

基于局部 Moran's I 和 GIS 的珠江三角洲肝癌高发区蔬菜土壤中 Ni、Cr 的空间热点分析

李勇^{1,5}, 周永章^{1,5*}, 张澄博^{1,5}, 窦磊², 杜海燕², 林小明², 范瑞^{1,3}, 杜敏^{1,4}, 何翔^{1,5}

(1. 中山大学地球科学系, 广州 510275; 2. 广东省地质调查院, 广州 510080; 3. 广东省环境技术中心, 广州 510630; 4. 中山市环境保护局, 中山 528400; 5. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275)

摘要:局部 Moran's I 是一种鉴定土壤重金属空间热点、区分空间集聚和空间离散的有用工具。本研究在珠江三角洲肝癌高发区系统采集了 208 个蔬菜地表层土样, 分析每个样品的 Ni 和 Cr 含量, 并在此基础上分析研究区蔬菜土壤中 Ni、Cr 的空间热点。结果表明, Ni、Cr 的平均含量为 33.2 mg/kg、80.8 mg/kg, 比其相应的广东省土壤背景值分别高出 130%、60%。总体上, 土壤中的 Ni 有一定程度的积累, Cr 的积累现象并不明显。本研究分别选取 3 000、6 000、9 000 m 作为距离尺度计算 Ni、Cr 的局部 Moran's I, 基于 6 000 m 作为距离尺度的局部 Moran's I 鉴定了土壤 Ni、Cr 的空间热点; Ni、Cr 的“个别热点”分布在研究区的北部, 主要受人为因素的影响, “区域化热点”分布在研究区的南部, 主要受成土母质控制。研究区原发性肝癌死亡率最高的区域与 Ni、Cr 的“区域化热点”重叠, 两者区域上分布的一致性有可能为排查其环境致病因子提供一种思路。

关键词:重金属; 空间热点; 空间集聚; 空间离散; 局部 Moran's I; 珠江三角洲经济区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1617-07

Application of Local Moran's I and GIS to Identify Hotspots of Ni, Cr of Vegetable Soils in High-Incidence Area of Liver Cancer from the Pearl River Delta, South China

LI Yong^{1,5}, ZHOU Yong-zhang^{1,5}, ZHANG Cheng-bo^{1,5}, DOU Lei², DU Hai-yan², LIN Xiao-ming², FAN Rui^{1,3}, DU Min^{1,4}, HE Xiang^{1,5}

(1. Department of Earth Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Institute of Geological Survey, Guangzhou 510080, China; 3. Guangdong Center of Environmental Technology, Guangzhou 510630, China; 4. Zhongshan Environmental Protection Bureau, Zhongshan 528400, China; 5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resource Survey, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The index of local Moran's I is a useful tool for identifying hotspots of soil Ni and Cr, and for classifying them into spatial clusters and spatial outliers. To identify hotspots of vegetable soils Ni and Cr in high-incidence area of liver cancer, Shunde area of Foshan City, Pearl River Delta Economic Zone, 208 topsoil samples were collected from vegetable fields to measure the contents of nickel (Ni) and chromium (Cr). The results showed that the mean concentrations of two heavy metals Ni, Cr were 33.21 mg/kg, 80.84 mg/kg, respectively, Which were 130%, 60% higher than their soil background values of Guangdong Province, respectively. Generally, Ni is partly accumulated in soil but the accumulation of Cr is not obvious at all. The local Moran's I of Ni and Cr was calculated using 3 000, 6 000, 9 000 m as distance bands, respectively. The hotspots of Ni and Cr elements in soils were identified by local Moran's I which computed based on 6 000 m; "individual hotspots" are in the north which were affected by anthropogenic factors; "regional hotspots" are in the south which were controlled by parent materials. Moreover, the distributions of "regional hotspots" of Ni, Cr are the same as that of the highest mortality rate of liver cancer, this consistence could come up with a research direction that could reveal environmental etiologic factors of liver cancer.

