

金昌市郊农田土壤重金属的污染特征

丁海霞, 南忠仁, 刘晓文, 李 媛, 王胜利, 秦 松, 赵转军

(兰州大学西部环境教育部重点实验室 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:以金昌市郊农田表层土壤(0~20 cm)为研究对象,研究了土壤中重金属 Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 的含量情况及可能来源,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,金昌市郊农田土壤重金属的累积现象比较明显,尤其是 Cu、Ni,二者的几何平均值均超过了国家土壤环境质量二级标准(GB15618—1995)。相关性分析表明 Cu 与 Ni、Pb 与 Cd 之间分别呈显著正相关;Pb 与 Ni、Cu 之间则呈显著负相关。因子分析显示,研究区土壤中的 Cu 和 Ni 主要来源于工矿业活动;农业生产活动则对 Zn、Cd、Pb 的贡献最大。潜在生态风险评估的结果为 Pb、Zn 这两种元素的潜在生态风险均处于低危害水平,Cd、Cu、Ni 则均存在不同程度的潜在生态风险,具体的潜在生态风险排序为 Cd>Cu>Ni>Pb>Zn。

关键词:金昌;资源型城市;农田土壤;重金属;来源;潜在生态风险

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2183-06

Characteristics of Selected Heavy Metal Pollution in Suburb Cropland, Jinchang City, Gansu, China

DING Hai-xia, NAN Zhong-ren, LIU Xiao-wen, LI Yuan, WANG Sheng-li, QIN Song, ZHAO Zhuan-jun

(National Laboratory of Western China's Environmental System & College of Resource and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The contents of toxic metal Zn, Ni, Pb, Cu, and Cd were investigated by sampling the topsoil(0~20 cm) from suburb croplands in Jinchang city, and the possible origination of pollutants speculated. The results indicated that the metals studied had obvious accumulation in suburb cropland. The geometric mean concentrations of Cu and Ni were higher than the critical value of second grade in national soil environmental quality standards, but the levels of others lower than the standards(GB15618—1995). The correlation analysis indicated that there were markedly significant positive correlations between Cu and Ni, and between Pb and Cd. As for Pb and Ni, there existed nicely significant negative correlations, and the same with Pb and Cu. The results from factor analysis suggested that Cu and Ni in the soils studied were mainly originated from industrial and mining activities; and agricultural activities had the largest impact on the accumulation of Zn, Cd, and Pb. The potential ecological risk assessment showed that the risks of Pb and Zn were on a low level, but Cd, Cu, and Ni existed different degrees of risk. The order of potential ecological risk was Cd>Cu>Ni>Pb>Zn.

Keywords: Jinchang city; resource-based city; cropland; heavy metal; origination; potential ecological risk assessment

近年来,由于资源开发导致的土壤重金属污染和随之而来的环境及人体健康风险问题已引起国内外学者的广泛关注^[1-4]。许多学者已对资源型城市的大气和水环境问题进行过大量深入和系统的研究^[5-8],目前有关资源型城市土壤重金属污染的研究主要集中在污染比较严重的矿区及人口分布比较集中的城区^[6,9-12],

有关资源型城市市郊农田土壤重金属研究也有一些报道^[1,13-14],但是有关干旱区资源型城市市郊农田土壤重金属的研究相对较少。

“镍都”金昌是以硫化型金属矿为原料生产镍铜的资源型城市,矿产的开发推动了金昌市城市的发展和经济的增长,但是长期的 Ni、Cu 等金属的开采、冶炼以及化工生产也给金昌市及周围的生态环境造成了很大的影响^[6]。大气中二氧化硫、氯气及粉尘的污染,冶炼厂、选矿厂酸性废水的排放,农田土壤重金属污染都已成为金昌市亟待解决的环境问题。本文在野外调查和室内实验分析的基础上,对金昌市郊农田土

收稿日期:2008-01-08

基金项目:国家自然科学基金(40671167)

作者简介:丁海霞(1983—),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为污染过程与生态修复。E-mail:dinghx06@lzu.cn

通讯联系人:南忠仁

壤重金属含量的污染特征及可能来源进行了研究,并做了相关的潜在生态风险评估,以揭示资源型城市人类活动对农田土壤重金属累积的影响,并为当地的土壤重金属污染治理和农产品安全保障提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金昌市位于中国西北部,甘肃省西部,地处河西走廊东段,祁连山北麓,阿拉善南缘。该区域昼夜温差大,年均气温 4.8 ℃,年均日照 2 878 h,无霜期 134 d,多年平均降水量在 100 mm 左右,年蒸发量是降水量的 24 倍。当地农业均为灌溉型,水分缺乏是当地农业发展的主要限制因素。

