

泰安市农田土壤重金属污染特征及来源解析

李瑞平¹, 郝英华¹, 李光德^{1*}, 姜咏栋², 张 华¹, 韩晓梅¹

(1.山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2.泰安市环境保护监测站, 山东 泰安 271018)

摘 要:泰安市土壤污染的研究还处于起步阶段, 尚缺乏系统的研究和探讨。利用因子分析法对泰安市 110 个农田表层土壤(0~20 cm)中 7 种重金属(Cr、Zn、Cu、Ni、Pb、Cd、Hg)元素进行分析并提取了 3 个主因子, 结合泰安市工业分布情况, 对比这 3 个主因子, 分析其可能来源, 并对土壤中重金属污染进行了潜在生态风险评估。结果表明, 泰安市农田土壤重金属的累积现象比较明显, 尤其是 Hg、Ni、Cu 的最大值均超过了国家土壤环境质量二级标准。相关性分析表明 Zn 与 Ni、Zn 与 Cu、Ni 与 Cr 之间分别呈显著正相关, Zn 与 Hg 呈显著负相关。因子分析显示, 研究区土壤中 Zn、Cu、Ni、Cr 主要来源于工矿业活动, 农业活动和居民生活对 Cd 和 Hg 的影响较大, 商业活动对 Pb 污染贡献最大。潜在生态风险评估的结果是 Cr、Zn、Ni、Pb 4 种元素的潜在生态风险均处于低危害水平, Hg、Cd、Cu 均存在不同程度的潜在生态风险。

关键词:泰安; 农田土壤; 重金属; 因子分析; 潜在生态风险

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)10-2012-06

Characteristics and Sources Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in Taian City, Shandong, China

LI Rui-ping¹, HAO Ying-hua¹, LI Guang-de^{1*}, JIANG Yong-dong², ZHANG Hua¹, HAN Xiao-mei¹

(1.College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2.Environment Protection Monitoring Station of Taian City, Taian 271018, China)

Abstract: The research on soil pollution in Taian City is at the preliminary stage and still lack systematic study and discussion. Seven heavy metal elements of 110 topsoil samples in Taian City were analyzed by factor analysis and 3 main factors were selected. Combined the distribution situation of enterprises in Taian with comparison of the 3 main factors, the possible origination of soil pollutants were proposed and potential ecological risk of heavy metal pollution were evaluated. The results indicated that the heavy metal accumulation in suburb cropland was obvious especially for Hg, Ni and Cu, with their maximum values higher than the critical value of the second grade in national soil environmental quality standards. The correlation analysis indicated that there were significant positive correlations between Zn and Ni, Zn and Cu, and between Ni and Cr, while there was significant negative correlation between Zn and Hg. The factor analysis results suggested that soil Zn, Cu, Ni and Cr were mainly affected by industrial and mining activities; business activity was the main factor for Pb, and agricultural activities and resident's life had much more impact on the accumulation of Hg and Cd. The potential ecological risk assessment showed that the risks of Pb, Zn, Ni and Cr were on a low level, while risks of Cd, Cu, and Hg existed with different degrees.

Keywords: Taian; cropland soil; heavy metal; factor analysis; potential ecological risk assessment

城市土壤是构成城市环境的一个重要部分, 其中重金属元素可通过吞食、吸入和皮肤吸收等主要途径进入人体, 并在人体中长期积累, 还可通过污染食物、大气和水环境间接地影响城市环境质量和危害人类健康。在城市化进程不断加快的今天, 研究和评价城市土壤重金属污染特征、污染来源以及在环

境中迁移、转化机理, 并对城市环境污染治理和城市进一步的发展规划提出科学建议, 不仅有利于城市生态环境良性发展, 也有利于人类社会健康和城市可持续发展^[1-5]。

在元素来源研究的方法上, 目前主要有元素形态分析法^[6-7]、剖面分析法^[8]、空间分布分析法^[9]等。综合运用这些方法可以比较直观地区别出人为来源与土壤母质残留的不同重金属, 但是通过以上方法来辨别人为来源重金属进入土壤的具体途径, 目前尚无更多报道。因此, 多元统计分析方法——因子分析法在近

