



# 矿区煤矸石堆对土壤重金属污染时空特征研究

李杰锋

(吕梁学院 建筑系, 山西 吕梁 033000)

**摘要:** 伴随着煤炭资源的大量回采, 产生了大量的煤矸石经过地表堆积形成矸石山。矸石山侵占大量土地的同时会释放多种有害重金属元素, 能够在周围土壤中进行富集, 通过食物链在生态中传递, 会对煤矸石周围人群造成伤害。煤矸石周围土壤中重金属分布规律对于矿区生态安全具有重要意义。以山西某矿区两个典型矿井矸石山堆积地为研究对象, 基于数理统计方法, 分析了周围环境和土壤中七种重金属的分布特征。研究结果表明: 甲、乙煤矿的煤矸石七种重金属元素含量明显高于当地背景值, Cr 的污染最大, 污染最小的是 Hg; 下风向区域的重金属污染含量明显高于上风向的重金属含量; 平面方向上, 煤矿甲的土壤重金属污染明显高于煤矿乙对土壤的污染与煤矿矸石堆堆放时间有关; 煤矿矸石堆周围重金属元素含量随着距矸石堆的距离增加而减少, 其变化趋势存在差异; 随着采矿活动的不断进行, 矿区矸石堆周围土壤中能够明显的表现出重金属积累的特征; 甲、乙煤矿矸石堆周围土壤重金属元素含量随着深度的增加呈递减趋势。土壤中的重金属元素主要集中在土壤表层。煤矿甲在剖面方向上重金属含量明显高于煤矿乙。

**关键词:** 环境工程; 生态环境; 重金属元素; 分布特征; 煤矸石

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.02.032

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 02-0181-06

我国是一个煤矿大国, 煤炭在我国能源结构中占有非常重要的地位, 对于我国经济发展具有重要的促进作用<sup>[1]</sup>, 能源十三五规划明确指出, 至 2020 年末, 我国煤炭消耗量占一次性能源的 62% 以内, 可见未来相当长时间内, 我国能源结构还是以煤炭为主<sup>[2]</sup>。

截至目前, 我国已开采煤炭资源 400 多亿吨, 煤炭资源开采过程中, 井工开采比例已接近 90%, 井工开采需要开拓巷道<sup>[3-4]</sup>, 大量巷道的开拓产生了巨量的煤矸石, 煤矸石在地表堆积, 由于风化、水力作用以及自然等作用<sup>[5-6]</sup>, 煤矸石中的大量重金属会释放到周围环境中去, 造成环境的大量污染, 掌握煤矸石对土壤的环境影响对于环境污染防治具有重要意义<sup>[7]</sup>。本文以山西某矿区

为例, 通过测定该矿区煤矸石及周围土壤中的重金属, 分析煤矸石堆对周围土壤的重金属影响程度及时空分布特征, 为煤矸石土壤重金属污染防治提供技术支撑。

## 1 实验方法

### 1.1 样品

山西省中部西侧地区是我国非常重要的主焦煤生产基地, 煤矿甲主要开采太原组上部的 6 号煤层, 煤层平均厚度约 5.5 m。煤矿乙主要开采太原组下部的 10 号煤层, 煤层平均厚度为 6.4 m, 其采矿历史约为 30 年和 20 年。煤矸石主要是由巷道掘进产生的矸石、采煤过程中的矸石以及洗选过程中的矸石。主要通过测定矿区矸石中以及

收稿日期: 2021-04-22; 改回日期: 2021-05-21

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目 (2020L0711); 吕梁市引进高层次科技人才重点研发项目 (Rc2020-113)

作者简介: 李杰锋 (1985—), 男, 博士, 讲师。

矸石周围土壤中的重金属进行分析 (Cr、Zn、Cu、Pb、Cd、Hg、As)，煤矸石表层土壤样品的选取主要根据其风向进行，对于土壤采集点主要是其西北的主要风向，在西北风向分上风口和下风口一定距离下合理选择采集点。共采集 26 个点，其中煤矿甲采集 12 个点，煤矿乙采集 14 个点。

对于煤矿矸石堆的选取各进行取样一份进行实验，其中煤矿甲土壤采集点位于矸石堆西 70 m 附近进行采集，煤矿乙土壤采集点在矸石堆东南角 60 m 附近进行采集，采集过程中每隔 10 cm 取样一次，共采集 5 次<sup>[8]</sup>。

