

珠江三角洲典型区农业土壤镍的空间结构及分布特征*

蔡立梅, 马 瑾, 周永章, 黄兰椿, 窦 磊, 张澄博
(中山大学地球科学系//地球环境与地球资源研究中心, 广东广州 510275)

摘 要: 通过对东莞市 118 处农业表层土壤和 5 处典型土壤纵剖面的取样调查, 利用常规统计学和地统计学方法研究了土壤中镍的空间结构和分布特征。结果显示, 东莞市农业土壤镍含量为 $2.29 \sim 58.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $21.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于广东省土壤背景值; 镍的空间结构表现为明显的几何各向异性, 各向异性比约为 1.7, 长、短轴分别在 118° 和 28° 方向; 指数模型对于实验变异函数的拟合效果较好, 变异函数表现出明显的块金效应, 块金值在基台值中所占的比例约为 40%, 表明东莞市农业土壤中镍具有较强的空间相关性; 镍的空间分布具有明显西部高、东部低的地域特征, 其空间分布主要受成土母质和地形的控制, 镍主要来源于成土母质, 另外人为活动对镍的空间分布也有显著的影响。

关键词: 农业土壤; 重金属污染; 镍; 地统计学; 东莞市

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 04-0100-05

镍既是某些高等植物的必需营养元素, 但是在过量情况下, 它也是一种有毒化学物质^[1]。研究指出^[2-5], 土壤中镍的浓度和空间变化主要受成土母质的影响, 而农业土壤中的镍, 除了来源土壤母质外, 还来自大气降尘、工业废水、城市污泥、污泥和施用磷肥等, 明显受到人类活动的影响。

土壤镍含量空间分布规律的研究对于准确评价土壤镍污染状况, 揭示土壤镍的来源, 有着极其重要的作用。地统计学是研究土壤污染物空间分布规律的有效工具。近年来, 地统计学在土壤污染评价和空间分布规律的研究等方面得到日益广泛的应用^[5-11]。

本文以地统计学和 GIS 技术相结合为手段, 对东莞市农业土壤中镍含量的结构特征和空间分布规律进行了系统的研究, 并分析了典型土壤纵剖面中镍的垂直分布规律, 通过研究初步揭示了东莞市农业土壤中镍的污染状况、空间分布特征及来源, 为进一步的农业土壤环境质量评价奠定基础。

1 研究区概况

东莞市地处珠江三角洲东部, 位于广州和深圳两大都市之间, 其地貌由网河平原和低山丘陵构成, 两种截然不同的地貌和地理条件使东莞市分异演化出 3 类明显不同的地域 (图 1): 西北部为东

江三角洲河网平原区, 水资源丰富, 主要成土母质为东江河流沉积物。其中位于三角洲上游东段的石排镇、横沥镇、企石镇和桥头镇作为东深供水工程和东莞运河水源区, 自 1991 年以来环境受到严格保护, 此区称为水乡上游保护区 (I 区)。其它 11 个镇总面积 549.7 km^2 , 该地域过境水资源丰富, 乡镇企业密集, 可称之为西部平原区 (II 区)。东南部为低山丘陵地区 (IV 区), 包括 9 个镇, 总面积 $1\,018.6 \text{ km}^2$, 成土母质主要为花岗岩、砂页岩; 中部为山区与水乡的过渡地带, 称为中部过渡地带

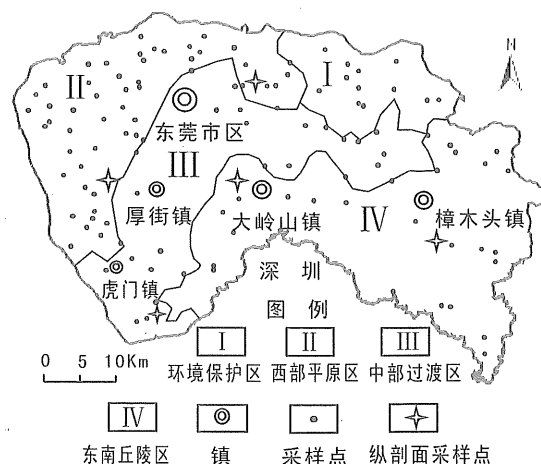


图 1 研究区分区及采样点分布图

Fig. 1 Zones and sample sites of studied area

* 收稿日期: 2008-01-22

基金项目: 国土资源部农业地质与生态地球化学调查资助项目 (121201511216); 国家教育部 985 工程 GIS 与遥感的地质应用科技创新平台; 广东省科技计划资助项目 (2006B70103005)

