollution risks existed. This study showed that at town scale minor differences could be observed, but they would not be observed at country scale, which provided useful basis to assessment of soil environmental quality and prevention of soil pollution. Fig 4, Tab 2, Ref 23

Keywords soil; heavy metal; spatial autocorrelation; different scales

CLC X825

空间自相关分析法(Spatial autocorrelation analysis)是通过检验具有空间位置的某变量的观测值是否显著地与其相邻空间点上的观测值相关联^[1-3],从而揭示区域化变量取值的空间分布特点的方法.空间自相关自1950年Moran等提出以来,国内外学者在多个研究领域的应用中都取得了一定的进展.如金友渔提出自相关-判别分析的数学模型,并将其应用在宁芜盆地中段1:5万的矿床统计预测^[4];梁艳平等用自相关的方法揭示了我国1978~1990年和1990~2000年两个时期的省级人均GDP增量变化的空间结构形态特征^[5];霍霄妮等以北京市耕作土壤重金属元素为例,采用Moran's I 统计量研究

了土壤重金属含量的空间自相关关系、空间相关尺度以及其空间分布规律^[6];Peter A. Jumars利用自相关分析方法,对半深海底栖息生物群落的纵向和横向空间结构进行了研究^[7];Kvamme K. L.^[8]和Premo L. S.^[9]分别利用空间自相关性对经典玛雅文明进行了考古研究;Diane M. Pearson应用自相关的方法对澳大利亚北部的热带草原景观进行了建模和定量结构分析^[10].

但是,以上研究多局限于自相关分析在单一尺度上的研究.土壤特性的空间变异性是尺度的函数^[11-12],即在不同尺度下,同一变量的自相关程度相差很大^[13],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自相关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^[14-15].本研究以山东省禹城市耕地0~20 cm土壤重金属Cr含量为例,运用地统计学、空间自相关分析法等研究方法,对禹城市县级和镇级两个不同取样尺度下的土壤重金属的变

收稿日期: 2010-07-03 接受日期: 2010-09-02

*国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(No. 200903001)、江苏省企业院士工作站项目(No. BM2009622)、江苏省科技支撑计划(农业)项目(No. BE2010313)、江苏省产学研联合重大创新载体建设项目(No. BY2010013)和国家公益性行业(海洋)科研专项经费项目(No. 201105020)资助 Supported by the Special Funds for Agricultural and Marine Science Research in the Public Interest of China (Nos. 200903001, 201105020), and the Funds of Jiangsu, China (Nos. BM2009622, BE2010313, BY2010013)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: jsyang@issas.ac.cn)

异函数和空间自相关特征等进行了研究, 以期对土壤环境质量合理评价和重金属污染防治提供科学依据。

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, 处于东经116°22′~116°45′、北纬36°40′~37°12′之间, 全市土地总面积990 km², 微地貌比较复杂, 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。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, 海拔高度介于19.2~27.27 m, 由于受地形、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967.9 km², 占土壤面积的97.77%, 在全市广泛分布。禹城市全市辖11个乡镇(包括两个街道办事处), 2008年总人口数50.89万。禹城市享有“中国功能糖城”荣誉称号, 规模以上工业企业213家, 主要分布在东部市中办的禹城市区和西南部的辛寨镇。主要工业部门有: 钢铁、精细化工、机械制造、造纸、食品加工等。2008年实现工业增加值43.06亿元, 比2007年增长23.1%。主要农作物为小麦、玉米、棉花。

1.2 样品采集与分析

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、行政区划图和镇级尺度下密集采样区的边界图等矢量图。在ArcMap中进行两个尺度下的室内网格布点, 样品采集于2008年5月下旬, 取样土层为0~20 cm耕层土壤。

1) 县级尺度下土壤样品采集。以禹城市矢量图为基础, 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500 m内进行调整, 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尺度下有效采样点298个(图1)。

2) 镇级尺度下土壤样品采集。选取距离工业发达的禹城

市区西南部的典型地块为镇级采样区。该地块处于市中办、安仁镇和伦镇镇结合处。样点布设分为两层: 第一层是进行0.5 km × 0.5 km网格布点, 第二层是进行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四个点的中心。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。遵照这个原则共得到镇级尺度下有效采样点352个(图1)。