## 1.2 样品处理及测试方法

将样品进行风干处理并剔除样品中的杂物后，对风干的样品进行研磨并通过 0.15 mm 筛。将处理好的样品进行消解，采用湿式消解法<sup>[9-10]</sup>。实验开始后，选取大约 0.5 g 的土样放到 50 mL 的聚四氟乙稀坩埚中，并加少量的水进行湿润，再加入 10 mL 的盐酸进行消煮，消煮 45 min 中剩余

大约 3 mL，待液体稍微冷却后依次加入 5 mL 的硝酸、5 mL 氢氟酸以及 3 mL 的高氯酸再次进行消煮到粘稠状停止，采用去离子水将粘稠状液体转移到 50 mL 的比色管中进行摇匀。静止一段时间后过滤测定溶液中 Cr、Zn、Cu、Pb、Cd、Hg、As 的总含量。采用火焰原子吸收分光光度计和石墨炉分光光度计测定 Cr、Zn、Cu、Pb、Cd、Hg、As 的含量。在分析过程中采用优级纯的试剂进行实验，使用的水均为去离子水。每个样品进行两次平行测量。分析过程按照国家标准进行质量控制<sup>[11]</sup>。

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 矸石堆周围土壤金属污染评价

采用中国环境监测总站 1990 年编写的中国土壤元素背景值中的山西省土壤重金属含量作为基础数据进行对比分析，得出基础数据和矸石堆重金属测定结果见表 1。

表 1 矸石中重金属含量对比/(mg·kg<sup>-1</sup>)  
Table 1 Comparison of heavy metal content in gangue

名称	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	Hg	As
山西省背景值	15.500	72.400	25.000	59.100	0.1118	0.0193	9.4000
煤矿甲矸石堆	96.400	170.20	38.500	204.50	0.3610	0.1230	15.670
煤矿乙矸石堆	62.500	97.600	34.200	112.40	0.2420	0.0840	10.980

由表 1 可知，煤矿甲和乙矸石堆堆积后其重金属含量明显升高，其中尤以煤矿甲最为严重，其 Cr 的污染值增加得最大，比背景值增加了 145.5 mg/kg，污染非常严重。Hg 的污染增加含量最小，其含量增加值为 0.1037 mg/kg，但其增加倍数最大，是背景值的 6.37 倍；对于煤矿乙，其 Cr 的污染值增加得最大，比背景值增加了 53.3 mg/kg，污染比较严重。Hg 的污染增加含量最小，其含量增加值为 0.0647 mg/kg，但其增加倍数最大，是背景值的 4.35 倍。

采用地质累计指数法对矿区周围土壤重金属污染进行评价，该方法不但考虑了自然地质过程造成的背景值影响，该很好的反映了重金属分布的自然变化特征，能够很好的判别煤矸石的存在对于环境的影响，得出矸石堆周围土壤重金属污染评价结果见表 2。

由表 2 结果可知，对于煤矿甲其重金属污染

程度 Pb>Cr>Hg>Cd>As>Zn>Cu。煤矿乙其重金属污染程度 Hg>Pb>Cd>As>Cr>Cu>Zn。甲乙两个煤矿受到重金属污染程度存在差别。大但存在一定的同样性。均受到重金属 Pb 的较重污染，同时，煤矿乙受到 Hg 的污染最严重。Cu、Zn 的污染程度较低，基本上与矸石中重金属污染保持一致，由此可知，在煤矿的长期活动中，煤矸石在风化、淋溶的作用下导致周边土壤发生累积性重金属污染。而且煤矿甲的土壤重金属污染明显高于煤矿乙对土壤的污染，经分析其与煤矿甲数十年的采矿活动有关；在两煤矿矸石堆周围，下风向区域的重金属污染含量明显高于上风向的重金属含量。经分析，该地区以西北风为主，当矸石堆受到风化、水蚀等作用后转化成粉末状，在风的作用下迁移到下风口，导致其含量明显高于上风口。

### 2.2 矸石堆周围土壤表层重金属分布特征

煤矿矸石堆周围土壤重金属元素平面分布特

表 2 矸石堆周围土壤重金属污染评价结果  
Table 2 Evaluation of heavy metal pollution in soil around gangue pile