金昌市有色金属矿储量比较丰富,特别是以镍为主的铂族贵金属矿藏得天独厚,被誉为“中国的镍都”。截至 2002 年底,全市有污染工业企业 107 个。由于开矿,全市每年产生矿山尾矿、固体废物 460 多万 t,占地面积近 10 hm²;全市废水产生量为 3 586.39 万 t,其中废水排放量达 2 086.39 万 t^[9]。

1.2 样品采集与处理

2007 年 7 月,采用 1 km×1 km 网格法进行均匀布点,在金昌市郊采集了 68 个农田土壤样品。采样时,用 GPS 进行准确定位,不锈钢铲取土,所采集的样品均为 0~20 cm 的耕层土壤。采集的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。

1.3 分析测定方法

土壤样品采用 HNO₃-HClO₄-HF 法消解,0.5%的稀硝酸定容,用原子吸收光谱仪测定 Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 这 5 种重金属元素的含量,具体测定方法参照了国家标准^[16-18]。分析过程中加入国家标准土壤样品 GSS-1(GBW—07401)进行分析质量控制,每种元素的测定值均在国家标准参比物质的允许误差范围之内。分析样品选取 20%的平行双样进行精密度评价,绝大多数平行双样之间的相对平均偏差小于 5%。该过程中所用试剂均为优级纯。数据的处理由 Excel 2003 和 SPSS13.0 完成。

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤重金属含量统计特征

金昌市近郊农田土壤重金属元素含量分析结果见表 1。

表 1 金昌市郊农田土壤重金属元素统计特征值(mg·kg ⁻¹)					
Table 1 Descriptive statistics of heavy mental concentrations in suburb cropland of Jinchang city (mg·kg ⁻¹)					
	Zn	Ni	Pb	Cu	Cd
最小值	25.07	30.72	10.01	24.25	0.043
最大值	697.32	1 355.51	62.66	985.40	0.912
算术平均值	129.14	226.40	38.39	194.61	0.196
几何平均值	109.75	138.26	35.37	127.12	0.155
中位数	97.40	120.22	40.50	113.26	0.147
变异系数/%	77.6	136.3	33.2	117.5	79.6
甘肃土壤背景值 ^a	69.3	35.2	18.8	24.1	0.116
土壤环境质量二级标准 ^b	300	60	350	100	0.6
土壤环境质量三级标准 ^b	500	200	500	400	1.0

注:a 出自李建、郑春江主编的《环境背景值数据手册》;b 出自《土壤环境质量标准(GB15618—1995)》。

对金昌市郊农田所采的 68 个样点数据进行单样本 K-S 检验,结果表明,Pb 元素的含量服从正态分布,Ni、Cu、Cd 元素的含量均服从对数正态分布,因此取 Pb 的算术平均值和 Ni、Cu、Cd 的几何平均值作为描述总体大小特征的统计量;Zn 元素的含量既不服从正态分布也不服从对数正态分布,取其中位数来描述 Zn 元素含量的大小特征。

由表 1 可知,金昌市郊农田表土中 Zn 元素的中位数明显高于甘肃土壤背景值,最大含量为背景值的 10 倍;Ni、Cu 的几何平均值分别是甘肃土壤背景值的 3.9、5.3 倍,最大值达到了背景值的 38.5、41 倍;另外,Pb 的算术平均值和 Cd 的几何平均值也远远超过了甘肃省的背景含量。可见,Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 这 5 种元素在金昌市郊农田中均有明显的累积现象。

与国家土壤环境质量二级标准相比,Cu、Ni 的几何平均值都超过了国家标准,而 Zn、Ni、Pb 3 种元素无论是平均值还是中位数均没有超过国家标准。所采取的 68 个样点中,Cu 元素 50.7%的样点和 Ni 元素 87.3%的样点超过了国家土壤环境质量二级标准,个别样点的 Cu、Ni 含量还超过了国家三级标准,存在着农业安全生产隐患。

