

东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析

蔡立梅^{1,2,3}, 马瑾^{1,2}, 周永章^{1,2*}, 黄兰椿^{1,2}, 窦磊^{1,2}, 张澄博^{1,2}, 付善明^{1,2}

(1. 中山大学地球科学系, 广州 510275; 2. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广州 510275; 3. 广东省地质调查院, 广州 510800)

摘要: 对东莞市农业土壤进行了系统采样分析, 测定了表层土壤中 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 的含量。利用 GIS 技术和多元地统计结合的方法, 研究了上述 8 种重金属元素的空间分布特征和来源。结果表明, Cu、Zn、Ni、Pb、Cd 和 Hg 的含量均超过广东省土壤背景值, 尤其是 Hg、Cd 和 Pb 含量分别达到 0.24、0.12 和 65.38 mg/kg, 远高于背景值, 说明随着东莞市快速工业化, 土壤中重金属呈明显积聚的趋势。上述 8 种元素可以由 3 个主因子反映。因子 1 为“自然源因子”, 主要包括元素 Cu、Zn、Ni、Cr 和 As, 其高值区主要分布在研究区西部, 主要受河流冲积物海相沉积物控制, 低值区的空间分布受酸性火山喷出岩风化物和花岗岩风化物影响, 因子 1 的空间分布主要受成土母质控制。因子 2 为“工业及交通源因子”, 主要包括元素 Pb 和 Hg, 高值区主要分布在中部过渡区和西部平原区, 高值区中心集中在中部过渡区的虎门镇和西部平原区的茶山镇, 主要由该区工业污染所致。因子 3 为“工农业活动因子”, 主要包括 Cd 元素, 其空间变异完全受人为随机因素控制。

关键词: 农业土壤; 重金属; 多元地统计; 空间分布; 来源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)12-3496-07

Multivariate Geostatistics and GIS-based Approach to Study the Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Agricultural Soil in the Pearl River Delta, China

CAI Li-mei^{1,2,3}, MA Jin^{1,2}, ZHOU Yong-zhang^{1,2}, HUANG Lan-chun^{1,2}, DOU Lei^{1,2}, ZHANG Cheng-bo^{1,2}, FU Shanning^{1,2}

(1. Department of Earth Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Center for Earth Environment and Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Geological Investigation Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510800, China)

Abstract: One hundred and eighteen surface soil samples were collected from the Dongguan City, and analyzed for concentration of Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, Cd, As, Hg, pH and OM. The spatial distribution and sources of soil heavy metals were studied using multivariate geostatistical methods and GIS technique. The results indicated concentrations of Cu, Zn, Ni, Pb, Cd and Hg were beyond the soil background content in Guangdong province, and especially concentrations of Pb, Cd and Hg were greatly beyond the content. The results of factor analysis group Cu, Zn, Ni, Cr and As in Factor 1, Pb and Hg in Factor 2 and Cd in Factor 3. The spatial maps based on geostatistical analysis show definite association of Factor 1 with the soil parent material, Factor 2 was mainly affected by industries. The spatial distribution of Factor 3 was attributed to anthropogenic influence.

Key words: agricultural soil; heavy metal; multivariate geostatistics; spatial distribution; source

随着工业化和城市化进程的不断加快、城市人口不断增加, 城市土壤环境和人群健康质量问题越来越突出。重金属在土壤中的积累, 不仅直接影响土壤理化性状、降低土壤生物活性、阻碍养分有效供给, 而且通过食物链数十倍富集, 通过多种途径直接或间接地威胁人类健康^[1]。珠江三角洲是我国经济最发达的区域之一, 高强度人类活动下土壤的环境质量已成为急需研究的课题^[2]。

近年来, 大量的工作利用多元统计和地统计相结合的方法来研究环境中污染物的来源、分布、归趋等问题^[3~5]。多元统计分析和地统计分析在土壤重金属污染的分析和评价方面有以下的应用: 通过因子分析简化数据, 用综合指标代替一类相关性较高的数据, 从而反映原始数据的大部分信息, 并揭示数