作者简介: 蔡立梅 (1980 年生), 男, 博士生; 通讯联系人: 周永章; E-mail: zhouyz@mail.sysu.edu.cn

(Ⅲ区),包括常平镇、厚街镇和虎门镇等8个镇(区),面积693.5 km²,成土母质为三角洲近代沉积物和花岗岩、红色砂页岩^[12]。

20世纪80年代以来,东莞市凭借区位优势,迅速实现了由农业社会向工业社会的转变。据统计,2006年东莞市工业企业超过2.1万家,机动车辆超过110万台^[13]。在快速工业化的同时,当地环境遭受了一定程度的污染,尤其是农业土壤的重金属污染。

2 材料与方法

2.1 样品采集

根据工业布局、“三废”排放状况、土壤类型和农业生产布局进行布点(图1),共采集农地表层土壤样(0~20 cm)118个,表土采用多点采样方式(10~15个点),等量混合后取1kg混合样。选取5个有代表性的剖面(图1)研究镍在纵向土层中的分布特征,采样深度分别为0~5、5~20、20~40、40~100。样点采用GPS定位,记录经纬度坐标。

2.2 样品处理与测试

土壤样品自然风干,剔除样品中的植物根系、有机残渣以及可见侵入体,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨,分别过20目和100目尼龙筛。土壤镍含量采用原子吸收光谱法(AAS Vario 6, Analytic Jena, 德国)测定^[14]。分析过程中所用的试剂均为优级纯,所用的水均为超纯水(亚沸水)。分析过程中分别加入国家标准物质样品GSS-16作为未知样品的测定以进行分析质量控制,其结果符合质控要求。

土壤样品pH采用电位法(水:土=2.5:1)测定,测试结果pH含量范围为3.69~7.73,平均值为5.89,可见东莞市农业土壤偏酸性。

2.3 数据处理

常规数理统计分析采用SPSS 13.0软件完成。地统计分析采用Surfer 8.0软件拟合半变异函数、确定拟合模型及其参数。在ArcGIS 9.1中应用普通Kriging插值模块,输入拟合参数,建立研究区镍元素的空间分布图。

3 结果与讨论

3.1 镍含量的统计性描述

东莞市土壤样品镍含量变化范围2.29~58.00 mg·kg⁻¹,由于数据符合正态分布(图2),可用算术平均值表示其平均值,其均值为21.22 mg·kg⁻¹,远高于广东省土壤背景值17.80 mg·

kg⁻¹^[15],其中,7个样品镍含量超过国家二级标准环境质量限定值40 mg·kg⁻¹(pH<6.50)^[16],超标率约为6%,说明东莞市农业土壤存在一定的镍污染问题。镍含量的变异系数为54.80%,变异程度中等。

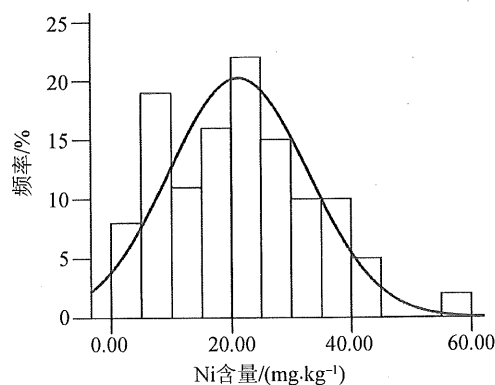


图2 东莞市农业土壤镍含量频率分布图

Fig. 2 Histogram of of Ni contents in soils

3.2 镍含量的结构特征分析

对原始数据采用直方图法、域法(均值±3倍标准差)和地球化学分析相结合的方法剔除异常值^[17],得到有效数据118个,进行空间结构的分析。数据的非正态分布会使变异函数产生比例效应,比例效应的存在会使实验变异函数产生畸变,抬高基台值和块金值,增大估计误差,变异函数点的波动大,甚至会掩盖其固有的结构,因此应该消除比例效应^[18]。由于镍含量数据服从正态分布,上述数据可直接参加计算。计算过程分成距离组和角度组,模型拟合参数检验用F分布检验完成。