煤矿	项目	Pb		Zn		Cu		Cr		Cd		Hg		As	
		含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub> (mg·kg <sup>-1</sup> )	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub>	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub>	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub>	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub>	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub>	含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>geo</sub>
煤矿甲	上风口	91.75	1.98	149.58	0.46	28.65	-0.38	212.50	1.26	0.3270	0.96	0.0650	1.16	21.560	0.61
	下风向	92.82	1.99	152.62	0.49	39.12	0.06	276.80	1.64	0.4220	1.33	0.0870	1.58	27.420	0.96
	平均值	92.29	1.98	151.10	0.47	33.89	-0.14	244.65	1.46	0.3745	1.16	0.0760	1.39	24.490	0.80
	污染度	中度	/	无—中	/	无污染	/	中度	/	无—中	/	中度	/	无—中	/
煤矿乙	上风口	40.27	0.79	95.740	-0.18	33.82	-0.15	78.480	-0.17	0.2420	0.53	0.0520	0.84	12.170	-0.21
	下风向	46.69	0.97	102.75	-0.07	37.25	-0.01	92.500	0.06	0.3210	0.94	0.0740	1.35	16.450	0.22
	平均值	43.48	0.90	99.250	-0.12	35.54	-0.07	85.490	-0.05	0.2815	0.75	0.0630	1.21	14.310	0.02
	污染度	无—中	/	无污	/	无污染	/	无污染	/	无—中	/	无—中	/	无—中	/