据之间的关联^[6~8]; 地统计方法被广泛地应用于环境调查和污染物的空间分析, 用来预测未采样点的土壤属性, 并通过地理信息系统软件制作相应的图件来直观表达污染的程度^[9~11]。

20世纪80年代以来, 东莞市凭借其地处珠江三角洲“黄金地段”的区位优势, 迅速实现了由农业社会向工业社会的转变, 据统计, 2006年东莞市生产总值超过2100亿元, 在广东省所有地级市中位于第4名, 工业企业超过21000家, 机动车辆超过110

收稿日期: 2007-11-06; 修订日期: 2007-12-29

基金项目: 国土资源部调查项目(121201511216); 广东省科技计划项目(2006B70103005)

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

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

万^[12].在快速工业化过程的同时,也给当地环境造成一定污染压力,尤其是重金属污染.本研究以多元统计和地统计方法相结合为手段,对东莞市农地土壤重金属的空间分布特征和来源进行了系统地分析,旨在为该区农业土壤污染综合防治提供参考,并为快速工业化、城市化地区土壤资源的持续利用和合理管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东莞市地处珠江三角洲东部,位于广、深两大都市之间,其地貌由网河平原和低山丘陵构成,2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),总面积213.0 km²,占全市面积的8.6%.其它11个镇总面积549.7 km²,占全市总面积的22.2%,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),水资源短缺,包括9个镇,总面积1018.6 km²,占全市面积的41.2%,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(III区),包括常平镇、厚街镇和虎门镇等8个镇(区),面积693.5 km²,占全市面积的28.0%,成土母质为三角洲近代沉积物和花岗岩、红色砂页岩^[13].

1.2 样品采集

根据工业布局、“三废”排放状况、灌溉水类型以及农地面积进行布点(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1 kg混合样.

1.3 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,过100目尼龙筛.所有处理样品经标准方法进行消化处理后,Hg总量采用冷原子吸收法测定,As总量采用DDCAg分光光度法测定,其它元素采用原子吸收分光光度法测定.样品测试在广东省生态环境与土壤研究所分析测试中心完成,分析过程中所用的试剂均为优级纯.土壤样品分析过程中加入国家标准物质样品GSS-1作为未知样品的测定以进行分析质量控制,同时进行空白和试剂的实验^[14].

土壤样品基本性质的测定采用常规方法:pH采用电位法(水:土=2.5:1),有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,测试结果见表1.可见土壤偏酸性,有机质含量处于中等偏下水平.

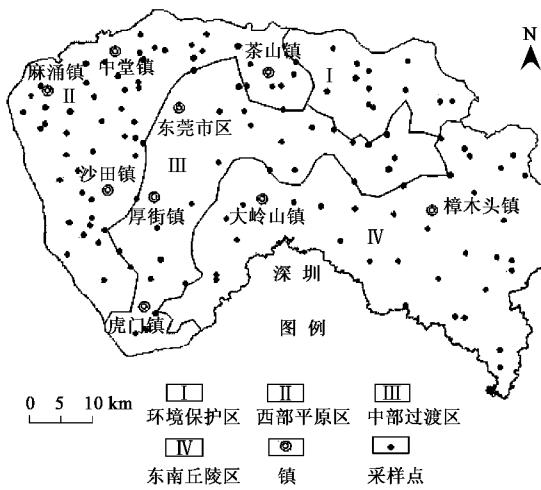


图1 研究区分区及采样点分布

Fig.1 Zones and sample sites of studied area

表1 东莞市农业土壤基本性质

Table 1 Basic properties of agricultural soils in Dongguan City

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布类型
pH	3.69	7.73	5.89	0.84	14.26	0.22	-0.28	正态
SOM/%	0.79	3.36	1.91	0.54	28.27	0.55	0.22	正态

1.4 数据处理

常规数理统计分析采用SPSS13.0软件完成,地统计分析采用R软件拟合半变异函数、建立拟合模型.在ArcGIS9.1中应用Kriging插值模块,输入拟合参数,建立空间分布图.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属的统计性描述

土壤样品重金属元素含量的描述性统计见表2.可看出,Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、As和Hg的平均值