收稿日期: 2011-04-06

作者简介: 李瑞平(1985—), 女, 陕西咸阳人, 在读硕士, 研究方向为污染修复工程。E-mail: lirui ping858@163.com

* 通讯作者: 李光德 E-mail: liguangde@sdau.edu.cn

年来被广泛运用于土壤重金属来源研究^[10-11]。

随着旅游城市功能的进一步完善和提升,以及工农业的快速发展,本文旨在通过对泰安城市表层土壤中重金属的调查,了解泰安城市土壤中重金属的富集特征和环境风险;同时,利用因子分析对泰安市土壤重金属污染评价尚未见报道,评价和研究泰安市土壤重金属污染程度、污染来源,并提出针对性的防治措施,对泰安市的重金属污染治理和进一步的城市规划具有参考价值和一定的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鲁中山区位于山东省中南部,是山东省地势最高的区域,区域内地貌类型复杂,土地利用方式多样,属于山东的传统农业区。泰安市是鲁中南山区的代表区域,位于东经 116°20′~117°59′,北纬 35°38′~36°28′,面积 7 762 km²,人口 551.7 万人,人均占有土地 0.15 hm²,可利用土地 67.2 万 hm²,占总面积的 86.6%。地势自东北向西南倾斜,境内拥有多种地貌类型如山地、丘陵、平原等。气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,寒暑适宜,光温同步,雨热同季。年平均气温 13.5℃,平均日照 2 627 h,降水量年际变化大,年平均降水量 719.2 mm,无霜期平均 195 d。全市土壤类型多样,主要有棕壤、褐土、砂姜黑土、潮土、山地草甸型土和风沙土六大类,土壤 pH 值为中性。土壤的粘化作用强烈,还产生较明显的淋溶作用。

1.2 样品采集与处理

按照《农田土壤环境质量监测技术规范》的规定,采用 1 km×1 km 网格法均匀布点。采样时,用 GPS 准确定位,不锈钢铲采集 0~20 cm 的耕层土壤,共采集了 110 个样品。将样品置于室内自然风干,剔除大石

块、植物根系等杂质,采用四分法反复取土至 200 g 左右,磨细过 100 目尼龙筛,装袋密封备用。图 1 为采样点分布图。

1.3 分析测定方法

土壤样品采用 HNO₃-HClO₄-HF 法消解,其中的 Hg 用冷原子吸收法测定,Cu、Zn、Cr 和 Ni 用原子吸收分光光度法测定,Pb 和 Cd 用石墨炉原子吸收分光光度法测定,具体方法参照国家标准^[12-14]。为了控制测定的准确度,在进行上述元素分析时,每 10 个测定样品用标准土壤样品校验。10%~20%的平行样分析用于控制测定的精密度,绝大多数平行样之间的相对平均偏差小于 5%。所用试剂均为优级纯。数据的处理采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 完成。

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤重金属含量统计特征

研究区土壤样品某些重金属元素含量基本统计特征、山东省土壤元素背景值^[15]及土壤环境质量二级标准值见表 1。

与国家土壤环境质量二级标准(算术平均值)相比,泰安市农田表土中 Hg、Ni、Cu 的最大值超过了国家标准,而 Cd、Cr、Zn、Pb 无论是平均值还是最大值均没有超过国家标准。所采取的 110 个样点中,16%样点的 Hg、Cu 元素和 21%样点的 Ni 元素超过了国家土壤环境质量二级标准,因而存在农业安全生产的隐患。

与山东省土壤元素背景值(算术平均值)相比,泰安市农田表土中 Hg、Ni 的富集程度较高,Cd、Zn、Cu 等重金属元素的含量高于全国土壤元素的算术平均的背景值,而 Cr、Pb 的富集程度较低。

表层土壤中 Hg 的含量范围为 0.029~0.582 mg·kg⁻¹,算术平均值为 0.338 mg·kg⁻¹,是山东省土壤元素



图 1 研究区采样点位分布图

Figure 1 Distribution of sampling points

表 1 泰安市农田土壤中重金属含量的统计特征(n=110)

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in Taian City(n=110)

项目	Hg	Zn	Ni	Cd	Pb	Cr	Cu
最小值/mg·kg ⁻¹	0.029	32.555	26.957	0.035	0.856	15.269	10.974
最大值/mg·kg ⁻¹	0.582	173.589	59.352	0.251	50.730	142.243	101.346
平均值/mg·kg ⁻¹	0.338	65.558	37.886	0.091	15.337	60.043	25.244
中位数/mg·kg ⁻¹	0.350	61.385	37.146	0.092	13.448	62.241	22.645
众数/mg·kg ⁻¹	0.213	32.555	59.352	0.042	0.856	15.269	10.974
方差/mg·kg ⁻¹	0.012	433.122	39.341	0.002	60.566	592.424	119.114
变异系数/%	75.4	75.6	85.4	70.8	70.9	72.2	71.6
山东土壤背景值/mg·kg ⁻¹	0.019	63.500	25.800	0.084	25.800	66.000	24.000
土壤环境质量二级标准/mg·kg ⁻¹	0.5	250	50	0.3	300	200	100