Key words: heavy metal; spatial hotspots; cluster; spatial outlier; Local Moran's I; Pearl River Delta Economic Zone

土壤是 Ni、Cr 等微量元素进入生物地球化学营养链的重要媒介, Ni、Cr 可以通过植物吸收、经食物链进入人体, 对人体产生直接或潜在危害。1987 年国际癌症研究中心 (IARC) 将 Ni、Cr 确认为第 I 类致癌物^[1], 同时, 我国土壤环境质量标准对 Ni、Cr 的含量进行了明确规定。Ni 是某些高等植物的必需营养元素, 也是一种有毒化学物质^[2], 有研究认为 Ni

有致癌性, 且镍化合物与肿瘤发生有关^[3]; Cr 在土壤环境中一般分为三价和六价 2 种形态, 但两者有

收稿日期: 2009-08-05; 修订日期: 2009-09-15

基金项目: 广东省自然科学基金研究团队项目 (06202438); 广东省科技厅重大专项攻关项目 (2004A3030800); 中国地质调查项目 (基[2005]011-16)

作者简介: 李勇 (1980 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: liyn8@mail2.sysu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhouyz@mail.sysu.edu.cn

着几乎相反的化学性质和生物学效应: Cr^{3+} 在土壤中活性较差,是人体所必需的活性微量元素; Cr^{6+} 的活性性和氧化性都很强,易被生物吸收,具有致癌致畸作用^[4,5].因此,对土壤中 Ni、Cr 等重金属含量的空间结构与分布特征的研究已成为土壤污染学、环境医学、医学地质学等多学科的研究热点.

局部 Moran's I 是一种鉴定土壤重金属空间热点、区分空间集聚和空间离散的有用工具.国内外众多学者把局部 Moran's I 应用于环境科学^[6-9]、环境规划^[10],以及鉴定疾病和死亡率热点^[11,12]等多学科领域.在环境科学领域,McGrath 等^[8]对土壤有机碳进行空间分析时,采用局部 Moran's I 对其空间异常值进行剔除,得到较为满意的结果;Zhang 等^[6]采用不同的统计方法对爱尔兰某城市土壤中的 Pb 含量进行空间异常值剔除,发现局部 Moran's I 对低值区空间异常值的剔除更有效率.但是,将地统计学方法运用到空间自相关分析中,弥补其不足之处的研究还是鲜见报道.本研究结合了地统计学与空间自相关分析 2 种空间分析方法,对土壤重金属 Ni、Cr 的空间热点进行了鉴定并提供显著性检验,在运用局部 Moran's I 区分 Ni、Cr 的空间集聚及空间离散时,空间插值预测图作为决定局部 Moran's I 的距离尺度提供参考依据.

顺德区位于珠江三角洲腹地,是全国三大原发性肝癌高发区之一.顺德 1970~1979 年恶性肿瘤死亡回顾调查发现肝癌年平均死亡率为 26.84/10 万(广东省年平均死亡率 11.33/10 万)^[13],杏坛镇(年均死亡率 36.25/10 万)是顺德肝癌年均死亡率最高的镇.有研究表明:肝癌致病因子可能与环境因子有关^[14-16],因此,有必要详查该区蔬菜土壤重金属的热点特征及空间分布.

1 材料与方法

1.1 位置的特征

研究区位于珠江三角洲腹地的顺德区($22^{\circ}40' \sim 23^{\circ}00' \text{N}$, $113^{\circ}00' \sim 113^{\circ}16' \text{E}$),面积约 500 km^2 ,是西江、北江汇合形成的海陆混合沉积的三角洲.土壤类型主要为人工堆叠土,土壤质地以中壤至重壤为主,部分质地属轻黏土.该区域水陆交通方便,工农业生产发达,是珠江三角洲主要的基塘农业区.近年来随着经济的快速发展,基塘生态系统已由过去单一的桑基鱼塘向蔗基、花基、菜基等类型多元化发展,物质流中增加了猪、鸭等养殖的中间环节.随着基塘生态系统结构的变化以及外部因素的影响,基

塘生态环境质量下降.

1.2 样品采集和分析

在 2007 年 1 月,对该区开展了农业土壤调查.在研究区蔬菜地,采集了 208 个非根际的表层土样品(深度为 0~20 cm)(见图 1).样点位置主要由蔬菜种植区决定,为减少植物吸收的影响,在蔬菜之间采样.每一个样点由 4~5 个副样混合组成.所有的样品在室温下($20 \sim 24^{\circ}\text{C}$)风干,除去石子或其它碎片,然后过 2 mm 的聚乙烯筛.取土壤部分样品(大约 50 g)在玛瑙研钵中研磨,完全过 0.149 mm 筛^[17].