分别为 21.82、66.15、20.52、43.01、65.38、0.12、12.76 和 0.24 mg/kg, 均没有超过国家二级标准中的土壤环境质量限定值^[15](表 3), 但有部分样品的 Cu、Ni、Cd 和 Hg 含量超过了限定值, 尤其是 Hg 含量最高值已达到 1.01 mg/kg, 远高于限定值 0.3 mg/kg, 30% 土壤样品 Hg 含量超过了二级标准, 应引起重

视。除 Cr 和 As 外, 其余元素总量平均值都超过广东省土壤背景值^[16], 尤其是 Hg、Cd、Pb 平均含量分别达到 0.24、0.12 和 65.38 mg/kg, 远高于背景值, 说明随着东莞市快速工业化, 土壤中重金属呈明显积聚的趋势。从变异系数看, Cd 和 Hg 的变异系数相对较大, 其余元素变异程度中等。

表 2 东莞市农业土壤重金属元素的统计性描述

Table 2 Descriptive statistics of the heavy metals of agricultural soils in Dongguan City

元素	样品数	平均值 /mg•kg ⁻¹	中值 /mg•kg ⁻¹	标准差	变异系数 /%	最小值 /mg•kg ⁻¹	最大值 /mg•kg ⁻¹	峰值	偏度	分布类型
Cu	118	21.82	20.62	10.67	48.90	5.08	65.10	4.27	1.56	对数正态
Zn	118	66.15	63.15	33.80	51.10	8.43	169.50	-0.32	0.35	正态
Ni	118	20.52	20.73	11.10	54.09	2.29	57.46	-0.14	0.39	正态
Cr	118	43.01	42.51	20.00	46.51	2.28	86.59	-0.51	-0.04	正态
Pb	118	65.38	58.50	24.44	37.38	20.36	137.20	0.44	0.86	正态
Cd	118	0.12	0.12	0.08	66.67	0.02	0.67	22.76	3.67	对数正态
As	118	12.76	13.00	6.82	53.45	0.40	28.87	-0.51	0.29	正态
Hg	118	0.24	0.21	0.17	70.83	0.01	1.01	4.30	1.70	对数正态

表 3 土壤重金属评价标准

Table 3 Evaluated standards of heavy metal concentrations in soil environment

标准	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	As	Hg
国家二级标准(pH<6.5)	50	200	40	150	250	0.3	40	0.3
广东省土壤背景值	17.65	49.71	17.8	56.53	35.87	0.094	13.52	0.085

2.2 土壤重金属的相关分析

表 4 计算了土壤 pH、有机质和土壤重金属元素间的相关系数, 从表 4 可以看出, Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、As、Hg 与有机质有较好的相关性, 表明这些元素可能来源于成土母质。Cu 与 Zn、Ni、Cr、As, Zn 与 Ni、

Cr、As、Ni 与 Cr、Pb、As, Cr 与 Pb, Pb 与 Hg 之间存在显著正相关。由此可初步推断, Cu、Zn、Ni、Cr 和 As 等 5 种元素可能同一来源, 元素 Pb 与 Hg 同一来源, 上述 7 种元素的来源与成土母质可能有关, 而 Cd 元素为其它来源。

表 4 东莞市农业土壤土壤 pH、有机质和土壤重金属元素间相关系数¹⁾

Table 4 Correlations matrix for the heavy metals, pH and SOM in the agricultural soils

	pH	SOM	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	As	Hg
pH	1									
SOM	-0.384**	1								
Cu	-0.206*	0.259*	1							
Zn	-0.230*	0.521***	0.477**	1						
Ni	-0.456**	0.464**	0.438**	0.582**	1					
Cr	-0.409**	0.520**	0.483**	0.723**	0.776**	1				
Pb	-0.138	0.443**	0.186	0.266**	0.457**	0.365**	1			
Cd	0.209*	0.090	0.125	0.238**	0.059	0.138	0.014	1		
As	-0.494**	0.399**	0.527**	0.557**	0.752**	0.663**	0.142	0.127	1	
Hg	-0.051	0.500**	0.049	0.190*	0.156	0.092	0.419**	0.204*	0.062	1

