

# 焦作市城区土壤重金属空间变异特征及污染评价

李艳利<sup>1</sup>, 肖春燕<sup>1</sup>, 王守全<sup>2</sup>, 刘坤朋<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 苏州科技学院 环境与科学工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 为揭示人类活动对土壤环境质量的影响, 在河南省焦作市 3 个城区采集了 44 个表层土壤样品。利用单因子指数法和内梅罗综合指数法评价了土壤表层重金属的污染程度。并采用地统计学方法对表层土壤样品 Cr、Cu、Cd、Pb 共 4 种重金属的空间变异结构和分布格局进行了分析。结果表明, Cr、Cu、Cd、Pb 的超标率分别为 47.73%、0%、22.73%、0%, 土壤 Cr、Cd 污染较为严重。3 个城区 Cr 和 Cd 的分布特征总趋势为: 山阳区 > 中站区 > 解放区, Pb 和 Cu 的分布特征总趋势为: 解放区 > 山阳区 > 中站区。土壤 Cr、Cd 和 Pb 之间以及 Cu 和 Pb 之间呈显著相关。空间变异结构分析表明, Cd 具有极强的变异性, Cr 具有较强的变异性, Cu 和 Pb 是中等变异强度。半方差函数模型拟合结果显示 Cr 具有较强的空间自相关性, Pb 具有中等程度的空间自相关性, Cd 和 Cu 具有较弱的空间自相关性。在此基础上, 元素 Pb 呈环状, Cu 呈岛状, Cr 和 Cd 呈带状分布。

**关键词:** 土壤重金属; 地统计学; 空间变异; 污染评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0271-06

中图分类号: X53

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.054

## Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Pollution in Jiaozuo City

LI Yan-li<sup>1</sup>, XIAO Chun-yan<sup>1</sup>, WANG Shou-quan<sup>2</sup>, LIU Kun-peng<sup>3</sup>

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. School of Environmental

Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

**Abstract:** In order to survey the effect of human activities on soil environmental quality, 44 top soil samples were taken in three areas of Jiaozuo City. The single pollution index and the composite pollution index were used to assess the soil heavy metal pollution, and geostatistics method was applied to evaluate the spatial variation structure and distribution of four heavy metals (Cr, Cu, Cd and Pb) in top soils. Results showed that Cr was ranked first and Cd was ranked second in pollution index and overall standard rate, with the overall standard rates being 47.73% and 22.73%, respectively. The concentrations of Cr and Cd were highest in Shanyang District, next in Zhongzhan District, and lowest in Jiefang District. The concentrations of Cu and Pb were highest in Jiefang District, followed by Shanyang District, and lowest in Zhongzhan District. The concentrations of Cr, Cd and Pb were significantly correlated and likewise, Cu and Pb were significantly correlated. The four elements, in order of decreasing spatial variability, were Cd, Cr, Cu and Pb. Results from semivariance analysis showed that Cr had a relatively strong spatial-related variability; Pb, a medium spatial-related variability; and Cd and Cu, a relatively weak spatial-related variability. The distribution of Pb was shown as ring; Cu, as island; and Cr and Cd, as ribbon.

**Keywords:** soil heavy metal; geostatistics; spatial variability; pollution assessment

城市土壤是城市生态系统的重要组成部分, 其环境质量状况直接关系到人类的健康安全<sup>[1-2]</sup>。伴随着工业化和城市化的发展, 来自工业排放、大气沉降、生

活垃圾和汽车尾气排放等方式造成的重金属在土壤中累积。且城市土壤重金属污染问题也引起了国内外学者的关注<sup>[3-10]</sup>, 东南沿海经济发达城市和中西部等

收稿日期: 2013-07-15

修回日期: 2013-08-29

资助项目: 河南省重点实验室开放基金项目“焦作市土壤重金属有效态空间分布及其影响因素研究”(KF2010-05); 国家自然科学基金项目“煤矿区矸石—土壤—作物系统中重金属生物有效性研究”(41102219)

作者简介: 李艳利(1979—), 女(汉族), 河南省焦作市人, 博士, 讲师, 主要从事生态水文学研究。E-mail: liyanli@hpu.edu.cn。

