赵恒谦,常仁强,金倩,等.河北西石门铁矿区土壤重金属污染空间分析及风险评价[J].岩矿测试,2023,42(2):371-382.doi: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202203290066.

ZHAO Hengqian, CHANG Renqiang, JIN Qian, et al. Spatial Analysis and Risk Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in the Xishimen Iron Mining Area of Hebei Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(2):371-382. doi: 10.15898/j.cnki.11-2131/td. 202203290066.

# 河北西石门铁矿区土壤重金属污染空间分析及风险评价

赵恒谦<sup>1,2</sup>,常仁强<sup>2</sup>,金倩<sup>3,4\*</sup>,吴艳花<sup>2</sup>,王雪飞<sup>3,4</sup>,马会春<sup>3,4</sup>,李美钰<sup>2</sup>,付含聪<sup>2</sup>

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学), 北京 100083;

- 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;
- 3. 河北省地质实验测试中心, 河北 保定 071051;

4. 河北省矿产资源与生态环境监测重点实验室, 河北保定071051)

摘要:矿区土壤重金属污染严重威胁着生态环境和周边居民的健康,对其进行有效监管意义重大。河北西 石门铁矿是邯邢地区的大型磁铁矿床,针对该矿区土壤重金属污染亟待开展综合研究。本文以西石门铁矿 一号矿区为研究对象,利用地球化学、统计学、地理信息学等多学科技术,对9种典型土壤重金属的空间分布 和污染风险进行分析。采用 ICP-MS 测定重金属含量,通过描述性统计分析、多元统计分析和空间插值分析 得到重金属超标率、污染来源及空间分布特征,并结合单因子污染指数、内梅罗综合污染指数、潜在生态危害 指数评价其污染风险。描述性统计分析结果显示,矿区土壤 Co的超标率为 75.83%,属重度污染,Cu、Cd、As 的超标率分别为 14.70%、21.40%和 13.29%,属中轻度污染,Cr、Ni、Zn、Pb 和 Hg 的超标率均低于 5%,属轻 度污染;多元统计分析结果显示,Cr、Ni、Zn、Cd、As 和 Pb 来源于成矿区自然风化环境污染,Co 和 Cu 来源于 采矿生产、化肥使用造成的人为环境污染,Hg 来源于人为因素造成的局部污染;空间插值分析结果显示, 重金属含量在马会河两岸露天采矿区较高,在河流和居民区较低;污染风险评估结果显示,研究区内梅罗综 合污染指数为 13.49,综合生态风险指数为 55.50。该矿区存在人为因素导致的 Hg、Co、Cu 污染,需要重点 关注并开展治理工作;该矿区的重金属污染属重度,但生态风险仍处于可控范围。

关键词:矿区;土壤重金属;电感耦合等离子体质谱法;统计分析;空间分析;污染风险评价 要点:

(1) 使用 ICP-MS 对河北西石门铁矿区样本 9 种重金属含量进行了高精度测试分析。

(2) 空间分析结果表明该矿区存在由人为因素导致的 Hg、Co、Cu 污染,需要重点关注并治理。

(3) 风险评价结果表明该矿区总体上属于重度污染但生态风险仍处于可控范围。

中图分类号: 0657.63; X53 文献标识码: A

随着工业化和城市化进程的快速发展,高强度 断富集而造成污染<sup>[1]</sup>。重金属具有高稳定性、难降的工农业生产活动导致重金属等各种污染物通过大 解、毒性强的特点<sup>[2]</sup>,当其含量超过土壤环境容量 气沉降、污水灌溉等途径进入土壤,并且在土壤中不 时,会使土壤理化性质发生变化、质量降低,进而导

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-06; 接受日期: 2022-06-25

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41971401);河北省地矿局地质科研项目(454-0601-YBN-DONH);中国矿业大学 (北京)越崎青年学者(2020QN07)

**第一作者:**赵恒谦,博士,副教授,从事矿区资源与环境分析、高光谱定量反演模型、光谱吸收特征提取算法等研究。 E-mail: zhaohq@ cumtb. edu. cn。

通信作者:金倩,高级工程师,从事实验测试分析工作。E-mail: 13373121110@163.com。

致生态环境恶化<sup>[3]</sup>。土壤重金属很难通过自然过 程从土壤环境中消失或稀释,可通过食物链途径进 入人体<sup>[4-5]</sup>。当人体重金属超量时,会致癌、致畸、 致突变,从而对人体健康造成严重危害<sup>[6-8]</sup>。矿区 采矿是重金属污染的一种主要来源,对矿区生态环 境、土壤质量和居民健康带来严重影响。因此,开展 矿区土壤重金属污染风险评价研究,对矿区的合理 开采、重金属污染治理、生态环境和居民健康保护有 重要意义。

