

# 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析

谢小进,康建成\*,李卫江,王国栋,闫国东,张建平

(上海师范大学城市生态与环境研究中心,上海 200234)

**摘要:**以上海宝山区为典型区域,在获取 216 个农用表层土壤样品重金属实测数据的基础上,运用多元统计和地统计相结合的方法,对上海宝山区农用土壤重金属的含量水平、分布特征和来源进行系统分析.结果表明,上海市宝山区农用土壤重金属 Cd、Hg、As、Cr、Pb、Cu、Zn 的平均含量值分别为 0.195、0.148、7.44、82.5、29.1、33.2、124.5 mg·kg<sup>-1</sup>,均没有超过国家土壤环境质量二级标准,但 Cd、Zn、Cr、Pb、Cu、Hg 元素平均含量值超过上海市土壤背景值,其中 Cd、Hg、Zn 最为显著,分别是对应背景值的 1.50、1.48、1.45 倍,呈现出明显的累积趋势.相关分析和因子分析结果显示,各元素的来源可分为三类,Zn、Cd、Hg 和 Pb 为一类,Cr 和 Cu 为一类,As 单独为一类,前两类元素含量远高于对应元素背景值,来源主要受各种人为活动影响,As 元素含量与背景值相当,各样品含量的变异程度最低,来源主要与成土母质有关.空间结构分析表明,As 元素以土壤母质、地形等结构性变异为主,其它元素主要受人为活动等随机因子影响,通过对临界值概率等值线的分布分析发现,Cd、Zn、Cr、Cu、Hg 来源以点源为主,来源较为集中,Pb 来源相对较为分散.

**关键词:**上海市;农用土壤;重金属;地统计分析;空间分布

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)03-0768-07

## Analysis on Heavy Metal Concentrations in Agricultural Soils of Baoshan Shanghai

XIE Xiao-jin, KANG Jian-cheng, LI Wei-jiang, WANG Guo-dong, YAN Guo-dong, ZHANG Jian-ping

(Urban Ecology and Environment Research Centre, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** Based on the acquisition of heavy metal data from 216 topsoil samples of the agricultural land in Baoshan District, a typical region of Shanghai City, the content, distribution characteristics and sources of the heavy metals in agricultural soil of Shanghai Baoshan District were analyzed with the methods of combining multivariate statistics and geo-statistical. The results show that the average concentrations of the Cd, Hg, As, Cr, Pb, Cu and Zn in agricultural soil of Baoshan District are 0.195, 0.148, 7.44, 82.5, 29.1, 33.2 and 124.5 mg·kg<sup>-1</sup>, they are lower than the secondary standards of the national soil environment; but the average concentrations of the Cd, Hg, Cr, Pb, Cu and Zn are more than background values of soil in Shanghai. Especially the Cd, Hg, Zn, they are 1.50, 1.48, 1.45 times higher than the background values, showing a net cumulative trend. The results of correlation analysis and factor analysis show that the sources of these elements can be divided into three categories; the Zn, Cd, Hg and Pb as one class; the Cr and Cu as another class; the As in a separate category. The concentrations of the former two classes are much higher than the background value, implying mainly from various human activities; the content of the As is almost the same as the background value of soil, it has the lowest degree of variation. Spatial structure analysis shows that the distribution of the As is influenced by the soil structural variations, such as soil parent material, topography, and other elements are mainly affected by random factors of human activities. Through the probability distribution of contour lines of the critical value, it can be found that the Cd, Zn, Cr, Cu, Hg come mainly from the point sources of pollution, but the source of Pb is relatively dispersed.

**Key words:** Shanghai City; agricultural soils; heavy metal; geostatistical analyst; spatial distribution

随着工业化和城市化的发展,城市土壤环境及所引起的人类健康问题越来越突出.城郊农用土壤作为城市生态系统的重要组成部分,同时也是城镇居民生存与发展的物质基础(联合国发展署的数据表明,城市 15% 以上的农业产品来自城郊地区<sup>[1]</sup>).在快速城市化过程中,城市生产、生活排放的大量含重金属的污染物导致城郊农用土壤肥力下降、土壤环境质量恶化,对人体健康造成威胁<sup>[2,3]</sup>.因此,农用土壤重金属污染问题已成为环境科学界关注的热点.已有的研究对城郊农用土壤重金属污染状况、分

布特征及其成因作了较多分析<sup>[4-12]</sup>.