大城市纷纷开展了对土壤重金属的研究<sup>[11-17]</sup>。目前国内关于土壤重金属的研究主要集中在两个方面,一是对土壤重金属的污染分布及来源进行分析<sup>[18-21]</sup>,另一方面是对土壤重金属进行污染评价和修复<sup>[14-15]</sup>。土地利用方式、人类干扰方式和距离污染源远近等的不同均会使城市土壤重金属含量存在显著的空间差异。

本文采用 GIS 空间分析技术和 SPSS 技术,与综合污染指数评价法相结合的方法,在焦作市开展表层土壤重金属污染程度、空间变异特征以及分布规律的研究。为焦作市土壤重金属防治提供一定理论基础。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

焦作市北依太行与山西省接壤,东临新乡市,西临济源市,南临黄河与郑州、洛阳相望,地跨北纬 35°10′—35°21′,东经 113°4′—113°26′,东西长约 32.5 km,南北宽约 19.7 km。焦作市城区地辖解放区、中站区、马村区、山阳区 4 个区,面积 4.24×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,市区人口约 88 万人。焦作市属暖温带大陆性季风型气候,春旱多风、夏热多雨、秋高气爽、冬寒少雪。平原地区年平均气温 14.9℃,山区比平原低 2~3℃,年均降雨量 603.5 mm,无霜期 231 d,年日照时数 2 422.7 h。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与测定 2012 年 4 月在焦作市 3 个城区(解放区、山阳区、中站区)采集 0—20 cm 表层土壤。按照网格法(2 km×2 km)均匀布点,采样点的选取兼顾了各种土地类型,具有空间代表性、经济性和可操作性,使用 GPS 定位,并准确记录经纬度。样品采用五分法采集,混合均匀后留下 1 kg 土样装入塑料袋,共采集了 44 个样品,其中山阳区 23 个,解放区 12 个,中站区 9 个。将采集的样品放置于通风处在室温下自然风干,避免阳光直接曝晒和其他污染。用研钵反复研磨,过 20 目筛子得到粗样,再次研磨,过 100 目筛子得到细样,然后低温保存、备用。所有样品经标准方法进行消化处理后,Cr,Cu 的测定采用火焰原子吸收分光光度法,Cd,Pb 的测定采用石墨炉原子吸收分光光度法进行测定。

1.2.2 土壤污染评价方法 土壤污染评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合指数法。单因子污染指数法适合单一因子污染的评价,内梅罗综合指数法能全面、综合地反映土壤的污染程度。

(1) 单因子指数法:

$$P_i = c_i / S_i \quad (1)$$

式中: $P_i$ ——土壤中污染物  $i$  的环境质量指数;

$c_i$ ——污染物  $i$  的实测浓度(mg/kg); $S_i$ ——污染物  $i$  的评价标准(mg/kg),采用河南省土壤重金属环境背景值<sup>[22]</sup>。下同。

(2) 内梅罗综合指数法:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\max c_i / S_i) + (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i})^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ ——土壤中重金属元素的综合污染指数; $n$ ——参与评价的重金属的种类总数。根据  $P$  值变幅,结合作物受害程度和污染物积累状况划分土壤质量分级: $P_i \leq 1$  为非污染, $1 < P_i \leq 2$  为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$  为中度污染, $P_i \geq 3$  为重度污染; $P_N \leq 0.7$  为安全等级, $0.7 < P_N \leq 1$  为警戒线, $1 < P_N \leq 2$  为轻度污染, $2 < P_N \leq 3$  为中度污染, $P_N \geq 3$  为重度污染。

1.2.3 数据分析方法 数据分析采用 SPSS 16.0 软件完成,半变异函数拟合、样点重金属浓度分布图以及重金属的插值图用 ArcGIS 9.3 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量的统计分析

土壤表层样品重金属含量测定结果如表 1 所示。土壤中 Cr,Cu,Cd 和 Pb 的浓度范围分别为:133.13~783.13,20.88~72.13,0.007~1.773 和 7.45~45.49 mg/kg,土壤样品中 Cr,Cu,Cd 和 Pb 这 4 种重金属平均含量分别为:378.86,36.26,0.33 和 20.23 mg/kg。变异系数反映了所有采样点的平均变异程度,研究区域 Cr,Cu,Cd 和 Pb 的变异系数分别为:63.23%,28.21%,107.21%和 32.97%,这 4 种重金属元素的平均变异程度由大到小依次为:Cd,Cr,Pb 和 Cu。说明 Cr 和 Cd 受人类活动的强烈干预,Cu 和 Pb 受人类干扰相对较小。相应研究采用单样本的 Kolmogorov—Smirnov 检验,Cd 和 Pb 符合正态分布,Cr 和 Cu 表现出偏态分布特征。按照地统计学空间变异分析的要求,对 Cr 和 Cu 进行对数转换,使其符合正态分布,用于空间变异分析。