全部样品在加工后由中国地质科学院廊坊物化探研究所进行分析测试.分析了土壤重金属 Ni 和 Cr 的含量.电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Ni 的全量. Cr 的全量由压片法-X 射线荧光光谱(XRF)测定.分析过程中分别插入 8% 的 GSS-1、GSS-2、GSS-3 和 GSS-8 等国家一级标准物质及 5% 的密码重复样进行分析质量监控,监控样的分析数据显示样品分析质量符合文献^[18]的规定要求.



图 1 土壤采样点分布示意

Fig.1 Schematic graph of sampling sites of soil

1.3 统计方法

地统计学中,数据的非正态分布易引起比例效应,增大估计误差^[19],此外,局部 Moran's I 的计算涉及均值与方差,而这 2 个参数易被正偏态影响^[7].故本研究采用了环境变量常用的 Box-Cox 转换,并进行 Spapiro-Wilk 检验.

1.4 空间集聚和空间离散

土壤重金属热点以聚集的形式存在(空间集

聚)也以单点形式存在(空间离散).本研究中,土壤重金属的空间集聚是一个高含量的样点被其它高含量的样点包围.相反,土壤重金属的空间离散是一个高含量的样点被其它正常含量或低含量的样点包围.局部 Moran's I 可区分空间集聚和空间离散^[20-22]:

$$I_i = \frac{z_i - \bar{z}}{\delta^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n [w_{ij}(z_j - \bar{z})] \tag{1}$$

式中, z_i 是变量 z 在 i 点的值, $\bar{z}$ 表示 n 个 z 值的均值, z_j 表示变量 z 在其它所有样点的值($j \neq i$), δ^2 是变量 z 的方差, w_{ij} 表示权重,定义为样点 i 与样点 j 之间距离的倒数.在本研究中,以距离尺度决定权重,当样点 i 与 j 之间的距离小于选定的尺度值 d 时,权重 w_{ij} 等于 1,而其余大于尺度值 d 的样点权重 w_{ij} 为 0.

如果某样点的局部 Moran's I 值是正数且数值较高,暗示该样点重金属含量与邻近的样点有类似高的或低的含量,因此,这些样点有空间集聚性.空间集聚包括了高-高值和低-低值集聚.在土壤污染中,低-低值集聚称为“冰点”,而高-高值集聚称为“区域性热点”.

如果某样点的局部 Moran's I 值是负数且数值较高,这意味着该样点是一个空间离散点.空间离散点的含量是明显不同于其邻近样点的含量.空间离散包括高-低值和低-高值离散.在土壤中,高-低空间离散被认为是孤立的“个别热点”.

冰点与热点鉴定结果常常被加权函数、数据转换和数据极值影响,用去极值的原始数据所得的局部 Moran's I 值类似于数据转换后的结果^[7].

1.5 数据处理的统计软件

用不同的软件包对原始数据分析;数据转换是用 MiniTab14 处理;用 GS + V9.0 进行地统计分析;空间集聚和空间离散用软件 GeoDa0.95i 分析;地图由 Arcgis9.2 和 ArcView3.2 完成.

2 结果与讨论

2.1 Ni、Cr 的统计性描述

土壤 Ni、Cr 含量的基本统计结果见表 1.可以看出:土壤 Ni、Cr 与文献[23]中二级标准相比,Ni 有一定程度的积累,Cr 的积累现象并不明显.土壤 Ni、Cr 的平均浓度均高于广东省土壤背景值^[24].Ni 的平均含量为 33.21 mg/kg,比其相应的广东省土壤背景含量高 1.3 倍;其最大值达 56.8 mg/kg,比其相应的广东省土壤背景值高出 3 倍.Cr 的平均含量为 80.84 mg/kg,比其相应的广东省土壤背景含量高 0.6 倍;其最大值达 115.10 mg/kg,比其相应的广东省土壤背景值高出 1.3 倍.从表 1 还可以看出,Ni、Cr 的变异系数在 16%~23%左右,均低于 30%,两者之间相差不大,因此,研究区土壤中 Cr 和 Ni 的变异程度接近,低的变异系数表明这 2 种重金属可能主要是自然来源.

