

霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 2009. 北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析 [J]. 环境科学学报, 29(6): 1339- 1344

Huo X N, Li H, Sun D F, et al. 2009. Spatial autocorrelation analysis of heavy metals in cultivated soils in Beijing [J]. A c t a S c i e n t i a e C i r c u m s t a n t i a e, 29(6): 1339- 1344

北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析

霍霄妮¹, 李红^{2*}, 孙丹峰¹, 张微微¹, 周连第², 李保国¹

1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2. 北京市农林科学院农业综合发展研究所, 北京 100097

收稿日期: 2008-08-30 修回日期: 2008-12-11 录用日期: 2009-04-08

摘要: 以北京市耕作土壤中重金属元素为例, 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、空间相关尺度以及空间分布规律。结果表明: 北京市耕作土壤中 8 种重金属含量均存在空间自相关性。Cr、Ni、Zn、Hg、Cu、Pb、As、Cd 的空间自相关尺度分别为 57、75、57、55、55、65、74、37 km。以 Cr 和 Hg 为例, 用区域空间自相关指标结合 Moran 散点图分析了重金属含量空间聚集区和空间孤立区在研究区内的分布规律。其中“高-高”空间聚集和“低-高”空间孤立区域存在潜在的污染风险, 对土壤重金属环境质量评价和重金属污染防治有着重要的作用。

关键词: 北京; 耕作土壤; 重金属; 空间自相关

文章编号: 0253-2468(2009)06-1339-06 中图分类号: X53 文献标识码: A

Spatial autocorrelation analysis of heavy metals in cultivated soils in Beijing

HUO Xiaoni¹, LI Hong^{2*}, SUN Danfeng¹, ZHANG Weiw ei¹, ZHOU Liand i², LI Baoguo¹

1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193

2. Institute of Comprehensive Research, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097

Received 30 August 2008 received in revised form 11 December 2008 accepted 8 April 2009

Abstract Moran's I statistics was applied to describe the spatial autocorrelation coefficients, correlation distance and spatial pattern of heavy metals in cultivated soils in Beijing. Significant spatial autocorrelations were detected for 8 heavy metals and the autocorrelation distances were: Cr, 57; Ni, 75; Zn, 57; Hg, 55; Cu, 55; Pb, 65; As, 74 km; and Cd, 37 km. Local Moran's I was used to analyze the spatial distribution pattern of the heavy metals and identify the spatial clusters and spatial outliers. Taking Cr and Hg as examples, clusters of high-high Cr were observed in northeast Beijing (Miyun county, Huairou and Pinggu districts) and in the Changping, Mentougou and Tongzhou districts. Clusters of low-low Cr were identified in the Fangshan, Daxing and Shunyi districts. Clusters of high-high Hg were distributed in the urban fringe. Outliers of low-high were found near clusters of high-high and outliers of high-low near clusters of low-low. The spatial distribution of heavy metals, particularly clusters of high-high and outliers of low-high which have potential pollution risks, play a key role in the assessment of the environmental quality of soils.

Keywords Beijing; cultivated soil; heavy metals; spatial autocorrelation

1 引言 (Introduction)

空间自相关分析 (Spatial Autocorrelation Analysis) 是对某一地理变量空间分布相邻位置间的相关性进行检验的一种统计方法, 它是通过检测一个位置上的变异是否依赖于邻近位置上的变异来判断该变异是否存在空间自相关性 (Cliff *et al.*, 1981; Martin, 1996)。空间自相关自 1950 年 Moran 等提出以来, 已经被广泛应用于多个研究领域 (张朝

生等, 1995; Anselin *et al.*, 2001; Oudemars *et al.*, 2003; 梁二等, 2007; 武继磊等, 2005; 林琳等, 2007)。在土壤空间变异中, 张朝生等 (1995) 采用 Moran's I 统计量研究了天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关关系、空间自相关的方向性、空间自相关与距离的关系以及不同方向的自相关与距离的关系; 梁二等 (2007) 运用空间自相关方法对河南省 1958 年和 1985 年 2 个时段土壤有机碳储量的分布状况进行了研究; 而黄智刚等 (2006) 在地统计学插

基金项目: 国家科技支撑项目 (No. 2006BAD10A06-03, 2006BAB15B05)