### 2.2 土壤重金属污染状况

对所有土壤样品重金属分析数据取其平均值并通过单因子污染指数进行评价,计算结果如表 2 所示。Cr 污染指数大于 1,其他元素均小于 1。Cr,Cu,Cd 和 Pb 的污染指数分别为:1.52,0.18,0.56 和 0.06。土壤中 Cr 和 Cd 的最大值分别为土壤环境质量的 3.13 和 2.96 倍。而 Cu 和 Pb 的最大值分别为环境质量的 0.36 和 0.13 倍。这也说明 Cr 和 Cd 在空间分布上具有较为强烈的空间变异性。

表 1 焦作市城区表层土壤重金属含量的统计特征( $n=44$ )

元素	重金属浓度 $\rho/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$				变异系数/ %	峰度	偏度	K—S 检验	
	最小值	最大值	均值	标准差				Asymp sig. (2-tailed)	对数转换 sig. (2-tailed)
Cr	133.130	783.130	378.86	239.56	63.23	-1.92	0.18	0.001	0.060
Cu	20.880	72.130	36.26	10.23	28.21	4.33	1.90	0.011	0.097
Cd	0.007	1.773	0.33	0.36	107.21	4.74	1.80	0.112	—
Pb	7.450	45.490	20.23	6.67	32.97	4.39	1.41	0.185	—

表 2 焦作市城区土壤重金属单因子污染指数

元素	单因子污染指数 $P_i$		样品个数			
	范围	均值	非污染	轻度污染	中度污染	重度污染
Cr	0.05~3.13	1.52	23	1	19	1
Cu	0.10~0.36	0.18	44	0	0	0
Cd	0.01~2.96	0.56	34	9	1	0
Pb	0.02~0.13	0.06	44	0	0	0

44 个采样点中,Cr 的污染指数超过 1 的有 21 个,超标率为 47.73%,其中大多数为中度污染。Cr 污染较重的区域主要集中在山阳区。土壤中 Cu 的单项污染指数均小于 1,说明焦作市土壤中 Cu 浓度未超过国家土壤环境质量标准 II 级标准值。土壤中 Cd 的污染指数超过 1 的有 10 个,超标率为 22.73%,焦作市污水处理厂附近、焦作师范专科学校、万方小区等采样点的土壤单因子污染指数均大于 1,说明这些地区已受到不同程度的轻度污染。土壤 Pb 的污染指数均小于 1,浓度值接近河南省土壤背景值 22.3 mg/kg,表明焦作市土壤中 Pb 污染程度很低。

焦作市城区土壤重金属的综合污染指数超过 1 的有 23 个,占 52.7%,表明焦作市城区土壤重金属污染整体较为严重。其中 44 个样点中 6.82%的样点综合污染指数在 1~2,属于轻度污染。40.18%的样点综合污染指数在 2~3,属于中度污染。2.27%的样点综合污染指数 $\geq 3$ ,属于重度污染。说明不同地区污染积累程度差异明显。

2.3 焦作市不同城区土壤重金属分布特征及累积状况

2.3.1 焦作市不同城区土壤重金属空间分布特征

焦作市 3 个城区土壤重金属空间分布如表 3 所示。元素 Cr 和 Cd 的最大值均出现在山阳区,元素 Pb 和 Cu 的最大值均出现在解放区,Pb 的最小值出现在山阳区,Cu 的最小值出现在中站区。

Cr 和 Pb 均在解放区呈最大变异程度,说明解放区 Cr 和 Pb 受人类活动的干扰程度最强。Cd 在山阳区和解放区均呈极强变异程度,这说明 Cd 在山阳区和解放区受人类干扰程度均很强。而 Cu 在 3 个城区的变异程度均较低,说明 Cu 受人类活动干扰程度相对较低。