近年来,对矿区重金属污染研究已有许多学者 作了大量的研究工作,通过统计分析法、污染指数法 等地球化学分析方法对重金属污染进行分析评价. 为矿区重金属污染治理提供依据<sup>[8-12]</sup>。目前,国外 学者对土壤重金属污染的研究主要集中于城镇,如 Seifeddine 等<sup>[8]</sup>采用地累积指数、污染指数、综合污 染指数与专题制图相结合的方法,评估了阿尔及利 亚东部赛迪夫市及其周边城市和城市周边土壤中的 重金属(Cr、Cu、Zn和Pb)污染。中国学者也作了许 多相关研究。例如,采用相关性分析和主成分分析 法对山东省临清市表层土壤重金属污染来源分析发 现,As 污染主要与化肥厂和煤炭燃烧有关,Zn、Ni、 Cr与Cd污染主要来源于钢铁制造与加工、纺织与 服装印染,Hg污染主要与电气仪表制造业及使用氯 碱工艺的造纸业、纺织业有关<sup>[9]</sup>。对黔西北玉兰、 永昌和杉树林铅锌矿周边农田土壤重金属含量统计 分析结果表明.3个矿区综合来看均属重度污染,其 中玉兰和永昌矿区 Pb、Zn、Cd 和 Cu 为重度污染,杉 树林矿区 Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 为重度污染,其余重 金属为轻度或无污染<sup>[10]</sup>。对重庆酉阳县某汞矿区 周边土壤重金属含量的主成分统计分析表明,矿区 土壤 As 是造成人体健康风险的主要贡献因子,且重 金属对成人的健康影响较小,对儿童造成健康风险 的概率较大[12]。总体上看,国内外学者主要是从重 金属污染程度、空间分布特征、污染来源等角度开展 重金属地球化学统计分析,对其地理空间信息的综 合应用研究相对较少。而地理空间信息综合应用有 助于从整体上把握矿区的重金属污染状况,系统地 解决污染土壤修复中面临的难题[13-14]。

河北西石门铁矿是邯邢地区大型磁铁矿床之 一,是典型的砂卡岩型铁矿,该矿区已有40年建矿 史,具有品位高、规模大、储量丰富、易开采等特点。 对西石门矿区的研究,大多是针对矿产资源开采的 工艺技术和岩矿地质研究等为主,对土壤重金属污 染的分析研究很少,对重金属污染问题认识严重不 足,亟需开展相关研究对其进行分析治理。因此本 文以西石门铁矿一号矿区为研究对象,通过地球化 学、地理信息学、统计学等多学科交叉的方式对重金 属含量地理空间信息进行综合应用分析研究,采用 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg 等 9 种重金属含 量,采用统计分析、GIS 制图、污染指数等方法对矿 区土壤重金属元素污染特征进行分析,以期对矿区 的土壤生态环境修复治理提出一些建议。

### 1 实验部分

### 1.1 样本采集区概况

本文选取西石门铁矿污染程度较高的废石填埋 场、尾矿库及其附近的农田区域为研究区。研究区 位于太行山东麓,太行山脉和华北平原交汇处,地理 位置如图1所示。研究区海拔275~370m,面积约 15km<sup>2</sup>,土地利用程度低,土壤类型主要有棕壤、褐 土、风沙土等,许多荒山未绿化,森林保护差,水土流 失严重。

西石门铁矿隶属河北武安和沙河,区内交通便 利,有铁路、公路相通。其主要矿物为自形磁铁矿,其 次为黄铁矿和黄铜矿等。矿石化学成分以 Fe 为主, 其次有 Si、Al、Ca、Mg、P 等,有益伴生组分元素有 S、 Co、Cu、Ni 等。在矿产资源开采时,易对当地自然生 态环境造成严重污染。研究区重金属污染主要来自 两方面:一是成矿集中区形成的自然风化环境污染, 二是采矿生产、化肥使用造成的人为环境污染。

#### 1.2 样本采集

采样点根据土壤类型和利用状况,划分不同功能 区,按全面性、代表性、可行性和连续性原则进行布 设。采样时,分别采集路边土、采坑土、废石下垫土、 耕种土等,每个采样点土壤样品由多点采集混合而 成,均匀后缩分至1kg。采样密度平均22个/km<sup>2</sup>,重 点区加密采样。在2018年5月至11月对研究区进 行多次野外考察和样品采集,包括矿区土壤、尾矿等 样品,共采集样品331件,其中耕地及路边土250件, 废石废渣下垫土及采坑土50件,尾矿土31件。

# 1.3 样品前处理

### 1.3.1 样品制备

(1)晾干。样品晾干和加工场地应确保无污染。将采集的土壤样品置于阴凉处悬挂在样品架上 自然风干,在风干过程中,适时翻动,并将大土块用 木棒敲碎以防止黏结成块、加速干燥。

(2)样品加工。①将风干后的样品平铺在制样

— 372 —



图 1 研究区采样点位示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of sampling points in the study area.

板上,用木棍碾压,并将植物残体、石块等所有非土物质剔除干净,细小的植物断根,采用静电吸附清除;②将样品研磨至全部通过 0.074mm 孔径筛。 ③过筛后土样分别称量混匀,一部分样品用纸袋盛 装送实验室化验;副样装入干净塑料瓶,送样品库 保存。

### 1.3.2 土壤样品重金属含量测定

不同重金属的测试方法并不相同。本研究中的 重金属使用 ICP-MS 法测定<sup>[14]</sup>。依据国家标准 《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电 感耦合等离子体质谱法》(HJ 803—2016)对分析样本 进行前处理和检测,各元素检出限为:Cd 0.07µg/g、 Co 0.03µg/g、Cu 0.5µg/g、Cr 2µg/g、Ni 2µg/g、 Pb 2µg/g,Zn 7µg/g、As1µg/g、Hg 0.0005µg/g,样品 经电热板消解,采用 ICP-MS 法测得重金属含量。