研究计算了土壤中镍含量的实验半变异函数,并根据其特点进行了理论模型的拟合,拟合原则见参考文献^[18]。理论变异函数采用“指数模型”进行拟合。从拟合结果可以看出(图3),理论变异函数对于实验变异函数的拟合效果较好,其决定系数 $R^2=0.75$, R^2 的F检验达到显著($P<0.01$)。元素镍具有很好的可迁性特点,反映为东莞市农业土壤中镍含量具有很好的空间结构性;镍含量半变异函数表现出明显的块金效应,块金值 C_0 约为45,块金值在基台值(C_0+C_1)中所占的比例约为40%,这部分变异通常解释为随机效应。 $C_0/(C_0+C_1)$ 的比值可以揭示区域化变量的空间相关程度,比值小于25%表明空间相关性很强,大于75%表明空间相关性较弱^[18]。因此东莞市农业土壤中镍含量具有较强的空间相关性。元素实验变异函数拟合所得的变程约为19.2 km,表明土壤中镍含量的相关性可达19.2 km左右。实验变异函数

到 22 km 左右达到最大值,表明土壤镍在 22 km 左右相关性最差,大于 22 km 以后反而又有所增强。

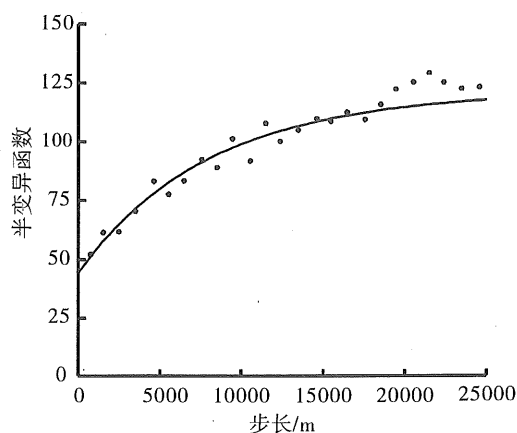


图3 东莞市农业土壤镍含量的半变异函数图

Fig. 3 Experimental and theoretical semivariograms of Ni contents in agricultural soils of Dongguan

区域化变量在不同方向上表现出不同的空间结构称为各向异性^[18]。在本研究中,为了比较元素在不同方向上的变异程度,分别计算了镍在多个方向上的半变异函数,最后选出变化差别最大方向上的半变异函数进行比较,分别为 28° (以正东为 0°, 正北为 90° 方向) 和 118°, 容限角度设置为 22.5°。由图 4 可看出,土壤镍的空间结构特征表现为明显的各向异性,长轴在 118° 方向,即空间变异尺度较大的方向;短轴在 28° 方向,即空间变异尺度较小的方向。两方向上的基台值基本一致,而变程明显不同,各向异性表现为几何各向异性,各向异性比约为 1.7。另外,两方向上块金值对基台值所占的比例均较小,说明两方向上的空间自相关性都较强。

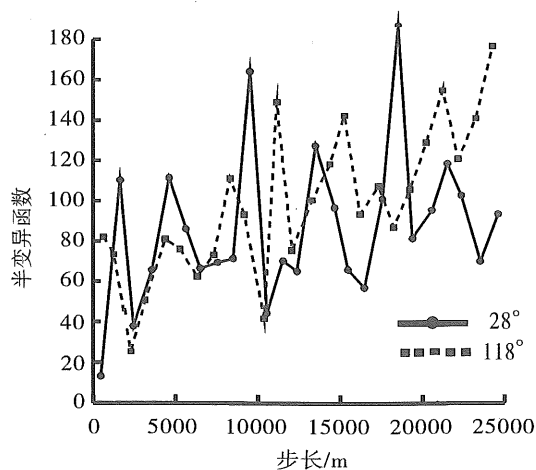


图4 土壤镍含量的半变异函数各向异性图

Fig. 4 Anisotropy of semivariograms of Ni contents in agricultural soils of Dongguan

3.3 镍的空间分布特征及成因分析

对空间变量连续插值可更直观地查看其空间分布特征。由于镍含量数据符合正态分布,可直接对其进行普通 Kriging 插值。根据空间结构分析所得的变异函数模型进行普通 Kriging 插值得到土壤镍含量的空间分布图(图 5)。

可以看出,东莞市土壤镍含量的空间分布具有明显的地域特征:西部高,东部低,且高含量地区相对比较集中。根据地理位置分析,镍高值区主要集中在西部平原区的麻涌、洪梅和沙田等镇,及中部过渡区的虎门镇。而低值区则主要分布在中南部的大岭山林场、樟木头林场、东部的清溪林场及东南部凤岗、清溪和塘厦等镇。