表 3 焦作市不同城区土壤重金属含量描述性统计分析

元素	行政区	范围/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准差	变异系数/ %	河南省土壤背景值/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
Cr	山阳区	144.38~783.12	489.92	224.44	45.81	63.20
	解放区	133.12~629.88	226.83	183.88	81.07	
	中站区	140.62~653.12	297.70	214.21	71.96	
Pb	山阳区	7.45~35.56	20.13	6.64	32.99	22.30
	解放区	11.57~45.49	20.89	20.40	97.65	
	中站区	14.21~25.10	19.58	3.77	19.25	
Cd	山阳区	0.007~1.773	0.45	0.084	18.71	0.065
	解放区	0.007~0.814	0.19	0.241	127.51	
	中站区	0~0.874	0.21	0.282	133.65	
Cu	山阳区	22.63~56.13	35.75	7.324	20.49	20.00
	解放区	23.38~72.13	37.88	13.09	34.56	
	中站区	20.88~67.63	35.43	13.18	37.20	

解放区土壤中 Pb 和 Cu 的平均值在 3 个城区中最高。其中 Pb(20.89 mg/kg)分别是山阳区的 1.04

和 1.07 倍。Cu(37.88 mg/kg)分别是山阳区的 1.06 和 1.07 倍。Pb 低于环境背景值,其他元素均超过环

境背景值,山阳区土壤 Cr 含量是背景值的 7.75 倍,解放区土壤 Cr 含量是背景值的 3.59 倍,中站区土壤 Cr 含量是背景值的 4.71 倍。山阳区土壤 Cd 含量是背景值的 6.91 倍,解放区土壤 Cd 含量是背景值的 2.91 倍,中站区土壤 Cd 含量是背景值的 3.25 倍。3 个城区 Cr 和 Cd 的分布特征总体上存在山阳区>中站区>解放区的趋势,Pb 和 Cu 的分布特征总体上存在解放区>山阳区>中站区的趋势。

2.3.2 焦作市不同城区土壤重金属累积状况 表 4 是不同城区土壤的重金属污染指数。其中山阳区、解放区和中站区土壤 Cd、Cu 和 Pb 的污染指数均小于 1,说明焦作市城区土壤 Cu、Cd 和 Pb 处于非污染状态。解放区 Cr 污染指数小于 1,说明解放区 Cr 处于非污染状态,山阳区和中站区 Cr 污染指数均大于 1,达到污染等级,属于轻污染状态。从 4 种重金属元素综合污染指数来看,山阳区土壤重金属达到中度污染,中站区土壤重金属属轻度污染,解放区的处于尚清洁状态。

表 4 焦作市不同城区土壤重金属污染指数

行政区	单项污染指数				综合污染指数	污染程度
	Cr	Cu	Cd	Pb		
山阳区	1.96	0.18	0.75	0.06	2.13	中度污染
解放区	0.91	0.32	0.19	0.06	1.00	尚清洁
中站区	1.19	0.18	0.38	0.06	1.27	轻污染

山阳区工业相对较集中,商业发达以及公路网密集、车流量大等,导致大量重金属的排放,累积于土壤中,这可能是造成其中度污染的原因。解放区建区较早,但其属于尚清洁状态,主要归功于其工业相对较少,仅电厂和火车站周围的采样点污染指数大于 2。中站区农田以土壤中重金属污染指数均大于 2,可能是造成中站区达到轻度污染的原因,且该区分布着矿务局电厂、多氟多化工厂等,也可能导致附近土壤中重金属的累积。

#### 2.4 焦作市城区土壤重金属来源分析

统计分析中的相关分析可有效揭示土壤重金属之间的关系和来源。相关性分析表明(表 5),土壤中 Cd 与 Cr、Pb 具有显著的空间相关性,Pb 和 Cu 具有极显著的相关性,表明土壤重金属之间表现为同源性或复合污染。Pb、Cu 主要来源于汽车轮胎磨损及油的泄漏<sup>[23-24]</sup>,因此 Pb 和 Cu 可能主要来源于交通排放污染物和钢铁厂等。一般认为 Cr 主要来源于成土母质<sup>[25]</sup>,但 Cr 和 Cd 也有相同来源,因此可推断 Cr 和 Cd 具有复合污染的特征,其来源包括交通排放污染物、工业和成土母质等。

表 5 焦作市城市土壤重金属的相关分析

重金属	Cr	Pb	Cd	Cu
Cr	1	-0.04	0.489**	0.159
Pb		1	0.18*	0.604**
Cd			1	0.283
Cu				1