#### 1.3.3 质量控制

本文通过以下方式对重金属分析结果进行质量 控制:首先对每批次样品做2个空白实验,空白实验 分析结果低于检出限;然后对每批次分析建立标准曲 线,其相关系数大于0.999;再对每批次样品按照大于 10%的比例抽取平行双样测定,平行双样测定结果中 Cd、Co、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn的相对偏差均小于30%;接 着在每批次样品均插入有证标准物质,有证标准物质 分析结果均在准确误差范围内;最后每批次样品分析 均使用内标锗、铑、铼,使得分析样品内标响应值介于 标准曲线响应值的70%~130%之间。

#### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 统计学方法

采用经典统计学方法对研究区各采样点土壤重 金属含量数据进行描述统计分析,统计参数主要包 括均值(mean)、最小值(min)、最大值(max)、标准 差(SD)和变异系数(CV)等<sup>[15]</sup>。所有数据统计分 析均采用 Microsoft Office Excel 2013 软件完成,依据 国家标准《土壤环境质量 农用地污染风险管控标准 试行》(GB 15618—2018)给定的土壤质量风险筛选 值作为分析标准进行研究。超标率是依据自然背景 值,利用超过背景值的样本数与样本总数的比值得 到。由于以往对西石门矿区重金属污染的研究少, 无以往的相关研究作参考,这里的自然背景值是采 用项目研究过程中调研得到的结果。

1.4.2 多元统计分析

采用 SPSS24.0 软件对研究区土壤重金属含量 进行相关性分析和主成分分析<sup>[16]</sup>,用于对矿区土壤 重金属元素之间相互依赖的统计规律进行分析,把 握研究区土壤重金属的同源性。

1.4.3 空间插值分析

空间插值的一个基本假设是样点的属性间存在 着某种空间相关性,未知点的属性值可以根据已知 点内插得到<sup>[17]</sup>。利用 ArcGIS10.3 软件采用反距离 权重法(IDW)对研究区土壤重金属含量和土壤重 金属污染指数进行空间插值制图,分析每一种重金 属元素在研究区的空间分布特征。

1.4.4 单因子污染指数法

单因子污染指数法是对土壤中某一污染物的污染程度进行评价,缺点是无法综合反映多污染物所造成的环境污染程度<sup>[18]</sup>,其计算公式如(1)所示。

 $P_i = C_i / S_i$  (1) 式中: $P_i$ 表示单因子污染指数; $C_i$ 表示重金属 i 的 实测浓度; $S_i$ 表示重金属 i 在研究区的背景值。

当 $P_i$ 大于1时代表重金属超标, $P_i$ 越大重金属 富集程度越高。采用单因子污染指数法对矿区土壤 重金属污染进行评价,评价标准为河北省土壤背景 值算术平均值,污染程度分四级,分别为:单因子指 数计算值 $P_i \le 1$ 为无污染; $1 < P_i \le 2$ 为轻度污染;  $2 < P_i \le 3$ 为中度污染; $P_i \ge 3$ 为重度污染<sup>[19]</sup>。

1.4.5 内梅罗(Nemero)综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是在单因子污染指数法 的基础上结合研究区内所有污染物中最大单因子指 数(P<sub>i-max</sub>)进行评价的一种方法,评价结果反映了污 染物对环境的综合污染程度。该方法的计算公式如 式(2)所示。

$$P_{\rm N} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum P_{\rm i}\right)^2 + P_{\rm i-max}^2}{2}}$$
(2)  
- 374 ---

1.4.6 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法(*RI*)是由瑞典研究人员 Hakanson 首先提出,是衡量重金属对生态环境影响 潜力的综合指标,适用于大面积的沉积物和土壤的 评价,是一种常用的重金属风险评价方法<sup>[20]</sup>。该方 法是以重金属元素单因子指数与重金属毒性系数之 积为衡量标准判定重金属污染程度<sup>[21]</sup>,其计算公式 如下<sup>[22]</sup>。

$$=T_{\rm r}^{\rm i} \times P_{\rm i} \tag{3}$$

$$RI = \sum_{r}^{n} E_{r}^{i} \tag{4}$$

式中: E<sup>i</sup><sub>r</sub> 表示重金属 i 的潜在生态危害系数; T<sup>i</sup><sub>r</sub> 表示元素 i 的毒性系数; RI 表示多种元素的综合生态 危害系数。重金属毒性响应系数反映重金属的毒性 水平及土壤对重金属污染的敏感性, 相关研究表明, Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 和 As 的毒性系数分别 为 30、5、2、5、5、5、1、40、10。

### 2 结果与讨论

 $E_r^i$ 

### 2.1 土壤重金属含量统计分析

对土壤重金属含量进行统计分析,计算平均值、 最大值、最小值及变异系数等参量,并与土壤自然背 景值、土壤环境质量标准(农用地土壤污染风险管 控标准)筛选值比较,统计结果见表1。可以发现, 土壤重金属 Cr 的浓度范围变化范围大,标准差和变 异系数表明 Cr 含量离散度大,含量分布不均匀,其 平均值为38.15mg/kg,远小于土壤背景值,最大值 102mg/kg 超过背景值,超标率仅为 0.30%,说明 Cr 总体含量偏低,大部分区域污染程度低,存在局部污 染,但风险低。土壤 Ni 含量超标率为 0.90%,与 Cr 具有相似的特征。Zn 和 Pb 含量具有相似的特点, 变化范围较大,离散度偏高,超标率分别为3.60% 和 3.00%, 其中 Pb 的离散度最大, 变异系数为 84.08%,表明 Zn 和 Pb 的总体含量偏低,大部分区 域污染程度较低,但也有部分区域超过自然背景值, 存在较低程度的污染。Cu、Cd 和 As 含量具有相似 的特点,超标率分别为14.70%、21.40%和13.29%, 表明部分区域存在 As、Cu 和 Cd 重金属污染风险, 污染程度可认为是偏中度污染。Co 含量范围在 2.67~121mg/kg,其变化范围大,标准差和变异系数 表明 Co 含量离散度大,按照土壤环境质量标准,Co 元素含量 12.70mg/kg 为自然背景值(即为丰富), Co含量平均值为 17.18mg/kg,超标率为 75.83%, 已超过丰富范围,说明 Co 元素污染程度严重。

