

北京市水源涵养区上游万庄金矿田土壤重金属空间分布、形态特征及污染评价

张爱星^{1,2}, 聂义宁^{1,2}, 季宏兵^{1,2,3*}, 冯金国⁴, 秦飞^{1,2}

(1.北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2.北京科技大学国家环境与能源国际科技合作基地, 北京 100083; 3.首都师范大学资源环境与旅游学院首都圈生态环境过程重点实验室, 北京 100083; 4.北京市地质工程设计研究院, 北京 101500)

摘要:对北京市水源涵养地平谷金矿及尾矿库土壤重金属(As、Cd、Cu、Pb、Cr、Ni、Zn 和 Hg)的空间分布特征、形态特征及污染现状进行研究与评价。空间分布图显示, As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 显示出基本相同的分布情况, 污染相对较严重的区域大部分分布在金矿区及周边, 受到人为活动的显著影响; Cr 和 Ni 的空间分布特征表明污染严重的区域为尾矿库矿区周边。采用改进的 BCR 法提取土壤中重金属形态, 采用 ICP-OES 测定。结果表明, Cd 可交换态及易还原态占总量的 20%~30%, Zn、Pb 的易还原态含量较高, 为潜在污染源。利用统计学分析, Pb、As、Hg、Zn、Cd 可能来源于矿山的开采、金属冶炼等人为活动。地累积指数评价结果表明, 研究区域土壤中 8 种重金属的含量, 除 Hg 外基本均处于污染状态, 其中: Ni、Cr、Hg 都处于轻度污染或未污染程度; Cu 个别采样点处于偏中度与中度污染水平; Pb、As、Cd 环境生态污染较严重, 个别采样点达到重度污染水平。

关键词:土壤; 重金属; 空间分布; 形态分析; 地累积指数

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)12-2321-08 doi:10.11654/jaes.2014.12.007

Spatial Distribution, Fractionation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Wanzhuang Gold Mining Field in Upstream Part of Water Conservation Area of Beijing, China

ZHANG Ai-xing^{1,2}, NI Yi-ning^{1,2}, JI Hong-bing^{1,2,3*}, FENG Jin-guo⁴, QIN Fei^{1,2}

(1.Civil & Environment Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.National Environment & Energy International Cooperation, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3.The Key Laboratory of Metropolitan Eco-Environmental Processes, College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4.Beijing Geo-engineering Design and Research Institute, Beijing 101500, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the spatial distribution, fractionation and contamination degree of heavy metals in soils of gold mine and tailings of Pinggu in Beijing. The spatial distributions of As, Cd, Cu, Pb, and Zn were basically the same. Their pollution was more serious in the gold mining and surrounding area, which was obviously affected by human activities. However, the spatial distribution of Cr and Ni showed that the most polluted area was the tailings. Exchange and reducible fractions of Cd accounted for about 20%~30% of the total Cd, respectively. Zinc and Pb were dominated by reducible fraction, which is potential pollution source. Pb, As, Hg, Zn, and Cd came mainly from mine mining, metal smelting and other human activities. The geo-accumulation index showed that the studied areas were seriously polluted by Pb, As and Cd, but slightly by Ni and Cr. The soils had not been contaminated by Hg. Some sample points showed mild and moderate Cu pollution.

Keywords: soil; heavy metals; spatial distribution; fraction analysis; geo-accumulation

重金属因其毒性及环境中的持久性, 被认为是人为环境污染中最严重的污染之一^[1]。其在土壤中主要

有两大来源, 分别是自然源和人为源^[2-3]。前者主要是来自母质岩石的风化, 后者主要是由于农药、动物粪便、化石燃料的燃烧、工业生产中矿山的开采、金属的冶炼等^[4-5]。现在最为引起大家关注的就是工业生产上金属矿的开采遗留的环境问题, 金属矿山的采、选、冶等过程都会给矿区土壤带来不同程度的重金属污染。

收稿日期: 2014-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173113); 中国科学院百人计划项目
作者简介: 张爱星(1988—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: zhangaixing1988@163.com

* 通信作者: 季宏兵 E-mail: jih_0000@126.com

矿山开采过程中,尾矿渣的堆积、金属的选冶、酸性废水的排放等过程中的重金属一般都是与有机物结合后通过大气尘降、水体迁移污染矿区周边的土壤和水系,进而通过植物累积威胁到人类的生命健康^[6-9]。

国内外学者针对各种金属矿区及其周边土壤的重金属污染进行了大量研究^[10-13],主要集中在研究某矿区土壤中重金属的污染现状、来源识别、形态分析、污染评价等方面^[14-15]。部分学者还对不同金属矿区土壤的重金属污染特征进行了对比研究^[16]。李海英等^[17]对炼锌矿区周围的土壤和植物中的 Zn、Cd、Pb、Cu、As 五种重金属的污染现状进行了调查与初步评价;Ioan Suciu 等^[18]对冶金活动较多的罗马尼亚中心地区土壤中的重金属(Pb、Co、Cr、Cu、Hg)的污染现状进行了研究,结果显示研究区域土壤中,大部分均超过本地的背景值,其中铅和铜的污染最为严重;李倩等^[19]对北京市密云水库上游金矿区土壤中重金属的来源识别、污染评价等进行了系统分析。

