

北京市平谷应急水源地周边农业土壤中重金属分布及风险评价

唐磊^{1,2}, 张会昌³, 季宏兵^{1,4*}, 冯金国², 姚俊¹, 闫广新²

(1.北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2.北京市地质工程设计研究院, 北京 101500; 3.北京市国土资源局, 北京 100013; 4.中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要:采用 ArcGIS 空间分析技术和多元统计方法研究了北京市平谷应急水源地周边农业土壤中重金属空间分布及来源,并基于潜在生态危害指数法进行了生态风险评价。结果表明,土壤中重金属含量均值由大到小为 $Mn > Pb > Cr > As > Hg > Cd$,所有重金属含量均值都高于北京市土壤背景值。 Pb 、 Cd 和 As 污染较为严重,含量均值分别为 $96.78, 0.25, 28.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且主要是人为来源; Mn 和 Cr 元素平均含量稍高于北京市土壤背景值,主要来源为自然源; Hg 元素的平均含量也稍高于北京市土壤背景值,是自然源和人为源共同作用的结果。重金属元素单项污染潜在生态风险系数从大到小依次为 $Cd > Hg > As > Pb > Cr > Mn$,6 种重金属综合潜在生态风险指数 RI 值为 169.29,为中等生态危害,东南方向土壤重金属生态危害高于西北方向。综上所述,该水源地的土壤已经受到重金属的潜在威胁,其生态风险不容忽视。

关键词:金矿;土壤重金属;来源;潜在生态风险

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)10-1897-08 **doi:**10.11654/jaes.2015.10.009

Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Surrounding a Contingency Water Source, Beijing

TANG Lei^{1,2}, ZHANG Hui-chang³, JI Hong-bing^{1,4*}, FENG Jin-guo², YAO Jun¹, YAN Guang-xin²

(1.Civil & Environment Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.Beijing Geo-engineering Design & Research Institute, Beijing 101500, China; 3.Beijing Municipal Bureau of Land and Resources; 4.State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China)

Abstract: Heavy metals in soils surrounding water source area pose direct risks to the water safety. Here the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soils around a contingency water source of Pinggu, Beijing, were elucidated by ArcGIS and multivariate analysis. The ecological risk assessment of soil heavy metals was also performed using potential ecological risk index (RI). The mean concentrations of heavy metals in soils were in order of $[Mn] > [Pb] > [Cr] > [As] > [Hg] > [Cd]$, all exceeding the soil background values of Beijing. The soils were seriously polluted by Pb , Cd and As , with the mean concentrations of $96.78, 0.25$ and $28.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. These metals mainly came from the human activities via mineral exploitation and transportation. The concentrations of Mn , Cr and Hg were slightly higher than the soil background values. Manganese and Cr were derived from the natural sources by weathering of rock and soil parent materials, and Hg from both human activities and natural sources. The potential ecological risk factor (E^i_r) for heavy metals decreased in order of $[Cd] > [Hg] > [As] > [Pb] > [Cr] > [Mn]$. The total potential ecological risk index of heavy metals in soils was 169.29, belonging to moderate potential ecological risk. There was higher potential ecological risk in the southeast than in the northwest areas. These results indicate that soils around the contingency water source of Pinggu, Beijing, is threatened deeply by heavy metals and that more attention should be paid to the potential ecological risk assessment.

Keywords: gold mine; soil heavy metal; sources; potential ecological risk

收稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41173113); 北京市优秀人才资助项目(2013D0002011000002)