土壤样品带回实验室, 风干、研磨、过100目尼龙网筛备用。根据项目要求, Cr含量的分析方法参考《土壤农业化学分析方法》^[16], 采用石墨炉-原子吸收法。

1.3 空间自相关性分析

空间自相关所统计的内容包括空间变量的空间位置及其属性, 即每个变量与其相邻统计分析变量之间的空间位置关系以及属性取值特征^[17]。表示空间自相关的指标和方法很多, 其中最常用的是Moran's *I*统计量。Moran's *I*统计量一般可分为全局空间自相关(Global spatial autocorrelation)和局部空间自相关(Local spatial autocorrelation)两种。全局空间自相关Moran's *I*的计算公式^[1]为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中, *n*是参与分析的土壤样品数目; *x_i*、*x_j*分别为样品*i*和样品*j*的观测值; \bar{x} 是所有样品观测值的平均值; *w_{ij}*是空间权重矩阵值, 当*i*=*j*时表示为自权重, 自权重定义为0。

全局Moran's *I*系数可定量描述研究变量在空间上的自相关程度, 判断区域化变量在研究区内是否存在空间聚集区和空间孤立区。*I*值取值在-1~1之间, 其值越大, 则空间结构性越显著, *I*>0表示变量在空间上呈现正相关, 存在空间聚集; *I*<0表示研究变量在空间上呈现负相关, 存在空间孤立; *I*=0表示研究变量空间不存在空间自相关性^[13, 18]。

局部Moran's *I*系数被定义^[19]为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$



图1 不同尺度下研究区域土壤样点分布图

Fig. 1 The study area and distribution of soil sampling sites at different scales

表1 不同尺度下重金属Cr含量的统计特征
Table 1 Statistical characteristics of Cr content in soil at different scales

研究尺度 Study scale	样点数目 No. of sampling sites	平均值 Mean	标准差 Std.	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 CV/%	偏度 ¹⁾ Skewness	峰度 ¹⁾ Kurtosis
县级尺度 County	298	61.02	7.72	42.84	85.85	12.66	-0.14	-0.01
镇级尺度 Town	352	60.31	6.77	44.29	85.54	11.23	0.67	0.56

¹⁾偏度和峰度是经对数转换后计算求得 Skewness and Kurtosis are calculated from the Log transformed Cr data

表2 不同尺度下土壤Cr含量的变异函数图
Table 2 Semi-variograms of Cr content in soil at different scales

研究尺度 Study scale	Model	C_0	Sill	$C_0/Sill$	R^2	RSS	Range (d/m)
县级尺度 County	Exponential	0.0090	0.0195	0.462	0.915	2.11E-05	39500
镇级尺度 Town	Spherical	0.0072	0.0146	0.493	0.899	1.08E-05	9400

式中,各变量的含义同式(1).局部Moran's I 指数可以对土壤重金属含量的空间格局进行可视化,便于进一步研究其空间分布规律.本研究利用局部空间自相关指标结合Lisa聚类图将土壤重金属含量空间分布划分为5种类型:“高一高”、“低—低”为空间聚集(Spatial clusters),表示高高相邻或低低相邻,即某观测点自身和该观测点周围其它观测点的重金属含量都较高或较低,同一聚集类型中重金属含量的空间差异程度显著较小;“高一低”、“低—高”为空间孤立(Spatial outliers),表示高低相邻,即某观测点自身土壤重金属含量较高(或较低),而该观测点周围其它观测点的土壤重金属含量较低(或较高),同一聚集类型中重金属含量的空间差异程度显著较大;“不显著”表示某观测点与其周围观测点的土壤重金属含量空间差异不显著.

1.4 数据处理与分析

采用GS+7.0软件进行变异函数、Moran's I 指数的计算和图形绘制;采用Geoda9.2软件进行空间权重计算和空间自相关性计算;用ArcGIS9.2进行相关图件绘制.本研究所采用的空间权重矩阵县级尺度下基于的距离范围是1~30 km,空间间隔为1 km,镇级尺度下基于的距离范围是1~6.4 km,空间间隔为0.2 km,计算了土壤重金属含量的空间自相关指标Moran's I 系数.

2 结果与分析

2.1 不同尺度下重金属Cr含量的统计特征

禹城市县级和镇级两个尺度耕层土壤重金属含量实测值的统计分析和K-S检验结果见表1.从偏度系数和峰度系数可以看出,经对数转化后,在两种尺度下Cr含量基本都服从正态分布.但两个研究尺度下,Cr含量的均值、最大值和最小

值均存在一定的差异.