1) ** 表示 99% 置信区间显著, * 表示 95% 置信区间显著

2.3 土壤重金属的因子分析

因子分析方法可用来判别土壤中重金属来源^[4,17]。对 8 种元素进行因子分析, 提取的 3 个因子解

释了总方差的 75%, 表 5 指示了 8 种元素所属类别。因子 1 主要包括 Cu、Zn、Ni、Cr 和 As 等元素(表 6), 对照讨论结果, 这些元素含量与对应元素背景值相当,

且这组元素与土壤有机质显著相关(表4),一般认为Cr和Ni主要受地球化学成因影响^[17,18].Boruvka等^[19]

在捷克东北部的研究也认为元素Cu、Zn、Ni和Cr主要为地质来源,故将因子1作为“自然源因子”.

表5 因子特征值¹⁾

Table 5 Eigenvalues of factors

主成分	旋转变换前			旋转变换后		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.661	45.761	45.761	3.405	42.568	42.568
2	1.306	16.331	62.092	1.514	18.921	61.489
3	1.046	13.075	75.167	1.094	13.678	75.167
4	0.619	7.733	82.900			
5	0.534	6.670	89.570			
6	0.471	5.884	95.454			
7	0.216	2.695	98.149			
8	0.148	1.851	100.000			

1)因子提取方法为主成分分析法

表6 因子负荷

Table 6 Factors matrixes

重金属	旋转变换前因子			旋转变换后因子		
	1	2	3	1	2	3
Cu	0.660	-0.228	0.112	0.697	-0.033	0.115
Zn	0.809	-0.037	0.165	0.774	0.171	0.233
Ni	0.877	-0.054	-0.219	0.848	0.288	-0.131
Cr	0.885	-0.126	-0.059	0.878	0.180	0.003
Pb	0.485	0.613	-0.421	0.261	0.829	-0.186
Cd	0.230	0.271	0.880	0.118	0.062	0.940
As	0.812	-0.298	0.032	0.864	-0.026	0.036
Hg	0.265	0.834	0.050	-0.025	0.823	0.301

元素Pb和Hg在因子2中占有较大的因子载荷(表6).从Pb和Hg在各区的分布可知,西部平原区、中部过渡区和东南丘陵区Pb污染都较普遍,尤以乡镇企业密集的西部平原区和中部过渡区最为严重,这说明土壤Hg、Pb的来源与该地区的工业有密切关系.在城市土壤中Pb常被作为机动车污染源的标识元素^[6,8],土壤Pb的来源与东莞市的公路网密集以及机动车辆的急剧增加有关.因子2可称为“工业及交通源因子”.

因子3主要包括Cd元素,Cd一般可作为施用农药和化肥等农业活动的标识元素^[20,21].据统计,自1990年以来东莞市共施用化肥超过200万t(实物量)、农药3.5万t^[12],其施用量远高于全国平均用量,我国农药和化肥的利用率普遍较低,约有70%流失到土壤、水和空气中^[22],长期的农业生产活动,使Cd在土壤中明显累积.此外,密集的工业活动也是Cd的重要来源之一,刘庆等^[23]研究浙江省慈溪市农田土壤重金属污染时,亦发现Cd污染为工业“三废”排放.故因子3可称作“工农业活动因子”.

2.4 因子的结构特征和空间分布特征

2.4.1 因子的结构分析

半方差函数在原点处的数值称为块金常数(C_0),它由测定误差和小于最小采样尺度的非连续性变异引起,属于随机变异;基台值($C_0 + C_1$)通常表示系统内的总变异,它是结构性变异和随机性变异之和.块金值 C_0 与基台值($C_0 + C_1$)之比是反映区域化变量空间异质性程度的重要指标,称为块金效应.该比值用于反映空间变异影响因素中区域因素(自然因素)和非区域因素(人为因素)的作用.当 $[C_0/(C_0 + C_1)] < 25\%$ 时,表明变量的空间变异以结构性变异为主,变量具有强烈的空间相关性;当上述比值 $25\% < [C_0/(C_0 + C_1)] < 75\%$ 时,变量为中等程度空间相关; $[C_0/(C_0 + C_1)] > 75\%$ 时,以随机变异为主,变量的空间相关性很弱^[24~27].