Supported by the National Key Technology R&D Program (No. 2006BAD10A06-03, 2006BAB15B05)

作者简介: 霍霄妮 (1981-), 女, E-mail: hxnskj@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: lhhd@sina.com

Biography: HUO Xiaoni (1981-), female; * Corresponding author, E-mail: lhhd@sina.com

值时利用局域 Moran's I 指数对丘陵红壤蔗区土壤有机质的空间特异值进行检验。

目前,有关土壤重金属空间结构的研究采用较多的是地统计学的半方差函数与 GIS 相结合的方法,而有关空间自相关分析在土壤重金属方面的应用相对较少,因此,探讨利用空间自相关分析方法研究土壤重金属空间变异及变化规律很有必要。本研究中以北京市耕作土壤重金属为例,运用空间自相关分析方法研究土壤重金属的空间自相关特征,并进一步研究其空间分布规律,判断重金属的空间聚集区和空间孤立区的位置,以期为土壤环境质量评价和重金属污染防治提供科学依据。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

北京位于华北平原的西北部(图1),东经 $115^{\circ}25' \sim 117^{\circ}30'$,北纬 $39^{\circ}28' \sim 41^{\circ}05'$,总面积为 $1.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中山地面积约占 62%,平原约占 38%。北京地势西北高东南低,从西北向东南呈现山地、丘陵、岗台地、冲洪积平原的有序排列,海拔高度在 10~2303m。北京属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度为 11.8°C ,多年平均降雨量 440~670mm,年内分配不均,多集中在 7、8 月份。土壤成土母质为各类岩石风化物 and 第四纪疏松沉积物 2 大类。北京市内耕作土壤主要是普通褐土和潮土,2005 年耕地面积 $22.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (菜地: $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$)、园地 $11.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,牧草地 1982 km^2 (张凤荣等, 2007)。

2.2 采样与分析

通过不规则嵌套布点的方法于 2006 年秋季作物收获后在北京市耕作土壤中采集了 1018 个土壤样点(图 1),每个样点均采自 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 正方形 4 个顶点和中心点,各取表层(0~20cm)土壤约 1kg 现场均匀混合后用四分法从中选取 1kg 土样作为代表该点的混合样品,采样的同时用 GPS 定位样点坐标。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。土样在室内风干、磨碎,过 100 目尼龙网筛。土壤样品的化学分析项目由北京市环境监测站按照国家标准(GB15618-1995)执行完成,主要包括 8 种重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 含量的测定。

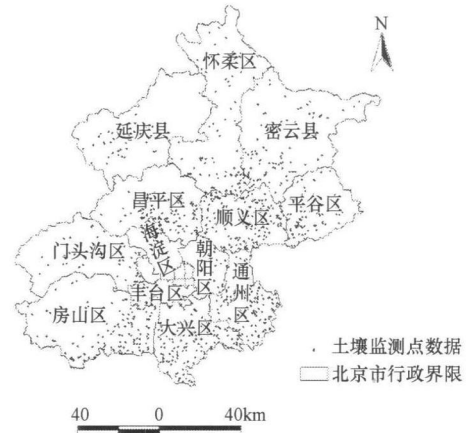


图 1 研究区示意图及土壤样点分布

Fig. 1 The study area and distribution of soil sample sites

2.3 空间自相关性分析

空间自相关分析是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(Cliff *et al.*, 1981; Martin, 1996)。空间自相关所统计的内容包括空间变量的空间位置和其属性,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(邱炳文等, 2007)。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域型(Global Spatial Autocorrelation)和区域型(Local Spatial Autocorrelation) 2 种。全域型 Moran's I 的计算公式为(Cliff *et al.*, 1981):

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

式中, n 是变量 x 的观测数; x_i, x_j 分别为位置 i 和位置 j 的观测值; \bar{x} 是所有观测值的平均值; w_{ij} 是空间权重矩阵值。

运用 Moran's I 统计量进行空间自相关分析的过程中,所使用的空间位置信息取决于空间权重矩阵,而空间权重矩阵的选择一般由研究者自行确定,可以基于邻接标准或距离标准构建(Cliff *et al.*, 1973; 张朝生等, 1998)。对于离散点而言,常用的方法是基于距离标准构建,若两点之间的距离小于指定的临界值即认为其是相邻的,权重为 1,否则为 0(刘仲刚等, 2006)。