注:土壤环境质量二级标准出自《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》。

背景值的 17.8 倍。

所研究样品中 Ni 含量的最小值为 26.957 mg·kg⁻¹, 最大值为 59.352 mg·kg⁻¹, 平均值 37.886 mg·kg⁻¹, 是土壤元素背景值的 1.5 倍。

Cu 含量的最小值为 10.974 mg·kg⁻¹, 算数平均值为 25.244 mg·kg⁻¹, 是土壤元素背景值的 1.1 倍, 其最大值为 101.346 mg·kg⁻¹, 约为背景值的 4.2 倍。

比较中位数与平均值可以发现, 7 种元素中有 3 种元素(Hg、Cd、Cr)中位数略大于平均值, 证明数据的正态分布特征偏右, 反映了由于工业发展和其他因素导致研究区元素含量超过原始水平, 但是情况尚不严重。对比众数和平均值, 只有 1 个元素(Ni)的众数高于平均值, 多数重金属元素的众数小于平均值, 说明元素叠加情况明显, 数值离散性较大, 方差数值较高也证明了上述特征。

由表 1 可以看出, 泰安市农田土壤重金属含量有较大的变异, 7 种元素的变异系数都在 70% 以上, 其中变异系数最大的为 Ni(85.4%), 其次为 Zn(75.6%)。变异系数的大小反映总体内部各样本之间的变异程度, 变异系数越大, 元素在土壤中含量的分布越不均匀, 说明受人类活动影响越大^[6]。7 种元素在土壤之间较大的变异性反映了这些元素的分布具有较大的波动性, 这种波动性很大程度上是由人类活动引起的。

2.2 研究区土壤重金属污染潜在生态风险评估

本文采用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法对泰安市农田土壤重金属污染情况进行评价。该方法不仅考虑了土壤重金属的含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 采用具有可比的等价属性指数分级法进行评价^[7]。其公式如下:

(1) 单项污染系数 $C_i^* = C_{\text{表层}} / C_n^i$

(2) 潜在生态危害单项系数 $E_i^* = T_i \times C_i^*$

(3) 潜在生态危害指数 $RI = \sum E_i^*$

式中: $C_{\text{表层}}^i$ 为表层土壤重金属浓度实测值; C_n^i 为计算所需的参比值, 本文选用山东省土壤背景值; T_i 为某一重金属的毒性响应系数, 以 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数为评价依据, 有关毒性系数为 Cd=30、Pb=5、Cu=5、Ni=5、Cr=2、Zn=1、Hg=40^[18-19]。

重金属污染潜在生态危害分级标准见表 2。

表 2 潜在生态风险评价指标与分级关系

Table 2 Indices and grades of potential ecological risk assessment

潜在生态危害 单项系数 E_i^* 范围	单项潜在生 态风险程度	潜在生态危害 指数 RI 范围	总的潜在生 态风险程度
$E_i^* < 30$	低	$RI < 110$	低度
$30 \leq E_i^* < 60$	中	$110 \leq RI < 220$	中度
$60 \leq E_i^* < 120$	较重	$220 \leq RI < 440$	重度
$120 \leq E_i^* < 240$	重	$RI \geq 440$	严重
$E_i^* \geq 240$	严重		

对泰安市农田土壤中重金属的潜在生态危害单项系数进行频数分析, 由表 3 的频数分布表可知, 泰安市农田土壤中 Zn、Pb、Cr、Ni 4 种元素的潜在生态风险均处于低危害水平, 暂时不会对农业生产造成危害, 而 Hg、Cd、Cu 3 种元素则均存在不同程度的潜在生态风险。在 110 个样点中, 大约有 70% 样品 Hg 的潜在生态危害达到较重水平, 有 50% 样品 Cd 的潜在生态危害达到中度及以上水平, 有 54.5% 样品的 Cu 潜在生态危害达到重度的水平。因此 Hg、Cd、Cu 对总的潜在生态风险指数的贡献率最大, 即生态危害最为严重。