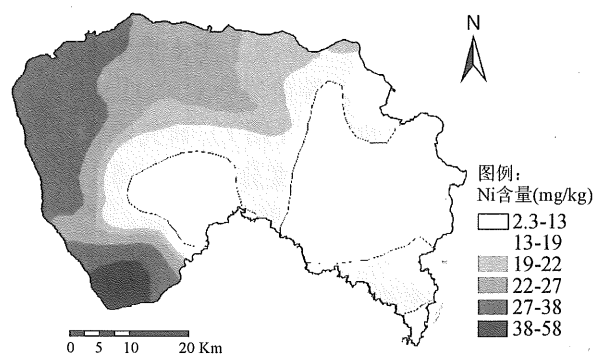


图5 东莞市农业土壤中镍的空间分布图

Fig. 5 Contour of Ni contents in agricultural soils of Dongguan

根据分析,镍含量空间分布主要受成土母质和地形的控制。镍高值区主要分布在成土母质为东江河流沉积物和海相沉积物的地区。西部平原区的麻涌、洪梅和沙田等镇及附近成土母质主要为东江河流沉积物,中部过渡区的虎门镇成土母质主要为海相沉积物^[12];并且上述地区地势较低,镍元素容易在这些低洼的地区沉积下来。尤其是虎门镇附近,镍含量为东莞市最高,主要受成土母质海相沉积物的控制,与杨国义等人的研究结论一致^[19]。中南部的大岭山林场、樟木头林场,成土母质主要为花岗岩风化物,东部的清溪林场及东南部凤岗、清溪等镇,成土母质主要为酸性火山岩风化物和砂页岩风化物^[12],上述母质镍含量相对较低;且上述地区地势较高,不利于镍元素在当地富集。根据其他人的研究^[1,4-5,9],镍的空间结构和分布主要受成土母质和地形等结构性因素的控制,这些都与本研究结论相符。

另一方面,人为活动对东莞市农业土壤镍含量的空间分布也有显著的影响。镍高值区主要集中在西部平原区,该区由于水源充足、交通方便,因此

吸引了大量能源消耗大、污染程度大的企业。如西北部镍高值区的麻涌和道窖等镇主要集中了东莞市的化工、电镀、纺织和造纸等高污染的工业企业。西南部镍高值区的虎门镇,工业企业密集,其中电镀厂就有50多家^[13]。上述工业企业,尤其是电镀厂,排出的废气、废水含镍量很高,通过污灌以及大气沉降,都会导致当地农田的镍污染。此外,含镍化肥的使用也是当地农田中镍的主要来源之一。镍含量低值区主要集中在人为活动较少的林场和经济开发相对较晚的一些地区,如东南部的凤岗、清溪等镇,由于经济开发较晚,人类活动强度相对较低,镍的积累较少。

3.4 镍在土壤剖面中的纵向分布特征

一般外源重金属污染主要在土壤表层富集,对深层土壤影响较小,这是重金属在土壤中的表聚性。本次分别在东莞市东南西北中的樟木头、虎门、沙田、茶山和大岭山等五个镇采集典型土壤纵剖面进行研究。

从图6可看出,总体上,在5个土壤纵剖面中镍均有一定的表聚。虎门五区剖面镍主要表聚在0~5 cm的土壤中,茶山京山剖面镍主要表聚在20~40 cm的土壤中,大岭山大塘朗剖面镍主要表聚在5~40 cm的土壤中,樟木头龙村剖面镍从0~40 cm都有一定的富集,沙田先锋剖面在0~5 cm表现为淋滤,在20~40 cm有微弱的富集。总体上,表聚现象比较微弱,说明土壤中镍主要来源于成土母质,另外,也有一定的人为输入,这与前面的结论一致。来自母质为东江河流沉积物的沙田先锋、茶山京山两个剖面,以及母质为海相沉积物的虎门五区剖面深层土壤均表现出很高的镍含量,反映了这两种土壤母质的镍含量非常高。

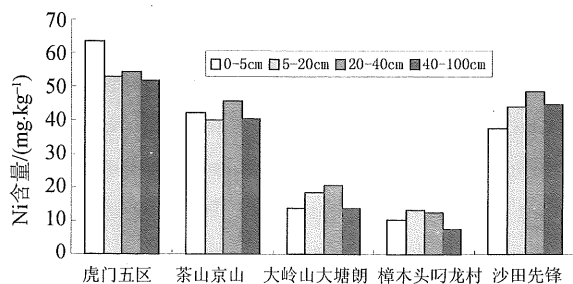


图6 不同土壤纵剖面中镍含量的分布

Fig. 6 Vertical distribution of Ni content in different soil sections

4 结 论

(1) 东莞市农业土壤镍含量变化范围 2.29 ~

58.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 21.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于广东省土壤背景值, 其中有 7 个样品镍含量超过国家二级标准限定值, 超标率约为 6%, 应引起重视。镍含量的变异系数为 54.80%, 变异程度中等。