Hg 在研究区的含量相对较低,超标率仅为 1.81%, 表明 Hg 含量在自然背景值范围以内,不会造成严 重的 Hg 污染,但其离散度很大,最大值是平均值的 96 倍,变异系数达到 532.73%,分析其原因为部分 样本点 Hg 含量异常高,最大值样本点所在区域有局部的 Hg 污染,应重点治理。与农用地土壤污染风险管控标准筛选值对比发现,只有 Co 含量平均值超过筛选值,其他8种重金属均未超过该值,

#### 表1 土壤重金属元素含量统计结果

Table 1 Statistical results of heavy metal element contents in soil

统计参数	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
平均值(mg/kg)	38.15	17.18	19.01	27.65	53.53	0.12	15.81	10.44	0.055
最小值(mg/kg)	5.94	2.67	2.76	2.44	10.5	0.018	1.24	0.17	0.004
最大值(mg/kg)	102	121	44.7	172	176	0.50	105	35.20	5.30
标准差(mg/kg)	23.22	11.54	11.19	21.00	27.81	0.08	13.29	5.14	0.293
变异系数(%)	60.86	67.19	58.89	75.94	51.95	67.24	84.08	49.26	532.73
自然背景值(mg/kg)	90	12. 7 <sup>[23]</sup>	40	35	100	0.20	35	15	0.15
土壤质量筛选值(mg/kg)	250	15	190	100	300	0.6	170	25	3.4
超标率(%)	0.30	75.83	0.90	14. 70	3.60	21.40	3.00	13.29	1.81



图 2 研究区重金属元素(a)Cr、(b)Co、(c)Ni、(d)Cu、(e)Zn、(f)Cd、(g)Pb、(h)As、(i)Hg 含量空间分布图 Fig. 2 Spatial distribution maps of heavy metal element contents in the study area.

表明研究区部分区域 Co 污染状况比较严重,需要 针对性重点治理。其他 8 种重金属未达到国家规定 的风险筛选值,但也需要对这些元素加强管控,及时 制定相应污染治理措施,以免造成研究区出现更为 严重的污染,破坏土壤环境,影响居民身体健康。

### 2.2 土壤重金属空间插值分析

对研究区土壤重金属含量进行 IDW 空间插值, 由图 2 可见,研究区的 Cr、Ni、Zn、Cd、Pb 和 As 的空 间分布特征为重金属含量的高值区分布范围较大, 空间分布特征相似,其中以Cr、Ni、Zn、Cd、As 这5种 重金属表现最为明显,具有较大的重金属潜在污染 风险。Co和Cu的空间分布特征以低值区分布范围 较大,高值区呈零星状分布,但结合统计分析结果来 看,这两种重金属存在较高的超标率,存在重金属污 染情况。重金属 Hg 污染呈现小点源污染,污染风 险很小。重金属元素空间分布特征进一步验证了主 成分分析的结果,同源重金属的空间分布特征相似。 结合研究区卫星影像,研究区除 Hg 外,其他 8 种重 金属含量均呈现出在马会河两岸的露天采矿区分布 较高,在河流和居民区呈低值分布,对人体健康带来 严重威胁的风险性较小,但仍需重点关注,及时开展 治理工作。

#### 2.3 土壤重金属多元统计分析

### 2.3.1 土壤重金属相关性分析

地质因素和人类活动的干扰都是重金属污染可能的主要因素<sup>[24]</sup>,相关性分析是推测重金属来源的 重要依据,若元素间相关性显著或极显著,则表明元 素间一般具有同源关系或复合污染<sup>[25]</sup>。重金属含 量之间的 Pearson 相关分析结果见表 2,研究区 Cr、 Ni、Zn、Cd 和 Pb 这 5 种重金属两两之间存在极显著 相关(*P*<0.01) 且相关系数均大于 0.75, As 与这

#### 表 2 土壤重金属元素间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of heavy metal elements in soil

5种重金属元素也呈显著性相关,因此这6种元素 具有较大同源性。结合表 1,这 6 种重金属除 Cd 外,其他4种重金属总体上处于自然背景值范围内, 受人为活动影响相对较小,只有 Cd 的超标率较高, 说明研究区土壤中的重金属污染主要是 Cd 污染。 对比分析 Co、Cu 和 Cd 这 3 种超标率较高的重金 属,只有 Co 与 Cu 之间存在极显著相关(P<0.01), 说明二者的来源极为相似,这与黄石德<sup>[26]</sup>对铁矿废 弃地 Cu 和 Zn 极显著相关、具有一定同源性的研究 结果不同,说明不同研究区受开采技术、自然环境、 人为等多因素影响下,重金属之间的同源性不同。 重金属 Hg 与其他重金属元素的相关性很弱,结合 表1统计分析结果和图2空间插值分析结果来看. Hg 含量整体上非常低,平均值仅为自然背景值的 1/3,只有一个样本点的 Hg 含量异常高,插值分析 结果呈小区域点源污染。因此,认为 Hg 与其他重 金属的来源不同,人为因素造成的点源污染的可能 性较大。