对于农田土壤而言, 重金属的潜在生态风险达到中度及以上水平时都会或多或少地影响到农产品的产量和质量。在本研究中, 有 78 个样点(占总数的

表 3 泰安市农田土壤重金属元素潜在生态危害系数频数分布

Table 3 Frequencies of potential ecological hazard coefficients about heavy metal in Taian City

潜在生态危害 单项系数 E_i^p 范围	单项潜在生 态风险程度	潜在生态危害频率/%						
		Hg	Zn	Ni	Cd	Pb	Cr	Cu
$E_i^p < 30$	低	6.4	100	100	43.6	100	100	0
$30 \leq E_i^p < 60$	中	22.7	0	0	52.7	0	0	1.9
$60 \leq E_i^p \leq 120$	较重	70	0	0	3.7	0	0	43.6
$120 \leq E_i^p < 240$	重	0.9	0	0	0	0	0	54.5
$E_i^p \geq 240$	严重	0	0	0	0	0	0	0

70.9%)的重金属潜在生态风险等级属于中度水平,这些样点的分布比较分散,其他样点的潜在生态风险均处于中度水平以下。因此,泰安市在进行农业生产时,优先要控制的污染元素是 Cu,其次为 Hg 和 Cd。应增强农田土壤的安全性,严格控制土壤污染,推行标准化农业生产,对于生态风险较高的农田,应对其进行限制生产,并采取一定的措施进行修复。

2.3 研究区土壤重金属元素的相关性分析

重金属元素之间的相关性在一定程度上反应了这些元素污染程度的相似性或污染元素有相似的来源^[20]。由表 4 的皮尔森相关系数可知,泰安市农田土壤中 Hg 与 Zn 之间呈极显著负相关,说明 Zn 与 Hg 为异源物质的可能性大。Zn 与 Ni、Zn 与 Cu、Ni 与 Cr、

Ni 与 Cu 之间分别呈极显著正相关,且 Zn、Cu 之间的相关系数达 0.740,说明它们的来源极为相似。

2.4 研究区土壤重金属元素的因子分析

在进行污染来源分析时,来自同一污染源的污染物之间一般存在一定的相关性,反映的信息具有一定的重叠^[21]。因子分析法能够很好地将元素按照相关性密切程度分类,从而通过各因子中的特征元素,判断该因子中的元素来源。该方法广泛运用于土壤或沉积物乃至大气沉降元素来源的识别研究中^[11,22-23],本文采取因子分析法来识别土壤重金属的来源。

由表 5 可以看出,泰安市农田土壤中 7 种重金属的全部信息可由前 3 个因子反映 65.27%,即对前 3 个因子进行分析能够反映全部数据的大部分信息。旋

表 4 泰安市农田土壤重金属的皮尔森相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient of heavy metal concentrations in Taian City

元素	Hg	Zn	Ni	Cd	Pb	Cr	Cu
Hg	1						
Zn	-0.246**	1					
Ni	-0.193*	0.328**	1				
Cd	-0.162	0.140	0.093	1			
Pb	0.130	-0.234*	-0.121	0.055	1		
Cr	-0.198*	0.202*	0.450**	0.034	-0.191*	1	
Cu	-0.213*	0.740**	0.436**	0.070	0.093	0.198*	1

注:** 表示相关性为 0.01 水平,* 表示相关性为 0.05 水平。

表 5 泰安市农田土壤重金属元素的因子分析

Table 5 Factor analysis of heavy metal in Taian City

元素	初始因子载荷阵			方差最大正交旋转后的因子载荷阵		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Hg	-0.475	-0.159	-0.480	-0.154	-0.376	-0.510
Zn	0.798	0.189	0.410	0.900	0.154	0.162
Ni	0.697	-0.152	-0.179	0.596	0.385	0.193
Cd	0.214	0.694	0.134	0.102	0.136	0.836
Pb	-0.345	0.558	0.142	-0.113	-0.573	0.299
Cr	0.552	-0.427	0.417	0.504	0.142	0.424
Cu	0.795	0.200	0.451	0.925	0.125	0.137
贡献率%	34.982	15.692	14.597	26.486	22.184	16.600