县级尺度下Cr含量高于镇级尺度下的Cr含量,其均值分别为61.02 mg/kg和60.31 mg/kg,根据重金属含量的国家评价标准(GB15618-1995),Cr含量小于自然背景值,说明研究区域还没有受到Cr污染.从表1中可以看出县级尺度下,Cr含量的变化范围比镇级尺度下变化范围大,变异系数比镇级尺度大,两个尺度下Cr含量都表现为中等偏弱强度的变异性.

2.2 不同尺度下土壤Cr的含量半方差函数分析

地统计学是基于区域化变量的一种空间分析方法,它主要是利用半方差函数来研究区域化变量的空间结构,其相关原理可参考文献[16, 20].表2为两个研究尺度下土壤Cr的半方差函数模型及其参数统计特征.在县级尺度下,Cr的理论模型符合指数模型,镇级尺度下符合球状模型,其决定系数分别为0.915和0.899,说明模型的拟合精度较高,能够较好地反映研究区域耕地土壤Cr含量的空间结构特征.

表2中,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.两个研究尺度下,Cr的变程分别为39.5 km和9.4 km,说明在两个研究尺度下,Cr含量在一定范围内均存在空间相关性. C_0 为块金值,表示由随机部分引起的空间异质性,Sill为基台值,表示系统内总的变异.土壤Cr含量的块金值在县级研究尺度下稍大些,说明要想了解Cr含量的微域结构特征必须还要在小尺度下进行采样观测,才能了解Cr含量在不同尺度小上的变异特征^[6]. $C_0/Sill$ 表示由随机因素所引起的异质性占总空间异质性的程度.两个研究尺度下,Cr含量的 $C_0/Sill$ 值分别为0.462和0.493,都具有中等强度的相关性^[21].随着研究尺度的缩小,Cr含量的 $C_0/Sill$ 值变大,空间相关性减弱,说明结构因素影响减弱,随机因素影响增强.两个尺度下Cr含量自相关的这种变化与研究区的工业生

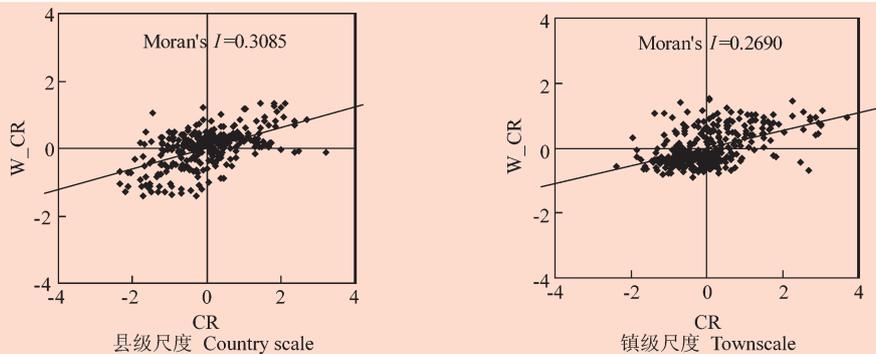


图2 不同尺度下土壤Cr含量的Moran散点图
Fig. 2 Moran scatter plots of Cr content in soil at different scales

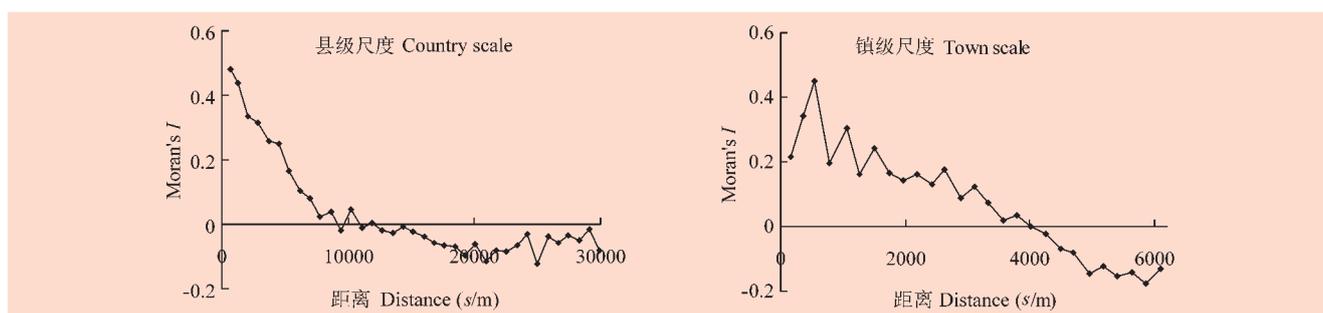


图3 不同尺度下土壤Cr含量的自相关性
Fig. 3 Spatial correlograms of Cr content of soil at different scales