通常将 Moran's I 标准化,以判断相关的正负性与显著性。本研究以近似正态为前提对其进行标

准化,得到指标 $Z(I)$ (Cliff *et al*, 1981; Goodchild 1986):

$$Z(I) = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (2)$$

式中, $E(I) = -\frac{1}{n}$; $\text{Var}(I) = \frac{1}{w_0^2(n^2 - 1)} (n^2 w_1 - m w_2 + 3w_0^2) - E^2(I)$

$$w_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}; w_1 = 0.5 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{ij} + w_{ji})^2;$$

$$w_2 = \sum_{i=1}^n (w_{i*} + w_{*i})^2, w_{i*} \text{ 表示权重矩阵第 } i \text{ 行之和, } w_{*i} \text{ 表示第 } i \text{ 列之和.}$$

以正态分布 95% 置信区间双侧检验阈值 1.96 为界限, $Z(I)$ 大于 1.96 为显著的正空间自相关, 表示某观测点与周围观测点的值相似, 即空间聚集; $Z(I)$ 小于 -1.96 为显著的负空间自相关, 表示某观测点与周围观测点的值差异程度显著较大, 即空间孤立; 若 $Z(I)$ 介于 -1.96 到 1.96 之间, 则空间自相关不显著, 变量呈随机分布 (Zhang *et al*, 2004).

区域型 Moran's I 系数被定义为 (Anselin 1995):

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, 各变量的含义同上. 区域型 Moran's I 指数可以将土壤重金属含量的空间格局可视化, 以进一步

研究其空间分布规律. 本研究利用区域型空间自相关指标结合 Moran 散点图将土壤重金属含量空间分布划分为 5 种类型: “高-高”、“低-低”为空间聚集 (spatial clusters), 表示某观测点自身与其周围观测点的重金属含量都较高或较低, 为高高相邻或低低相邻, 二者的空间差异程度显著较小; “低-高”、“高-低”为空间孤立 (spatial outliers), 表示某观测点自身土壤重金属含量较高 (或较低), 而其周围观测点的土壤重金属含量较低 (或较高), 为高低相邻, 二者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.

2.4 使用软件及数据处理

本研究采用 Anselin 等开发的 Geoda 软件进行空间权重计算、空间自相关性分析, 用 ArcView 3.2 进行图形绘制. 本研究所采用的空间权重矩阵基于的距离范围是 1~155 km, 空间间隔为 1 km, 计算了土壤重金属含量的空间自相关指标 Moran's I 并对其进行了标准化.

3 结果 (Results)

3.1 土壤重金属全域空间自相关性

图 2 为 8 种重金属元素的标准化空间自相关图, 纵坐标为 Moran's I 的标准化值 $Z(I)$. 标准化的 Moran's I 越大, 则空间结构的显著性越强. 由标准化空间自相关图可知区域化变量的空间自相关特