近年来,我国工业化、城市化的水平在日益提高,而有针对性地选取城市化、工业化水平相对较高地区,研究其在工业化、城市化等综合性人为活动影响下,但对城郊农用土壤环境质量、重金属污染等问

收稿日期:2009-07-06,修订日期:2009-08-26

基金项目:上海市教委重点学科建设项目(J50402)

作者简介:谢小进(1981~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市土地利用与土壤环境,E-mail:xiexiaojin@foxmail.com

\* 通讯联系人,E-mail:kangjc@126.com

题的研究报道较少.此外,对环境中污染物来源进行判别一直是环境研究中的难点,近年来,越来越多的研究利用多元统计与地统计相结合的方法对环境中污染物的分布规律、来源进行分析<sup>[13-17]</sup>,该方法把离散的点连续化、平面化,并通过 GIS 软件的制图功能把污染程度直观地表达出来,对污染物来源的解析具有明显的优势.

本研究以城市化和工业化发展较快的上海宝山区为例,在获得大量土壤实测数据的基础上,运用多元统计和地统计相结合的方法,对宝山区农用土壤重金属含量、分布特征和来源进行系统分析,以期为上海城市土地利用规划,城郊农用土壤环境治理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宝山区地处上海市北部,位于长江三角洲东北角、黄浦江与长江汇合处,地势平坦,属北亚热带季风气候区,区域面积 293.71 km<sup>2</sup>,常住人口密度达 4 698 人/km<sup>2</sup>,是上海的水路门户.区内水陆交通十分发达,工业企业密集,宝山城市工业园区、吴淞工业区、罗店工业园区、月浦工业园区,以及中国最大的精品钢生产基地、世界 500 强企业宝山钢铁股份有限公司座落在该区域(各工业区分布见图 1).全区农业用地面积 39 km<sup>2</sup>,农业主导产业为粮食、蔬菜、林果苗木、奶牛、水产特种养殖等.随着工业化和城市化的发展,土壤环境问题日趋突出.

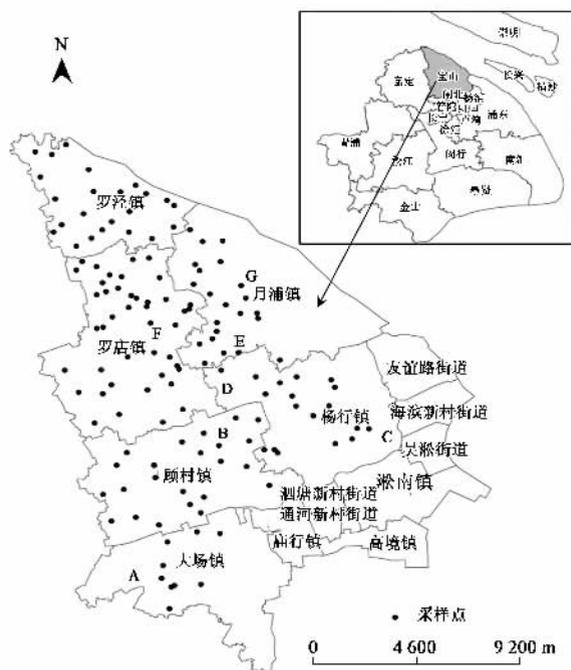
### 1.2 样品采集与分析

样点选取以村级区域尺度为基本采集单元,保证每村至少有一个采样点,全区共设样点 216 个(图 1),采样时间为 2003~2004 年.采样选择乡镇、园区有代表性的田块(主要包括农场、果园、园艺场、农业园区、蔬菜出口基地等农业用地类型),采用梅花多点(5~12 点)混合取样法,采样深度为 0~20 cm,各样点取土壤量 1.5~2.0 kg.样品装于聚乙烯塑料袋,袋内及袋上皆置标签.