北京市水源保护地主要为密云、怀柔、平谷等,对于水源地的研究与保护直接关系着人们的饮用水质量与身体健康,大部分学者主要针对水源金属矿区及沉积物的重金属总量污染特征进行了研究,但对于利用多种分析方法对具体某金矿矿山总量分布、来源分析及形态进行综合研究相对较少。因此,本文在基于前人对金属矿山各种研究的基础上,针对北京水源地上游平谷区内的万庄金矿田及尾矿库的土壤进行调查,主要是研究土壤中重金属的空间分布特征及其来源与形态分析,利用地累积指数评价方法进行重金属的污染评价,以期为北京市的重金属污染防治及矿山修复工作提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

平谷位于北京市东北部,为北京市水源地上游地区,与其相邻的密云是首都重要饮用水源地和生态涵养发展区,境内的密云水库是北京最大的也是唯一的饮用水源供应地。平谷境内有河流 20 余条,属海河流域蓟运河水系,自东、北流向西南。洳河系洳河支流,发源于密云县东邵渠乡的银冶岭。金矿及尾矿库主要集中区距离王都庄水源地及中桥水源地较近。

本研究以平谷金矿田及尾矿库的土壤为研究对象,主要在矿区和尾矿库及周边表层土壤(0~20 cm)进行样品的采集(图 1),土壤类型为壤土,共采集样品 25 个。



图 1 研究区域及采样点位置

Figure 1 Schematic map of studied area and sampling points

1.2 样品的采集与分析

根据场地地势、河流方向及重金属扩散方向布设采样点,采集地表 0~20 cm 的表层土壤,要采集每个采样点周围 50 m 范围内的三个土壤子样组合成一件土壤样品并采用四分法处理。所有样品均保存在密封的塑料袋中并编号。土壤样品经过自然风干之后,在烘箱中烘干至恒重,研磨,并过 200 目筛后备用。

采用硝酸-氢氟酸-高氯酸高温溶解土壤样品进行消解,利用电感耦合等离子质谱法在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室测定土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni。采用氢化物发生-原子荧光法测定土壤样品中的 As 和 Hg。采用电位法(水土比为 5:1)利用便携式 pH 计测定土壤 pH 值。利用德国 Elemetar 公司的 Liqui TOC 仪测定样品中总有机碳(TOC)的含量。

重金属元素化学形态分析采用欧共体修正的 BCR 顺序提取法。

(1)可交换态:称取 1.00 g 样品移至离心管中,加入 40 mL 的 0.11 mol·L⁻¹ 醋酸溶液,25 °C 下振荡提取 18 h,然后放入转速为 2500 r·min⁻¹ 的离心机离心 30 min,将上清液转入聚乙烯瓶中保存待测。

(2)易还原态:在上述残留物中加入 40 mL 的 0.5 mol·L⁻¹ 的盐酸羟胺(硝酸调节 pH=2),振荡 18 h,然后 2500 r·min⁻¹ 离心 30 min,将上清液转入聚乙烯瓶中保存待测。

(3)易氧化态:上述残留物中缓慢加入 8.8 mol·L⁻¹ 的双氧水 10 mL,振荡 1 h,85 °C 水浴加热,冷却后加入 40 mL 的 1.0 mol·L⁻¹ 的醋酸氨(醋酸调节 pH=2),振荡 18 h,然后 2500 r·min⁻¹ 离心 30 min,将上清液转入聚乙烯瓶中保存待测。

(4)残渣态:用总量减去上述三种形态含量的测试值。上清液采用电感耦合等离子发射光谱法测定。

采用 Excel、Spee17.0、Origin8.1 和 Arcgis10 等数据处理软件对所测土壤中重金属含量、各种统计学分

析及污染现状的评价进行数据处理及图表绘制。

2 结果与讨论

2.1 矿区土壤重金属污染水平

各采样点土壤重金属最大值、最小值及平均值等见表1。结果显示,平谷矿区土壤中Cd、Pb和As平均超标较大,污染相对较严重,重金属在矿区的富集程度由强到弱为Cd>As>Pb>Zn>Cu>Ni>Cr>Hg。矿区采样点2、3土壤中Cu分别超出北京市背景值5~7倍,Zn超出背景值高达25、13倍,Cd超出背景值高达434、266倍,Pb超出背景值高达95、38倍。采样点1土壤中Pb超出背景值258倍,As超出背景值254倍。这说明金矿区采样点1、2、3重金属富集污染较严重。

2.2 矿区土壤重金属空间分布

随着科学技术的发展,ArcGIS空间分析技术广泛应用于地下水评价、土地利用规划、重金属的分布规律等领域^[20-25]。本研究利用ArcGIS空间插值方法中的Kring插值法来了解研究区域的重金属空间分布特征,结果如图2所示。不同的重金属呈现的空间分布特征存在相当大的可变性。