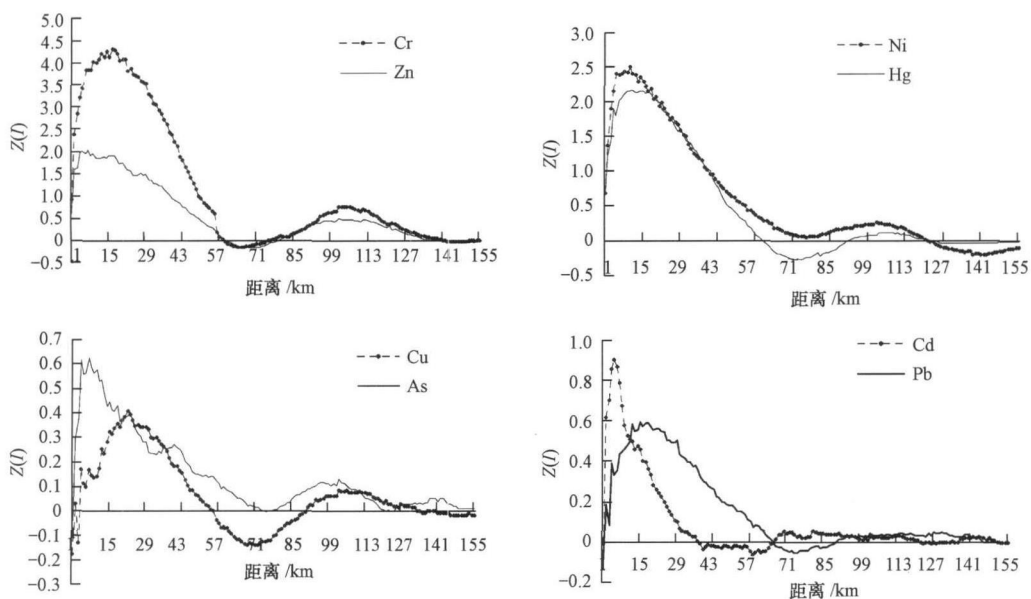


图 2 8 种土壤重金属的标准化空间自相关图

Fig 2 Standardized spatial correlograms of heavy metal contents

性,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,同时也可以得到区域化变量的空间自相关尺度。一般地,标准化的空间自相关图有两个或多个正相关,张朝生等(1998)指出,较近的正相关距离表示的是变量的空间自相关距。图2显示,Cr的标准化 Moran's I 值在 1 km 到 57 km, 79 km 到 140 km 两个范围内都为正,表明 Cr 结构上存在空间聚集; Cr 的标准化 Moran's I 值在 60 km 到 72 km 范围内为负,表明 Cr 结构上存在空间孤立。相似地, Ni Zn Hg Cu 的空间结构也存在空间聚集和空间孤立。As Cd 和 Pb 的标准化 Moran's I 值随距离的增加,没有表现出明显的负相关性,因此,As Cd 和 Pb 不存在明显的空间孤立区,但 As Cd 和 Pb 的分布同样存在空间聚集区。图2中近距离的空间正相关范围即为重金属的空间自相关尺度,则 Cr Ni Zn Hg Cu Pb As Cd 的自相关尺度分别为 57 75 57 55 55 65 74 37km。

3.2 土壤重金属半方差函数分析

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,有关原理可参考文献(王政权,1999, Isaaks *et al.*, 1989)。表1为拟合的土壤重金属最优半方差函数模型的参数值。由表1可知, Cr Ni Zn Hg 的半方差函数拟合都较好,回归系数 R^2 都在 0.9 以上,且4种重金属的空间变异结构都以指数模型拟合效果最佳。

C_0 与 $C_0 + C$ 的比值可以揭示区域化变量的空间相关程度。一般来说,比值 < 25% 表明空间相关性很强,比值在 25% ~ 75% 之间表明具有中等的空间相关性, > 75% 则表明空间相关性很弱 (Sun *et al.*, 2003)。表1中 Cr Ni Zn Hg 的 $C_0 / (C_0 + C)$ 在 34.24% ~ 48.88% 之间,均表现出中等程度的自相关性。Cr Ni Zn Hg 的变程分别为 59 55 94 50 65 79 65 10km,超出该距离范围,重金属不再具有空间相关性,因此, Cr Ni Zn Hg 的变程即为空间自相关距。

表 1 土壤重金属的半方差函数拟合参数

Table 1 Parameters of semivariance of heavy metals

重金属 Heavy metals	拟合模型 Models	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill ($C_0 + C$)	变程 /km Range (A_0)	块基比 Nugget/sill ($C_0 / (C_0 + C)$)	回归系数 R^2	残差 RSS
铬	指数模型	0.0251	0.0733	59.55	34.24%	0.980	1.21×10^{-5}
镍	指数模型	0.0696	0.1423	94.50	41.88%	0.972	3.52×10^{-5}
锌	指数模型	0.0377	0.0801	65.79	47.06%	0.930	3.80×10^{-5}
汞	指数模型	0.5010	1.0250	65.10	48.88%	0.969	5.20×10^{-3}

3.3 土壤重金属区域空间自相关性

全域型空间自相关的功能在于描述土壤重金属含量的整体分布状况,判断土壤重金属含量分布是否存在空间聚集区和空间孤立区,而区域空间自

相关指标结合 Moran 散点图能够揭示土壤重金属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位置,下面以 Cr 和 Hg 为例来说明(图3)。