土壤样品经自然风干,剔除样品中植物根系,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛.所有样品经标准方法进行消化处理后,Hg、As 采用原子荧光法测定,Cd 采用石墨炉法测定,Cu、Zn、Pb、Cr 采用 X 荧光法测定.土壤样品分析过程中加入国家土壤标准样品(GSS-1)进行分析质量控制.

### 1.3 数据处理

数据分析采用 SPSS13.0 软件完成,半变异函数



A. 宝山城市工业园区; B. 顾村工业园区; C. 吴淞工业园区;  
D. 杨行工业园区; E. 月浦工业园区; F. 罗店工业园区; G. 宝山钢铁股份有限公司

图 1 样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

拟合、样点分布图和重金属含量插值图用 ArcGIS9.0 软件完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属元素含量特征

宝山区土壤重金属元素含量统计分析见表 1.可以看出,重金属元素 Cd、Hg、As、Cr、Pb、Cu、Zn 的平均值分别为 0.19、0.15、7.44、82.47、29.13、33.18、124.53 mg·kg<sup>-1</sup>,均没有超过国家土壤环境质量二级标准<sup>[18]</sup>,但 Cd、Zn 有个别样点超过二级标准,其中以 Zn 含量较为突出,最高值达到 855.9 mg·kg<sup>-1</sup>,远高于二级标准 250 mg·kg<sup>-1</sup>.

与 1991 年上海市土壤背景值比较发现<sup>[19]</sup>,除 As 外,其它各重金属元素平均值都超过上海市土壤背景值,尤以 Cd、Hg、Zn 显著,分别是对应背景值的 1.50、1.48、1.45 倍.变异系数是反映样品变异程度的一个统计量,能在一定程度反映样品受人为影响的程度,从变异系数来看,Cd、Hg、Zn 变异系数明显高于其它元素,分别为 0.45、0.43、0.49,其它元素变异系数介于 0.21~0.28 之间,属中等变异程度.K-S 拟合优度检验是非参数假设检验方法之一,可用来检验样本的分布是否服从某种理论分布,本研

究采用 SPSS 统计软件中的非参数检验模块对各元素的分布进行 K-S 正态检验,发现 Hg、As 服从正态分布,Pb 服从对数正态分布,其它元素既不服从正态分布,也不服从对数正态分布.以背景值为标准,

各重金属元素超标率表现为  $Zn > Cd > Hg > Cr > Pb, Cu > As$ .以上分析表明,在人为活动的影响下,宝山区农用土壤已存在一定程度的累积现象,其中以 Zn、Cd 最为明显.

表 1 宝山区农用土壤重金属统计分析

Table 1 Statistical analysis of heavy metals in agricultural soils of Baosha District, Shanghai

重金属元素	平均值 /mg · kg <sup>-1</sup>	标准差	变异系数	最小值 /mg · kg <sup>-1</sup>	最大值 /mg · kg <sup>-1</sup>	峰度	偏度	分布类型	上海市土壤背景值 /mg · kg <sup>-1</sup>	超标率	国家土壤环境质量标准(二级) /mg · kg <sup>-1</sup>
Cd	0.195	0.09	0.45	0.105	0.620	9.92	2.83	偏态	0.130	0.82	0.600
Hg	0.148	0.06	0.43	0.050	0.560	8.91	2.12	正态	0.100	0.77	0.500
As	7.44	1.55	0.21	2.48	15.26	2.84	0.46	正态	9.10	0.11	30.00
Cr	82.5	19.26	0.23	44.7	197.0	10.86	2.50	偏态	75.0	0.72	200.0
Pb	29.1	5.99	0.21	18.3	55.9	3.24	1.24	对数正态	25.5	0.70	300.0
Cu	33.2	9.43	0.28	21.4	75.4	5.83	2.21	偏态	28.6	0.70	100.0
Zn	124.5	61.01	0.49	64.3	855.9	98.86	8.73	偏态	86.1	0.95	250.0