(2) 结构分析表明, 东莞市农业土壤镍含量的空间各向异性表现为几何各向异性, 各向异性比约为 1.7, 长、短轴分别在 118° 和 28° 方向。指数模型对于实验变异函数的拟合效果较好, 半变异函数表现出明显的块金效应, 块金值在基台值中所占的比例约为 40%, 表明东莞市农业土壤中镍含量具有较强的空间相关性。拟合所得的变程为 19.2 km, 表明东莞市农业土壤中镍含量的相关性可达 19.2 km 左右。

(3) 东莞市农业土壤镍含量的空间分布具有明显的地域特征: 西部高, 东部低, 且高含量地区相对比较集中。镍含量空间分布主要受成土母质和地形的控制。另一方面, 人为活动对镍含量的空间分布也有显著的影响。

(4) 东莞市农业土壤纵剖面特征表明镍主要来源于成土母质, 另外, 也有一定的人为输入。

参考文献:

- [1] MARTIN J A R, ARIAS M L, CORBI J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 1001-1021.
 - [2] NICHOLSON F A, SMITH S R, ALLOWAY B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 311(1/3): 205-219.
 - [3] MAPANDA F, MANGWAYANA E N, NYAMANGARA J, et al. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107(2-3): 151-165.
 - [4] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114: 313-324.
 - [5] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征 [J]. *地理学报*, 2003, 58(3): 470-476.
- ZHENG Yuanming, CHEN Tongbin, CHEN Huang, et al. The Spatial Structure and Distribution of Ni Contents in Soils of Suburbs of Beijing [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 58(3): 470-476.

- [6] WEBSTER R, HEUVELINK G B M. Modeling soil variation: past, present, and future[J]. *Geoderma*, 2001, 100: 269–301.
- [7] GOOVAERTS P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89: 1–45.
- [8] LIU X, WU J, XU J. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 257–264.
- [9] 王学军, 李本纲. 土壤微量金属含量的空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] MCGRATH D, ZHANG C, CARTIN O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127: 239–48.
- [11] EDUARDO F S. Hazard assessment on arsenic and lead in soils of Castromil gold mining area, Portugal[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(6): 887–898.
- [12] 陆发熹. 珠江三角洲土壤[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [13] 东莞市统计局. 东莞市统计年鉴(2006)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006: 68.
- [14] 刘凤枝. 农业环境监测使用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [15] 广东省环境监测中心站. 广东省土壤环境背景值数据集[R], 1990.
- [16] GB15618–1995, 土壤环境质量标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [17] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究[J]. *地理学报*, 1997, 52(2): 184–192.
ZHANG Chaosheng, ZHANG Shen, HE Jianbang. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 52(2): 184–192.
- [18] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [19] 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.
YANG Guoyi, LUO Wei, ZHANG Tianbin, et al. The distribution of Ni contents in agricultural soils in the Pearl River Delta, China [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 818–821.

Spatial Structure and Distribution of Ni Contents in Agricultural Soils in a Typical Area of the Pearl River Delta, China

CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, HUANG Lan-chun, DOU Lei, ZHANG Cheng-bo

(Department of Earth Science // Center for Earth Environment and Resources,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Spatial variations and distribution of Ni contents in agricultural soils of Dongguan city, Guangdong Province are studied using geostatistical and geographic information system (GIS) techniques. 118 surface samples and 5 vertical sections of agricultural soil were collected from Dongguan city. Spatial structure is described with Variogram. Well-defined structure with nonzero nugget effect, distinct sill and range can be fitted with exponential model ($R^2 = 0.75$, $P < 0.01$), which is mainly influenced by soil parent materials and landform, with the relative range of 19.2 km. Variogram analysis shows that spatial structure of Ni contents is in obvious geometric anisotropy with a ratio of 1.7, and the major axis in the 118° direction and the short axis in the 28° direction. Ni contents of agricultural soils are high in west and low in east. The spatial distribution of Ni contents is mainly controlled by soil parent materials, landform, and anthropogenic factors.

Key words: agricultural soil; heavy metal pollution; nickel; geostatistics; Dongguan in the Peral River Delta