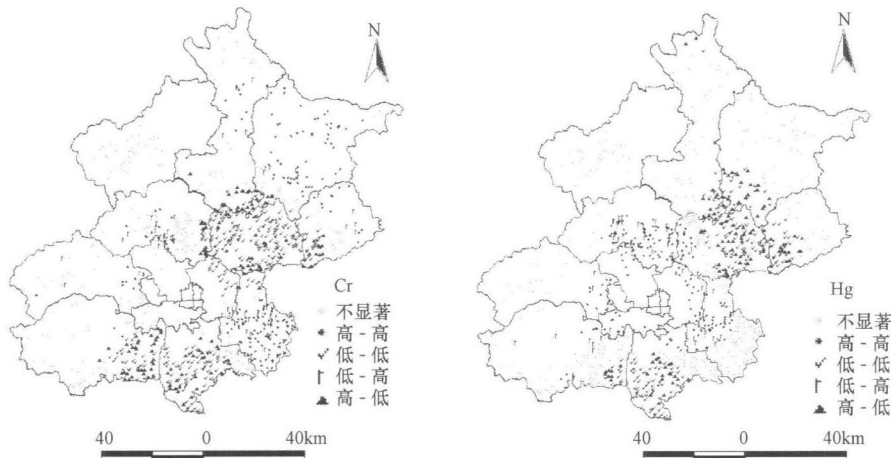


图 3 Cr 和 Hg 含量的区域空间关联图

Fig. 3 Maps of local indicators of spatial association for Cr and Hg

从图 3 可以看出, 重金属 Cr 和 Hg 含量的分布都存在明显的空间聚集区。东北部的密云、怀柔以及平谷、昌平、门头沟东部、通州中南部都出现了 Cr 含量的“高-高”空间聚集区; “低-低”空间聚集区主要出现在房山、大兴、顺义及其与附近的交界处。Hg 含量的“高-高”空间聚集区主要出现在人类活动较为密集的城区周围, 而“低-低”空间聚集区出现在大兴、顺义及其与附近的交界处。重金属含量的“高-低”和“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。

4 讨论 (Discussion)

地统计学的半方差函数和空间自相关分析法都可以对变量的空间分布结构进行定量描述。地统计学是通过块基比或变程来定量表征空间变异特点, 但不能描述具有离散特点 (即空间负相关) 的空间变量特征, 也不能对变程等进行显著性检验; 而空间自相关分析法不仅能反映变量的正负空间自相关特点, 而且可以对空间相关的显著性进行检验。与地统计学相比, 空间自相关分析法在衡量自相关时更为严格 (张朝生, 1998)。以 Cr、Ni、Zn 和 Hg 的空间自相关尺度为例, 采用半方差函数获得的空间自相关尺度分别为 59、55、94、50、65、79、65、10km, 采用空间自相关分析法得到的空间自相关尺度则相对缩小, 分别为 57、75、57、55km, 前者反映出的相关尺度同时包括正相关和负相关, 而后者只包括正相关。

空间自相关分析不仅可以描述研究区内重金属的空间自相关特征, 而且可以反映局部空间自相关特点, 识别空间聚集区和空间孤立区的位置。图 3 描述了北京地区土壤中 Cr 和 Hg 含量空间聚集区和空间孤立区的位置所在, 其中“高-高”空间聚集和“低-高”空间孤立区域为土壤环境研究的重点区域, 因为这 2 种区域内重金属含量较高, 存在潜在的污染风险, 对土壤重金属环境质量评价和重金属污染防治有着重要的作用。

有研究表明, 密云水库周边及上游地区土壤重金属污染的主要原因是由于金属矿山不合理堆放的尾砂及废矿石等人为因素所致 (廖海军, 2007)。密云和怀柔中部的矿山开采以铁矿和金矿为主, 铁矿和金矿尾砂中重金属元素 Cr 经雨水冲刷渗入地下, 使土壤中 Cr 含量增加。昌平区矿藏资源也很丰