作者简介: 唐磊(1982—), 男, 山东费县人, 博士研究生, 主要研究方向为矿山重金属污染与修复。E-mail: tangtom1220@163.com

* 通信作者: 季宏兵 E-mail: jih_0000@126.com

土壤的重金属污染已经成为世界性的环境问题^[1]。土壤中的重金属污染一般源于人为活动,如农业生产、城市化进程、工业发展以及矿业选冶等活动,其中金属矿产的选冶被认为是土壤重金属污染最主要的来源^[1-3]。土壤重金属污染具有潜伏性、累积性、长期性、难降解性等特点,而且很容易通过食物链或水体淋溶进入植物或人体,从而影响人类健康。国内外学者对矿区周边农田土壤中重金属污染状况开展了大量研究^[4-6],主要集中在土壤中重金属的现状分析、来源识别、形态分析、污染评价等方面。徐有宁等^[7]对某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险进行研究发现,研究区存在因重金属导致的不可接受的人体健康高非致癌风险和致癌风险;Liu等^[8]研究了江西省吉水河有色金属矿区农业土壤中重金属分布和污染特征,结果表明,在接近矿山和金属冶炼厂的农业土壤中,重金属污染严重;Rodríguez等^[9]对西班牙一废弃Pb-Zn矿周边农业土壤研究发现,土壤中Pb、Zn、Cd和Cu平均浓度分别为453.50、7 000.44、20.57、308.48 mg·kg⁻¹,达到了严重污染程度。目前比较常用的重金属风险评价方法包括单因子指数法、综合污染指数法、污染负荷指数法、潜在生态危害指数法、环境风险指数法及地累积指数法等。伍恒赞等^[10]评价了鄱阳湖沉降物的重金属污染,指出湖区已达到中等潜在风险危害;邹小冷等^[11]利用综合污染指数法评价云南某铅锌矿的重金属污染,结果表明已经存在严重的生态风险;马守臣等^[12]指出焦作煤矿周围的农田已经达到重度污染水平。通过风险评价方法可系统地解析土壤的重金属污染程度,对农业安全具有重大的意义。但是,目前的风险评价研究多集中在对整个区域的整体风险评价方面,对区域内生态风险的分布特征研究较少。

尽管国内外对农业土壤重金属污染特征和风险评价研究较多,但对矿区周边环境敏感区,特别是水源地内农业土壤重金属分布和累积特征研究较少。中桥应急水源地位于北京市平谷区,作为北京市应急水源地,其土壤环境质量直接影响北京市用水安全。中桥村水系上游存在丰富的金矿资源,其开采可能对下游土壤和水体造成潜在的威胁。为了解北京市应急水源地土壤的影响因素,本文研究了中桥村周边农业土壤中重金属的空间分布及污染特征,分析了农田里土壤重金属污染影响,并结合地理信息系统(GIS)和潜在生态风险指数法进行了生态风险评价,结果将为北京市应急水源地土壤质量改善和水环境保护提

供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域面积13.5 km²,位于北京市东北部平谷区中部,是北京市重要的应急水源地。该地区属暖温带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,秋季凉爽湿润,年平均最高气温17.3℃,年均降水量为644 mm。平谷区为相对独立的水文地质单元,是由南、北山前断裂形成的断陷盆地。该盆地内第四系由沟河、错河的冲洪积作用形成,第四系含水层厚度由盆地边缘到中心逐渐增大,盆地边缘厚几十米,盆地中心超过500 m。研究区域内存在的唯一金属矿区(万庄金矿),位于中桥水源地错河水系和风向的上游,距中桥水源地直线距离9 km。平谷区土壤包括中山地带的棕壤、低山丘陵区的褐土和平原区的潮土三个土类,其中褐土和潮土是主要土壤类型,占全区面积的98.4%。

1.2 样品采集和分析

根据场地地势、河流方向并按照网格法布设采样点,布点网格设计为800 m×800 m,用GPS仪对采样点位置进行准确定位。采集地表0~20 cm的表层土壤,共采集样品25个(图1),每个采样点以一点为中心,采集周围50 m范围内的三个土壤子样混合组成一个土壤样品,并采用四分法处理,保留样重1 kg。详细记录采样点环境状况,所有样品保存在密封的塑料袋中,并依次编号。待测土壤样品在室温下自然风干后在实验室用玛瑙钵研磨,过200目尼龙筛,存储备用。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(ICP-MS)在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室测定土壤中Pb、Mn、Cr和Cd,检测限分别为0.001、0.002、0.02、0.003 μg·L⁻¹。采用氢化物发生原子荧光法测定土壤样品中的As和Hg,检测限分别为0.02、0.001 μg·L⁻¹。

1.3 多元统计方法和空间分布研究

多元统计分析^[13]中Pearson相关系数分析、主成分(PCA)分析^[14-16]及聚类(CA)分析已广泛用于土壤污染的研究。主成分分析方法主要是将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。聚类法通过数据分类集中到不同的类或者簇,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,以便更清楚地了解污染物的来源。本文使用SPSS 17.0软件进行多元统计分析。