注:\*为显著相关;\*\*为极显著相关性。

#### 2.5 土壤重金属污染空间变异结构分析

应用球形模型对重金属元素的半变异函数进行了拟合,表 6 是各参数半变异函数的相应参数。块金值表示变量在小尺度上的非连续变异,主要来源于抽样尺度的随机变异和测量误差,反映了随机效应的程度。基底效应揭示了区域化变量的空间相关程度,如果其值小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性;在 25%~75%表明系统具有中等程度的空间相关性;大于 75%表明系统空间相关性很弱。

表 6 焦作市城区土壤重金属半方差函数理论模型及相关参数

重金属	块金常数 ( $C_0$ )	基台值 ( $C_0+C$ )	基底效应/% [ $C_0/(C_0+C)$ ]	变程/ km
lg(Cr)	0.007 3	0.520 2	1.40	2.62
lg(Cu)	0.080 0	0.080 0	100.00	15.05
Cd	0.118 9	0.139 1	85.41	17.21
Pb	30.860 0	54.160 0	56.98	6.33

Cu 和 Cd 的基底效应值分别为 100%和 85.41%,空间相关性很弱,以随机变异为主,主要受外源污染(交通运输、电厂以及管理措施等人为活动)的影响,反映了人类活动强烈影响着土壤 Cu 和 Cd 的空间变异性。Cu 和 Cd 的空间相关性的最大距离分别为 15.05 和 17.21 km。Pb 的基底效应值为 56.98%,呈中等程度的空间相关性,Cr 的基底效应值为 1.4%,具有强烈的空间相关性,表明 Cr 主要受内源污染(如成土母质、气候变化、土壤特性等)的控制。而 Pb 受到内源和外源因素的综合影响。Pb 和 Cr 空间自相关的最大平均距离分别为 6.33 和 2.62 km。

#### 2.6 土壤重金属的空间分布分布格局

由图 1 可看出,焦作市城市土壤 Cr 浓度普遍较高,由南到北,浓度逐渐递减,东西方向上由中间向两边逐渐递增,呈带状分布。Cu 元素含量由东南往西北逐渐下降,高浓度区主要集中在高新区西南部、解放区中部以及山阳区偏东北部,低含量区主要位于焦作市西部。Cu 污染高值区集中的高新区西南部是农业区,土壤中重金属含量易受农田施肥的影响,且由实际调查知道该地区乡镇企业较多,农田多采用企业污水灌溉,也对土壤中 Cu 含量做出一定的贡献。位于解放区中部的焦作电厂也是高值区域,电厂会产生

大量的粉煤灰、飘尘,大气沉降亦造成主导风向(东北方向)上重金属含量的高值,对土壤重金属污染也起到一定的积累作用。Cd 元素含量从东向西逐渐降低,且中北部区域浓度最低。高值区域主要集中在人口比较集中、交通流量高的区域,例如焦作师范专科学校、人民广场、万方小区、火车站、中州铝厂家属院等区域附近,因此可能交通污染、商业活动对土壤中 Cd 的积累起到一定的作用。农业活动如农田施肥及污水灌溉也可能加剧重金属污染。同时,旧城区改造前该区域建有许多化工厂、冶炼厂等,虽然均已拆除,

但重金属带来的威胁可能仍然存在。Pb 元素含量普遍较低,解放区原化工三厂附近浓度最高,呈环状向南逐渐降低,不同区域差异性较低,Pb 的变异程度较低上也从侧面证明了这点。同时考虑到焦作市季风水风向为东北风,解放区拥有容量为  $1.2 \times 10^6$  kW 的焦作电厂、焦西矿、原化工三厂这些重污染企业,化工三厂的位置恰好位于 Pb 浓度最高值点,可以初步推断,Pb 的污染源可能是位于解放区北部的工矿企业,有较大可能性为大气污染扩散点源。因此 Pb 浓度分布受土壤属性和工业污染共同影响。

