

# 焦化厂周边土壤重金属分布特征及生态风险评价

商执峰, 祝方, 刘涛, 陈东

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为研究某焦化厂周边土壤中重金属(Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 和 Mn)的生态风险, 对焦化厂东、西、南和北方向上的 500, 1 000 和 3 000 m 处表层土壤进行了采样。采用单因子质量指数法、地累积指数法以及潜在生态危害指数法对各样点土样中重金属的生态风险进行了评价。结果表明, 所有采样点中 Cd 含量是土壤环境质量标准(GB15618—1995)Ⅱ级标准中 Cd 标准值的 2.1~7.2 倍, 其他重金属含量均未超过其标准值, 各重金属元素含量均在 1 000 m 处达到最大值; 研究区域土壤中各种重金属元素的污染程度由强至弱依次为: Cd>Cr>Cu≈Zn>Pb≈Mn, 潜在生态危害由强至弱依次为: Cd>>Pb>Cu>Cr>Zn>Mn, 北部>西部>东北>南部; 焦化厂周边土壤整体存在严重的潜在生态风险, 特别是焦化厂北面土壤中重金属的潜在生态风险为极严重, 其中 Cd 在土壤中存在严重的累积效应, 是造成潜在生态风险的主导因子。

**关键词:** 焦化厂; 重金属; 生态风险评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0288-05

中图分类号: X825

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.056

## Distribution and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Coking Plant

SHANG Zhi-feng, ZHU Fang, LIU Tao, CHEN Dong

(College of Environmental Science & Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract:** The surface soil at the 500, 1 000 and 3 000 m in the east, west, south and north of coking plants were sampled and three methods (single factor index, geo-accumulation index and Hakanson potential ecological risk index) were adopted to assess the potential ecological risk of heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu, Cr and Mn) near coking plant in Taiyuan City. Results showed that the concentration of Cd in all soil samples was 2.1~2.7 times of the standard value (Ⅱ) of environmental quality standard (GB15618—1995) for soil, the concentration of the other heavy metals did not exceed the standard values (Ⅱ) and the concentration of six heavy metals was maximum at 1 000 m; The relative degree of pollution was in the order of Cd>Cr>Cu≈Zn>Pb≈Mn; Likewise, the potential ecological risk was characterized by the order of Cd>>Pb>Cu>Cr>Zn>Mn and north>west>east>south, and the soil in the research area possessed serious potential ecological risk, specially the potential ecological risk of heavy metals in the north of the coking plant was very serious, in which, Cd was dominant contributors for ecological risk, for it accumulated markedly in soil around the coking plant.

**Keywords:** coking plant; heavy metals; ecological risk assessment

焦化生产过程中重金属污染物会随着产品的泄露、堆放、淋洗以及飞灰的沉降进入土壤, 对动植物的生长以及人类的健康造成潜在威胁, 因此对焦化厂附近土壤中重金属的调查研究对于保护当地生态意义重大。目前对焦化厂土壤中重金属的研究主要是张亦驰<sup>[1]</sup>和尹勇<sup>[2]</sup>等对焦化厂场地中重金属空间分布进

行的研究, 而对焦化厂土壤中重金属的生态风险评价研究报道较少, 因此需要借鉴其他土壤中重金属的生态风险评价方法进行研究。土壤中重金属生态风险评价的主要方法有 Hakanson 潜在生态危害指数法<sup>[3-4]</sup>、内梅罗综合污染指数法<sup>[5]</sup>、地累积指数法、污染负荷指数法<sup>[6]</sup>和沉积物富集系数法。其中 Hakanson 潜

收稿日期: 2013-09-30

修回日期: 2013-12-21

资助项目: 山西省基础研究计划项目“天然高分子改性絮凝剂的合成及其对焦化废水的絮凝性能研究”(2008011020)

作者简介: 商执峰(1987—), 男(汉族), 山西省晋中市人, 硕士研究生, 研究方向为重金属污染土壤修复。E-mail: 1524210143@qq.com。

通信作者: 祝方(1965—), 女(汉族), 上海市人, 博士, 副教授, 主要从事污染土壤修复, 土壤环境化学和环境修复药剂等方面的研究与教学工作。E-mail: zhufang@tyut.edu.cn。