### 2.3.2 土壤重金属主成分分析

利用主成分分析可以有效地判别重金属元素的 污染来源<sup>[27]</sup>。相关性分析表明,重金属元素之间具 有显著的相关性,利用 SPSS 进行描述性统计分析 发现其 KMO 检验统计值为 0.792,Bartlett 球形度检 验的相伴概率为 0.00,小于显著性水平 0.05,数据 适合作主成分分析。研究区土壤重金属含量主成分 分析结果见表 3,根据特征值大于 1 的要求,选出了 两个主成分可以解释 70.461%的原有信息,说明通 过对前 2 个主成分进行分析即可得到 Cr、Co、Ni、 Cu、Zn、Cd、Pb、As 和 Hg 这 9 种重金属含量数据的 大部分信息。来源相同的重金属污染物之间存在一 定的相关性,其信息也具有一定的重叠,因此通过对

重金属元素	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Cr	1	-0.049	0. 947 * *	0.082	0.820 * *	0. 783 * *	0. 797 * *	0.463 * *	0.034
Со		1	0.110	0.645 * *	0.048	-0.016	-0.062	0.129	0.036
Ni			1	0.157	0.847 * *	0.810 * *	0. 797 * *	0.536 * *	0.041
Cu				1	0.184	0.133	0.116	0.093	0.034
Zn					1	0. 867 * *	0.909 * *	0.461 * *	0.047
Cd						1	0.854 * *	0.437 * *	0.055
Pb							1	0.387 * *	0.039
As								1	0.025
Hg									1

注: "\*\*"表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

主成分分析结果可以分析重金属的污染来源。

由表3可知,研究区土壤重金属第一主成分 (F1)贡献率为 51.395%,在 Cr、Ni、Zn、Cd、Pb 和 As 的含量上载荷较高,主要反映了这6种元素的富集 信息。这6种元素的平均值均未超过土壤背景值, Cr、Ni、Zn、Pb 的超标率相对较低,但 As 和 Cd 分别 有 13.29%和 21.40%的超标率相对较高,分布相对 集中,而As和Cd分别与Cr、Ni、Zn、Pb具有显著的 相关性。因此,总体上这6种元素受人为活动影响 较小,第一主成分可认为是成矿集中区所形成的自 然风化环境污染。第二主成分(F2)贡献率为 19.066%,在Co和Cu这两种重金属含量上的载荷 较高,主要反映了 Co 和 Cu 的富集信息,其中 Co 超 标率高达 75.83%,说明有较多的样品中的 Co 含量 超标。Cu 的平均值虽未超过该区域的土壤背景值. 但超标率 14.70% 也相对较高。 矽卡岩型铁矿石中 往往伴生有大量的 Co<sup>[28]</sup>, Co 和 Cu 的高相关性可判 断这2种重金属受相同污染源影响。因此,第二主 成分代表了研究区采矿生产、化肥使用所造成的人 为环境污染。图3重金属间的距离进一步反映了各 重金属元素含量间的同源性, Cr、Ni、Zn、Cd、As 和 Pb、Co和Cu距离较近,表明这6种元素同源,Co和 Cu 同源;重金属 Hg 相较于其他重金属, Hg 与其他 8种重金属均不同源,可能是人为因素造成的局部 污染,这与相关性分析的结果一致。

#### 表 3 土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 3 Component matrix of principal component analysis of heavy metal contents in soil

香公屋	初始	因子载荷	旋转后因子载荷		
里並周	F1	F2	F1	F2	
Cr	0.921	-0.121	0. 929	0.016	
Со	0.064	0.914	-0.071	0.914	
Ni	0.946	0.014	0.934	0.153	
Cu	0.196	0.873	0.065	0.892	
Zn	0.945	-0.015	0.937	0.124	
Cd	0.913	-0.077	0.914	0.058	
Pb	0.914	-0.120	0.922	0.015	
As	0.582	0.100	0.561	0.185	
Hg	0.061	0.079	0.049	0.088	
方差贡献率(%)	52.127	18.334	51.395	19.066	
累积方差贡献率(%)	52.127	70.461	51.395	70.461	

### 2.4 矿区重金属污染评价

**2.4.1** 单因子污染指数法

利用单因子污染指数公式(1),分别计算每种

重金属每个样本的污染指数,采用 IDW 空间插值, 将研究区重金属污染情况划分为无污染、轻度污染、 中度污染和重度污染四个等级。从图4可见,研究 区土壤重金属的污染程度为:Co>Cu>Hg>Cd>As> Pb>Zn>Ni>Cr,这与统计分析的结果总体上是一致 的,其中以Co和Cu的污染程度最为严重,达到了 重度污染的程度,可见矿区的矿物中包含的 Co 和 Cu 这两种重金属的含量最为丰富,在开采后的土壤 治理修复过程中需要重点针对这两种重金属污染采 用见效较快的物理化学方法进行治理:Hg 在部分区 域的污染程度虽然也达到了重度污染的程度,但结 合统计分析结果来看,可能是人为因素造成的点源 污染,需要进一步调查、针对性治理;而 Cd、As、Pb、 Zn、Ni和Cr这6种重金属则属于来源于成矿集中 区所形成的自然风化所造成的轻度和中度污染,可 以采取相对较缓且危害性不大的生物学方法进行修 复治理。



#### 图 3 研究区土壤重金属元素主成分载荷

Fig. 3 Principal component load of heavy metal elements in soil from the study area.