As、Cd、Cu、Pb和Zn显示基本相同的分布情况,与前人的研究结果基本一致^[26]。污染相对较严重的区域大部分分布在矿区,金矿尾矿的堆积,因雨水的冲刷,可能会随雨水进入到土壤中,进而造成矿区土壤重金属的污染,可见研究区域土壤重金属污染的来源可能为人为源,即矿山的开采。Cr和Ni的空间分布特征相对相似,污染严重的区域为尾矿库矿区周边,呈现富集趋势,但污染均相对较轻,其污染来源可能为尾矿及农业污染源。因堆放尾矿的区域已经覆土,进行了初步的治理,故污染现状相对较轻。Hg在所研究区域内均基本无污染。

2.3 矿区土壤重金属间及其与pH、OM间的相关性分析

统计学中的相关性分析已经被广大国内外学者

广泛应用于研究土壤重金属的领域^[27]。由研究区域土壤重金属之间的相关性情况(表2)可以看出,Zn与Cd、As、Hg及Cd与Cu、Pb、As在土壤中均呈现显著的正相关性,说明其地球化学性质相似,表明其可能具有相同的污染源;Cr与Ni也呈现显著的正相关,相关系数在0.9以上,Cr与Ni为亲铁元素,在一样的外界条件下,表现出一定相同的性质;As和Cu及Hg和Cd均呈现中度正相关性。除Cd与Zn之外,其他重金属均与OM不呈现相关性,表明Cd与Zn的富集可能与土壤中的有机质含量有关。

2.4 矿区土壤重金属来源分析

统计学中的主成分方法已被研究者广泛应用于环境污染影响分析中,近几年也被应用于对土壤污染的研究中^[28-30]。主成分分析方法是多个变量通过线性变换过程,提取出较少变量的多元统计学分析方法。为了解研究区域重金属的来源,本研究利用主成分分析对所研究的8种重金属进行了分析,结果如表3所示。可以分成三种主成分,其总共贡献率达到了95%;Pb、As、Hg、Zn、Cd五种元素构成第一主成分,贡献率为55.8%;Cr、Ni两者主要构成第二主成分,贡献率为24%;Cu元素构成第三主成分,贡献率为14%。PC1中的重金属元素可能来源比较接近,主要来自于人为污染,可能为矿区废水排放、废渣的堆放、尾矿的淋滤作用等。Cu元素与其他元素之间的相关系数差别较大,说明其可能与其他重金属元素来源不同,在此区域中来源相对单一,可能是源于岩石的自然风化。

聚类法通过数据分类得到不同的类或者簇,本文选用其中分层聚类,利用树状图来形象地反映土壤重金属元素间的相似性或亲疏关系,便于更清楚地了解污染物的来源。对金矿区土壤中8种重金属进行聚类分析,从树状图(图3)中可将土壤中重金属分为三聚类:第一聚类包括Pb、As、Hg、Zn、Cd5种元素;第二

表1 矿区及周边土壤重金属含量分析结果统计
Table 1 Statistical results of heavy metal concentrations in soils

元素	样品数量/ 个	金矿、尾矿库矿区及周边土壤/mg·kg ⁻¹				北京市背景值/ mg·kg ⁻¹	平均超标倍数
		最小值	最大值	平均值	标准偏差		
Cu	25	26.50	175.00	60.46	40.18	23.1	2.62
Zn	25	72.00	2 460.00	347.36	582.56	97.2	3.57
Cd	25	0.19	23.20	2.86	5.67	0.053 4	53.56
Cr	25	67.10	177.00	90.24	20.63	66.7	1.35
Ni	25	23.00	91.30	38.60	13.13	28.2	1.37
Pb	25	34.30	6 380.00	553.67	1 303.42	24.7	22.42
As	25	22.00	2 386.00	280.88	525.55	9.4	29.88
Hg	25	0.01	0.13	0.05	0.03	0.057 6	0.87