在生态危害指数法综合考虑了多种重金属的协同作用、毒性水平、污染浓度、生态效应以及环境对重金属的敏感程度等因素,地累积指数法综合考虑了人为因素、污染地球化学背景值等方面对重金属污染程度的影响,适用于土壤中重金属的生态风险评价。Sun Yuebing 等<sup>[7]</sup>采用综合污染指数和潜在生态危害指数对沈阳地区表层土壤中重金属的生态风险评价进行了研究,表明研究区域存在严重的生态风险,其中 Pb 和 Cd 对生态风险的贡献率较大;于云江等<sup>[8]</sup>采用地累积指数法和潜在生态危害指数法对某流域农田土壤中重金属污染的生态风险进行评价,结果表明该区域存在较严重的潜在生态风险,Cd 的风险指数最高。此外,研究人员还通过模糊数学模型<sup>[9]</sup>、灰色聚类模型<sup>[10]</sup>和 GIS 的地统计学评价模型<sup>[11-12]</sup>对土壤中的重金属造成的生态风险进行了评价。本研究对太原市某焦化厂周边土壤 3 km 范围内土壤表层采样,研究了土样中的 Pb、Cd、Zn、Cu、Cr 和 Mn 污染程度和空间分布,并采用单因子质量指数法、地累积指数法以及潜在生态危害指数法对土样中 6 种重金属的生态风险进行评价。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选择太原市某焦化厂(东经 112°47', 北纬 37°84')周边土壤作为研究对象。该区域冬季主导风向为西北风或者是偏北风。此焦化厂于 1982 年 8 月开工建设,1984 年 12 月正式投产,占地面积约  $3.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。该厂年产城市煤气  $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,冶金焦炭  $7.0 \times 10^5 \text{ t}$ ,焦油、轻苯、硫胺、粗酚等化工产品  $4.0 \times 10^4 \text{ t}$ 。投产至今,该焦化厂总计生产焦炭  $1.77 \times 10^7 \text{ t}$ ,生产城市煤气近  $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

### 1.2 土壤样品的采集与处理

本研究采样时间为 2012 年 11 月 25 号进行,在太原市某焦化厂东、西、南和北 4 个方向上,在 500, 1 000 和 3 000 m 处表层土壤(0—20 cm)各取 3 个土壤样品,混合均匀后采用四分法取土壤样品,将土壤样品装入无菌的采样袋。去除土壤中的残渣物,风干后研磨、过 100 目筛,样品消解后采用原子吸收法对土壤中重金属的含量进行测定。所有样品的测定过程通过空白试验和加标回收试验两种方法对样品进行质量控制,各种重金属的加标回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

### 1.3 土壤样品重金属的生态风险评价方法

本研究采用单因子指数法、地累积指数法和潜在生态危害指数法对研究焦化厂附近土壤中重金属的

污染状况及生态风险进行综合评价。

1.3.1 单因子指数法 单因子污染指数法是以土壤元素背景值为评价标准来评价某一种重金属元素的累积污染程度,表达式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中:  $P_i$ ——土壤中重金属  $i$  的环境质量指数;  $C_i$ ——重金属  $i$  的实测浓度;  $S_i$ ——重金属  $i$  的土壤环境质量标准<sup>[13]</sup>中 II 类标准的临界值。若  $P_i \leq 1.0$ , 则土壤没有受到人为污染;若  $P_i > 1.0$ , 则土壤已受到人为污染,而且指数越大则表明土壤重金属累积污染程度越高。

1.3.2 地累积指数法 地累积指数法是广泛用于研究土壤和沉积物中重金属污染程度的定量指标,综合考虑了人为因素、污染地球化学背景值等方面的影响。其表达式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \cdot B_i)]$$

式中:  $C_i$ ——重金属  $i$  在土壤中的含量;  $B_i$ ——该重金属的地球化学背景值,本研究以太原市土壤中重金属背景值为地球化学背景值<sup>[14]</sup>;  $k$ ——考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。地累积指数的分级标准与污染程度的划分如表 1 所示。