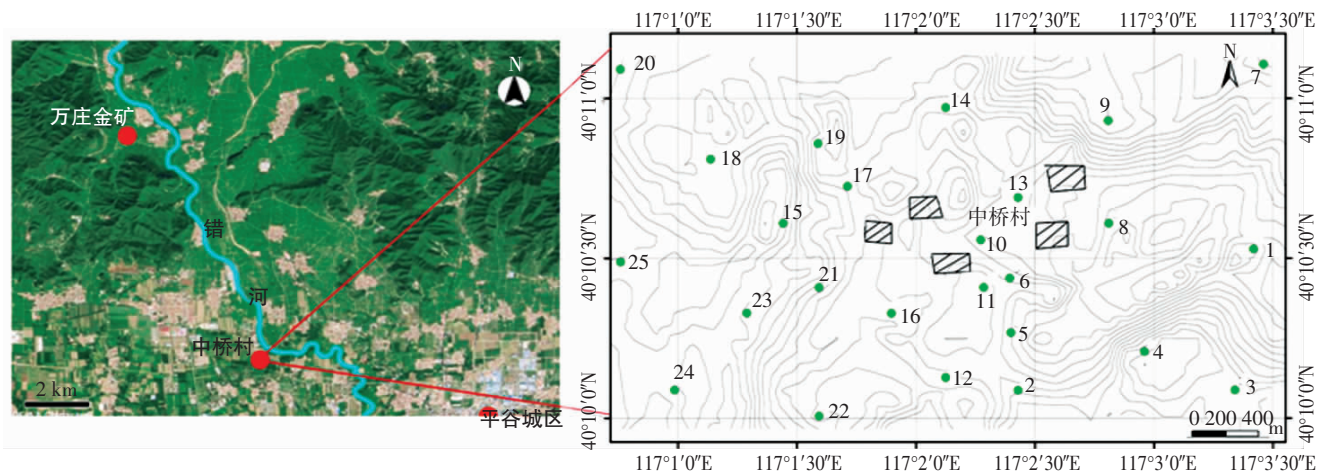


图 1 研究区域及采样点位置
Figure 1 Map of studied area and sampling points

随着科学技术的发展,ArcGIS 空间分析技术得到了广泛应用,如在地下水评价、土地利用规划、重金属的分布规律等领域^[17-19]。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的空间分布特征。

1.4 重金属生态风险评价

本研究采用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法^[20]。该法是基于重金属性质及环境行为特点,从沉积学角度提出的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法。该方法综合考虑了重金属毒性、在土壤中的迁移规律和评价区域对重金属污染的敏感性,以及重金属区域背景值的差异,消除了区域差异影响,体现了生物有效性、相对贡献、地理空间等特点,可综合反映重金属对生态环境的影响潜力^[21-22]。潜在生态危害指数涉及到单项污染系数、重金属毒性响应系数以及潜在生态危害单项系数,其公式分别为:

$$RI=\sum E_r^i$$
$$E_r^i=T_r^i/C_f^i$$
$$C_f^i=C_i/C_n^i$$

式中:RI 为多种重金属潜在生态危害指数; E_r^i 为某种重金属的潜在生态危害单项系数; T_r^i 为某种重金属的毒性系数,本研究中 Pb、Mn、Cr、Cd、As 和 Hg 六种重金属元素的毒性系数分别为 5、1、2、30、10、40^[21-22]; C_f^i 为重金属的单项污染系数; C_i 为表层土壤重金属浓度实测值; C_n^i 为参比值,本研究选用北京市土壤背景值作为参比值。

重金属污染潜在生态危害单项系数和潜在生态危害指数分级标准见表 1。

表 1 E_r^i 和 RI 的分级标准

Table 1 Grades and description of E_r^i and RI

潜在生态危害 单项系数 E_r^i	生态危害等级	潜在生态危害 指数 RI	生态危害等级
$E_r^i \leq 40$	轻微	$RI \leq 150$	轻微
$40 < E_r^i \leq 80$	中等	$150 < RI \leq 300$	中等
$80 < E_r^i \leq 160$	强	$300 < RI \leq 600$	强
$160 < E_r^i \leq 320$	很强	$600 < RI$	极强
$320 < E_r^i$	极强		

2 结果与讨论

2.1 中桥村农田土壤中重金属含量及空间分布特征

所采样品中重金属含量均值、最大值、最小值、标准偏差、标准误差、变异系数及北京市土壤重金属背景值见表 2。样品中所测重金属含量均值由大到小依次为 $Mn > Pb > Cr > As > Hg > Cd$, 所有重金属含量均高于北京市土壤背景值^[23]。在所测重金属元素中,As 元素均值为 $28.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是北京市土壤背景值的 4 倍,所有采样点中 As 含量均高于北京市土壤背景值,最大值更是达到了 $152.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为背景值的 21 倍,表明 As 元素污染严重,由于 As 是金的伴生元素,金矿的开采必定使本来处于稳定状态的 As 被激活,中桥村位于万庄金矿水系和风向的下游,As 会通过水系或扬尘的携带对其周边的水源地造成危害。Pb 含量范围为 $18.20 \sim 663.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $96.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是北京市土壤背景值 Pb 含量的 4 倍,最大值更是达到了北京市土壤背景值的 27 倍,在 88% 的采样点中,Pb 含量高于北京市土壤背景值,说明研究区域受人为活动影响较大。Cd 元素均值为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