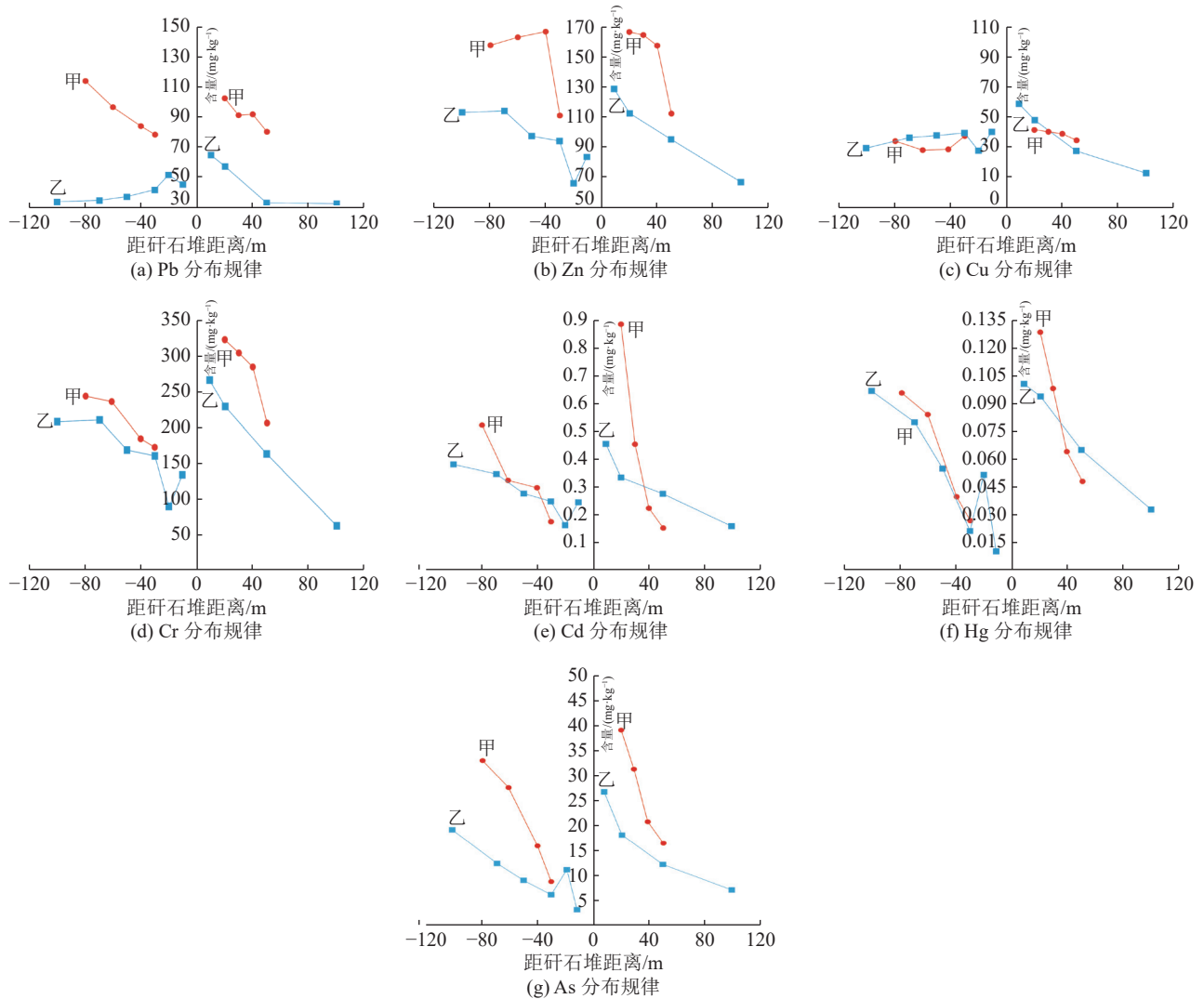


图 1 重金属分布规律  
Fig.1 Distribution of heavy metals

征见图 1。其中横坐标正方向代表东南方向，横坐标负方向代表西北方向。

由图 1 可知，煤矿矸石堆周围重金属元素含量随着距矸石堆的距离增加而减少，其变化趋势

存在差异。两煤矿在下风口重金属含量随着距离的增加而减少的趋势非常明显。在上风口其变化趋势不明显。其中煤矿甲 Pb 在上风口随着距矸石堆的距离增加而不断减少，这与其靠近公路以及农田施肥、灌溉有关。而煤矿乙的 Pb 含量在东南 10 m 处有明显增加，这与其靠近公路有关。

煤矿土壤中重金属元素分布及其迁移受多种因素影响，其中最主要的是风化迁移以及雨水的冲刷流动和农业灌溉等。不同的重金属元素对于土壤的污染程度也各不相同。说明重金属在煤矸石中的赋存特征以及风化迁移存在着差异。两个

煤矿由于其地理特征不同，其重金属污染变化特征也存在着差异。随着采矿活动的不断进行，矿区矸石堆周围土壤中能够明显的表现出重金属积累的特征，两个开采多年的煤矿，矸石堆对周围土壤污染程度将有逐步增加的变化趋势。