富, 导致土壤中 Cr 和 Hg 含量增加, 出现富集。因此, 矿山开采是导致北京耕作土壤中 Cr 和 Hg 含量富集的主要原因之一。人类活动, 尤其是化石燃料、燃煤、工业锅炉、石油冶炼等排放的气体, 导致大气中 Hg 含量增加, 含 Hg 气体通过大气沉降等进入土壤, 导致土壤中 Hg 大量富集 (Miller *et al.*, 2003; Engle *et al.*, 2005), 而这些人类活动主要发生在城区周围。因此, 在北京人类活动密集的城区周围, 土壤中 Hg 含量较高。北京地区从 20 世纪 50 年代开始采用污水灌溉农田, 污水来源主要是生活污水和工业污水。长期的污水灌溉可能会对土壤产生危害, 致使土壤中出现重金属的富集 (Liu *et al.*, 2005; Khan *et al.*, 2007)。图 3 显示, 在北京南部的通州, Cr 和 Hg 含量都较高。在昌平的垃圾填埋场周围也出现了 Cr 和 Hg 含量较高的区域, 说明城市生活垃圾 (尘土、电池、油漆、塑料、电子产品等) 也是土壤中重金属的主要来源 (任福民等, 2001)。

5 结论 (Conclusions)

1) 全域空间自相关分析结果表明: 北京市土壤重金属含量的空间分布并非随机状态, 而是存在显著的空间自相关特性。正的显著空间自相关说明了土壤重金属含量分布存在空间聚集, 负的显著空间自相关则表示重金属含量分布存在空间孤立, 同时近距离的显著正相关范围表示重金属的显著空间自相关尺度。因此, Cr、Ni、Zn、Hg、Cu、Pb、As、Cd 的显著自相关尺度分别为 57、75、57、55、55、65、74、37km。

2) 区域空间自相关结合 Moran 散点图的分析结果揭示了土壤重金属的空间分布规律, 其中“高-高”空间聚集和“低-高”空间孤立 2 种结构总是相伴出现, 且区域内重金属含量较高, 存在潜在的污染风险, 为土壤环境研究的重点。结果显示: Cr 含量较高的区域分布在北京市的东北部以及通州、昌平和门头沟, Hg 含量较高的区域分布在人类活动密集的城区及其周围。究其原因, 北京市土壤 Cr 和 Hg 的富集主要是由采矿、污灌、垃圾填埋和大气沉降等引起的。

责任作者简介: 李红 (1973—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事农业资源可持续利用与管理研究, E-mail: lhrsdf@sina.com.

参考文献 (References):