表 1 地累积指数法分级标准

风险级别	地累积指数( $I_{\text{geo}}$ )	污染程度
0	$(-\infty, 0]$	清洁
1	$(0, 1]$	轻度累积
2	$(1, 2]$	偏中等累积
3	$(2, 3]$	中等累积
4	$(3, 4]$	偏重累积
5	$(4, 5]$	重累积
6	$(5, +\infty)$	严重累积

1.3.3 Hakanson 潜在生态危害指数法 Hakanson 潜在生态危害指数法综合考虑了多种重金属的协同作用、毒性水平、污染浓度、生态效应以及环境对重金属的敏感程度等因素,适合于土壤和大区域范围沉积物进行评价比较。其表达式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

式中:  $C_f^i$ ——重金属  $i$  的富集系数;  $C_s^i$ ——重金属  $i$  的实测含量;  $C_n^i$ ——计算所需的参比值,本研究以太原市土壤重金属背景值作为参比值,其参比值详见表 2;  $E_r^i$ ——土壤中重金属  $i$  的潜在生态危害系数;  $T_r^i$ ——重金属  $i$  的毒性系数<sup>[15]</sup>(表 2)。RI——土壤中多种重金属的综合潜在生态危害指数。其分级标准详见表 3。

表 2 重金属元素的参比值  $C_i$  以及毒性系数  $T_r^i$ 

重金属元素	Pb	Cd	Zn	Cu	Mn	Cr
评价参比值/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	20.04	0.01	63.75	21.13	505	73.19
国家土壤环境背景值/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	300	0.3	250	100	583	200
毒性系数 $T_r^i$	5	30	1	5	1	2
地球化学背景值/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	20.04	0.10	63.75	21.13	505	73.19

注:国家土壤环境背景值参照文献[16]以及[13]。

表 3 重金属潜在生态危害指数的分级标准

风险级别	潜在生态危害系数 $E_i$	潜在生态危害指数 RI	潜在生态风险程度
A	$\leq 40$	$\leq 150$	低
B	40~80	150~300	中等
C	80~160	300~600	重
D	160~320	600~1200	严重
E	$> 320$	$> 1200$	极严重

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中 6 种重金属的分布特征与污染状况

由焦化厂周边土壤中 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 和 Mn 的分布状况分析得出,除 Cu 和 Cr 外,各方向 Pb, Cd, Zn 和 Mn 的含量均表现为:北部>西部>东部>南部,1 000 m 处>3 000 m 处>500 m 处,而且所有采样点中焦化厂 1 000 m 处土样中 6 种重金属的含量均为最大值。结合土壤环境质量标准发现,Pb, Zn, Cu, Cr 和 Mn 的含量均未超过国标中的相应重金属的临界值,符合国家规定的土壤环境质量标准,而 Cd 的含量为国标 II 级标准中 Cd 临界值的 2.1~7.2 倍,使得焦化厂周边土壤受到严重的 Cd 污染。

### 2.2 土壤重金属 Pb, Cd 和 Zn 的富集系数 $C_f$

土壤的污染程度除了使用重金属含量表征外,也可以用重金属的富集系数  $C_f$  即污染系数表征其污染程度。图 1 为焦化厂周边土壤各采样点中 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 和 Mn 的富集系数。图 1 中可以看出,焦化厂周边土壤中 6 种重金属的富集系数大小顺序为:  $Cd \gg Pb > Cu > Cr > Zn > Mn$ 。所有采样点中 Mn 的富集系数均小于 1; Cd, Pb, Zn, Cr 和 Cu 分别在 100%, 91.7%, 50%, 16.7%, 75% 采样点中的富集系数大于 1,说明在焦化厂 3 km 的范围土壤受到的不同程度的人为污染。在东南西北方向的土样中焦化厂北面 1 000 m 处 Pb, Cd, Cr 和 Mn 的富集系数为最大,东面 1 000 m 处 Zn 和 Cu 的富集系数最大,即重金属在焦化厂 1 000 m 处存在较严重富集,特别是焦化厂北 1 000 m 处 Cd 的富集最为严重,导致此处土壤受到的人为污染也最严重。