表 2 密云水库上游金属矿区土壤重金属含量($n=25$)
Table 2 Content of heavy metals in soils of studied area($n=25$)

重金属元素	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cr/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Hg/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
最小值	18.20	451.00	40.10	0.13	8.24	8.00
最大值	663.00	861.00	70.60	0.97	152.00	63.00
平均值	96.78	693.16	54.68	0.25	28.40	31.56
标准差	144.33	95.71	7.98	0.18	35.45	14.10
标准误差	3.90	2.59	0.22	0.01	0.96	0.38
变异系数	1.49	0.14	0.15	0.72	1.25	0.45
北京市土壤背景值	24.60	571.00	29.80	0.12	7.09	30.00

是北京市土壤背景值的 2 倍,在研究区域内,25 个采样点 Cd 元素含量均高于北京市土壤背景值,表明矿区土壤中 Cd 元素已经受到人为活动的影响。Mn 元素平均含量为 $693.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 稍高于北京市土壤背景值,表明 Mn 元素在研究区域土壤中污染较小。Cr 元素均值为 $54.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是北京市土壤背景值的 2 倍。与其他研究不同,中桥农业土壤中 Hg 含量并不

高,均值为 $31.56\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,稍高于北京市土壤背景值,表明金矿选冶对周边土壤中 Hg 含量的影响较小。

土壤重金属含量的变异大小可以反映重金属元素的分布和污染程度的差异。从表 2 可以看出,样品中重金属变异系数 Pb 和 As 值大于 1,表现出较大的变异系数,表明其受外来干扰较大,在空间分布上差异较明显。中桥村农业土壤重金属空间分布如图 2 所