## 2.2 土壤重金属元素间的相关性

重金属元素之间的相关性,可反映有关元素之间的关联情况或污染来源<sup>[20]</sup>.通过计算各元素间的相关系数,并对计算结果进行假设检验发现(见表 2),除 As 与 Cr 相关性不明显外,其余各元素之间均呈显著正相关,其中 Zn 与 Cd 之间,Pb 与 Cd 之间,Hg 与 Zn 之间,Cr 与 Cu 之间的相关系数较高,各相关系数数值在 0.47 ~ 0.57 之间,As 与各元素之间的相关系数相对较小.由此可以初步推断,Zn、Cd、Pb、Hg 来源比较广泛,可能受多方面因素影响(因 Zn 与 Cd 之间有相同来源,Pb 与 Cd 之间有相同来源,Hg 与 Zn 之间有相同来源),Cr 与 Cu 可能为同一来源,而 As 可能是另一来源.

表 2 宝山区农用土壤重金属相关系数分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation analysis of heavy metals in agricultural soils of Baoshan District, Shanghai

	Cd	Hg	As	Cr	Pb	Cu	Zn
Cd	1						
Hg	0.39**	1					
As	0.40**	0.20**	1				
Cr	0.25**	0.24**	0.09	1			
Pb	0.47**	0.33**	0.21**	0.13*	1		
Cu	0.41**	0.30**	0.25**	0.51**	0.23**	1	
Zn	0.57**	0.50**	0.24**	0.31**	0.34**	0.41**	1

1) \*\* 表示 99% 置信区间显著,\* 表示 95% 置信区间显著

## 2.3 土壤重金属元素的因子分析

因子分析可通过降维的方式将多个变量归结为相互独立的综合因子,各因子能较好地反映变量的主要信息,现被广泛地用于多源环境污染的来源判别<sup>[21-22]</sup>.本研究采用因子分析法来判别土壤重金属元素的来源.通过对 7 种元素进行主成分分析,提取

特征根较大的前 3 个因子,累计贡献率达 71%(表 3),表明这 3 个主成分可解释重金属元素的绝大多数信息.

从因子载荷表(表 4)可以看出,元素 Zn、Cd、Hg 和 Pb 等元素在因子 1 中占有较大的载荷,Cr 和 Cu 元素在因子 2 中占有较大的载荷,As 在因子 3 中占有较大的载荷.表明元素 Zn、Cd、Hg 和 Cu 来源相似,Cr 和 Cu 具有相似的来源,对照前面的统计分析结果,因子 1 和因子 2 中的元素含量远高于对应元素背景值,超标率均在 70% 以上,故可推断因子 1 和因子 2 中的元素含量主要受各种人为活动的影响.因子 3 中的 As 元素含量与背景值相当,各样品含量的变异系数最小,因子 3 可能主要与土壤母质有关.因子分析进一步验证了相关分析的结果.

## 2.4 土壤重金属元素的空间结构和空间分布

### 2.4.1 重金属的空间结构

半变异函数在间隔距离为 0 时的半方差值称为块金值( $C_0$ ),它反映最邻近样点间的非连续程度,代表随机变异;基台值( $C_0 + C_1$ )是系统中最大的变异,是随机变异( $C_0$ )与结构性变异( $C_1$ )之和;块金值( $C_0$ )与基台值( $C_0 + C_1$ )之比表示随机性变异在系统总变异中占的比例,可反映土壤重金属元素在一定范围内样点的空间自相关程度,该比值  $C_0/(C_0 + C_1)$  越大,表明空间自相关性越弱,受人为因素影响越大<sup>[23]</sup>.当  $[C_0/(C_0 + C_1)] < 25%$  时,表明变量具有强烈的空间自相关;当比值  $25% \leq [C_0/(C_0 + C_1)] \leq 75%$  时,变量具有中等自相关;当比值  $[C_0/(C_0 + C_1)] > 75%$  时,变量的空间自相关性很弱,以随机变异为主<sup>[24]</sup>.