由表 1 可以看出,金昌市郊农田土壤重金属含量有较大的变异。除 Pb 元素的变异系数相对较小外(33.2%),其他重金属元素均在 70%以上,其中变异系数最大的为 Ni(136.3%),其次为 Cu(117.5%)。Ni、Cu、Zn、Cd 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。而 Pb 相对较小的变异性反映了这种元素分布相对比较均匀。

2.2 土壤重金属元素的相关性分析

由于 Zn 的含量既不服从正态分布也不服从对数正态分布,因此,只对 Ni、Pb、Cu、Cd 4 种元素进行相关性分析。分析结果如表 2。

表 2 金昌市郊农田土壤重金属的皮尔森相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of heavy metal concentrations in suburb cropland, Jinchang city

元素	Ni	Pb	Cu	Cd
Ni	1			
Pb	-0.434**	1		
Cu	0.974**	-0.363**	1	
Cd	-0.193	0.751**	-0.114	1

注:** 表示相关性为 0.01 水平。

重金属元素之间的相关性在一定程度上反映了这些元素污染程度的相似性或污染元素有相似的来源^[9]。由表 2 的皮尔森相关系数可知,金昌市农田土壤中的 Cu 与 Ni、Pb 与 Cd 之间分别呈显著正相关,且 Cu、Ni 之间的相关系数高达 0.974,说明他们的来源极为相似。土壤中 Pb 与 Ni、Cu 之间则呈显著负相关,说明 Pb 与 Ni、Cu 为异源物质的可能性比较大。以上结果除 Pb 与 Cd 之间的关系与廖晓勇等^[9]的研究结果一致外,其他均存在一定的差别。

2.3 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。因子分析可以通过降维的方式将变量归结为数量较少的几种综合因子,这些综合因子之间既互不相关,又能反映原有变量的所有信息。因此,本文采取因子分析法来识别土壤中重金属的来源。

由表 3 可以看出,金昌市郊农田土壤中这 5 种元素的全部信息可由前两个因子反映 87.2%,即对前两个因子进行分析已经能够反映全部数据的大部分信息。由上表还可以看出,旋转前后的因子载荷阵差别比较大,此时如果将初始因子载荷阵看作是主成分系数矩阵,分析结果将会产生较大偏差,因此采用旋转后的正交因子载荷阵进行分析。

因子 1 的贡献率为 47.7%,Ni、Cu 这两种元素的浓度在该因子上具有比较高的正载荷,其相应的因子载荷值分别为 0.986、0.980,这反映了他们的富集特征。由表 2 可知,Ni、Cu 两种元素的相关系数非常高,二者同源的可能性非常大。金昌矿区蕴藏着中国最大的铜镍硫化物矿床,Ni 和 Cu 是该矿业城市的主要矿

表 3 金昌市郊农田土壤重金属元素的因子分析

Table 3 Factor analysis of heavy mental in suburb cropland, Jinchang 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	
	1	2	1	2
Zn	0.513	0.736	0.018	0.905
Ni	-0.843	0.517	0.986	-0.072
Pb	0.870	0.090	-0.654	0.580
Cu	-0.817	0.543	0.980	-0.035
Cd	0.656	0.638	-0.160	0.901
贡献率	56.5%	30.7%	47.7%	39.5%

产品^[6]。长期的矿业开采和冶炼活动导致这两种元素在当地农田土壤中有较高的累积。从 Ni、Cu 对因子 1 的贡献可以理解因子 1 主要反映了金昌地区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,将其称之为“工矿业污染因子”。因子 1 中,Pb、Zn、Cd 的因子载荷值均比较小,而当地矿石中这几种元素的含量相对较低,这从反方面进一步说明了因子 1 所代表的实际意义。

因子 2 贡献率为 39.5%,高载荷的指标有 Zn、Cd,对应因子载荷值分别为 0.905、0.901,另外,Pb 的载荷值也超过了 0.5。金昌地处严重缺水的大西北,污水灌溉现象比较严重。污灌导致土壤中重金属 Hg、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Pb 等含量的增加^[20]。此外,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,氮肥和钾肥含量较低,但氮肥中铅含量较高,其中 As 和 Cd 污染严重^[20-21]。据统计,2004 年金昌市化肥施用量为 12.39 万 t(实物量)^[22],长期大量施用化肥将会导致 As、Cd、Zn、Pb 等在农田土壤中的积累。重复使用含重金属的无机农药可使重金属仍留在土壤中^[23]。可见,因子 2 表征了农业生产活动对市郊农田土壤中重金属污染的影响,将其称之为“农业活动污染因子”。