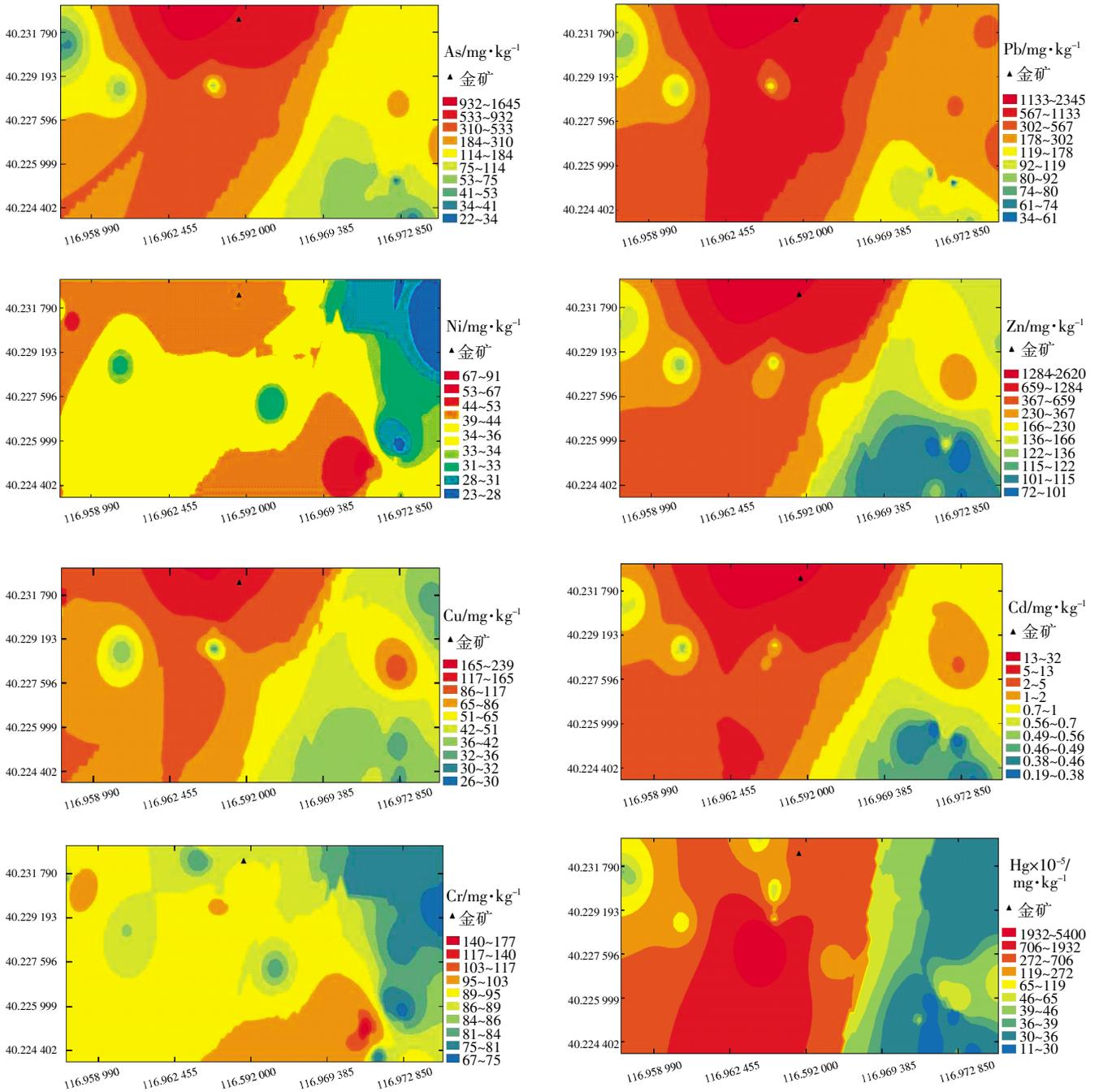


图 2 研究区域金矿及尾矿库矿区及周边土壤重金属空间分布图
Figure 2 Spatial distributions of heavy metals in studied area

聚类包括 Cr、Ni;第三聚类为 Cu。

2.5 矿区土壤重金属污染评价

地累积指数法被广泛应用于土壤及沉积物中重金属的污染评价^[31]。

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}$$

式中： I_{geo} 为地累积指数； C_n 指元素 n 在土壤或沉积物

中的含量， $mg \cdot kg^{-1}$ ； B_n 为该元素的地球化学背景值。

地累积指数与环境污染程度的分级情况见表 4。

由上式计算得出平谷区重金属地累积指数结果如图 4 所示。平谷采样点土壤中 Ni、Cr、Hg 都处于轻度污染或未污染程度；Cu 除个别采样点处于偏中度与中度污染水平，其他采样点污染程度不明显；土壤中 Pb、As、Cd 环境生态污染较严重，个别采样点达到

表2 土壤重金属质量分数与pH值、OM之间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between heavy metals and OM and pH in soils

	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb	As	Hg	pH	OM
Cu	1									
Zn	0.586**	1								
Cd	0.623**	0.994**	1							
Cr	-0.062	-0.094	-0.108	1						
Ni	0.135	0.155	0.144	0.948**	1					
Pb	0.282	0.748**	0.694**	-0.047	0.086	1				
As	0.429*	0.865**	0.832**	-0.074	0.099	0.970**	1			
Hg	0.133	0.535**	0.468*	0.002	0.070	0.956**	0.869**	1		
pH	-0.087	-0.028	-0.022	-0.148	-0.207	-0.018	-0.013	-0.036	1	
OM	0.345	0.729**	0.736**	-0.046	0.187	0.236	0.366	0.011	-0.129	1