表 3 因子特征值

Table 3 Total variance explained

主成分	初始特征值			提取特征值		
	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.041	43.449	43.449	3.041	43.449	43.449
2	1.085	15.496	58.945	1.085	15.496	58.945
3	0.854	12.201	71.145	0.854	12.201	71.145
4	0.681	9.727	80.872			
5	0.569	8.126	88.998			
6	0.433	6.188	95.187			
7	0.337	4.813	100			

表 4 因子负荷

Table 4 Factors matrixes

元素	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	1	2	3	1	2	3
Cd	0.786	0.26	6.63E-02	0.648	0.247	0.458
Hg	0.657	9.99E-02	-0.382	0.731	0.23	-2.74E-02
As	0.482	0.391	0.732	0.116	7.63E-02	0.949
Cr	0.534	-0.685	8.20E-02	6.89E-02	0.869	-2.65E-02
Pb	0.584	0.428	-0.316	0.775	-6.61E-02	0.14
Cu	0.712	-0.448	0.176	0.245	0.794	0.219
Zn	0.792	-3.05E-02	-0.175	0.664	0.445	0.138

利用 ArcGIS 地统计分析模块对宝山区农用土壤中各重金属元素进行最优模型拟合,拟合出来的土壤重金属半变异函数模型及参数见表 5。Cd、Hg、As、Cr、Pb 和 Cu 元素块金值与基台值的比值在 25% ~ 75% 之间,属于中等空间相关,其中 Hg、Cr、

Pb、Cu 等元素比值均在 50% 以上,受人为活动等随机因子影响较大;Zn 块金值与基台值的比值 > 75%,属于空间弱相关,表明 Zn 空间结构受随机因子影响显著,外源污染物对表层土壤 Zn 含量的贡献较大。

表 5 宝山区农用土壤重金属半变异函数模型<sup>1)</sup>

Table 5 Semivariogram models of heavy metals in agricultural soils of Baoshan District, Shanghai