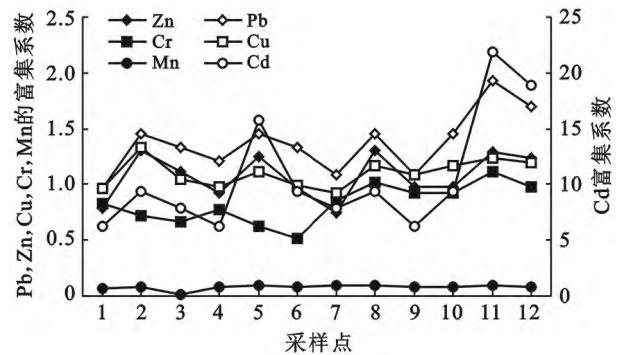


图 1 不同土壤采样点中 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 和 Mn 的富集系数

注:横坐标 1—12 分别代表焦化厂东、西、南和北方向各 500, 1 000 和 3 000 m 处的采样点。

### 2.3 单因子指数法评价法

表 4 反映了焦化厂周边采样点土壤中 6 种元素的单因子指数,各采样点土壤中各元素的单因子指数  $P_i$  值表现为:  $Cd > Cr > Cu \approx Zn > Pb \approx Mn$ , 100% 采样点中 Pb, Zn, Mn 和 Cu 的  $P_i$  值小于 1, Cr 和 Cd 分别在 16.7% 和 100% 的采样点中的  $P_i$  值大于 1, 而且 1 000 m 处采样点土壤中各元素的  $P_i$  值均为最大, 同时各方向的采样点中 Pb, Cd 和 Zn 的  $P_i$  值表现为: 北部>西部>东部>南部, 1 000 m 处>3 000 m 处>500 m 处。可见,焦化厂北面 1 000 m 受到的重金属污染较为严重,而且此处 Cd 的富集系数和单因子指数均为最大,导致此处重金属污染最为严重。焦化厂土壤中 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 和 Mn 污染程度依次为:  $Cd > Cr > Cu \approx Zn > Pb \approx Mn$ 。

### 2.4 地累积指数法(Mull 指数)评价

表 5 为不同采样点土壤中 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 和 Mn 的地累积指数 ( $I_{geo}$ )。采样区土壤中 6 种重金属的地累积指数大小依次为:  $Cd > Pb > Zn > Cu > Cr > Mn$ 。土壤所有采样点中 Zn, Cr, Cu 和 Mn 的地累积指数小于 0, 生态风险等级为 0 级, 无生态风险; 50% 的采样点中 Pb 的地累积指数在 0~1 之间, 生态风险等级为 1 级, 存在轻微的生态风险; 100% 的采样点土壤中 Cd 的地累积指数均在 2~4 之间, 风险级别为 3~4, 其中风险级别为 3 的采样点数占 75%, 风险级别为 4 的采样点数占 25%, 即焦化厂北 1 000 和 3 000 m

和西面 1 000 m 处 Cd 的风险级别为 4,存在偏重度 Cd 在土壤中的累积程度最大,对土壤的污染也最累积。结合图 2 和表 4 可知,在焦化厂北 1 000 m 处 严重。

表 4 土壤采样点中 Pb,Cd,Zn,Cu,Cr 和 Mn 的单因子指数  $P_i$

重金属	东部			西部			南部			北部		
	500 m	1 000 m	3 000 m	500 m	1 000 m	3 000 m	500 m	1 000 m	3 000 m	500 m	1 000 m	3 000 m
Zn	0.20	0.33	0.28	0.23	0.32	0.24	0.19	0.33	0.25	0.25	0.33	0.31
Pb	0.069	0.11	0.096	0.087	0.11	0.096	0.079	0.10	0.079	0.11	0.14	0.12
Cd	1.04	3.11	2.60	2.59	5.19	3.12	2.08	3.11	2.08	3.12	7.20	6.22
Cu	0.22	0.31	0.24	0.23	0.26	0.23	0.21	0.27	0.25	0.27	0.28	0.28
Cr	0.84	0.71	0.66	0.77	0.63	0.52	0.86	1.01	0.93	0.60	1.11	0.90
Mn	0.073	0.083	0.019	0.075	0.010	0.084	0.089	0.091	0.080	0.085	0.100	0.086