表 1 土壤 Ni、Cr 含量统计结果/mg·kg⁻¹
Table 1 Descriptive statistics of Ni and Cr concentrations in soils/mg·kg⁻¹

土壤元素	算术均值	几何均值	中位值	最小值	最大值	标准差	变异系数/%	国家土壤环境质量标准值 ^[23]	广东土壤背景值 ^[24]
Ni	33.21	32.67	33.76	13.6	56.8	7.58	23	50	14.4
Cr	80.84	79.7	82.5	39.2	115.10	13.06	16	200	50.5

2.2 数据转换

本研究对原始数据进行 Box-Cox 转换后,并对转换后的数据进行 Spapiro-Wilk 检验,分析结果见表 2.从表 2 可发现,土壤 Ni 的原始数据通过了

Spapiro-Wilk 检验(S-W 检验),而土壤 Cr 的原始数据没通过检验.因此,对土壤 Cr 进行 Box-Cox 转换,其 Spapiro-Wilk 检验概率显著提高.

2.3 地统计分析

表 2 土壤 Ni、Cr 的正态分布检验¹⁾
Table 2 Test for normality of soil Ni and Cr

项目	原始数据			Box-Cox 变换			
	偏度	峰度	S-W(p)	偏度	峰度	S-W(p)	λ
Ni	-0.24	0.18	0.24	-0.08	0.15	0.56	1.2
Cr	-0.58	0.74	0.01	0	-0.001	0.98	2

1) S-W(p)表示 Shapiro-Wilk 正态检验的显著性水平; λ 表示 Box-Cox 变换的系数

2.3.1 空间结构分析

在本研究中,用地统计方法分析了土壤 Ni、Cr

的空间结构和插值分布图.Ni、Cr 的半方差模型参数见表 3.

半方差函数显示土壤中 Ni、Cr 分布最优拟合了球形模型和指数模型. 块金比例可以表征随机成分在变量空间变异中所占的比例. Cambardella 等^[25]认为块金比例 < 25%、25% ~ 75%、> 75%, 分别代表强、中、弱 3 种程度的空间相关性. 空间相关性是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果. 结构性因素, 如气候、母质、土壤类型等可导致强的空间相关性; 随机性因素如施肥、耕作措施等各种人为活动

使空间相关性减弱. 对比 Ni、Cr 块金比例发现: Ni、Cr 属于强空间相关. 这表明结构性因素决定了 Ni、Cr 的空间相关性. 变程是指变异函数达到基台值所对应的距离, 表明空间自相关范围, 其变化也反映出引起变异主要过程的变化, Ni、Cr 的变程相当. 结合块金比例和变程考虑, 表明 Ni、Cr 有很好的空间结构以及主要来源于成土母质, 这与前面讨论的结果是一致的.

表 3 Ni、Cr 的理论半变异模型拟合参数
Table 3 Best-fitted semivariogram model parameters of soil Ni and Cr

元素	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 α/m	块金比例 $\frac{C_0}{C_0 + C}/\%$	决定系数 R^2
Ni	球面	2	325.1	1160	0.62	0.311
Cr	指数	480 000	4 321 000	1 020	11.11	0.156

2.3.2 空间分布

为了解蔬菜土壤中 Ni、Cr 的分布类型, 用克里金插值可获得由等高线填充的预测图 (见图 2). 研究区北部主要有乐从、陈村和北滘等镇, 中部主要是

龙江镇, 均安、杏坛镇主要位于南部. Ni、Cr 的空间分布示意了其有相似的分布规律: 北部、中部的点状富集, 南部的斑块状富集.