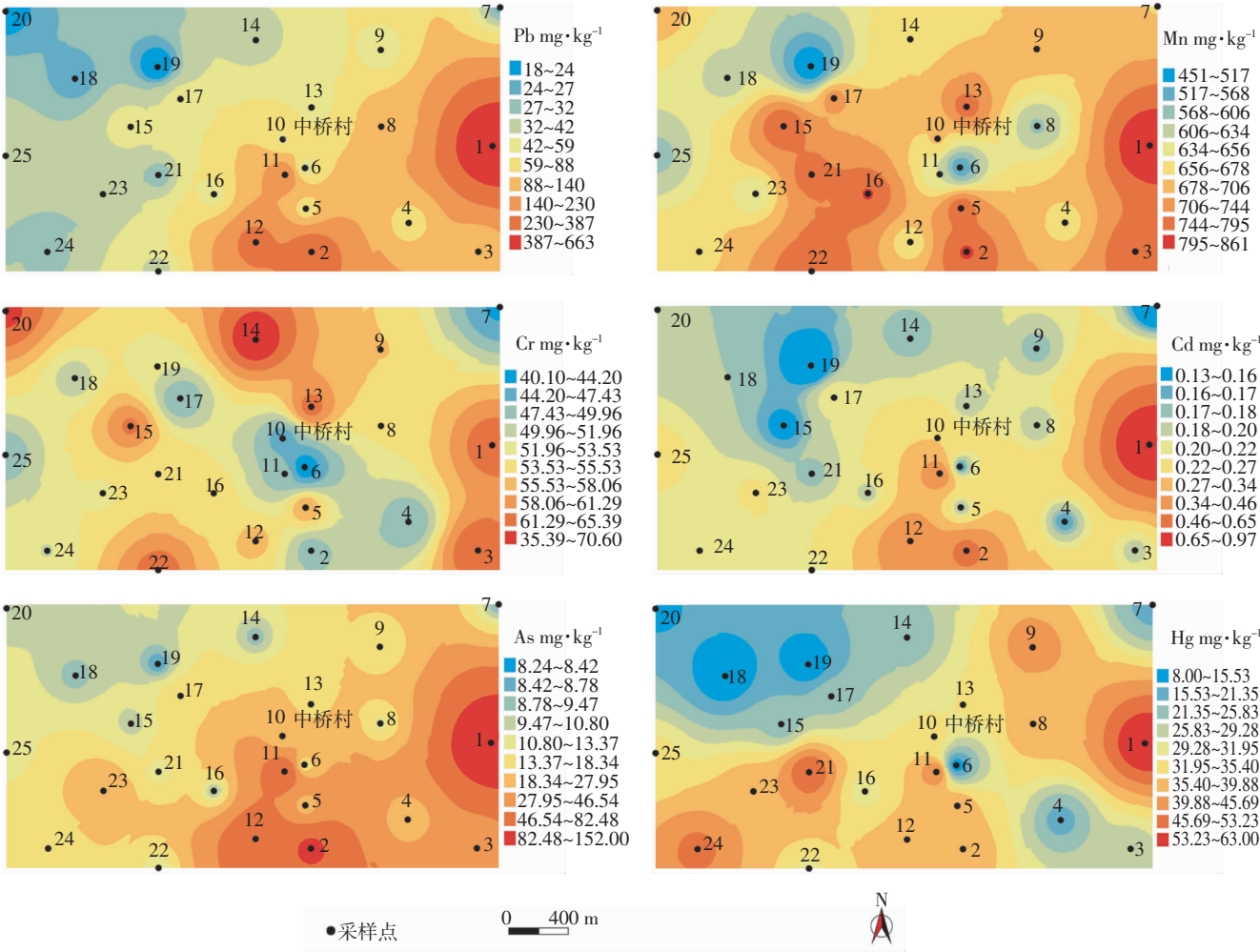


图 2 研究区域内土壤重金属含量空间分布
Figure 2 Spatial distribution of heavy metals in studied area

示,可以看出,除了 Cr 以外,其他重金属含量大致从东往西逐渐降低。金矿区位于研究区域的上风向,而其土壤重金属含量却较东部更低,说明风力对矿区土壤重金属迁移影响较小,主要是由于万庄金矿矿区与中桥村之间分布有较多山脉,这些山脉减弱了含有重金属的尾砂扬尘等随风迁移。研究区域东部靠近错河河道(图 1),由于矿区重金属元素随着水流迁移,而周边的农田取河道流水进行灌溉,造成了重金属在河道周边农业土壤中的富集。一些研究也表明,上游的矿区可能通过河流对下游土壤造成重金属污染^[24]。

2.2 统计学分析及土壤重金属来源的识别

在对中桥村农业土壤重金属含量进行统计分析的基础上,分析了各重金属之间的相关关系,并计算出相应的 Pearson 相关系数,其结果如表 3 所示。中桥村土壤中 Pb、Cd 与 As 之间呈极显著正相关($P<0.01$),说明土壤中这几种元素之间的地球化学性质相近,在相同或相似的外界条件下其变化趋势基本一致,其来源相同,与前人的结果基本相似^[25]。Mn 与 Cr 呈显著正相关($P<0.05$),表明其具有相同的来源,与表 2 的结果相似,Pb、Cd、As 基本来源于人为源,Mn 和 Cr 来自于自然源的可能性较大。而 Hg 与 Cd、As 有极显著相关性($P<0.01$),与 Mn、Pb 有显著相关性($P<0.05$),说明其归类比较复杂,来源也是多种因素共同作用的结果。

表 3 中桥村土壤重金属之间的相关系数($n=25$)

Table 3 Correlation coefficients between heavy metals in soils($n=25$)

R	Pb	Mn	Cr	Cd	As	Hg
Pb	1					
Mn	0.387	1				
Cr	0.142	0.489*	1			
Cd	0.976**	0.374	0.121	1		
As	0.975**	0.341	0.094	0.965**	1	
Hg	0.563*	0.471*	0.139	0.603**	0.578**	1

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

中桥村农业土壤中 6 种重金属的主成分分析结果如表 4 所示,6 种重金属的二维因子荷载图如图 3 所示,通过二维图可以更加直观地看出各重金属之间的亲疏关系。中桥村农田土壤中重金属可以提取两个主成分,它们的累积贡献率达到 82.48%。第一主成分主要反映 Pb、As、Hg 和 Cd 的组成信息,贡献率为 60.90%,与各重金属的二维荷载图结果是一致的,由图 3 可以看出 Pb-As-Hg-Cd 之间的距离较近,表明

表 4 土壤中 6 种重金属含量的主成分分析结果($n=25$)

Table 4 Results of PCA of heavy metal concentrations in soils($n=25$)

主成分	方差贡献			重金属	主成分	
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%		PC1	PC2
1	3.654	60.902	60.902	Pb	0.952	-0.208
2	1.295	21.579	82.481	Mn	0.575	0.651
3	0.619	10.311	92.792	Cr	0.273	0.840
4	0.380	6.329	99.122	Cd	0.954	-0.224
5	0.034	0.564	99.685	As	0.941	-0.260
6	0.019	0.315	100	Hg	0.740	0.072