利用R软件拟合因子的半方差函数理论模型及其相关参数见表7.根据表7,因子1和因子2的变异函数理论模型分别符合指数模型和高斯模型,块金值/基台值分别为33%和67%,可见,因子1的

表 7 因子的半方差函数理论模型及其相关参数

Table 7 Theoretical semivariogram models of factors and their corresponding parameters

项目	理论模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C_1$)	有效变程(m)	块金值/基台值[$C_0/(C_0 + C_1)$]
因子 1	指数模型	0.250	0.763	5428	0.33
因子 2	高斯模型	0.682	1.019	8372	0.67

空间变异以土壤母质、地形、土壤类型等结构性变异为主,变量具有强烈的空间相关性;而因子 2 的空间变异以随机性变异为主,空间变异主要受人为因素的影响,变量具有中等的空间相关性.从图 2(C)可看出,因子 3 的空间变异完全受人为随机因素的控制,在取样尺度内不具有空间相关性.因子的结构分析也初步验证了因子分类的正确性.

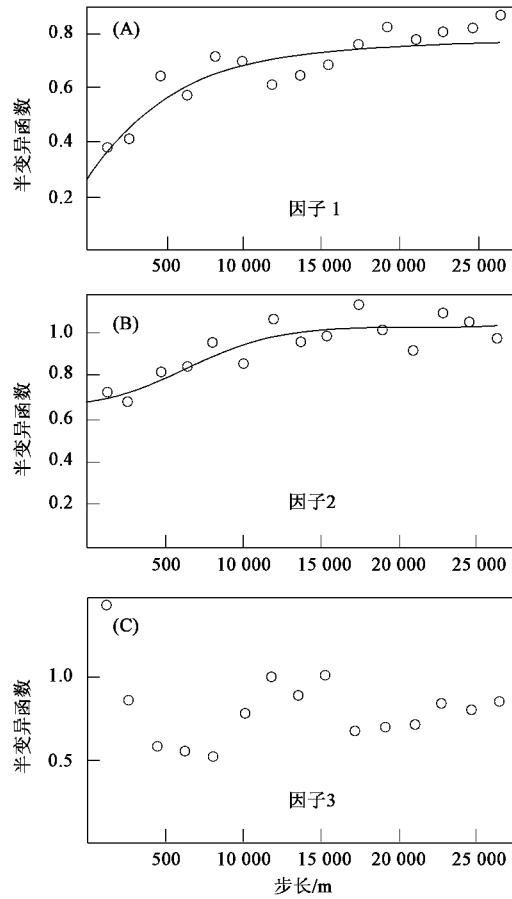


图 2 因子的关变异函数

Fig.2 Semivariogram map of factors

2.4.2 因子的空间分布特征及成因分析

对变量连续插值可更直观地查看其空间分布特征,图 3、4 分别是利用 ArcGIS 地统计模块进行普通 Kriging 插值后,因子的插值结果.