注:** 极显著($P<0.01$);* 显著($P<0.05$)。

表3 主成分分析结果($n=25$)
Table 3 PCA results of heavy metals in soils

主成分	初始特征值			提取的载荷平方和			重金属	因素载荷值		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%		PC1	PC2	PC3
1	4.461	55.763	55.763	4.461	55.763	55.763	Cu	0.554	0.022	0.708
2	1.946	24.331	80.094	1.946	24.331	80.094	Zn	0.929	-0.014	0.259
3	1.178	14.720	94.814	1.178	14.720	94.814	Cd	0.903	-0.025	0.336
4	0.381	4.763	99.577				Cr	-0.055	0.990	-0.090
5	0.020	0.254	99.830				Ni	0.153	0.981	0.064
6	0.009	0.111	99.941				Pb	0.926	-0.031	-0.368
7	0.004	0.052	99.993				As	0.982	-0.039	-0.165
8	0.001	0.007	100.000				Hg	0.792	-0.008	-0.567

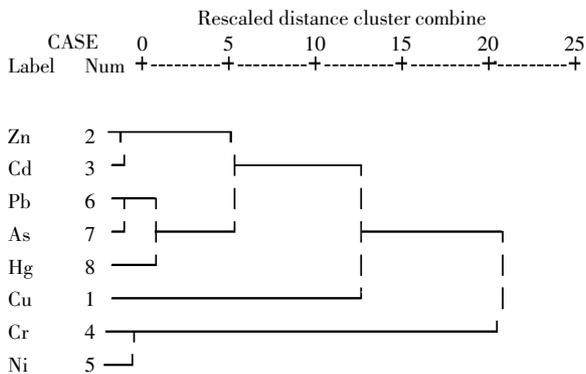


图3 重金属元素的聚类分析树状图

Figure 3 Dendrogram for heavy metals obtained by hierarchical clustering method

重度污染水平。由图5 采样点地累积指数加权图可知,大部分采样点 I_{geo} 指数均大于6,为重金属严重污染,只有部分采样点为无污染或轻微污染。其污染可能由于采矿活动排放废水和居民生活污染所致。

2.6 矿区土壤重金属形态分析

为了更全面地了解重金属在研究区域的毒性特征及其迁移转化,选取 Zn、Cu、Pb 和 Cd 4 种污染相对

表4 重金属地累积指数分级与污染程度之间的相互关系
Table 4 Geo-accumulation index grades and pollution degree

地累积指数分级	I_{geo}	污染程度
6	$I_{geo} \geq 5$	极重污染
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	重污染-极重污染
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	重污染
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	中污染-重污染
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	中污染
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	无污染-中污染
0	$I_{geo} < 0$	无污染

严重的重金属,对其在研究区域的形态特征进行分析,结果如图6所示。可见,这4种重金属中Cu主要以残渣态存在,易氧化态次之,Zn、Cd和Pb的总量的均值分别为347.36、2.86、553.67 $mg \cdot kg^{-1}$,三者的相态分布较为相似,其中可交换态及易还原态总含量比例分别为25%、25%、15%左右。Zn、Cd和Pb三者均为亲硫元素,易于与土壤中的S结合生成溶解度极小的硫化物沉淀。