表 5 采样点中 Pb,Cd,Zn,Cu,Cr 和 Mn 的地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 以及风险等级

采样点	Zn		Pb		Cd		Cr		Cu		Mn		
	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	
东部	500	-0.750	0	-0.510	0	2.050	3	-0.840	0	-0.500	0	-4.360	0
	1 000	-0.014	0	0.080	1	2.640	3	-1.070	0	-0.340	0	-4.170	0
	3 000	-0.240	0	-0.045	0	2.380	3	-1.190	0	-0.390	0	-6.280	0
西部	500	-0.520	0	-0.180	0	2.020	2	-0.970	0	-0.480	0	-4.320	0
	1 000	-0.073	0	0.080	1	3.380	4	-1.250	0	-0.290	0	-3.910	0
	3 000	-0.450	0	-0.045	0	2.640	3	-1.520	0	-0.450	0	-4.150	0
南部	500	-0.810	0	-0.340	0	2.380	3	-0.800	0	-0.560	0	-4.070	0
	1 000	-0.016	0	0.080	1	2.640	3	-0.570	0	-0.240	0	-4.040	0
	3 000	-0.430	0	-0.330	0	2.050	3	-0.690	0	-0.330	0	-4.230	0
北部	500	-0.430	0	0.081	1	2.640	3	-1.320	0	-0.240	0	-4.140	0
	1 000	-0.035	0	0.480	1	3.850	4	-0.440	0	-0.150	0	-3.890	0
	3 000	-0.100	0	0.300	1	3.640	4	-0.730	0	-0.200	0	-4.120	0

2.5 潜在生态危害指数法评价

焦化厂周边土壤中不同采样点中的 Pb,Cd,Zn,Cu,Cr 和 Mn 的潜在生态危害指数详见表 6。由表 6 可得,焦化厂周边 3 km 范围内所有样点土壤中 Pb,Cd,Zn,Cu,Cr 和 Mn 的潜在生态风险系数和风险程度依次为: Cd>>Pb>Cu>Cr>Zn>Mn,1 000 m>3 000 m>500 m。所有采样点的土壤中 Pb,Zn,Cu,

Cr 和 Mn 的潜在生态危害系数均低于 40,风险级别为 A 级,存在极低的潜在生态风险;而所有采样点土壤中 Cd 的潜在生态危害系数均大于 160,风险级别为 D 级和 E 级,存在严重和极严重的潜在生态危害,其中 75% 的采样点存在严重的潜在生态危害,25% 的采样点存在极严重的潜在生态危害。

表 6 采样点中 Pb,Cd,Zn,Cu,Cr 和 Mn 的潜在生态危害系数 ( $E_i^p$ ) 以及潜在生态危害指数 RI

采样点位置	Zn		Pb		Cd		Cr		Cu		Mn		RI	级别	
	$E_i^p$	级别	$E_i^p$	级别	$E_i^p$	级别	$E_i^p$	级别	$E_i^p$	级别	$E_i^p$	级别			
东部	500	0.79	A	4.85	A	188.69	D	1.67	A	4.85	A	0.073	A	200.89	B
	1 000	1.31	A	7.28	A	283.15	D	1.43	A	6.69	A	0.083	A	299.90	B
	3 000	1.12	A	6.68	A	235.94	D	1.32	A	5.22	A	0.019	A	250.26	B
西部	500	0.92	A	6.07	A	188.81	D	1.54	A	4.92	A	0.075	A	202.34	B
	1 000	1.25	A	7.28	A	471.78	E	1.26	A	5.59	A	0.099	A	487.25	C
	3 000	0.96	A	6.68	A	283.18	D	1.04	A	4.99	A	0.084	A	296.91	B
南部	500	0.75	A	5.46	A	235.87	D	1.72	A	4.63	A	0.089	A	248.54	B
	1 000	1.30	A	7.28	A	283.15	D	2.05	A	5.81	A	0.091	A	298.85	B
	3 000	0.98	A	5.46	A	188.75	D	1.86	A	5.44	A	0.080	A	202.58	B
北部	500	0.98	A	7.29	A	283.24	D	1.84	A	5.81	A	0.085	A	299.24	B
	1 000	1.29	A	9.62	A	654.48	E	2.22	A	6.17	A	0.100	A	673.89	D
	3 000	1.23	A	8.48	A	565.23	E	1.97	A	5.96	A	0.086	A	582.92	C
RI	12.88		69.69		1 449.95		19.92		66.08		0.929		Cd 生态风险达到严重程度		
级别	A		A		E		A		A		A				