从图 3 可看出,因子 1 的高值区主要分布在研究区的西部,区域上主要属于西部平原区和中部过渡区.对照研究区的成土母质图(图 5)可看出^[28],因

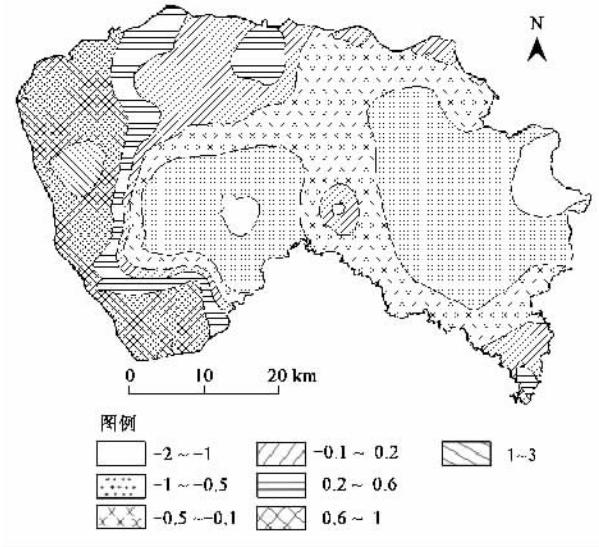


图 3 因子 1 的空间分布

Fig.3 Spacial distributions of factor 1

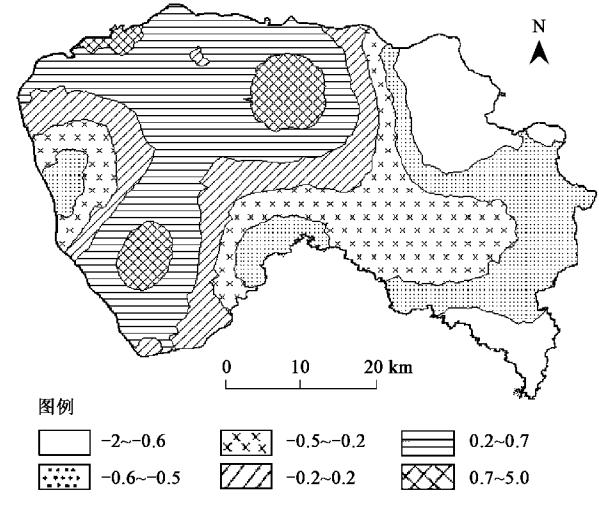


图 4 因子 2 的空间分布

Fig.4 Spacial distributions of factor 2

子 1 高值区与河流冲积物海相沉积物的空间分布十分一致.而低值区的空间分布大致受酸性火山喷出岩风化物和花岗岩风化物所控制.这说明因子 1 的分布主要受成土母质的控制,与前面结构分析的结论一致.

从图 4 可看出,因子 2 的高值区主要分布在中部过渡区和西部平原区,高值区中心集中在中部过

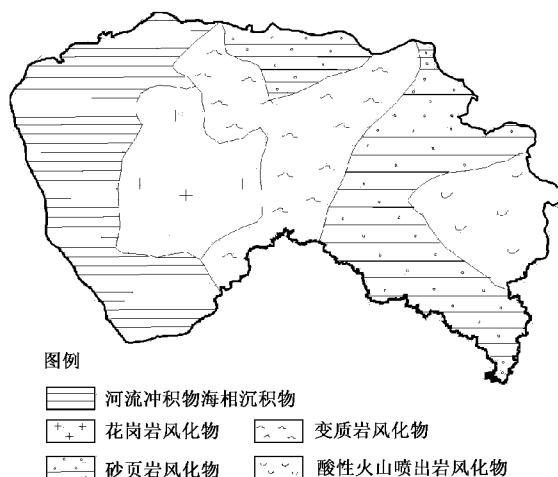


图 5 东莞市土壤母质

Fig.5 Soil parent materials in Dongguan City

渡区的虎门镇和西部平原区的茶山镇,主要是由于该区工业污染所致,西部平原区由于水源充足、交通方便,一些资源消耗大、污染程度大的制造业在改革开放初期开始进入并迅速发展,随着这些重污染产业的不断发展,大量重金属污染物排放到环境中,从而也成为东莞市重金属污染最严重的区域。据统计^[12],2004年底虎门镇共有各种类型企业140多家,其中有50多家电镀厂和3家电厂,茶山镇也分布着东莞市25家重点污染企业,且多是造纸厂和电镀厂。这说明因子2的来源与该地区的工业有密切关系。

土壤中重金属的空间分布特征受到土壤质地、地形、大气沉降和人类活动等多种影响。王学军等^[20]研究了多种尺度的土壤微量元素含量的空间结构,从小尺度的北京东郊污灌区,中尺度的深圳地区到大尺度的内蒙古,其研究认为在中尺度和大尺度的情况下,成土母质成为影响土壤中微量元素空间分布的首要因素。本研究认为在乡镇企业密集的东莞市,成土母质和高强度的人类活动共同控制土壤中重金属元素的空间分布,其中Cu、Zn、Ni、Cr和As等元素的空间分布主要受成土母质的控制,而Pb、Hg和Cd元素则主要受人类活动影响。

3 结论

(1)东莞市农业土壤中Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、As和Hg的平均含量均低于国家二级标准,但有部分样品的Cu、Ni、Cd和Hg含量超过了二级标准,尤其是Hg含量最高值远高于限定值,30%土壤样品Hg含量超过了二级标准,应引起重视。除Cr和As外,