转前后因子载荷的差别较大,变量与一个因子的联系系数绝对值(载荷)越大,则该因子与变量关系越近,因此采用旋转后的正交因子载荷阵进行分析。

因子 1 的贡献率是 26.486%,Zn、Cu 这两种元素的浓度在该因子上具有较高的正载荷,其相应的因子载荷值分别为 0.900、0.925,这反映了它们的富集特征。由表 4 可知,Zn 与 Ni、Cu 与 Ni、Ni 与 Cr 之间分别呈极显著正相关,因此,这 4 种元素同源的可能性非常大。采矿活动可导致煤矿区及其周围土壤 Zn、Cu、Ni 等重金属元素的积累,其中煤矿开采所产生的固体废物——煤矸石的堆积和风化被认为是造成重金属积累的重要原因。煤矸石当中往往含有较多的 Zn、Cu、Ni、As 等重金属,长期堆积和风化会向周围土壤缓慢地释放重金属,会导致重金属在附近土壤中的积累。这与 Boruvka 等在捷克东北部的研究认为元素 Cu、Zn、Ni 和 Cr 主要为地质来源一致^[24]。从 Zn、Cu 对因子 1 的贡献可以理解因子 1 主要反映了泰安市的矿业活动以及与矿业活动有关的工业活动对市区近郊农田土壤重金属的污染情况,故将其称之为“工矿污染因子”。

因子 2 贡献率为 22.184%,高载荷的指标是 Pb。根据文献,城市中 Pb 的主要来源为颜料生产、冶炼等工业的废水以及橡胶和农药厂。近年来,泰安市的纺织、服装业以及皮革制造业迅速发展,泰安市周边地区分布着恒大纺织印染有限公司、泰东染织厂和山东岱银纺织集团股份有限公司等十几家纺织印染企业,纺织业的污水灌溉是泰安市农田土壤 Pb 污染的主要来源。另外,随着泰安市旅游城市功能的进一步完善和提高,汽车尾气的排放和轮胎的磨损是泰安市 Pb 污染的另一个基本来源,在城市土壤中 Pb 常被作为机动车污染源的标识元素^[25-26]。因此,将因子 2 称之为“商业活动污染因子”。

因子 3 的贡献率为 16.600%,高载荷的指标有 Cd、Hg,泰安市处于缺水的华北平原的东部,污水灌溉现象比较严重,导致土壤中重金属 Cd、Cr、As、Cu、Zn、Pb 等含量的增加。化肥和农药的使用也会导致土壤重金属的污染。一般过磷酸盐中含有较多的重金属 Hg、Cd、As、Zn、Pb,磷肥次之,氮肥和钾肥中含量较低,Cd 一般可作为施用农药和化肥等农业活动的标识元素^[27-29]。大量重复使用塑料地膜和含重金属的无机农药也加重了农田土壤中 Cd、Hg、Pb 的污染。据统计,2008 年泰安市化肥施用量为 64.06 万 t(实物量),地膜使用量为 1.5 万 t,农药施用量为 8 161 t。另一方

面,泰安市地表土 Hg 污染的一个主要原因是燃煤及落后的燃烧方式,无论是工业用煤还是居民用煤。民用采暖燃煤温度较低,排放烟筒较低,经干湿沉降,Hg 随烟尘颗粒物主要在附近沉降,加重其在农田中的积累。可见,因子 3 表征了农业生产活动以及居民生活对泰安市农田土壤重金属污染的影响,将其称之为“农业活动和居民生活污染因子”。

3 结论

(1)泰安市农田表土中 Hg、Ni 的富集程度较高,Cd、Zn、Cu 等重金属元素的含量高于全国土壤元素的算术平均的背景值,而 Cr、Pb 的富集程度较低。其中 Hg、Ni、Cu 的最大值超过了国家土壤环境质量二级标准,累计污染现象和程度较高。

(2)不同重金属含量间相关性分析表明,Cu、Zn、Ni、Cr 之间呈极显著相关,说明泰安市农田土壤中这 4 中元素污染源可能相同,主要来自泰安市的矿业活动以及与矿业活动有关的工业活动。因子分析表明,泰安市农田土壤中重金属 Pb 一方面主要来自泰安市的纺织、服装业以及皮革制造业的污水,另一方面来自汽车尾气的排放和轮胎的磨损。农田土壤中 Cd 和 Hg 主要来自农药、化肥及地膜的大量使用,其中居民和工业的燃煤也对泰安市农田土壤中 Hg 的污染贡献比较大。泰安市农田土壤中的重金属主要来源有三个方面,即:工矿企业污染源,商业活动污染源,农业活动和居民生活污染源。