2.4 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来对金昌市郊农田土壤中的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^[24]。其公式如下:

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

(2) 潜在生态危害单项系数(E_i^r): $E_i^r = T_i^r \times C_f^i$

(3)潜在生态危害指数: $RI=\sum E_i^i$
式中: $C_{\text{表}i}^i$ 为土壤重金属浓度实测值; C_n^i 为计算所需的参比值,本文选用甘肃省土壤背景值; T_i^i 为某一重金属的毒性响应系数,根据 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数为评价依据,系数分别为 $Zn=1<Cu=Ni=Pb=5<Cd=30$ ^[25-26]。重金属污染潜在生态危害分级标准见表 4。

表 4 潜在生态风险评价指标与分级关系^[27]
Table 4 Indices and grades of potential ecological risk assessment

潜在生态危害单项系数 E_i^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
$E_i^i<30$	低	$RI<110$	低度
$30\leq E_i^i<60$	中	$110\leq RI<220$	中度
$60\leq E_i^i<120$	较重	$220\leq RI<440$	重度
$120\leq E_i^i<240$	重	$RI\geq 440$	严重
$E_i^i\geq 240$	严重		

对金昌市郊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 5 的频数分布表可知,金昌市郊农田土壤中,Pb、Zn 这两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 Cd、Cu、Ni 这 3 种元素则均存在不同程度的潜在生态风险。68 个样点中,有接近半数的 Cd、40%的 Cu 和 20%的 Ni 的潜在生态危害达到了中度及以上水平,其中,潜在生态风险达到重度水平的 Cd、Cu、Ni 的频率分别为 4.4%、5.9%、7.4%,达到较重水平的 Cd、Cu、Ni 的频率分别占到了 25.0%、8.8%、4.4%。可见,Cd、Cu、Ni 对总的潜在生态风险指数的贡献率最大,也即生态危害最为严重。

表 5 金昌市郊农田土壤重金属元素潜在生态危害系数频数分布
Table 5 Frequencies of potential ecological hazard coefficients about heavy mental in suburb cropland, Jinchang city

潜在生态危害单项系数 E_i^i 范围	单项生态风险程度	潜在生态危害频率/%				
		Zn	Ni	Pb	Cu	Cd
$E_i^i<30$	低	100	79.4	100	60.3	38.2
$30\leq E_i^i<60$	中	0	8.8	0	25.0	32.4
$60\leq E_i^i<120$	较重	0	4.4	0	8.8	25.0
$120\leq E_i^i<240$	重	0	7.4	0	5.9	4.4
$E_i^i\geq 240$	严重	0	0	0	0	0

为进一步比较这 5 种元素对总的潜在生态风险指数的贡献大小,在此对这 5 种元素的潜在生态危害单项系数进行了简单的排序。如图 1 所示,不论是按

算术平均值、几何平均值还是中位数进行比较,这 5 种元素潜在生态危害的排序是一致的,均为 $Cd>Cu>Ni>Pb>Zn$ 。因此,当地在进行农业生产时,优先控制的污染元素应该是 Cd,其次为 Cu 和 Ni。

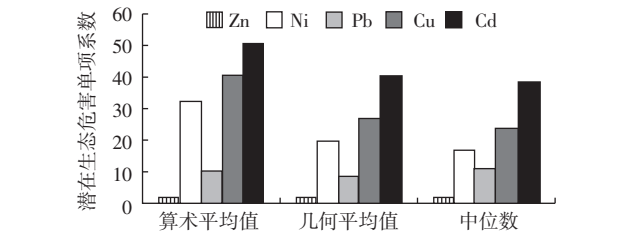


图 1 金昌市郊农田土壤重金属潜在生态危害单项系数统计比较
Figure 1 Statistical comparison of potential ecological hazard individual cofficient about heavy mental in suburb cropland, Jinchang city

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或多或少的会影响到农产品的产量和质量,理应引起人们的注意。在本次研究中,有 10 个样点(占总量的 14.8%)的重金属潜在生态风险等级属于重度水平,这些样点主要分布在下高崖子弃耕地(由于老尾矿坝污染而弃耕);有 23 个样点(占总量的 33.8%)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以下水平,具体的潜在生态危害指数分布如图 1 所示。