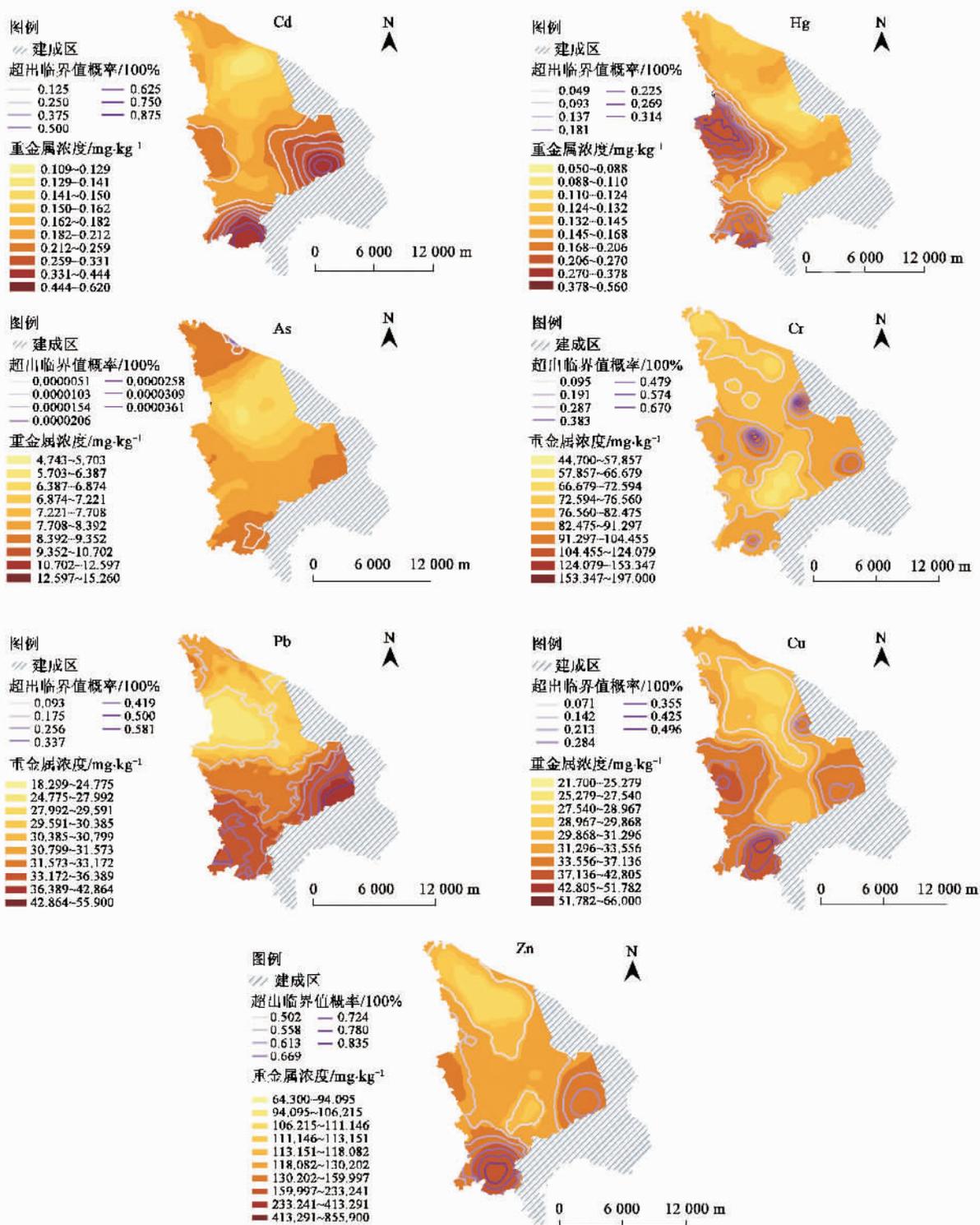
元素	拟合模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C_1$	变程 /km	块金值/基台值(100%) $C_0/(C_0 + C_1)$	标准平均值	标准均方根 预测误差
Cd	球状模型	0.0504	0.1404	7.32	0.3589	-0.0104	1.002
Hg	球状模型	0.1149	0.1756	6.833	0.6543	0.0038	0.9801
As	球状模型	1.2515	2.6309	15.491	0.4756	-0.0049	1.031
Cr	指数模型	216.52	398	3.035	0.5440	-0.0106	0.9788
Pb	球状模型	26.739	37.242	7.47	0.7179	-0.0249	1.029
Cu	指数模型	41.548	61.731	5.914	0.6730	-0.0328	1.002
Zn	指数模型	4.178	5.211	5.765	0.8017	-0.0172	0.9865

1) 最优拟合模型检验标准(标准平均值接近于 0,标准均方根预测误差接近于 1)

变程是指变量的空间依赖范围,反映变量在空间上的自相关尺度<sup>[23]</sup>。各重金属元素的变程大小顺序为:As > Pb > Cd > Hg > Cu > Zn > Cr。其中 As 的变程达到 15.493 km,明显高于其它元素,表明该元素以土壤母质、地形等结构性变异为主,其它元素变程在 3.035 ~ 7.47 km 之间,表明受人为活动等随机因子影响较大,导致元素在空间上的自相关尺度相对较小。

## 2.4.2 土壤重金属元素的空间分布特征

克里格插值是对离散变量进行连续无偏插值的可靠方法,插值结果可以直观地呈现出重金属元素的空间分布特征<sup>[25]</sup>。根据各重金属元素的分布形态,采用 ArcGIS 软件中的地统计模块,对服从正态分布的 Hg、As 元素采用普通克里格插值,其它元素采用析取克里格插值。在此基础上,运用非参数地质统计学方法<sup>[26]</sup>,以上海市土壤评价标准中的轻度污染的下限为临界值<sup>[19]</sup>,创建各元素含量超出临界值概率等值线图并叠加,结果如图 2 所示。



上海市土壤评价标准中的轻度污染下限值 Cd 0.293、Hg 0.259、As 14.2、Cr 99.5、Pb36.1、Cu 40.6、Zn 116.8,单位  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