由图7可见,各采样点Cd的可交换态和易还原态所占比例相对较大,部分采样点可达80%,表明其

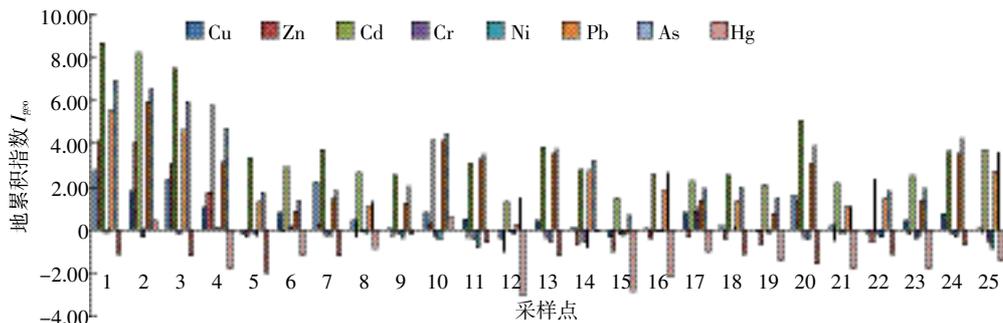


图4 研究区域金矿及尾矿库矿区及周边土壤地累积指数图

Figure 4 Geo-accumulation index of heavy metals in soils of studied area

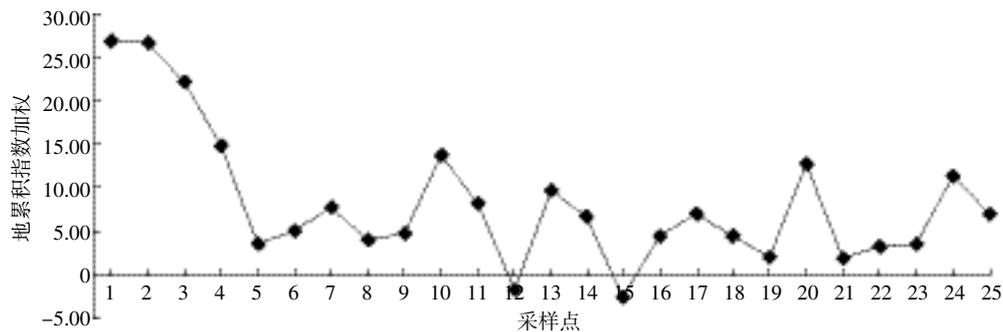


图5 矿区土壤重金属地累积指数加权图

Figure 5 Weighted geo-accumulation index of heavy metals in soils

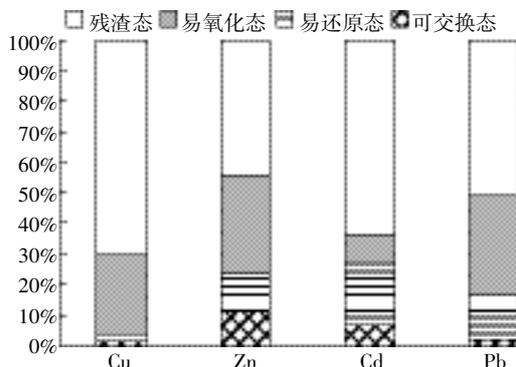


图6 矿区土壤重金属形态平均分布

Figure 6 Distribution of averages of heavy metal fractions in soils of studied area

容易迁移和转化,被植物体吸收,造成的危害性最大。采样点 S6、S12 和 S15 三处 Cd 的可交换态达到了 20% 左右,易于吸附在粘土及腐殖质等成分中,迁移转化直接被植物吸收,进而对周边生态环境系统造成破坏。Zn、Cu、Pb 三种重金属在个别采样点可交换态及易还原态含量相对较高,可能是由矿山开采、金属冶炼污染所致。Pb 较难在表层富集,其在表层中的可交换态含量较少,对周边环境影响相对较小,但其易还原态在采样点 S10、S17、S25 含量相对较高,达到了 25%~40%,因而在一定环境条件改变时,易被还原成可交换态,造成二次污染。Cu 与 Pb 呈现较类似的特征。

3 结论

(1)水源涵养地河谷矿区土壤中研究的 8 种重金属除 Hg 之外,含量均基本超过北京市的背景值,其中 Cd、Pb 和 As 含量整体超过北京背景值较大,污染相对较严重,平均超标倍数分别为 53.56、22.42 倍和 29.88 倍。重金属在矿区的富集程度由强到弱依次为 Cd>As>Pb>Zn>Cu>Ni>Cr>Hg。

(2)由相关性分析、主成分分析与聚类分析结果明显可见,Pb、As、Hg、Zn、Cd 五种重金属可能具有同源性,来自于金矿矿山开采、金属冶炼、废水排放等。金属 Ni、Cr 两者在尾矿库污染相对较严重,且来源相同,可能由尾矿渣的淋滤作用造成的。Cu 与其他重金属来源不同,可能来自于岩石的风化。

(3)地累积指数法评价结果表明,采样点土壤中 Ni、Cr、Hg 都处于轻度污染或未污染程度;Cu 除个别采样点处于偏中度与中度污染水平之外,其他采样点污染程度均不明显;土壤中 Pb、As、Cd 环境生态污染较严重,个别采样点达到重度污染水平。

(4)由形态特征分析结果可知,Zn、Cu、Pb、Cd 四种重金属均主要以残渣态存在。其中重金属 Cd 和 Zn 的可交换态所占比例相对较大,易于被植物直接吸收,造成的危害性最大;Cd 和 Pb 的易还原态也相对