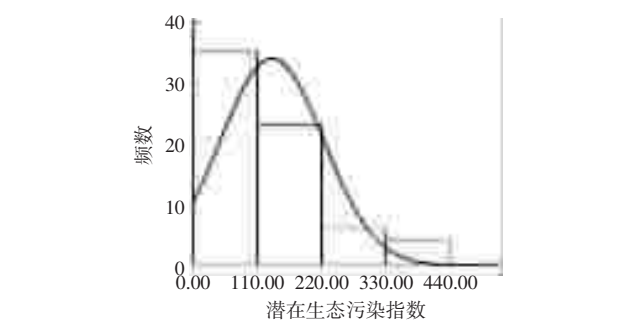


图 2 金昌市郊农田土壤重金属潜在生态危害指数频数分布图
Figure 2 Frequencies of potential ecological hazard indices about heavy mental in suburb cropland, Jinchang city

为进一步说明当地农田的潜在生态风险水平,本次研究还在这 68 个土壤样品采集处采集了 10 个春小麦样品。由于当地土壤中含量比较高的元素为 Cu 和 Ni,因此我们对春小麦中这两种元素的含量进行了测定,全量分析得春小麦种子中 Cu、Ni 的平均含量

分别为 $9.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 的平均浓度已接近食品中 Cu 的限量值 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 目前国家食品卫生标准中还没有 Ni 的限量值, 参考无公害蔬菜卫生标准(Ni 的标准为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)可以看出, 本次实验分析的春小麦种子中 Ni 的含量比较高。在潜在生态风险处于重度水平的下高崖子弃耕地所采集的春小麦种子样品中 Cu、Ni 的含量分别达到了 $11.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Cu 的含量已超过了食品中 Cu 的限量值, Ni 的含量也高于平均值。可见当地农田土壤已存在一定的潜在风险, 部分地区尤其是下高崖子弃耕地附近的土壤已危害到了粮食的质量, 如果不严加控制, 最终可能会对人体健康造成一定的影响。

3 结论

(1) 金昌市近郊农田中 Zn 的含量范围为 $25.07 \sim 697.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni 的含量范围为 $30.72 \sim 1355.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 的含量范围为 $10.01 \sim 62.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 的含量范围为 $24.25 \sim 985.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 的含量范围为 $0.043 \sim 0.912 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 这 5 种重金属元素的算术平均值、几何平均值和中位数均高于甘肃土壤背景值, 其中 Cu、Ni 的几何平均含量还超过了国家土壤环境质量二级标准, 累积污染现象比较严重。

(2) 相关性分析表明 Cu 与 Ni、Pb 与 Cd 之间分别呈显著正相关; Pb 与 Ni、Cu 之间则呈显著负相关。因子分析的结果为, 研究区表层农田土壤中的 Cu 和 Ni 主要来源于工矿业活动; Zn、Cd、Pb 则主要来源于农业生产活动。

(3) 潜在生态风险评估表明, 接近一半的土壤样点的重金属潜在生态风险等级达到了中度及以上水平; 从潜在生态危害单项系数来看, $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Zn}$, 其中, Cu、Ni 和 Cd 存在不同程度的潜在生态危害, Pb、Zn 这两种元素的潜在生态风险则均处于低危害水平。寄予农产品质量安全的重要性, 当地在进行粮食生产的同时, 应增强农田土壤的安全性, 严格控制土壤污染物, 推行标准化农业生产。对于生态风险比较高的农田, 应对其进行限制生产, 并采取一定的措施进行修复。

参考文献:

- [1] 李艳霞, 徐理超, 熊 雄, 等. 典型矿业城市农田土壤重金属含量的空间结构特征—以辽宁省阜新市为例[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 679–687.
- LI Yan-xia, XU Li-chao, XIONG Xiong, et al. The spatial atructure feature of heavy metallis in agricultural aoil of mining city: A case study of