图2 宝山区农用土壤重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of Baoshan District

从图2可以看出,研究区各重金属元素的空间分布差异较大,除As外,各元素含量的高值区主要位于靠近城区的东南部地区,以及宝山城市工业园区、吴淞工业区、罗店工业园区、月浦工业园区和宝

钢等大型工业园区附近,低值区主要位于宝山区北部的罗泾镇和月浦镇北部地区,表明工业生产及城市交通等人为活动对宝山农用土壤重金属空间分布有较大的影响。

Cd 和 Zn 分布的高值区中心集中在大场镇的西南部和杨行镇的东南部地区。究其原因,大场西南部工业密集,以机械制造、金属制造、塑料制造、交通运输设备制造为主的上海市级工业园区宝山城市工业园区位于此,园区拥有企业 60 余家,而且该区域紧靠普陀等老工业区,生产过程中“三废”的长期排放可能是导致该区周边农用土壤重金属污染的重要原因。杨行镇东南部地区紧临交通网密集的宝山城区,汽车尾气排放是该区域土壤 Cd、Zn 累积的主要原因。Pb 被作为机动车污染源的标志性元素<sup>[27,28]</sup>,研究区 Pb 分布的高值区主要集中在宝山区的东南部,该区域作为宝山区的经济文化中心,交通网密集,Pb 的积聚与交通业有密切的关系。Hg 高值区位于罗店镇的西北部,该区域河网密集,河流上游有大型工业区,而且 Hg 的空间分布与河流流向非常一致,故推断该区域 Hg 含量过高很可能是引用污水灌溉导致。Cr、Cu 分布的高值区与宝山城市工业园区、吴淞工业区、月浦工业园区和宝钢等大型工业园区的位置非常吻合,表明研究区 Cr、Cu 累积与工业生产活动有密切的关系。As 分布在空间上呈现出由中间向四周逐渐递增的趋势,但增幅不大,各样点整体含量与上海背景值较为接近,其含量的空间差异主要由成土母质等自然因素造成。

从图 2 超出临界值概率等值线的分布情况,可以较直观地看出各元素超出临界值概率的空间分布特征。概率等值线数值较高区域基本与各元素含量分布的高值区吻合,其中 Cd、Zn、Cr、Cu、Hg 在高值区等值线密集,而且成同心圆分布,说明元素来源受点源等随机因素影响较大,来源比较集中,Pb 等值线较分散,没有明显的同心圆现象,来源相对较为分散。元素来源受区域性因素影响较大。各元素超出临界值概率依次为: Cd > Zn > Cr > Pb > Cu > Hg > As,超出临界值概率最高的是 Cd,达到 87.5%,最小的是 As,只有 0.004%。

### 3 结论

(1)宝山区农用土壤重金属元素 Cd、Zn、Cr、Pb、Cu、Hg、As 的平均含量均低于国家土壤环境二级标准,但 Cd、Zn、Cr、Pb、Cu、Hg 元素平均值都超过上海市土壤背景值,其中 Cd、Hg、Zn 最为显著,分别是对应背景值的 1.50、1.48、1.45 倍;以上海市土壤背景值为标准,各元素超标率表现为 Zn > Cd > Hg > Cr > Pb、Cu > As。

(2)对宝山区农用土壤重金属元素的相关分析

和因子分析表明,各元素的来源可分为三类,Zn、Cd、Hg 和 Pb 为一类,Cr 和 Cu 为一类,As 单独为一类;前两类元素来源主要受各种人为活动影响,As 元素来源主要与成土母质有关。

(3)空间结构分析表明,Zn 空间结构受随机因子影响显著,外源污染物对表层土壤 Zn 含量的贡献较大;As 的变程明显高于其它元素,表明 As 元素以土壤母质、地形等结构性变异为主;其它元素空间上的自相关尺度相对较小,主要受人为活动等随机因子影响。