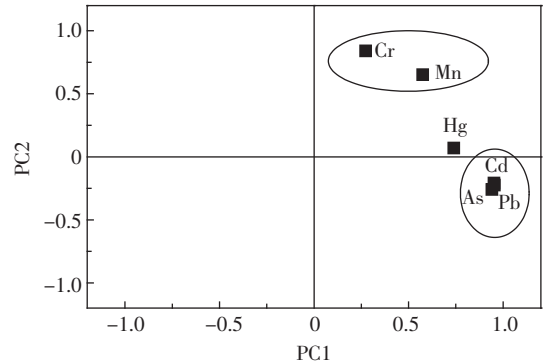


图 3 土壤中 6 种重金属元素的 PCA 二维因子荷载图

Figure 3 PCA loading 2-D plot for 6 heavy metals in soils

它们有共同的来源;第二主成分反应 Mn 和 Cr 的组成信息,贡献率为 21.58%。对矿区土壤中 6 种重金属进行聚类分析所得树状图如图 4 所示,该图可以形象地反映土壤元素间的相似性或亲疏关系,有效地揭示土壤重金属的来源。据树状图可将土壤中重金属分为三个聚类:第一聚类包括 Pb、As 和 Cd;第二聚类为 Hg;第三聚类包括 Mn 和 Cr。

主成分分析、聚类分析与重金属相关性分析结果均一致,按来源可把 6 种重金属分为三大类:第一类包括 Pb、As 和 Cd 三种重金属,其来源主要为人为源,综合分析研究地的工业、农业现状,其主要的污染源为上游的矿区,矿区活动产生的重金属元素可随着水流、风力和扬尘而迁移^[26-27];第二类包括 Mn 和 Cr 2 种重金属,其来源主要为自然源,Mn 和 Cr 的含量略高于背景值,或与背景值相当,说明二者的浓度主要反映了区域自身的地球化学特征,岩石矿物的风化、侵蚀及土壤母质^[27]均可对土壤的金属成分产生影响;第三类包括 Hg 一种重金属,自然源和人为源的贡献率基本相当。

2.3 潜在生态危害评价

中桥村农业土壤中重金属污染潜在生态危害评

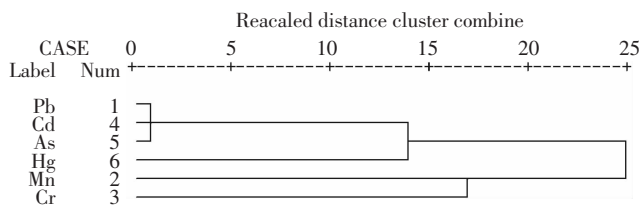


图4 应用分层聚类方法得到的重金属树状图

Figure 4 Dendrogram obtained by hierarchical clustering method for soil heavy metal content

价结果如表5所示。中桥村土壤中重金属的单项污染潜在生态风险系数平均值从大到小依次为 $Cd > Hg > As > Pb > Cr > Mn$ 。其中 Cd 潜在生态危害程度表现为中等生态危害, 25 个采样点中有 1 个处于很强生态危害, 3 个点处于强生态危害, 17 个点处于中等生态危害; Hg 和 As 潜在生态危害程度也表现为中等生态危害; 其他元素潜在生态风险程度处于轻微生态风险。中桥村土壤中重金属潜在生态危害主要源于 Cd、Hg 和 As。结合表1可以看出, 样品中 Cd 元素超出北京市土壤背景值的 2 倍, 且其毒性系数为 30, 潜在生态危害系数为 62.60, 则 Cd 潜在生态危害指数较高的原因为土壤中 Cd 的高含量和高毒性系数, 与前人的研究也是一致的^[28-29]。Hg 元素在土壤中含量不高, Hg 潜在生态危害指数较高的原因是 Hg 的高毒性系数。As 元素是北京市土壤背景值的 4 倍, 土壤中 As 潜在生态危害指数较高的原因则为土壤中 As 的高含量。6 种重金属综合潜在生态风险指数 RI 值为 169.29, 为中等生态危害, 其中 Cd、Hg 和 As 对风险贡献率为 85.49%。

按照重金属潜在生态危害指数法, 将研究区各采样点 RI 值按照 Kriging 插值方法进行分析, 结果如图5所示。总体来看, 研究区域东南方向潜在生态危害高于西北方向, 与土壤重金属分布状况是一致的, 何东明等^[24]也得到了类似的研究结果。这主要是因为中