(3)由潜在生态风险评价可知,70.9%的土壤样点的重金属潜在生态风险等级达到中度水平,Zn、Pb、Cr、Ni 4 种元素的潜在生态风险处于低危害水平,而 Hg、Cd、Cu 3 种元素则均存在不同程度的潜在生态风险,其中大约有 70%样品 Hg 的潜在生态危害达到较重水平。基于农产品质量安全的重要性,在进行粮食生产的同时,应增强农田土壤的安全性,严格控制土壤污染源,推行标准化农业生产。

参考文献:

- [1] Kim K W, Myung J H, Ahn J S, et al. Heavy metal contamination in dusts and stream sediment in the Taejon area[J]. *Korea J Geochemical Exploration*, 1998, 64: 409-419.
- [2] Tong S T Y, Kin C L. Home sweet home: A case study of household dust-contamination in Hong Kong[J]. *Sci Total Environ*, 2000, 256: 115-123.
- [3] Li Xiangdong. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 1361-1368.
- [4] Imperato M, Adamo P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124: 247-256.

- [5] Abrahams P W. Soils: Their implications to human health [J]. *The Science of Total Environment*, 2002, 291: 1–32.
- [6] 刘杰, 钟雪梅, 梁延鹏, 等. 电镀废水污染水稻田土壤中重金属的形态分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 398–401.
LIU Jie, ZHONG Xue-mei, LIANG Yan-peng, et al. Fractionations of heavy metals in paddy soils contaminated by electroplating wastewater [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 398–401.
- [7] CHEN W, QIAN G R, LIM T T, et al. Speciation of heavy metals in surface sediments from Suzhou Creek [J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2007, 11(4): 415–425.
- [8] Tyler G. Vertical distribution of major, minor, and rare elements in a Haplic Podzol [J]. *Geoderma*, 2004, 119(3–4): 277–290.
- [9] Hamlett J M, Miller D A, Day R L, et al. Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution [J]. *Soil and Water Cons*, 1992, 47(5): 399–404.
- [10] Slavkovic L, Skrbic B, Miljevic N, et al. Principal component analysis of trace elements in industrial soils [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2004, 2(2): 105–108.
- [11] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 84–88.
WANG Xue-song, QIN Yong. Accumulation and identification of heavy metals in Xuzhou urban topsoil [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(1): 84–88.
- [12] GB/T 17138—1997, 土壤质量铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17138—1997, Soil quality—determination of copper, zinc—flame atomic absorption spectrophotometry[S].
- [13] GB/T 17139—1997, 土壤质量镍的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17139—1997, Soil quality—determination of nickel flame atomic absorption spectrophotometry[S].
- [14] GB/T 17141—1997, 土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
GB/T 17141—1997, Soil quality—determination of lead, cadmium—graphite furnace atomic absorption spectrophotometry[S].
- [15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
Chinese General Station of Environmental Monitoring. The background values of elements in soils of China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [16] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 等. 河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2139–2146.
ZHANG Li-hong, XU Hui-zhen, YU Qing-chun, et al. The investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland soil and crop in the Qingyuan of Hebei, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2139–2146.
- [17] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 108–112.
GUO Ping, XIE Zhong-lei, LI Jun, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 108–112.
- [18] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [19] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的作用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, 1: 111–116.
ZHAO Qin-na, XU Qi-xin, YANG Kai. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2005, 1: 111–116.
- [20] 王美青, 章明奎. 杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 603–608.
WANG Mei-qing, ZHANG Ming-kui. Concentrations and chemical associations of heavy metals in urban and suburban soils of the Hangzhou City, Zhejiang Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 603–608.
- [21] 丁海霞, 南忠仁, 刘晓文, 等. 金昌市郊农田土壤重金属的污染特征 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2183–2188.
DING Hai-xia, NAN Zhong-ren, LIU Xiao-wen, et al. Characteristics of selected heavy metal pollution in suburb cropland, Jinchang City, Gansu, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2183–2188.
- [22] 刘俊华, 王文华, 彭安. 降水中汞及其他元素来源的识别分析[J]. 环境科学, 2003, 21(2): 77–80.
LIU Jun-hua, WANG Wen-hua, PENG An. The source of mercury in rainfall in Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 21(2): 77–80.
- [23] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区 As 等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 213–222.
TANG Qi-feng, YANG Zhong-fang, ZHANG Ben-ren, et al. A study of elements flux and sources from atmospheric bulk deposition in the Chengdu Economic Region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 213–222.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain) [J]. *Environmental Technology*, 1996, 17(7): 763–770.
- [27] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 267–277.
- [28] 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.
- [29] 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): 3496–3501.
CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. 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 [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(12): 3496–3501.