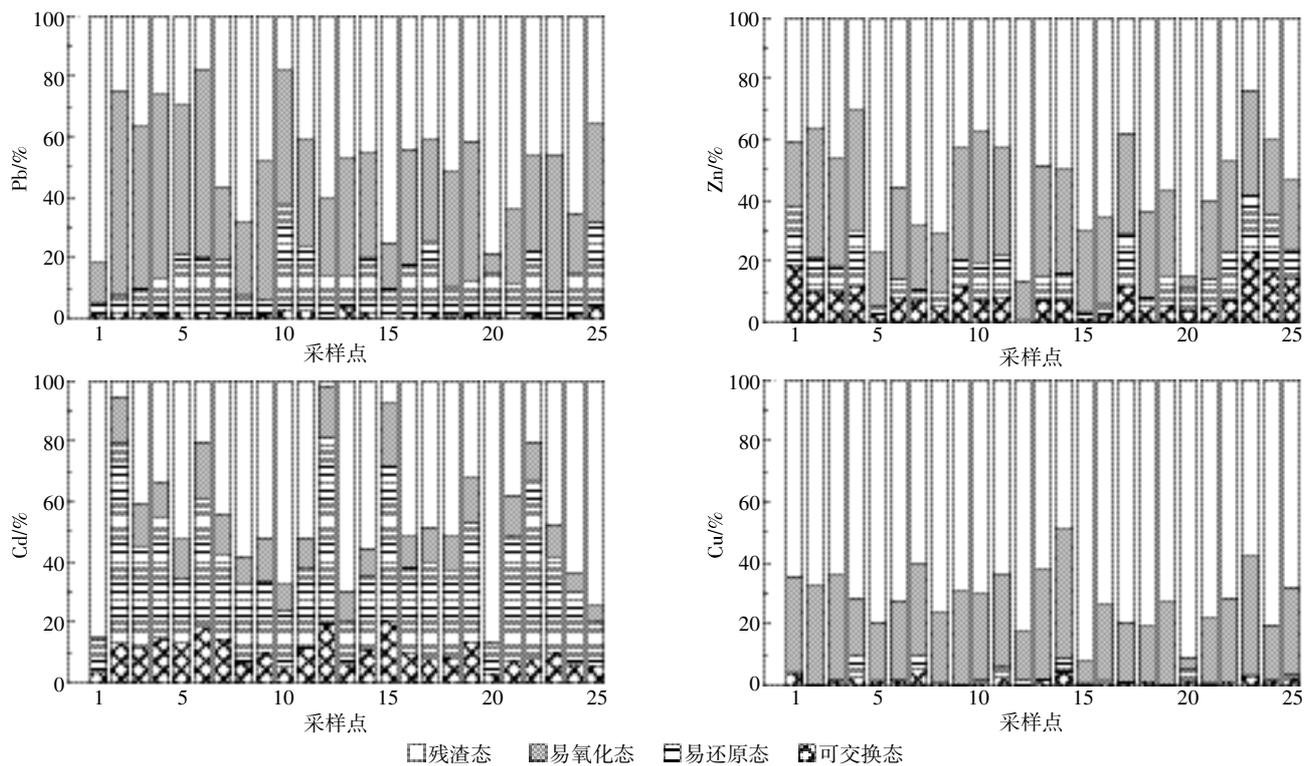


图7 矿区土壤重金属形态分布

Figure 7 Distribution of heavy metal fractions in soil from each point of studied area

较高,在一定环境改变的情况下,易造成二次污染,也应引起高度重视。

综合上述多种分析结果表明,矿山的开采、金属冶炼及尾矿库等已经对矿区及周边土壤造成了不同程度的重金属污染,易于随着雨水进入河流,进而对下游造成污染。因此,应引起广泛关注,加大对其的监测,以防止对下游的北京市水源地造成污染,影响人类的身体健康。

参考文献:

- [1] Nyarko B J B, Dampare S B, Serfor-Armah Y, et al. Biomonitoring in the forest zone of Ghana: The primary results obtained using neutron activation analysis and lichens[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2011, 32(4):467-476.
- [2] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3):313-324.
- [3] Li J, He M, Han W, et al. Analysis and assessment on heavy metal sources in the coastal soils developed from alluvial deposits using multivariate statistical methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2):976-981.
- [4] 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.
ZHANG Yi-xiu, WANG Ji, QIN Fan-xin, et al. Compare of dust and source identification of heavy metal in soil in Guiyang road[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1):204-212.
- [5] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. *Nature*, 1988, 333(6169):134-139.
- [6] 黄德娟,朱业安,刘庆成,等. 某铀矿山环境土壤重金属污染评价[J]. *金属矿山*, 2013(1):146-150.
HUANG De-juan, ZHU Ye-an, LIU Qing-cheng, et al. Environmental pollution assessment of heavy metal in the soil of a uranium mine[J]. *Metal Mines*, 2013(1):146-150.
- [7] 陈 婧. 典型金属矿山城市土壤重金属污染及健康风险评估[D]. 合肥:合肥工业大学, 2013.
CHEN Jing. Heavy metals pollution and health risk assessment of soil in a typical metal mining city[D]. Hefei: Technology of Hefei University, 2013.
- [8] Merington G, Alloway B J. The transfer and fate of Cd, Cu, Pb and Zn from two historic metalliferous mine in the UK[J]. *Applied Geochemistry*, 1994, 9(3):677-687.
- [9] 张文江. 大型金属矿山环境污染及防治研究[J]. *资源节约与环保*, 2013(1):67-68.
ZHANG Wen-jiang. Environment pollution and prevention study of large metal mines[J]. *Journal of Resource Saving and Environmental Protection*, 2013(1):67-68.
- [10] 高晓宁. 矿区土壤重金属污染及其研究方法[J]. *黑龙江科技信息*, 2013(15):124-125.
GAO Xiao-ning. Heavy metal pollution and methods in mine soil[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2013(15):124-125.
- [11] 艾建超. 夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[D]. 长春:东北师范大学,