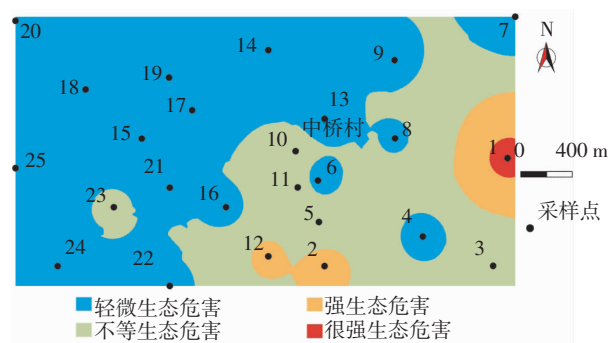


图5 研究区域农业土壤重金属生态风险分布

Figure 5 Distribution of ecological risks of heavy metals in agricultural soils in studied area

桥村东南部临近错河(见图1), 上游金矿的重金属污染经过河水迁移增加了周围土壤的潜在危害程度。

3 结论

(1) 样品中所测重金属含量均值由大到小依次为 $Mn > Pb > Cr > As > Hg > Cd$, 所有重金属含量均高于北京市土壤背景值。重金属空间分布大致呈现从东往西含量逐渐降低的趋势, 表明水流对水源地土壤重金属含量影响大于风力。

(2) 6 种重金属有三个来源: Pb、As 和 Cd 为人为源; Mn 和 Cr 为自然源; Hg 既有自然源也有人为源。

(3) 重金属元素单项污染潜在生态风险系数从大到小依次为 $Cd > Hg > As > Pb > Cr > Mn$, 其中 Cd、Hg 和 As 潜在生态危害程度表现为中等生态危害, Mn、Cr、Pb 表现为轻微生态危害。6 种重金属综合潜在生态风险指数 RI 值为 169.29, 为中等生态危害, 且东南方向土壤重金属生态危害高于西北方向。

参考文献:

- [1] Li Z Y, Ma Z W, van der kuip T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J].

表5 土壤重金属潜在生态风险指数统计分析

Table 5 Statistic values of RI of heavy metals in soil

重金属元素	潜在生态危害单项系数 E_i					样点数量				
	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	轻微生态风险	中等生态风险	强生态风险	很强生态风险	极强生态风险
Pb	3.70	134.76	19.67	29.34	1.49	21	3	1	0	0
Mn	0.79	1.51	1.21	0.17	0.14	25	0	0	0	0
Cr	2.69	4.74	3.67	0.54	0.15	25	0	0	0	0
Cd	32.50	242.50	62.60	44.91	0.72	4	17	3	1	0
As	11.62	214.39	40.05	50.00	1.25	19	2	3	1	0
Hg	10.67	84.00	42.08	18.80	0.45	14	10	1	0	0
潜在生态危害指数 (RI)	64.10	681.46	169.29	135.12	0.80	18	3	3	1	0