#### 2.4.2 内梅罗(Nemero)综合污染指数法

利用内梅罗综合污染指数法的公式(2)计算研 究区9种重金属的综合污染指数(P<sub>N</sub>)为13.49,表 明研究区在9种重金属污染物的综合影响下属于重 度污染,污染程度比较严重,因此开展对矿区重金属 污染的综合治理非常重要,相关部门应及时制定相 应的治理措施开展重金属污染治理。

### 2.4.3 潜在生态危害指数法

利用潜在生态危害指数法,计算土壤单个重金属的潜在生态风险因子(*E*<sup>i</sup><sub>r</sub>)和多种重金属的综合 潜在生态危害指数(*RI*)见表 4。根据 Hakanson 潜 在生态风险分级标准(表 5),9 种重金属的 *E*<sup>i</sup><sub>r</sub> 和 *RI* 值均低于低生态风险标准值,说明研究区虽然部分



#### 图 4 研究区重金属单因子污染指数空间分布图

Fig. 4 Spatial distributions of heavy metal single factor pollution index in the study area.

重金属元素污染严重,但整体生态风险仍处于可控状态,需要及时开展针对性的治理措施,以避免生态环境进一步恶化。Co和Cu两种重金属的E<sup>i</sup>值明显大于除Cd外的其他重金属的值,再一次说明这两种重金属污染程度严重,而Cd和Hg的E<sup>i</sup>值高于其他重金属的值是由于其毒性系数大,危害性比较大,应重点针对性治理。与单因子污染指数和内梅罗综合污染指数相比,得出的结果基本一致,但由于不同方法的侧重点与算法不同,评价结果存在差异,这与张晓薇等<sup>[29]</sup>的研究方法和现象相一致。

#### 表 4 重金属潜在生态危害指数

Tabl	e 4	Potential	ecol	ogical	hazard	inde	x of	heavy	metals
------	-----	-----------	------	--------	--------	------	------	-------	--------

重金属元素	$E^{ m i}_{ m r}$	重金属元素	$E_r^i$
Cr	0.85	Cd	18.06
Co	5.73	Pb	2.26
Ni	2.38	As	6.96
Cu	3.95	Hg	14.79
Zn	0.54	RI	55.50

#### 表 5 Hakanson 潜在生态风险分级标准

Table 5 Grading standards of Hakanson potential ecological risk

单项生态风险	这因子 $(E_r^i)$	综合生态危害指数(RI)		
等级	得分	等级	得分	
低生态风险	<40	低生态风险	<150	
中等生态风险	40~80	中等生态风险	150~300	
较高生态风险	80~160	高生态风险	300~600	
高生态风险	160~320	极高生态风险	>600	
极高生态风险	>320			

### 3 结论

本文主要采用描述性统计分析、多元统计分析、 空间插值分析和污染风险指数分析的方法对河北西 石门铁矿区的9种重金属污染状况进行分析研究, 结果表明矿区土壤Co超标率最高为75.83%,属于 重度污染,Cu、Cd、As超标率分别为14.70%、 21.40%和13.29%,属于中轻度污染,Cr、Ni、Zn、Pb 和Hg超标率均在5%以下,属于轻度污染;Cr、Ni、 Zn、Cd和Pb这6种元素共同来源于成矿集中区所 形成的自然风化环境污染,Co和Cu共同来源于采 矿生产、化肥使用所造成的人为环境污染,Hg则来 源于人为因素造成的局部污染;研究区9种重金属 在马会河两岸露天采矿区分布较高,河流和居民区 呈低值分布;重金属内梅罗综合污染指数为13.49, 综合生态风险指数为55.50,表明该区域虽然总体 属于重度污染,但整体生态风险可控。值得注意的 是,该矿区存在人为因素引起的Hg、Co、Cu污染,需 要重点关注并开展相关治理工作。 本研究工作综合分析了西石门铁矿区9种重 金属元素的污染程度、空间分布特征和污染风 险,对矿区重金属污染治理具有一定的指导意 义,有助于及时制定相应的治理措施。但是地球 化学方法对重金属污染进行分析也存在一定的 局限性,如采样过程容易破坏当地的地表环境, 存在操作繁琐、易污染、成本高、难溯源等弊端。 因此,在现有重金属污染研究的基础上,今后可 以利用高光谱遥感等高新技术开展重金属污染 分析研究工作。

# Spatial Analysis and Risk Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in the Xishimen Iron Mining Area of Hebei Province

ZHAO Hengqian<sup>1,2</sup>, CHANG Renqiang<sup>2</sup>, JIN Qian<sup>3,4\*</sup>, WU Yanhua<sup>2</sup>, WANG Xuefei<sup>3,4</sup>, MA Huichun<sup>3,4</sup>, LI Meiyu<sup>2</sup>, FU Hancong<sup>2</sup>

- State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;
- College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;
- 3. Hebei Research Center for Geoanalysis, Baoding 071051, China;
- 4. Hebei Key Laboratory of Mineral Resources and Ecological Environment Monitoring, Baoding 071051, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) High-precision content analysis results of 9 heavy metals were achieved using ICP-MS.
- (2) The spatial analysis results indicated that the pollution of Hg, Co and Cu caused by human factors should be specially noted.
- (3) The risk assessment results revealed that the pollution grade of the study area was severe while the ecological risk remained in the controllable range.