2.4 热点分析

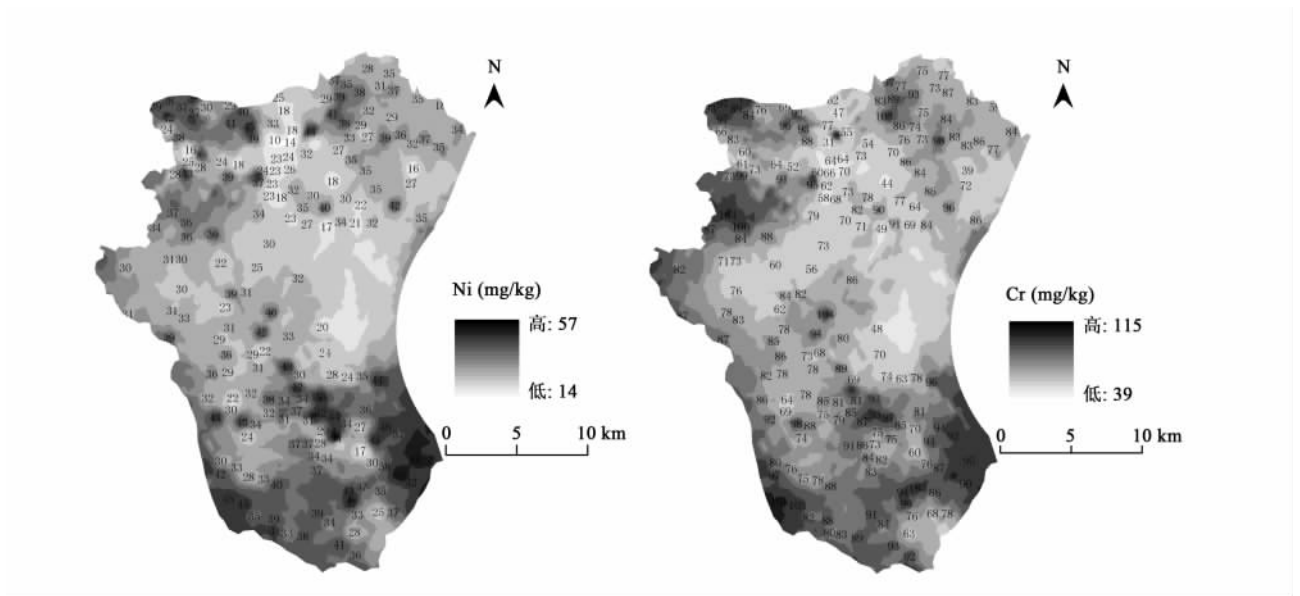


图 2 蔬菜土壤 Ni、Cr 空间分布示意

Fig. 2 Spatial distributions of soil Ni and Cr

局部 Moran's I 是鉴定土壤重金属热点一种有用的方法^[7], 由于无具体标准决定最优距离尺度, 在计算权重时, 距离尺度的选择具有随意性. 一般而言, 距离尺度不应小于样点对的最小间距, 也不能大于样点对最大间距的一半^[7]. 空间分布图可为距离尺度的选取提供参考依据 (见图 2), 本研究分别选取了 3 000、6 000、9 000 m 作为距离尺度分析土壤 Ni、Cd 的空间热点 (见图 3 ~ 5).

2.4.1 热点与冰点的空间分布

对比分析发现, 6 000 m 最适合作为距离尺度分析 Ni、Cr 的空间热点. 图 4 是距离尺度为 6 000 m 时, 在 0.05 显著水平 Ni、Cr 的热点与冰点的空间分布图, 从图 4 可以看出: 土壤中 Ni 与 Cr 的空间热点有类似分布. Ni 的热点包括了“区域化热点”和“个别热点”, 它们分别在南部和北部分布, 有 36 个“区域化热点”和 23 个“个别热点”, 占总样点的 28%.

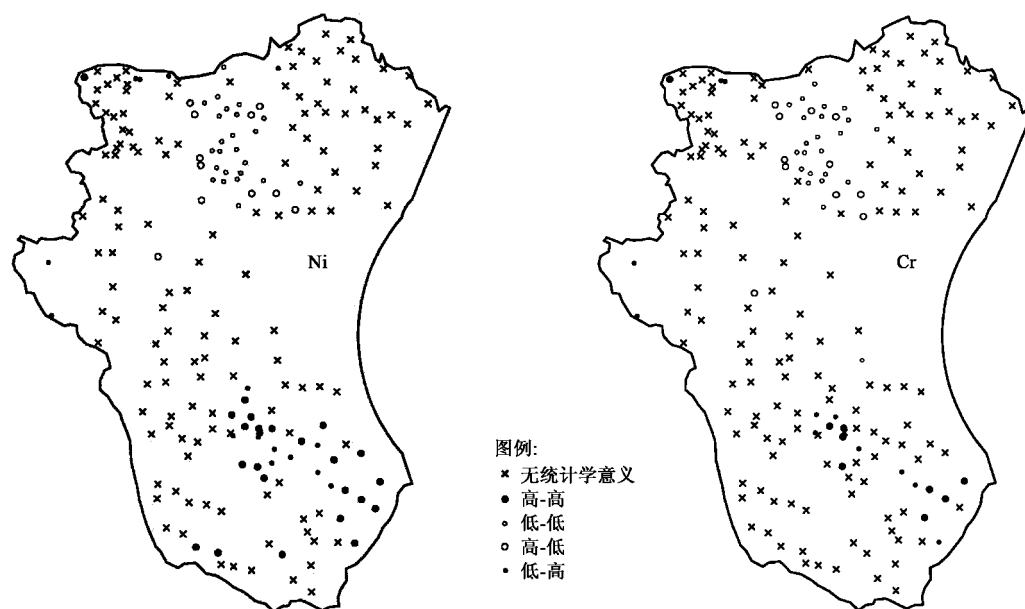


图3 距离尺度为 3 000 m 时, Ni、Cr 的热点与冰点的空间分布示意

Fig. 3 Spatial distribution maps of significant hotspots and cool spots for Box-Cox transformed data calculated using a distance band of 3 000 m