产废物的排放与扩散、农药和化肥的施用、灌溉、耕作等有密切的关系。

在镇级尺度下, Cr含量的变程明显变小, 说明随着研究尺度的缩小, Cr含量的空间自相关距离减小, 地形、母质、土壤类型等大尺度结构因素对Cr含量的影响逐渐减弱, 而小尺度结构因素和随机因素的影响逐渐加强, 能引起土壤Cr含量在较小的尺度上发生强烈的变化, 从而使它的变程明显变小。

2.3 不同尺度下土壤Cr的全局空间自相关性分析

图2是两个尺度下Cr含量的Moran散点图。图中第一、三象限代表Cr含量正的空间相关联系, 第二、四象限代表负的空间相关联系。其中第一象限代表了Cr含量高值采样点为其它高值采样点所包围(高一高); 第二象限代表了Cr含量低值采样点为其它高值采样点所包围(低一高); 第三象限代表了Cr含量低值采样点为其它低值采样点所包围(低一低); 第四象限代表了Cr含量高值采样点为其它低值采样点所包围(高一低)^[19]。由图2可知, 两个不同尺度下多数采样点位于第一和第三象限内, 为正的空间联系, 属于“高一高”集聚和“低一低”集聚类型。在两个尺度下, 县级尺度下的Moran's *I*系数要大些, 说明随着研究尺度的增加, 空间结构性增强, 随机因素影响减小, 这与两个尺度下的块基比分析结论一致。

将Moran's *I*系数与滞后距离(步长)相结合, 便可得到不同尺度下重金属Cr含量的空间自相关关系变化, 从而可以看

出空间自相关性随尺度的变化^[22]。从图3中可以看出, 在县级尺度下Cr含量的Moran's *I*系数在0~8 800 m和10 000~11 900 m两个范围内都大于0, 表明Cr结构上呈正相关, 存在空间聚集, Cr的Moran's *I*系数在8 800~10 000m和11 900~30 000 m两个范围内小于0, 表明Cr结构上呈负相关, 存在空间孤立; 在镇级尺度下Cr含量的Moran's *I*系数在0~3800 m范围内大于0, 表明在此范围内Cr结构上呈正相关, 存在空间聚集, Cr的Moran's *I*系数在3 800~6 400 m范围内小于0, 表明在此范围内Cr结构上呈负相关, 存在空间孤立。根据张朝生等的研究^[23]可知县级尺度下Cr含量的自相关尺度为8.8 km, 镇级尺度下Cr含量的正相关尺度为3.8 km。自相关尺度随着研究尺度的增加明显增大。

2.4 不同尺度下土壤Cr的局部空间自相关性分析

全局空间自相关能够判断土壤重金属Cr含量空间分布上是否存在空间聚集区和空间孤立区, 可以描述Cr含量的自相关系数随滞后距离的变化, 而局部空间自相关指标结合Moran散点图能够揭示Cr含量的空间分布规律, 指出重金属含量空间聚集区和空间孤立区在研究区内的具体位置。

从图4中可以看出, 两个不同尺度下重金属Cr含量的分布都存在明显的空间聚集区。在县级尺度下, 市中办、梁家镇的南部、十里望乡的东北部和新寨镇的中南部都出现了Cr含量的“高一高”空间聚集区; 在北部的辛店镇、和伦镇镇的中部出现“低一低”空间聚集区; 重金属Cr含量的“高一低”和