- Fuxin, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4): 679–687.
- [2] Oscar Betancourt, Alberto Narvaez, Marc Roulet. Small-scale gold mining in the Puyango River Basin, southern ecuador: A study of environmental iimpacts and human exposures[J]. *EcoHealth*, 2005, 2: 323–332.
- [3] Israel Razo, Leticia Carrizales, Javier Castro, et al. Arsenic and heavy mental pollution of soil, water and sedimentsin a semi-arid climate mining area in mexico[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 152: 129–152.
- [4] 郭朝晖, 宋 杰, 陈 彩, 等. 有色矿业区耕作土壤、蔬菜和大米中重金属污染[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1144–1148.
- GUO Zhao-hui, SONG Jie, CHEN Cai, et al. Heavy metals contamination for cultivated soils, vegetables and rice in the vicinity of non-ferrous metals industry[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4): 1144–1148.
- [5] 李宏伟. 资源型城市大气污染扩散状况模拟与污染总量控制研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- LI Hong-wei. Research on the simulation of air pollutant dispelling and total amount of pollution control in resource-type city[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006.
- [6] 廖晓勇, 陈同斌, 武 斌, 等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 843–852.
- LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, WU Bin, et al. Mining urban soil pollution: Concentrations and patterns of heavy metals in the soils of Jinchang, China[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 843–852.
- [7] Duran M, Kara Y, Akyildiz G K, et al. Antimony and heavy metals accumulation in some macroinvertebrates in the Yesilirmak River (N Turkey) near the Sb-mining area[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2007, 78: 395–399.
- [8] John M Besser, William G Brumbaugh, Thomas W May, et al. Biomonitoring of lead, zinc, and cadimium in streams draining lead-mining and non-mining areas, southeast missouri, USA [J]. *Environ Monit Assess*, 2007, 129: 227–241.
- [9] Eduardo Ferreira Da Silva, Chaosheng Zhang, Luis Serrano Pinto, et al. Hazard assessment on arsenic and lead in soil of Castromil gold mining area, Portugal[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(6): 887–898.
- [10] 叶玉瑶, 张虹鸥, 谈树成. 个旧城区土壤中重金属潜在生态危害评价[J]. 热带地理, 2004, 24(1): 14–18.
- YE Yu-yang, ZHANG Hong-ou, TAN Shu-cheng. A study on the potential ecological risk of heavy metals in soils of Gejiu Urban Area[J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(1): 14–18.
- [11] 张明亮, 王海霞. 煤矿区矸石山周边土壤重金属污染特征与规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 189–192.
- ZHANG Ming-liang, WANG Hai-xia. Characteristics on soil heavy metal pollution around coal mine waste piles[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 189–192.
- [12] 毛 竹, 张世熔, 李 婷, 等. 铅锌矿区土壤重金属空间变异及其污染风险评价——以四川汉源富泉铅锌矿山为例[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 617–621.
- MAO Zhu, ZHANG Shi-rong, LI Ting, et al. Spatial variability and environmental pollution assessment of soil heavy metal in the vicinity of a lead/zinc mine: A case study from fuquan lead/Zinc in Hanyuan County

- [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):617-621.
- [13] 徐理超, 李艳霞, 苏秋红, 等. 阜新市农田土壤重金属含量及其分布特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1510-1517.
- XU Li-chao, LI Yan-xia, SU Qiu-hong, et al. Contents and spatial distribution patterns of heavy metals in farmland soils of Fuxin city[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1510-1517.
- [14] 徐友宁, 柯海玲, 赵阿宁. 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 732-736.
- XU You-ning, KE Hai-ling, ZHAO A-ning. Assessment of heavy metals contamination of farmland soils in some gold mining area of Xiao Qinling[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 732-736.
- [15] 窦 贤. 中国镍都能走多远? [J]. 西部资源, 2005, 8: 4-6.
- DOU Xian. How far can China's nickel capital go? [J]. *Western Resources*, 2005, 8: 4-6.
- [16] 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].
- [17] 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].
- [18] 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].
- [19] 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.
- [20] 郑喜坤, 鲁安怀, 高 翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79-84.
- ZHENG Xi-shen, LU An-huai, GAO Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 79-84.
- [21] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 188-213.
- WANG Huan-xiao. Pollution Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 188-213.
- [22] 《甘肃年鉴》编委会. 甘肃年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005. 452-455.
- Gansu Yearbook Editorial Board. Gansu Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005. 452-455.
- [23] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 7-8.
- CHEN Huai-man. Soil-Plant System of Heavy Metal Pollution[M]. Beijing: Science Press, 1996. 7-8.
- [24] 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.
- [25] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [26] 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.
- [27] 曹会聪, 王金达, 张学林. 吉林黑土中 Cd、Pb、As 的空间分布及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 89-92.
- CAO Hui-cong, WANG Jin-da, ZHANG Xue-lin. Spatial distribution and potential ecological risk of Cd, Pb, As in Jilin black soil[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(1): 89-92.