- Science of the Total Environment*, 2014, 468–469:843–853.
- [2] Kohfahl C, Graupner T, Fetzter C, et al. The impact of cemented layers and hardpans on oxygen diffusivity in mining waste heaps A field study of the Halsbrücke lead–zinc mine tailings (Germany) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(23):5932–5939.
- [3] Rojas J, Vandecasteele C. Influence of mining activities in the North of Potosi Bolivia on the water quality of the Chayanta River, and its consequences [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 132(1–3):321–330.
- [4] 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 Detianguo–Qifengcha, Beijing City, China [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2012, 31(11):2142–2151.
- [5] 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 soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun Reservoir, Beijing, China [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2013, 32(12):2384–2394.
- [6] 虞先国, 徐争启, 滕彦国, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿矿区土壤重金属地球化学特征及污染评价 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(2):127–131.
- TUO Xian-guo, XU Zheng-qi, TENG Yan-guo, et al. The geochemical characteristics of heavy metals in soils in the Panzhihua V–Ti magnetite mine and the pollution evaluation [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(2):127–131.
- [7] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险 [J]. 地质通报, 2014, 33(8):1239–1252.
- XU You-ning, ZHANG Jiang-hua, KE Hai-ling, et al. Human health risk under the condition of farmland soil heavy metals pollution in a gold mining area [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8):1239–1252.
- [8] Liu G N, Tao L, Liu X H, et al. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132:156–163.
- [9] Rodríguez L, Ruiz E, Alonso-Azcarate J, et al. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2):1106–1116.
- [10] 伍恒赞, 罗勇, 张起明, 等. 鄱阳湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 [J]. 中国环境监测, 2014, 30(6):114–201.
- WU Heng-yun, LUO Yong, ZHANG Qi-ming, et al. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Poyang Lake [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(6):114–201.
- [11] 邹小冷, 祖艳群, 李元, 等. 云南某铅锌矿区周边农田土壤 Cd、Pb 分布特征及风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2143–2148.
- ZOU Xiao-leng, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Pollution and health risk assessment of cadmium and lead in cultivated soils and crops surrounding a lead–zinc mine in Yunnan Province [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(11):2143–2148.
- [12] 马守臣, 邵云, 杨金芳, 等. 矿粮复合区土壤–作物系统重金属污染风险性评价 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(5):937–941.
- MA Shou-chen, SHAO Yun, YANG Jin-fang, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in soil–plant system of the overlapped areas of crop and mineral production [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(5):937–941.
- [13] 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. Speciation of heavy metals in sediments from Xiang River and analysis of their environmental factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11):2447–2458.
- [14] Chabukdhara M, Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach [J]. *Chemosphere*, 2012, 87(8):945–953.
- [15] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 425:66–74.
- [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. The 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] Acosta J A, Faz A, Martínez-Martínez B, et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 109(1–3):8–17.
- [18] 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. Analysis on groundwater spatial variability characteristics based on ArcGIS [J]. *Information Technology*, 2013(3):63–65.
- [19] 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 rules of heavy metals in the soil of a typical oilfield based on GIS [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(17):9306–9310.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975–1001.
- [21] Guo W H, Liu X B, Liu Z G, et al. Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin [J]. *Procedia Environmental Science*, 2010(2):729–

- 736.
- [22] Fu C, Guo J, Pan J, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Yangtze River within the Wanzhou Section, China[J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 129(1-3):270-277.
- [23] 陈同斌, 郑袁鸣, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):117-122.
CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.
- [24] 何东明, 王晓飞, 陈丽君, 等. 基于地累积指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2):126-131.
HE Dong-ming, WANG Xiao-fei, CHEN Li-jun, et al. Assessment on heavy metals contaminations of sugarcane soil in Guangxi by the geo-accumulation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(2):126-131.
- [25] 张爱星, 聂义宁, 季宏兵, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2321-2328.
- ZHANG Ai-xing, NIE Yi-ning, JI Hong-bing, et al. Spatial distribution, fractionation and pollution assessment of heavy metals in Wanzhuang gold mining field in upstream part of water conservation area of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2321-2328.
- [26] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS based approach to identify heavy metal sources in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3):313-24.
- [27] Dragović S, Mihailović N, Gajić B. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(3):491-502.
- [28] Shi G, Chen Z, Bi C, et al. A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(3):764-771.
- [29] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, 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.

欢迎订阅 2016 年《农业资源与环境学报》

《农业资源与环境学报》(原《农业环境与发展》)创刊于 1984 年,由农业部主管、农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的国家级学术期刊,被评为中国科技核心期刊、天津市优秀期刊。本刊被美国乌利希期刊指南、化学文摘(CA)、国际农业与生物科学中心(CABI)、EBSCO、中国学术文摘数据库核心版(CSAD)等重要数据库收录。

作为与一级学科“农业资源与环境”对应的学报,《农业资源与环境学报》(Journal of Agricultural Resources and Environment)主要刊登土壤、水、养分及生物质等自然资源的高效利用及生态环境保护方面的研究论文。所设栏目:

- | | |
|---------|--------------|
| 一、战略与综述 | 六、产地环境与农产品安全 |
| 二、土地资源 | 七、生态农业 |
| 三、养分资源 | 八、生物多样性保护 |
| 四、水资源 | 九、乡村环境 |
| 五、生物质资源 | 十、检测分析方法 |

《农业资源与环境学报》为双月刊,大 16 开,96 页,逢单月 10 日出版,每册定价 30.00 元,全年 180.00 元。国际标准刊号:ISSN 2095-6819,国内统一刊号:CN 12-1437/S,国内外公开发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号:6-40,国外发行代号:BM3272。有漏订者可直接与编辑部联系订阅。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号
邮政编码:300191
电话:022-23611149
传真:022-23674336
电子信箱:caed@vip.163.com
网址:www.aed.org.cn

银行:中国农业银行天津滨水西道支行
户名:农业部环境保护科研监测所
帐号:02-190101040001154
纳税人识别号:120104401229113