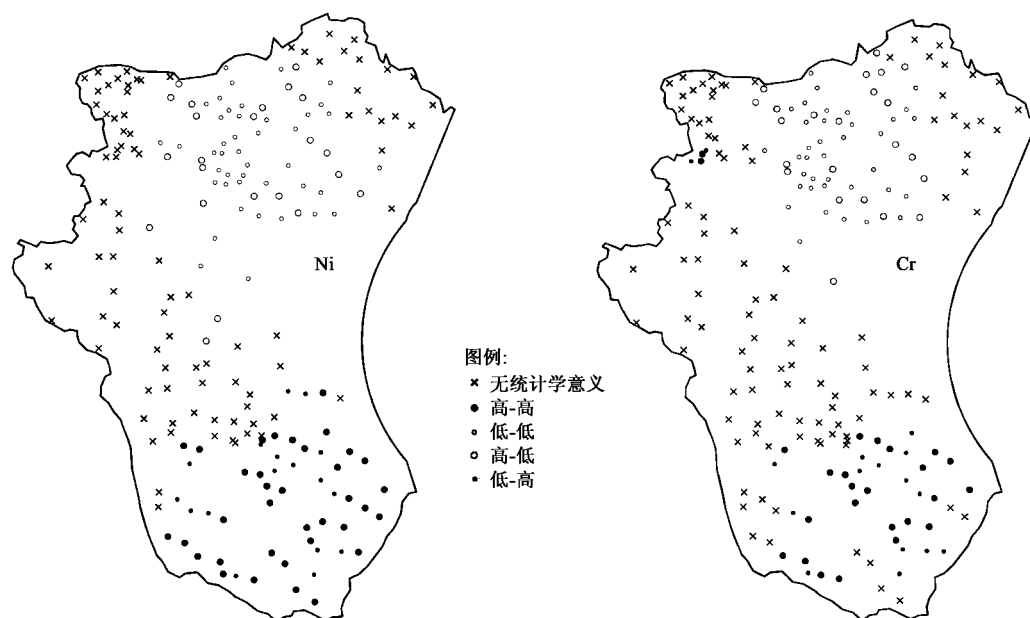


图4 距离尺度为 6 000 m 时, Ni、Cr 的热点与冰点的空间分布示意

Fig. 4 Spatial distribution maps of significant hotspots and cool spots for Box-Cox transformed data calculated using a distance band of 6 000 m

Ni 的“冰点”又称为低-低值空间集聚,其主要分布在北部,占总样点的 21%。从图 4 也可以发现,空间集聚与空间离散是伴随出现的,一般是高-高值空间集聚与低-高值空间离散伴随,低-低值空间集聚与高-低值空间离散伴随。Ni 的高-低值空间离散主要分布在北部和中部,低-低值空间集聚伴随着高-低

值空间离散分布;高-高值空间集聚和低-高值空间离散主要分布在南部地区;其余为无统计学意义的样点。38% 的 Ni 样点分布属于空间集聚,19% 属于空间离散。Cr 的“区域化热点”主要分布在南部及少数几个分布在西北角,“个别热点”主要分布在北部,有 25 个“区域化热点”和 23 个“个别热点”,占