## ABSTRACT

**BACKGROUND**: Heavy metal pollution in the soil of mining areas is a serious threat to the ecological environment and the health of surrounding residents, and it is of great significance to effectively supervise it. The Xishimen iron deposit in Hebei Province is a large magnetite deposit in the Hanxing area. Comprehensive research on soil heavy metal pollution in this mining area is urgently needed.

OBJECTIVES: To evaluate soil heavy metal pollution in the Xishimen iron mining area in Hebei Province.

**METHODS**: The No. 1 mining area of the Xishimen iron deposit was selected as the research object. ICP-MS was used to determine the heavy metal content. The exceedance rate, pollution sources and spatial distribution characteristics of heavy metals were obtained by descriptive statistical analysis, multivariate statistical analysis and spatial interpolation analysis, and the pollution risk was evaluated by combining the single factor pollution index, Nemero comprehensive pollution index and potential ecological hazard index.

**RESULTS**: Descriptive statistical analysis showed that the exceedance rate of Co in the mining area was 75.83%, indicating heavy pollution, while the exceedance rates of Cu, Cd and As were 14.70%, 21.40% and 13.29%, indicating moderate to light pollution. The exceedance rates of Cr, Ni, Zn, Pb and Hg were less than 5%, which were light pollution. The multivariate statistical analysis showed that Cr, Ni, Zn, Cd, As and Pb were from the natural weathering environmental pollution in the mineralized area, and Co and Cu were from the anthropogenic environmental pollution caused by mining production and fertilizer use. Hg came from the local pollution caused by human factors. Spatial interpolation analysis showed that the nine heavy metals had a high distribution in the open pit mining area on both sides of the Mahui River and a low distribution in the rivers and residential areas. The Nemero comprehensive pollution index of heavy metals in the study area was 13.49, and the comprehensive ecological risk index was 55.50.

**CONCLUSIONS**: The results indicate that there is Hg, Co, and Cu pollution caused by human factors in the mining area, which needs to be addressed. The heavy metal pollution in this area is serious but the ecological risk is still in a controllable range.

**KEY WORDS**: mining area; heavy metals in soil; inductively coupled plasma – mass spectrometry; statistical analysis; spatial analysis; pollution risk evaluation

## 参考文献

[1] 苏辉跃,刘江川,王璐,等.城乡过渡区土壤-蔬菜中重 金属耦合分异特征及形成机理解析[J].生态与农村 环境学报,2022,38(2):184-193.

> Su H Y, Liu J C, Wang L, et al. Analysis of heavy metal coupling differentiation characteristics and formation mechanism in soil-vegetable in urban-rural transition area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(2):184-193.

- [2] Pekey H, Dogan G. Application of positive matrix factorisation for the source apportionment of heavy metals in sediments: A comparison with a previous factor analysis study[J]. Microchemical Journal, 2013(106):233-237.
- [3] 姚春卉, 宁曙光, 武波, 等. 青岛市新兴工业园区土壤
   重金属污染特征[J]. 中国科技论文, 2020, 15(9):
   1050-1057.

Yao C H, Ning S G, Wu B, et al. Characteristics of heavy — 380 — metal pollution in soil of Qingdao Xinxing Industrial Park
[J]. China Science and Technology Paper, 2020, 15
(9):1050-1057.

- [4] Hadzi G Y, Ayoko G A, Essumang D K, et al. Contamination impact and human health risk assessment of heavy metals in surface soils from selected major mining areas in Ghana [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019,41(2):2821-2843.
- [5] Ren Z Q, Xiao R, Zhang Z H, et al. Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: A case study in the coastal city of Zhejiang Province, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(11-12):2109-2118.
- Kolo M T, Khandaker M U, Amin Y M, et al. Assessment of health risk due to the exposure of heavy metals in soil around Mega coal-fired cement factory in Nigeria [J]. Results in Physics, 2018, 11:755-762.

- [7] Abrahams P W. Soils: Their implications to human health
   [J]. Science of the Total Environment, 2002, 291
   (1-3):1-32.
- [8] Seifeddine S, Ouahida Z, Ferid D, et al. Assessment of heavy metal pollution in urban and peri-urban soil of Setif City (High Plains, eastern Algeria) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(2):1-17.
- [9] 郭晗,孙英君,王绪璐,等.县域城市土壤重金属空间 分布特征及来源解析[J].环境科学学报,2022,42
   (1):287-297.

Guo H, Sun Y J, Wang X L, et al. Spatial distribution characteristics and source analysis of soil heavy metals in county cities [J]. Journal of Environmental Science, 2022,42(1):287-297.

[10] 冯乾伟,王兵,马先杰,等. 黔西北典型铅锌矿区土壤 重金属污染特征及其来源分析[J]. 矿物岩石地球化 学通报,2020,39(4):863-870.

> Feng Q W, Wang B, Ma X J, et al. Characteristics of soil heavy metal contamination in typical Pb–Zn mining areas in northwest Qianxi and its source analysis [J]. Mineral and Rock Geochemistry Bulletin, 2020, 39(4):863–870.

[11] 王锐,邓海,贾中民,等. 汞矿区周边土壤重金属空间 分布特征、污染与生态风险评价[J].环境科学, 2021,42(6):3018-3027.