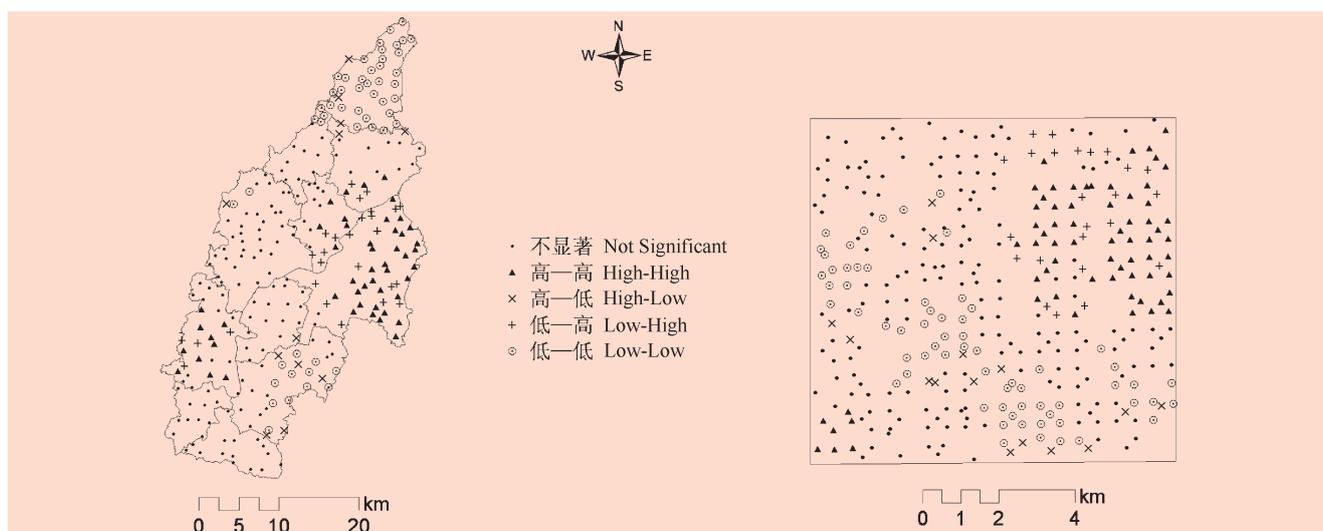


图4 不同尺度下土壤Cr含量的区域空间聚类图
Fig. 4 Spatial cluster maps of Cr content in soil at different scales

“低—高”空间孤立区较少,“高—低”空间孤立区一般出现在“低—低”空间聚集区附近,而“低—高”空间孤立区则伴随“高—高”空间聚集区出现。在镇级尺度下,研究区域的东北部(市中办、伦镇镇的交界处)、西南部(安仁镇的南部)都出现了Cr含量的“高—高”空间聚集区;研究区域的西部、东南部安仁镇和伦镇镇的交界处出现“低—低”空间聚集区;“高—低”空间孤立区出现在“低—低”空间聚集区附近,而“低—高”空间孤立区则伴随“高—高”空间聚集区出现。

对比两个尺度下Cr含量空间聚类图发现,在县级采样尺度下,镇级研究区域西北部和东南部主要分布为“不显著”,东北为“高—低”空间孤立区,南部主要为“低—低”聚集区。但是在镇级采样尺度下却出现了“高—高”等空间聚集区。可见,镇级研究尺度下能够观察到县级尺度下不能观察到的重金属Cr空间关联性的细微变化。

“高—高”空间聚集和“低—高”空间孤立的相伴出现,在此区域内Cr含量较高,存在潜在的污染风险。对照图1和图4可以看出,县级尺度下禹城市Cr含量的“高—高”与“低—高”聚集区主要分布在工业发达的市中办和辛寨镇,说明潜在的Cr污染与工业的排污直接相关;镇级尺度下,Cr含量的“高—高”与“低—高”聚集区靠近其东部的工业发达区,而“低—低”空间聚集区却背向分布,这也说明了研究区域Cr含量主要来自于工业排污。因此工业分布区是今后重金属污染的重点防治区域。

3 结论

1) 经典统计分析和半方差函数分析结果表明,研究区域土壤Cr含量在不同的研究尺度下的均值和最大值均存在一定的差异,随着研究尺度的增加变异系数增大;受结构性和随机性因素共同影响,两个尺度下Cr含量都表现为中等强度的空间异质性,随着研究尺度的增加,Cr含量的空间异质性增强。

2) 全局自相关分析表明,禹城市两个不同尺度下土壤重金属Cr含量的空间分布存在显著的空间自相关特征。正的显著空间自相关性说明重金属Cr含量分布存在空间聚集,负的显著空间自相关性说明重金属Cr含量分布存在空间孤立。县级尺度下Cr含量在0~8 800 m和10 000~11 900 m两个范围内存在空间聚集,在8 800~10 000 m和11 900~30 000 m范围内存在空间孤立;镇级尺度下Cr含量在0~3 800 m范围存在空间聚集,在3 800~6 400 m范围内存在空间孤立。随着研究尺度的增加,自相关系数增大,自相关尺度增大。

3) 局部自相关分析聚类结果揭示了研究区域土壤重金属Cr的空间分布规律,在不同尺度下Cr含量都存在“高—高”空间聚集和“低—高”空间孤立的相伴出现,并且都分布在工业发达的区域,在此区域内Cr含量较高,存在潜在的污染风险,这是今后重金属污染的重点防治区域。