Anselin L. 1995 Local indicators of association-LISA [J]. *Geographical*

- Analysis 27: 93—115
- Anselin L. 2001 Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics [J]. *American Journal of Agricultural Economics* 83: 705—710
- 陈涛. 2007 杭州市城郊蔬菜地土壤重金属污染及其时空变异研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 97
- Chen T. 2007 Heavy metals pollution and spatial-temporal variation in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou China [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 97 (in Chinese)
- Cliff A D, Ord J K. 1973 Spatial Autocorrelation [M]. London: Pion, 178
- Cliff A D, Ord J K. 1981 Spatial processes Models and Applications [M]. London: Pion, 266
- Engle M A, Gustin M S, Lindberg A W, *et al.* 2005 The influence of ozone on atmospheric emissions of gaseous elemental mercury and relative gaseous mercury from substrates [J]. *Atmospheric Environment* 39: 7506—7517
- Goodchild M F. 1986 Spatial Autocorrelation [M]. CATMOG 47. Geobooks Norwich UK, 6—25
- 黄智刚, 李保国, 胡克林. 2006 丘陵红壤蔗区土壤有机质的时空变异研究 [J]. *农业工程学报*, 22(11): 58—63
- Huang Z G, Li B G, Hu K L. 2006 Characteristics of the spatio-temporal changes of soil organic matter of sugarcane field in red soil hill areas [J]. *Transactions of the CSAE*, 22(11): 58—63 (in Chinese)
- Isaaks E H, Srivastava R M. 1989 Applied geostatistics [M]. New York: Oxford University Press, 351—364
- Khan S, Cao Q, Zheng Y M, *et al.* 2007. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 152(3): 686—692
- 梁二, 王小彬, 蔡典雄, 等. 2007. 河南省土壤有机碳分布空间自相关分析 [J]. *应用生态学报*, 18(6): 1305—1310
- Liang F, Wang X B, Cai D X, *et al.* 2007. Spatial autocorrelation analysis on soil organic carbon distribution in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(6): 1305—1310 (in Chinese)
- 廖海军. 2007 北京市密云水库上游土壤重金属污染调查评价 [J]. *分析研究*, 2(3): 31—34
- Liao H J. 2007. Investigation and assessment of pollution of heavy metals in the soil of the upstream area of Miyun reservoir Beijing [J]. *Analysis Research* 2(3): 31—34 (in Chinese)
- 林琳, 马飞. 2007 广州市人口老龄化的空间分布及趋势 [J]. *地理研究*, 26(5): 1043—1054
- Lin L, Ma F. 2007 Spatial distribution and trends of the aging of population in Guangzhou [J]. *Geographical Research* 26(5): 1043—1054 (in Chinese)
- Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, *et al.* 2005 Impact of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China [J]. *Environment International* 31: 805—812
- 刘仲刚, 李满春, 刘剑锋, 等. 2006 面向离散点的空间权重矩阵生成算法与实证研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 22(3): 56—56
- Liu Z G, Li M C, Liu J F, *et al.* 2006. Analysis and implement of spatial weight matrix based on discrete points [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 22(3): 56—56 (in Chinese)
- Martin D. 1996. An assessment of surface and zonal models of population [J]. *International Journal of Geographic Information Systems* 10(8): 973—989
- Miller J R, Lechler P J, Bridge G. 2003 Mercury contamination of alluvial sediments within the Essequibo and Mazamiri river basins, Guyana [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 148: 139—166
- Ovemaas K P, de Koning G H J, Veldkamp A. 2003. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models [J]. *Ecological Modelling* 164: 257—270
- 邱炳文, 王钦敏, 陈崇成, 等. 2007 福建省土地利用多尺度空间自相关分析 [J]. *自然资源学报*, 22(2): 311—321
- Qiu B W, Wang Q M, Chen C C, *et al.* 2007. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use in Fujian Province [J]. *Journal of Natural Resources* 22(2): 311—321 (in Chinese)
- 任福民, 汝宜红, 许兆义, 等. 2001 北京市生活垃圾重金属元素调查及污染特性分析 [J]. *北方交通大学学报*, 25(4): 66—68
- Ren F M, Ru Y H, Xu Z Y, *et al.* 2001. Investigation of heavy metal elements in municipal solid waste in Beijing [J]. *Journal of Northern Jiaotong University* 25(4): 66—68 (in Chinese)
- Sun B, Sheng H Z, Zhao Q. 2003 Evaluation of temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China [J]. *Geoderma* 115: 85—89
- 王政权. 1999. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 65—98
- Wang Z Q. 1999. Geostatistics and application in ecology [M]. Beijing: Science Press, 65—98 (in Chinese)
- 武继磊, 王劲峰, 孟斌, 等. 2005. 2003年北京市 SARS 疫情空间相关性分析 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 31(1): 97—101
- Wu J L, Wang J F, Meng B, *et al.* 2005. Spatial association analysis on epidemic of SARS in Beijing, 2003 [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 31(1): 97—101 (in Chinese)
- Zhang C S, McGrath D. 2004. Geostatistical and GIS analysis on soil organic carbon concentrations in grassland of southeast Ireland from two different periods [J]. *Geoderma* 119: 261—275
- 张朝生, 陶澍, 袁贵平, 等. 1995 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究 [J]. *土壤学报*, 32(1): 50—57
- Zhang C S, Tao S, Yuan G P, *et al.* 1995. Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin plain area [J]. *Acta Pedologica Sinica* 32(1): 50—57 (in Chinese)
- 张朝生, 章申, 何建邦. 1998 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究—空间自相关与分形方法 [J]. *地理学报*, 53(1): 87—96
- Zhang C S, Zhang S, He J B. 1998. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system—Spatial autocorrelation and fractal methods [J]. *Acta Geographica Sinica* 53(1): 87—96 (in Chinese)
- 张凤荣, 赵华甫, 陈阜, 等. 2007 都市型现代农业产业布局 [M]. 北京: 中国石油大学出版社; 中国农业大学出版社, 194
- Zhang F R, Zhao H F, Chen F, *et al.* 2007. Industrial Layout of Metropolitan Modern Agriculture [M]. Beijing: China University of Petroleum Press; China Agricultural University Press, 194 (in Chinese)