(4)空间分布分析表明,Cd 和 Zn 空间分布主要受工业和交通因子的影响,Cr、Cu 空间分布主要受工业活动的影响,Pb 空间分布主要受交通因子的影响,Hg 分布与农业污水灌溉关系密切;通过临界值概率等值线的分布情况发现,Cd、Zn、Cr、Cu、Hg 来源以点源为主,Pb 来源相对较为分散,各元素超出临界值概率依次为: Cd > Zn > Cr > Pb > Cu > Hg > As。

致谢:本论文在撰写过程中,芮建勋副教授、吴涛、安琰、任惠茹、朱文武等参与了讨论,提出了许多有益的建议,在此致以诚挚谢意。

### 参考文献:

- [1] Jac S, Annu R, Joe N. Urban Agriculture: Food, Jobs and Sustainable Cities[M]. New York: UNDP, 1996.
- [2] Aelion M C, Davis T H, Medermoot S, et al. Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina potential for human health impact[J]. Sci Total Environ, 2008, 402(2-3): 149-156.
- [3] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] Gil C, Boluda R, Ramon J. Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almeria (Spain) [J]. Chemosphere, 2004, 55(7): 1027-1034.
- [5] 孟飞, 刘敏, 史同广. 上海农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 428-433.
- [6] 郑娜, 王起超, 刘景双, 等. 葫芦岛市土壤、蔬菜重金属污染空间变化规律[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 2071-2076.
- [7] 王鑫, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 细河流域土壤中重金属的污染现状及潜在生态风险[J]. 环境科学研究, 2009, 22(1): 66-70.
- [8] 霍霞妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京市农业土壤重金属状态评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 66-71.
- [9] 孙宏飞, 李永华, 姬艳芳, 等. 湘西汞矿区土壤中重金属的空间分布特征及其生态环境意义[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1159-1165.
- [10] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1693-1698.
- [11] 章明奎, 王浩, 张慧敏, 等. 浙东海积平原农田土壤重金属来

- 源辨识[ J ]. 环境科学学报, 2008, **28**( 10 ):1946-1954.
- [ 12 ] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等. 湘江中下流农田土壤和蔬菜的重金属污染[ J ]. 地理学报, 2008, **63**( 1 ) 3-11.
- [ 13 ] 钟晓兰,周生路,赵其国,等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[ J ]. 环境科学, 2007, **28**( 12 ) 2758-2765.
- [ 14 ] 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时空分布研究[ J ]. 环境科学, 2007, **28**( 7 ): 1578-1583.
- [ 15 ] Martin J A R, Arias M L. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin ( Spain ). Application of the multivariate geochemical methods to study spatial variations [ J ]. Environ Pollut, 2006, **144**( 3 ):1001-1012.
- [ 16 ] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [ J ]. Environ Pollut, 2004, **127**( 2 ) 239-248.
- [ 17 ] Lark R M, Bellamy P H, Rawlins B G. Spatio-temporal variability of some metal concentrations in the soil of eastern England, and implications for soil monitoring[ J ]. Geoderma, 2006, **133**( 3-4 ) 363-379.
- [ 18 ] GB 15618-1995. 土壤环境质量标准[ S ].
- [ 19 ] 王云,汪雅谷. 上海市土壤环境背景值[ M ]. 北京:中国环境科学出版社, 1992.
- [ 20 ] 蔡立梅,马瑾,周永章,等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[ J ]. 地理学报, 2008, **63**( 9 ) 994-1003.
- [ 21 ] 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**( 3-4 ) 289-300.
- [ 22 ] 蔡立梅,马瑾,周永章,等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[ J ]. 环境科学, 2008, **29**( 12 ) 3496-3502.
- [ 23 ] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[ M ]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [ 24 ] 张仁铎. 空间变异理论及应用[ M ]. 北京:科学出版社, 2000.
- [ 25 ] 汤国安,杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[ M ]. 北京:科学出版社, 2006.
- [ 26 ] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[ M ]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1990.
- [ 27 ] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India [ J ]. Environ Pollut, 2003, **123**( 1 ): 95-105.
- [ 28 ] 马建华,谷蕾,李文军. 连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累及潜在风险[ J ]. 环境科学, 2009, **30**( 3 ) 894-899.