References

- Cliff AD, Ord J K. Spatial process: Models and Applications. London, UK: Pion, 1973. 178
- Waser MN, Mitchell RJ. Nectar standing crops in delphinium nelsonii flowers: Spatial autocorrelation among plants. *Ecology*, 1990, **71** (1): 116~123
- Martin D. An assessment of surface and zonal models of population. *Intern J Geogr Inform Syst*, 1996, **10** (8): 973~989
- Jin YY (金友渔). Statistical prediction of mineral deposit by autocorrelation—discriminant analysis. *Geol & Prospect* (地质与勘探), 1991, **27** (3): 32~36
- Liang YP (梁艳平), Zhong ES (钟耳顺), Zhu JJ (朱建军). Spatial feature analysis of increment of GDP per person in provinces of China. *Cent South Univ Soc Sci* (中南大学学报社会科学版), 2003, **9** (3): 355~359
- Huo XN (霍霄妮), Li H (李红), Sun DT (孙丹峰), Zhang W (张微微), Zhou LD (周连第), Li BG (李保国). Spatial autocorrelation analysis of heavy metals in cultivated soils in Beijing. *Acta Sci Circumst* (环境科学学报), 2009, **29** (6): 1339~1344
- Jumars PA. Spatial autocorrelation with RUM (Remote Underwater Manipulator): Vertical and horizontal structure of a bathyal benthic community. *Deep Sea Res*, 1978, **25** (7): 589~604
- Kvamme KL. Spatial autocorrelation and the Classic Maya collapse revisited. *J Archaeol Sci*, 1990, **17**: 197~207
- Premo LS. Local spatial autocorrelation statistics quantify multi-scale patterns in distributional data: An example from the Maya Lowlands. *J Archaeol Sci*, 2004, **31**: 855~866
- Pearson DM. The application of local measures of spatial autocorrelation for describing pattern in north Australian landscapes. *J Environm Manag*, 2002, **64** (1): 85~95
- Bloschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling—a review. *Hydrol Proc*, 1995, **9**: 251~290
- Zhao J (赵军), Liu HJ (刘焕军), Sui YY (隋跃宇). Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in blacksoil crop area with different scales. *J Soil & Water Conserv* (水土保持学报), 2006, **20** (1): 41~45
- Xie HL (谢花林), Liu LM (刘黎明), Li B (李波), Zhang XS (张新时). Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes: A case study in Ongniud Banner, Inner Mongoli. *Acta Geogr Sin* (地理学报), 2006, **61** (4): 389~400
- 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
- Wang SY (王淑英), Lu P (路莘), Wang JL (王建立). Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: A case study in Pinggu County. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2008, **28** (10): 4957~4964
- Wang ZQ (王政权). Application of Geostatistics on Ecology. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 1999. 65~132
- Qiu BW (邱炳文), Wang QM (王钦敏), Chen CC (陈崇成), Chi TH (池天河). Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use in Fujian Province. *J Nat Resour* (自然资源学报), 2007, **22** (2): 311~321
- Yang JS (杨劲松), Yao RJ (姚荣江). Spatial variability of soil water and salt characteristics in the Yellow River Delta. *Sci Geogr Sin* (地理科学), 2007, **27** (3): 348~353
- Anselin L. GeoDa 0.9 User's Guide. Urbana-Champaign, IL, USA: Spatial Analysis Laboratory, University of Illinois, 2003. 88~105
- Cheng XF (程先富), Shi XZ (史学正), Yu DS (于东升), Pan XZ (潘贤章). Spatial variance and distribution of total nitrogen and organic matter of soil in Xingguo country of Jiangxi, China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2004, **10** (1): 64~67
- Zheng HL (郑海龙), Chen J (陈杰), Deng WJ (邓文靖), Tan MZ (檀满枝). Assessment of soil heavy metals pollution in the chemical industrial of Nanjing peri-urban zone. *Acta Sci Circumst* (环境科学学报), 2005, **25** (9): 1182~1188
- Hu W (胡伟), Shao MA (邵明安), Wang QJ (王全九). Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau. *Trans Chin Soc Agric Engin* (农业工程学报), 2005, **21** (8): 11~16
- Zhang CS (张朝生), Tao S (陶澍), Yuan GP (袁贵平), Liu S (刘水). Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin plain area. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1995, **32** (1): 50~57