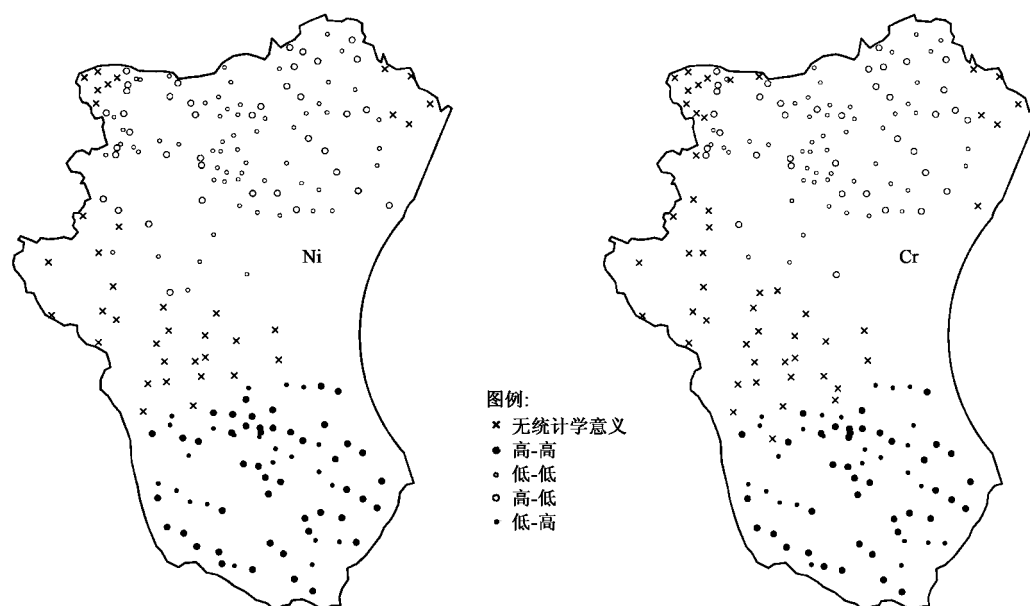


图5 距离尺度为9 000 m时,Ni、Cr的热点与冰点的空间分布示意

Fig. 5 Spatial distribution maps of significant hotspots and cool spots for Box-Cox transformed data calculated using a distance band of 9 000 m

总样点的23%。Cr的“冰点”主要分布在北部,占总样点的18%。Cr的空间集聚与空间离散也是伴随出现,Cr的高-低值空间离散主要分布在北部,低-低值空间集聚伴随着高-低值空间离散分布;高-高值空间集聚和低-高值空间离散主要分布在南部地区;其余为无统计学意义的样点。30%的Cr样点分布属于空间集聚,19%属于空间离散。

2.4.2 热点来源

Ni、Cr的“区域化热点”主要分布在研究区南部,包括了杏坛与均安两镇。该区域属于西江流域,西江在流经上游富含Ni、Cr等重金属的基性、超基性岩时,携带大量富含Ni、Cr的物质沉积在该区域,Ni、Cr在该区域呈斑块状富集,主要受成土母质的影响^[26-28];此外,Ni、Cr等铁族元素同属第四周期过渡元素,它们的离子半径十分接近,因此在硅酸盐矿物中发生同晶置换时的性质相似^[29],这是Ni、Cr的“区域化热点”共同分布在南部的的主要原因。

Ni、Cr的“个别热点”主要分布在北部,包括了乐从和陈村等镇。乐从位于研究区西北部,该镇有数百家印刷、家具及陶瓷制造等企业,镍的化合物常用于陶瓷工业,铬的诸多化合物被应用于制革、纺织品生产、印染等工厂中。陈村位于研究区的东北部,该镇主要分布一些锻造厂、五金厂和机械厂等,镍钢和不锈钢含有大量的镍,金属加工企业的废水中含铬也最多,Ni、Cr的“个别热点”主要由上述工厂排放

的“三废”所致。

通过以上分析发现:土壤中Ni、Cr的“区域化热点”主要分布在原发性肝癌死亡率最高的区域-杏坛镇,这可能为排查原发性肝癌的环境致病因子提供一种思路,而且,两者区域分布的一致性还是必然,需要进一步求证。

3 结论

(1) 珠江三角洲肝癌高发区蔬菜土壤的Ni有一定程度的积累,Cr的积累不明显。Ni、Cr的平均含量为33.21 mg/kg、80.84 mg/kg,比其相应的广东省土壤背景值分别高出130%、60%。

(2) 基于6 000 m作为距离尺度的局部Moran's I对Ni、Cr的空间热点进行鉴定,区分其空间集聚与空间离散。Ni、Cr的热点分布规律相似,热点主要分布在研究区南部和北部,冰点主要分布在北部,经统计检验大约一半的样点在0.05显著水平无统计学意义。其空间集聚与空间离散是伴随出现的,高-高值空间集聚伴随低-高值空间离散分布,低-低值空间集聚伴随高-低值空间离散分布。