2013.
AI Jian-chao. Source apportionment of heavy metals in goldfields soil[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2013.
- [12] 陈菲. 小峪河金矿区沟道水、土、植被重金属污染研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
CHEN Fei. Heavy metal contamination in water, soil, vegetation in a gold mine[D]. Xi'an: Science and Technology of Xi'an University, 2013.
- [13] Iavazzo P, Adamo P, Boni M, et al. Mineralogy and chemical forms of lead and zinc in abandoned mine wastes and soils: An example from Morocco[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 113: 56-67.
- [14] 陈岩, 季宏兵, 朱先芳, 等. 北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2142-2151.
CHEN Yan, JI Hong-bing, ZHU Xian-fang, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in soils around the gold mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2142-2151.
- [15] 高彦鑫, 冯金国, 唐磊, 等. 密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1707-1717.
GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in iron and gold mine soil of Miyun Reservoir upstream[J]. *Environment Science*, 2012, 33(5): 1707-1717.
- [16] 黄兴星, 朱先芳, 唐磊, 等. 北京市密云水库上游金铁矿区土壤重金属污染特征及对比研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1520-1528.
HUANG Xing-xing, ZHU Xian-fang, TANG Lei, et al. Pollution characteristics and their comparative study of heavy metals in the gold and iron mine soil of the upstream area of Miyun Reservoir, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(6): 1520-1528.
- [17] 李海英, 顾尚义, 吴志强, 等. 黔西北土法炼锌矿区重金属污染现状及其环境影响评价[J]. 中国环境监测, 2009(1): 55-60.
LI Hai-ying, GU Shang-yi, WU Zhi-qiang, et al. Heavy metals pollution and environmental impact assessment of a zinc mine[J]. *China Environmental Monitoring*, 2009(1): 55-60.
- [18] Suciu I, Cosma C, Todică M, et al. Analysis of soil heavy metal pollution and pattern in central Transylvania[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2008, 9(4): 434-453.
- [19] 李倩, 秦飞, 季宏兵, 等. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2384-2394.
LI Qian, QIN Fei, JI Hong-bing, et al. Contents, sources and contamination assessment of heavy metals in the gold mine soil of the upstream area of Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2384-2394.
- [20] 陈浩, 胡燕, 王贵玲, 等. ArcGIS空间分析技术在地下水评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 112-115.
CHEN Hao, HU Yan, WANG Gui-ling, et al. ArcGIS spatial analysis techniques in groundwater evaluation[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, 34(4): 112-115.
- [21] 漆星, 许江涛, 郝成元, 等. 基于GIS空间分析的孟州市土地利用/覆盖变化研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(2): 730-731.
QI Xing, XU Jiang-tao, HAO Cheng-yuan, et al. GIS-based spatial analysis of Mengzhou land use and cover change[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(2): 730-731.
- [22] 许伟, 张发旺, 陈立, 等. 基于ArcGIS的地下水空间变异特征分析[J]. 信息技术, 2013(3): 63-65.
XU Wei, ZHANG Fa-wang, CHEN Li, et al. Spatial variability of groundwater analysis based on ArcGIS[J]. *Information Technology*, 2013(3): 63-65.
- [23] 王剑. 浅谈ArcGIS在土地利用规划中的应用[J]. 科学之友: 下, 2012(8): 16-17.
WANG Jian. ArcGIS in planning application of land use[J]. *Friends of Science: Under*, 2012(8): 16-17.
- [24] 孟冲, 李都峰, 杜显元, 等. 基于GIS的典型石油开采区土壤重金属的分布规律[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(17): 9306-9310.
MENG Chong, LI Du-feng, DU Xian-yuan, et al. Distribution of soil heavy metals in petroleum mining area based on a typical GIS[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(17): 9306-9310.
- [25] 苏州, 涂圣文. ArcGIS空间分析功能在道路交通环境影响后评价中的应用[J]. 中南公路工程, 2006, 31(2): 164-166.
SU Zhou, TU Sheng-wen. ArcGIS spatial analysis in environment impact assessment of road traffic[J]. *Central South Highway Engineering*, 2006, 31(2): 164-166.
- [26] 王鸣宇, 张雷, 秦延文, 等. 湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2447-2458.
WANG Ming-yu, ZHANG Lei, QIN Yan-wen, et al. Chemical speciation and environmental impact analysis of heavy metals in surface sediments in Xiangjiang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2447-2458.
- [27] 敖亮, 雷波, 王业春, 等. 三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 179-185.
AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, et al. Risk assessment and sediment sources of heavy metals in fluctuating zone of typical rural[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 179-185.
- [28] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 137-141.
LI Yu, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian. Evaluation pollution sources by principal component analysis(PCA) of heavy metals in marine sediments[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 137-141.
- [29] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 45-50.
ZHAO Yan-feng, GUO Heng-liang, SUN Zhi-ying, et al. Principle component analyses based on soil knowledge as a tool to indicate origin of heavy metals in soil[J]. *Geography*, 2008, 28(1): 45-50.
- [30] 姚晓飞, 周岩梅, 于晓华, 等. 南沙河表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2012, 34(12): 197-200.
YAO Xiao-fei, ZHOU Yan-mei, YU Xiao-hua, et al. Heavy metal pollution assessment and source apportionment in surface sediments of Nansha River[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 34(12): 197-200.
- [31] 滕彦国, 虞先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(4): 25-27, 31.
TENG Yan-guo, TUO Xian-guo, NI Shi-jun, et al. Applying the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in soil in Panzhi-hua Region[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 24(4): 25-27, 31.