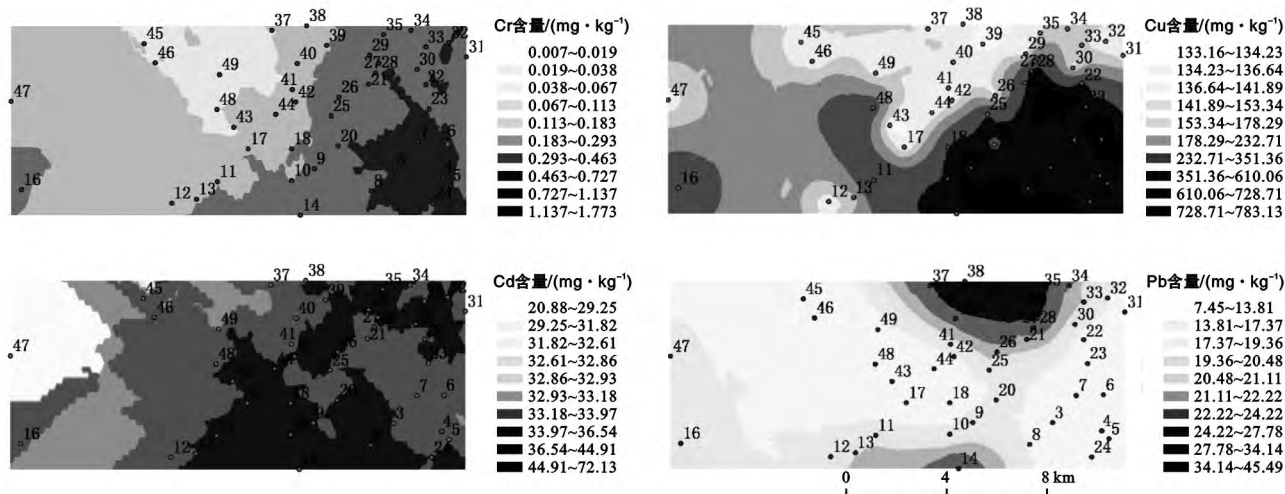


图1 焦作市城区土壤重金属含量空间分布

### 3 讨论

研究结果显示,相较于国内外其他城市 Cr, Pb, Cd 和 Cu 的污染状况,焦作城区土壤 Cr 平均含量比其他城市普遍都高,而 Pb 含量普遍较其他城市低。Cr 平均含量较高可能是因为焦作城区土壤中 Cr 的基底值较高的原故;Pb 含量较低的原因可能是因为汽车轮胎磨损和油的泄露是 Pb 的一个重要来源。焦作市作为中小城市,交通运输量相对较小因而 Pb 含量普遍较低。分析中发现,焦作城区总体样本中各采样点 Cr 具有强烈的空间相关性,且变异程度较高,也充分说明了 Cr 的分布和污染程度差异较大,其主要受内源污染(成土母质、成土过程、土壤特性等)的影响。而焦作城区 Cu 和 Cd 的空间相关性很弱,主要以随机变异为主,说明 Cu 和 Cd 受外源污染的影响。焦作城区总体样本中 Cd 的分布和污染程度差异极大,说明其主要受人类活动的影响,其高值区域主要集中在人口比较集中、交通流量高的区域,可能商业活动和交通流量对其污染分布贡献较大。Cu 的高值区主要集中在工农业企业集中的区域,因为其农田多

采用污水灌溉,电厂产生大量的粉煤灰、飘尘,也对 Cu 的积累做出了一定贡献。城市 Pb 呈中等程度的空间相关性,且总体样本中所有采样点 Pb 的分布和污染程度差异也较小。土壤 Cr, Cd 和 Pb 之间以及 Cu 和 Pb 之间呈显著相关,说明重金属污染具有复合污染和同源污染的特征。其中外界重金属来源,包括大气沉降、城市垃圾,污水灌溉,工业废渣和农用化学品等对焦作城区土壤重金属的含量有一定贡献。

### 4 结论

(1) 研究区域内 4 种土壤重金属元素含量的统计结果表明,Cd 的变异系数最大,超过了 100%,变异程度最强,Cr, Pb 和 Cu 均呈中等变异性。

(2) 三城区 Cr 和 Cd 的分布特征总体上存在山阳区>中站区>解放区的趋势,Pb 和 Cu 的分布特征总体上存在解放区>山阳区>中站区的趋势。

(3) 土壤污染状况分析表明,土壤 Cr 和 Cd 污染相对严重,样点超标率在 47.73%和 22.73%,土壤中 Cd 与 Cr, Pb 具有显著的空间相关性,Pb 和 Cu 具有极显著的相关性,土壤重金属之间表现为同源性或者