(3) Ni、Cr的“个别热点”分布在研究区北部,主要受人为因素影响,“区域化热点”分布在研究区南部,主要受成土母质控制。研究区原发性肝癌死亡率最高的区域与Ni、Cr的“区域化热点”重叠,两者区域上分布的一致性有可能为排查其环境致病因子

提供一种思路。

参考文献:

- [1] WHO. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, overall evaluation of carcinogenicity: an updating of IARC monographs[R]. Lyon: IARC, 1987.
- [2] 杨定清,傅绍清,青长乐. 镍的作物效应及临界值研究[J]. 四川环境,1994,13(1):19-23.
- [3] Nieboer E, Nriagu J Q. Nickel and human health: current perspectives[M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1992.
- [4] Pohl H R, McClure P R, Fay M. Public health assessment of hexachlorobenzene[J]. Chemosphere, 2001, 43: 903-908.
- [5] Brahushi F, Ulrike D E, Schroll R. Stimulation of reductive dechlorination of hexachlorobenzene in soil by inducing the native microbial activity[J]. Chemosphere, 2004, 55(11): 1477-1484.
- [6] Zhang C S, Tang Y, Luo L, *et al.* Outlier identification and visualization for Pb concentration in urban soils and its implications for identification of potential contaminated land[J]. Environ Pollut 2009, 157(11): 3083-3090.
- [7] Zhang C S, Luo L, Xu W L, *et al.* Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland[J]. Sci Total Environ, 2008, 398(1-3): 212-221.
- [8] McGrath D, Zhang C S. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland [J]. Appl Geochem, 2003, 18(10): 1629-1639.
- [9] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods[J]. Geoderma, 2004, 119(3-4): 261-275.
- [10] Brody S D, Highfield W E, Thornton S. Planning at the urban fringe: an examination of the factors influencing nonconforming development patterns in southern Florida [J]. Environ Plann B: Plann Des, 2006, 33: 75-96.
- [11] McLaughlin C C, Boscoe F P. Effects of randomization methods on statistical inference in disease cluster detection [J]. Health Place, 2007, 13(1):152-163.
- [12] Goovaerts P, Jacquez G M. Accounting for regional background and population size in the detection of spatial clusters and outliers using geostatistical filtering and spatial neutral models: the case of lung cancer in Long Island, New York [J]. Int J Health Geogr, 2004, 3: 14.
- [13] 顺德区卫生局. 顺德区 1970-1979 恶性肿瘤死亡回顾调查报告[R]. 1981.
- [14] 窦磊. 珠江三角洲典型肝癌高发区生态地球化学环境特征与人群健康关系研究——兼论原发性肝癌致病的可能环境地球化学因素[D]. 广州:中山大学,2008.
- [15] 曾水泉,廖洪涛. 珠江三角洲基塘系统物质循环与原发性肝癌[M]. 北京:中国环境科学出版社,1991.
- [16] 黎丹戎,刘宗河,张振权,等. 肝癌高发区居民饮用水质与肝癌病因研究[J]. 中华预防医学杂志,1994,28(1):24-26.
- [17] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社,2005.492-493.
- [18] DD2005-02,生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S].
- [19] 蔡立梅,马瑾,周永章,等. 珠江三角洲典型区农业土壤镍的空间结构及分布特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008,47(4):100-104.
- [20] Anselin L. Local indicators of spatial association -LISA [J]. Geogr Anal, 1995, 27: 93-115.
- [21] Getis A, Ord J K. Local spatial statistics: an overview[A]. In: Longley P, Batty M. (eds): Spatial Analysis: Modelling in a GIS environment [C]. GeoInformation International, Cambridge, England, 1996. 261-277.
- [22] Levine N. CrimeStat III: a spatial statistics program for the analysis of crime incident locations. Ned Levine & Associates, Houston, TX and the National Institute of Justice [R]. Washington, D C, 2004.
- [23] GB 15618-1995,土壤环境质量标准[S].
- [24] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [25] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58(5):1501-1511.
- [26] 王铁宇,罗维,吕永龙,等. 官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J]. 环境科学,2007,28(2):225-231.
- [27] 郑袁明,陈煌,陈同斌,等. 北京市土壤中 Cr、Ni 含量的空间结构与分布特征[J]. 第四纪研究,2003,23(4):436-445.
- [28] 杨国义,罗薇,张天彬,等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征[J]. 生态环境,2007,16(3):818-821.
- [29] Krauskopf K B. Int Geochem[M]. New York: Mc GrawHill, 1979.