### 2.3 矸石堆周围土壤剖面重金属分布特征

为了进一步分析矸石堆对于土壤不同深度的污染程度，对其不同深度的土壤重金属含量进行分析，得出土壤剖面方向上重金属分布特征曲线见图 2。

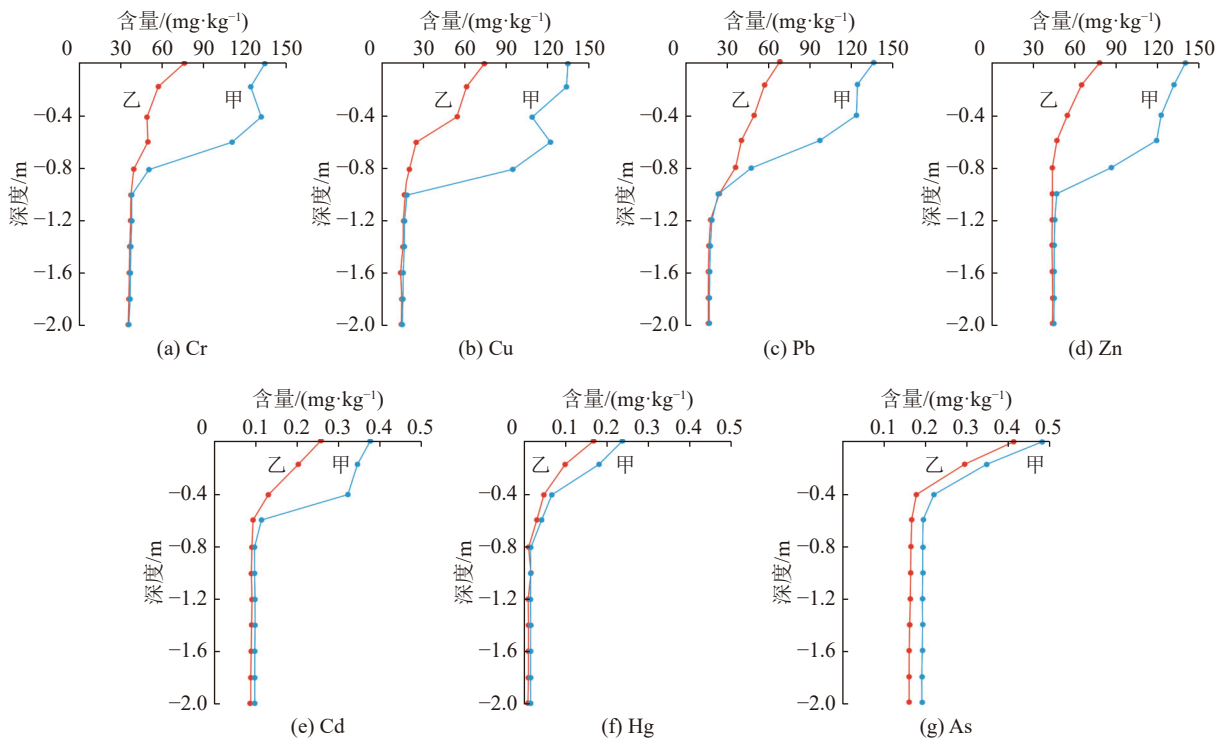


图 2 矸石堆周围土壤不同深度下重金属元素浓度分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of heavy metal element concentrations in different depths of soil around gangue pile

由图 2 可知，甲、乙煤矿矸石堆周围土壤重金属元素浓度随着深度的增加浓度呈递减趋势，但存在一定的波动性。这些重金属元素随着土壤溶液下渗过程中受到雨量的季节性变化。土壤中的重金属元素主要集中在土壤表层，而对于土壤深度由于植物根系的吸收作用，能够大大降低重金属含量，但这也增加了重金属元素进入到实物链的风险。煤矿甲在剖面方向上重金属含量明显高于煤矿乙，表明，土壤重金属污染受时间影响明显，且煤矿甲的土壤剖面重金属污染尤其严重。

### 3 结论

(1) 甲、乙煤矿的矸石中七种重金属元素含量明显高于当地背景值，Cr 的污染值增加得最大，污染增加最小的是 Hg。

(2) 煤矿甲其重金属污染程度 Pb>Cr>Hg>Cd>As>Zn>Cu。煤矿乙其重金属污染程度 Hg>Pb>Cd>As>Cr>Cu>Zn。两煤矿重金属的污染程度基本上一致；下风向区域的重金属污染含量明显高于上风向的重金属含量；煤矿甲的土壤重金属污染明显高于煤矿乙对土壤的污染与煤矿矸石堆

堆放时间有关。

(3) 煤矿矸石堆周围重金属元素含量随着距矸石堆的距离增加而减少，其变化趋势存在差异；随着采矿活动的不断进行，矿区矸石堆周围土壤中能够明显的表现出重金属积累的特征，矸石堆对周围土壤污染程度将有逐步增加的变化趋势。

(4) 甲、乙煤矿矸石堆周围土壤重金属元素浓度随着深度的增加浓度呈递减趋势，但存在一定的波动性。土壤中的重金属元素主要集中在土壤表层。煤矿甲在剖面方向上重金属含量煤明显高于乙。

### 参考文献：

- [1] 王涛, 王晓平, 张新. 煤中伴生矿产赋存状态及提取方法综述[J]. *矿产综合利用*, 2019(4):21-25.  
WANG T, WANG X P, ZHANG X. Summary of occurrence and extraction methods of associated minerals in coal[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(4):21-25.
- [2] 王晓蕾. 新型煤岩体加固注浆料制备及应用分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(3):844-851.  
WANG X L. Preparation and application analysis on a new grouting material for coal and rock mass reinforcement[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(3):844-851.
- [3] 刘应冬, 徐力, 王先达, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中主要金属元素淋滤浸出行为研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):84-90.  
LIU Y D, XU L, WANG X D, et al. Study on leaching behavior of main metal elements from panzhihua vanadium-titanium magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):84-90.
- [4] 刘应冬, 代力, 张卫华. 青海某金矿集区土壤重金属污染评价及综合利用讨论[J]. *矿产综合利用*, 2018(5):97-100.

LIU Y D, DAI L, ZHANG W H. Assessment of soil heavy metals pollution and comprehensive utilization in a gold mine area in qinghai[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(5):97-100.