其余元素含量都超过广东省土壤背景值,尤其是Hg、Cd和Pb含量远高于背景值,说明随着东莞市快速工业化,土壤中重金属呈明显积聚的趋势。

(2)东莞市农业土壤中8种重金属元素有着不同的来源。相关分析、因子分析和空间分析表明8种重金属元素可分成3类。因子1为“自然源因子”,主要包括Cu、Zn、Ni、Cr和As等元素。因子2为“工业及交通源因子”,主要包括元素Pb和Hg。因子3为“工农业活动因子”,主要包括Cd元素。

(3)结构分析表明,因子1的空间变异以结构性变异为主,空间变异影响因素主要为自然因素,具有强烈的空间相关性。因子2的空间变异以随机性变异为主,空间变异主要受人为因素的影响,具有中等的空间相关性。因子3的空间变异完全受人为随机因素的控制,在取样尺度内不具有空间相关性。

(4)空间分析表明,因子1的高值区主要分布在研究区的西部,区域上主要属于西部平原区和中部过渡区,主要受河流冲积物海相沉积物控制。低值区的空间分布大致受酸性火山喷出岩风化物和花岗岩风化物控制。因子1的空间分布主要受成土母质控制。因子2的高值区主要分布在中部过渡区和西部平原区,高值区中心集中在中部过渡区的虎门镇和西部平原区的茶山镇,主要由于该区工业污染所致。

- 参考文献:
- [1] Lee C S, Li X, Shi W, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. Science of the Total Environment, 2006, 356(1-3): 45-61.
 - [2] 钟晓兰,周生路,李江涛,等.长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J].土壤学报,2007,44(1):33-40.
 - [3] 李玉,俞志明,宋秀贤.运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J].环境科学,2006,27(1):137-141.
 - [4] Facchinielli 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] Cattle J A, McBratney A B, Minasny B. Kriging method evaluation for assessing the spatial distribution of urban soil lead contamination [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 1576-1588.
 - [6] Loska L, Wiechula D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir [J]. Chemosphere, 2003, 51: 723-733.
 - [7] 陆安祥,王纪华,潘瑜春,等.小尺度农田土壤中重金属的统计分析与空间分布研究[J].环境科学,2007,28(7):1578-1583.
 - [8] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis of road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain)[J]. Environmental Technology, 1996, 17(7):763-770.

- [9] McGrath D, Zhang C, Cartin O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **127**: 239-248.
- [10] Saby N, Arrouays D, Boulonne L, et al. Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**: 212-221.
- [11] 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.
- [12] 东莞市统计局. 东莞市统计年鉴(2005)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005. 68, 89-115.
- [13] 陆发嘉. 珠江三角洲土壤[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 64-68.
- [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] GB 15618-1995. 土壤环境质量标准[S].
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Hanesch M, Scholger R, Dekkers M J. The application of Fuzzy cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for detection of polluted sites [J]. *Physical Chemical Earth Science*, 2001, **26**: 885-891.
- [19] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, **128**: 289-300.
- [20] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, **54**: 267-277.
- [21] Filzek P D B, Spurgeon D J, Broll G, et al. Pedological characterization of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works [J]. *Ecotoxicology* 2004, **13**: 725-737.
- [22] 陈同斌, 曾希柏, 胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异[J]. 地理学报, 2002, **57**(5): 531-538.
- [23] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 浙江省慈溪市农田土壤重金属污染初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 639-644.
- [24] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 52-80.
- [25] 谢正苗, 李静, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb, Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 742-747.
- [26] Webster R, Heuvelink G B M. Modeling soil variation : past, present, and future [J]. *Geoderma*, 2001, **100**: 269-301.
- [27] Goovaerts P. Geostatistics in soil science : state-of-the-art and perspectives [J]. *Geoderma*, 1999, **89**: 1-45.
- [28] 陆发嘉. 珠江三角洲土壤[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 86-87
- [29] 王学军, 李本纲, 陶澍. 土壤微量元素含量的空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 22-101.