复合污染。土壤重金属污染程度反映了商业区分布、废弃物排放、工业区分布、城市交通等对城市土壤重金属分布影响的复杂性。

(4) 半变异函数模型拟合结果表明,Cu 和 Cd 存在较弱的空间自相关性,说明这两种元素主要以随机变异为主,受人类活动影响和干扰大。Cr 存在极强的空间自相关性,说明其主要受内在因素影响;Pb 存在中等程度的空间自相关性,说明其浓度受内在因素和外在因素综合影响。

(5) 采用普通克里格最优内插法得到了焦作市表层土壤重金属的含量空间分布图。Cr 的空间分布呈带状,由东南向西北递减;Cu 的空间分布由中心向四周辐射状递减;Cd 的空间分布呈带状分布,由东部向西部递减;Pb 的空间分布呈环状分布,由北部向南部递减。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Miguel D E, Jimenez D G M, Llamas J F. The overlooked contribution of compost application to the trace element load in the urban soil of Madrid(Spain)[J]. The Science of the Total Environment, 1998,215(1/2):113-122.
- [2] 陈燕芳.我国城市土壤重金属污染及其治理研究进展综述[J].中国人口资源与环境,2011,21(3):536-539.
- [3] Kimple C R, Morel J L. Urban soil management: a growing concern[J]. Soil Science, 2001,65(1):31-40.
- [4] Turer D, Maynard J B, Sansalone J J. Heavy Metal Contamination in the Soils of Urban Highways: Comparison Between Runoff and Soil Concentrations at Cincinnati, Ohio[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 132(3/4):293-314.
- [5] Madrid L, Diaz Barrientos E, Madrid F. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville [J]. Chemosphere, 2002,49(10):1301-1308.
- [6] Jennings A A, Petersen E J. Variability of North American regulatory guidance for heavy metal contamination of residential soil[J]. Environmental Engineering and Science, 2006,5(6):485-508.
- [7] Imperato M, Adamo P, Naimo D, et al. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples City(Italy)[J]. Environmental Pollution, 2003, 124(2):247-256.
- [8] Jordao C, Nascentes C, Cecon P, et al. Heavy Metal Availability in Soil Amended with Composted Urban Solid Wastes[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006,112(1/3):309-326.
- [9] Linde M, Bengtsson H, Oborn I. Concentrations and Pools of Heavy Metals in Urban Soils in Stockholm, Sweden[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001,1(3/4):83-101.
- [10] 柳云龙,章立佳,韩晓菲,等.上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J].环境科学,2012,33(2):599-605.
- [11] 王济,张浩,曾希柏,等.贵阳市城区土壤重金属分布特征及污染评价[J].土壤,2010,42(6):928-934.
- [12] 马建华,李灿,陈云增.土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响:以开封市为例[J].土壤学报,2011,48(4):743-750.
- [13] 钱翌,张玮,冉德超.青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析[J].环境化学,2011,30(3):652-657.
- [14] 黄敏,杨海舟,余萃,等.武汉市土壤重金属积累特征及其污染评价[J].水土保持学报,2010,24(4):135-139.
- [15] 刘勇,岳玲玲,李晋昌.太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J].环境科学学报,2011,31(6):1285-1293.
- [16] 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):33-39.
- [17] 赵淑苹,陈立新.大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J].水土保持学报,2011,25(5):195-199.
- [18] 谢小进,康建成,李卫江,等.上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J].环境科学,2010,31(3):768-774.
- [19] 李瑞平,郝英华,李光德,等.泰安市农田土壤重金属污染特征及来源解析[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2012-2017.
- [20] 段雪梅,蔡焕兴,巢文军.南京市表层土壤重金属污染特征及污染来源[J].环境科学与管理,2010,35(4):31-35.
- [21] 陈景辉,卢新卫,翟萌.西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险[J].应用生态学报,2011,22(7):1810-1816.
- [22] 邵丰收,周皓韵.河南省主要元素的土壤环境背景值[J].能源保护,2005,20(2):28-29.
- [23] 张一修,王济,秦樊鑫,等.贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J].环境科学学报,2012,32(1):204-212.
- [24] 曹益金,李晓燕,王干珍,等.贵阳市城区土壤重金属累积现状研究[J].土壤通报,2012,43(2):484-489.
- [25] 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.