- [5] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. *矿产综合利用*, 2017(6):5-9.  
HANG Z X, WAN D J, HU J P, et al. Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(6):5-9.
- [6] LIU X Y, BAI Z K, SHI H D, et al. Heavy metal pollution of soils from coal mines in China[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(2):1163-1177.
- [7] ZHANG K, GAO J, MEN D P, et al. Insight into the heavy metal binding properties of dissolved organic matter in mine water affected by water-rock interaction of coal seam goaf[J]. *Chemosphere*, 2021, 45(2):129-134.
- [8] 闫英师, 李玉凤, 赵礼兵. 改性钢渣吸附重金属离子的研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2021, 41(1):8-13.  
YAN Y S, LI Y F, ZHAO L B. Research status of heavy metal ions adsorption by modified steel slag[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(1):8-13.
- [9] HOU L, LI X J, LI F. Hyperspectral-based inversion of heavy metal content in the soil of coal mining areas[J]. *Journal of environmental quality*, 2019, 48(1):57-63.
- [10] 刘雅瑾, 雷国元. 冶金工业园周边水域底泥中重金属的污染评价[J]. *矿产综合利用*, 2017 (2): 90-94.  
LIU Y J, LEI G Y. Research pollution assessment of heavy metal in the surrounding waters sediments from metallurgical industrial park[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017 (2): 90-94.
- [11] Han Y, Li Q, Liu N. Heavy metal accumulation of 13 native plant species around a coal gangue dump and their potentials for phytoremediation[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2020, 19(1):191-199.

## Study on Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metal Pollution in Coal Gangue Piles in Mining Area

Li Jiefeng

(Department of Architecture, Lvliang University, Lvliang, Shanxi, China)

**Abstract:** With the massive mining of coal resources, a large amount of coal gangue has been accumulated on the surface to form gangue hills. Gangue hills encroach on a large amount of land while releasing a

variety of harmful heavy metal elements, which can be enriched in the surrounding soil and transmitted in the ecology through the food chain, which will cause harm to the people around the gangue. The distribution of heavy metals in the soil around coal gangue is of great significance to the ecological safety of mining areas. Taking two typical mine gangue piles in a mining area in Shanxi as the research object, based on mathematical statistics, the distribution characteristics of seven heavy metals in the surrounding environment and soil are analyzed. The research results show that the seven heavy metal elements in coal gangue of coal mines A and B are significantly higher than the local background value. Cr has the largest pollution and Hg is the least polluted; the heavy metal pollution content in the downwind area is significantly higher than the heavy metal content in the upwind direction; In the plane direction, the soil heavy metal pollution of coal mine A is significantly higher than that of coal mine B. It is related to the time of coal mine gangue pile stacking; the content of heavy metal elements around the coal mine gangue pile decreases with the increase of the distance from the gangue pile, and their changing trends are different. With the continuous progress of mining activities, the soil around the gangue piles in the mining area can clearly show the characteristics of heavy metal accumulation; the content of heavy metal elements in the soil around the gangue piles of A and B coal mines shows a decreasing trend with the increase of depth. The heavy metal elements in the soil are mainly concentrated in the surface layer of the soil. Coal Mine A has significantly higher heavy metal content coal than Coal Mine B in the section direction.

**Keywords:** Environmental engineering; Ecological environment; Heavy metal elements; Distribution characteristics; Coal gangue



(上接第 134 页)

## Study on Separation of Gold from Tailings by Combined Flotation-Gravity Beneficiation Flowsheet

Chen Guang<sup>1,2</sup>, Yang Kun<sup>1</sup>, Chen Sizhu<sup>3</sup>, Lin Yiming<sup>4</sup>, Xiong Ping<sup>2</sup>, Zhang Xiaojun<sup>2</sup>

(1.Sichuan Non-Ferrous Technology Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China; 2.Sichuan Times Oasis Environmental Remediation Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China; 3.Sichuan Non-ferrous Metallurgy Research Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China; 4.Sichuan Non-Ferrous Mining and Metallurgy Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** A gold tailings in Mianyang contains 0.8 g/t gold, 1.24% sulfur and 3.45% carbon, and the gold mainly existing as particles, intergrowth with gangue minerals and wrapped in iron oxides. The gangue minerals are mainly quartz, silicate and organic carbon, etc, which named as high carbon and low gold deposit. The combined beneficiation flowsheet was developed to recovery gold, and good results were achieved. Flotation concentrate with a yield of 3.06% and grade of 12.7 g/t was achieved, which makes up 48.52% of total gold. Meanwhile, gravity concentrate with a yield of 2.82% and grade of 4.54 g/t was achieved, account for 16.02% of total gold. The final tailing with grade of 0.23 g/t was obtained. Therefore, the developed beneficiation flowsheet provides a technical basis for comprehensive recovery of tailings.

**Keywords:** Tailings; Flotation; Gravity separation; Combined beneficiation flowsheet