Wang R, Deng H, Jia Z M, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metals in soils around mercury mining areas, pollution and ecological risk assessment [J]. Environmental Science, 2021, 42(6);3018–3027.

 [12] 迟晓杰,谷海红,李富平,等.重金属污染土壤植物修复效果评价方法——高光谱遥感[J].金属矿山, 2019(1):16-23.

Chi X J, Gu H H, Li F P, et al. Evaluation method of phytoremediation effect of heavy metal contaminated soil by hyperspectral remote sensing[J]. Metal Mining, 2019 (1):16-23.

 [13] 赵恒谦,张文博,朱孝鑫,等.煤炭矿区植被冠层光谱
 土地复垦敏感性分析[J].光谱学与光谱分析,2019, 39(6):1858-1863.

> Zhao H Q, Zhang W B, Zhu X X, et al. Sensitivity analysis of vegetation canopy spectra for land reclamation in coal mining areas [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6):1858-1863.

 [14] 刘恒凤,张吉雄,周楠,等.矸石基胶结充填材料重金 属浸出及其固化机制[J].中国矿业大学学报,2021, 50(3):523-531.

Liu H F,Zhang J X,Zhou N, et al. Heavy metal leaching from gangue – based cemented filling materials and its curing mechanism [J]. Journal of China University of

Mining and Technology, 2021, 50(3):523-531.

[15] 孙厚云,吴丁丁,毛启贵,等.新疆东天山某铜矿区土 壤重金属污染与生态风险评价[J].环境化学,2019, 38(12):2690-2699.
Sun H Y, Wu D D, Mao Q G, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution and ecological risk in a copper mining area in East Tianshan, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry,2019,38(12):2690-2699.
[16] 段友春,梁兴光,臧浩,等. 日照市典型农用地土壤重

金属来源分析及环境质量评价[J]. 环境污染与防 治,2020,42(11):1410-1414,1429. Duan Y C, Liang X G, Zang H, et al. Analysis of heavy metal sources and environmental quality evaluation of typical agricultural land in Rizhao [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2020, 42(11): 1410-1414, 1429.

 [17] 董霁红,卞正富,于敏,等.矿区充填复垦土壤重金属 分布特征研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(3): 335-341.
 Dong J H, Bian Z F, Yu M, et al. Study on the

distribution characteristics of heavy metals in mine reclamation soils [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(3):335–341.

[18] 陈佳林,李仁英,谢晓金,等.南京市绿地土壤重金属 分布特征及其污染评价[J].环境科学,2021,42(2): 909-916.

> Chen J L, Li R Y, Xie X J, et al. Distribution characteristics of heavy metals in greenland soils of Nanjing and its pollution evaluation [J]. Environmental Science, 2021, 42(2):909-916.

[19] 周艳,陈樯,邓绍坡,等.西南某铅锌矿区农田土壤重 金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科 学,2018,39(6):2884-2892.

Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al. Spatial principal component analysis and ecological risk evaluation of heavy metals in agricultural soils of a Pb–Zn mining area in southwest China[J]. Environmental Science, 2018, 39 (6):2884–2892.

- [20] Lin Q, Liu E, Zhang E, et al. Spatial distribution, contami -nation and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China [J]. Catena, 2016, 145: 193-203.
- [21] Qin F, Ji H B, Li Q, et al. Evaluation of trace elements and identification of pollution sources in particle size fractions of soil from iron ore areas along the Chao River[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 138:33-49.
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution

control:A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.

[23] 张锂,韩国才,陈慧,等.黄土高原煤矿区煤矸石中重 金属对土壤污染的研究[J].煤炭学报,2008(10): 1141-1146.

Zhang L, Han G C, Chen H, et al. Study on soil contamination by heavy metals in coal gangue in the Loess Plateau coal mining area [J]. Journal of Coal, 2008(10):1141-1146.

- [24] Hao J L, Han Z Z, Wang C Z, et al. Distribution of heavy metals in the topsoil of the Jining mining area[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(3):395-399.
- [25] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3):410-418.
- [26] 黄石德.铁矿废弃地不同修复模式土壤重金属污染
   特征及评价[J].防护林科技,2019(3):5-7.
   Huang S D. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soils of iron ore waste sites with different

remediation modes [ J ]. Protective Forest Technology, 2019(3):5-7.

 [27] 葛晓颖,欧阳竹,杨林生,等.环渤海地区土壤重金属 富集状况及来源分析[J].环境科学学报,2019,39
 (6):1979-1988.
 Ge X Y, Ouyang Z, Yang L S, et al. Analysis of the

enrichment status and sources of heavy metals in soils in the Bohai Sea Rim [J]. Journal of Environmental Science, 2019, 39(6): 1979-1988.

- [28] 赵俊兴,李光明,秦克章,等. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. 科学通报,2019,64(24):2484-2500.
  Zhao J X, Li G M, Qin K Z, et al. Research progress and problem analysis of cobalt rich deposits [J]. Science Bulletin,2019,64(24):2484-2500.
- [29] 张晓薇,王恩德,安婧.辽阳弓长岭铁矿区重金属污染评价[J].生态学杂志,2018,37(6):1789-1796.
  Zhang X W, Wang E D, An J. Evaluation of heavy metal pollution in the Gongchangling iron ore mining area of Liaoyang [J]. Journal of Ecology, 2018, 37 (6): 1789-1796.