注:风险级别 A,B,C,D 和 E 分别表示低、中等、重、严重和极严重潜在生态风险。

从采样点土壤中单一重金属的角度分析可得,焦化厂周围土壤中 6 种重金属的潜在生态危害指数大小顺序依次为: Cd>>Pb>Cu>Cr>Zn>Mn,除 Cd 外其余 5 种重金属产生潜在生态风险的程度险极低。所有土样中 Cd 的风险级别均在 D 级以上,存在严重的生态风险。在焦化厂西 1 000 m、北 1 000 和 3 000 m 处土样中 Cd 的风险级别甚至达到了 E 级,存在极严重的潜在生态风险;综合 6 种重金属的潜在生态危害指数分析可知,在焦化厂 3 km 的范围内东、西、南和北方向上的 6 种重金属的潜在生态危害指数分别为 751.05,986.50,749.97 和 1 556.05,潜在风险级别为严重、严重、严重和极严重风险,说明该研究区域土壤中重金属存在严重的潜在生态风险,而且在焦化厂北重金属的潜在生态风险达到极严重的程度,需要重点治理。在焦化厂土壤如此严重的生态风险中,Cd 导致的生态风险程度(贡献率)分别占 94.24%,95.87%,94.37%和 93.18%,可见 Cd 是该区域中产生潜在生态风险的主导因子。

### 3 结论

(1) 焦化厂周边土壤中重金属 Cd 含量超过(GB15618—1995) II 级标准规定的标准值,其余 5 种元素未超过其相应的标准值,而且各重金属含量均在焦化厂 1 000 m 处达到最大值。

(2) 焦化厂周围土壤中重金属的生态风险程度达到严重的程度,特别是焦化厂北面存在极严重的潜在生态风险,其中 Cd 是产生风险的主导因子,应该对焦化厂北面进行重点治理。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张亦弛,于玲红,王培俊,等.某焦化生产场地典型污染物的垂向分布特征[J].煤炭学报,2012,37(7):1211-1218.
- [2] 尹勇,戴中华,蒋鹏,等.苏南某焦化厂场地土壤和地下水特征污染物分布规律研究[J].农业环境科学学报,2012,31(8):1525-1531.
- [3] Fang Shubo, Jia X B, Yang Xiaoying, et al. A method of identifying priority spatial patterns for the management of potential ecological risks posed by heavy metals[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 237: 290-298.
- [4] 杨净,王宁.夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(3):595-600.
- [5] 陈涛,常庆瑞,刘京,等.长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2152-2159.
- [6] Mohammad A H B, Parvez L, Islam M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,173(1/3):384-392.
- [7] Sun Yuebing, Zhou Qixing, Xie Xiaokui, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1/3):455-462.
- [8] 于云江,胡林凯,杨彦,等.典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].环境科学研究,2010,23(12):1523-1527.
- [9] Li Weixin, Zhang Xuxiang, Wu Bing, et al. A comparative analysis of environmental quality assessment methods for heavy metal-contaminated soils[J]. Pedosphere, 2008, 18(3):344-352.
- [10] 何厅厅,赵艳玲,李建华,等.基于 GCM\_CB 模型的土壤重金属污染评价[J].环境工程学报,2012,6(10):3781-3786.
- [11] Wang Meie, Bai Yanying, Chen Weiping, et al. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2012,161: 235-2422.
- [12] 张直,曹英兰,蔡超,等.基于 GIS 的菜园土壤重金属空间分布及其风险评[J].安全与环境学报,2013,13(1):129-133.
- [13] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.GB15618—1995 土壤环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,1995.
- [14] 吴启祥,陈阳.太原市土壤重金属元素背景值研究[J].山西农业大学学报,1988,8(2):205-211.
- [15] 徐争启,倪师军,虞先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [16] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤环境背景值研究[J].环境科学,1991,12(4):12-20.