

矿山环境保护

某废弃煤矿区土壤重金属污染风险评价

张永康^{1,2,3}, 曹耀华^{1,2,3}, 冯乃琦^{1,2,3}, 刘岩^{1,2,3}, 张耀^{1,2,3}, 王庆^{1,2,3}, 刘佳^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 国家非金属矿产资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006; 3. 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006)

摘要: 煤矿在开采过程中产生大量煤矸石、洗煤水等废弃物, 其中的重金属污染物经沉降、径流、淋滤等作用迁移、扩散至周边水土环境中, 对生态环境构成威胁。为研究某废弃煤矿区土壤重金属污染状况, 评价重金属污染生态风险, 检测了该矿区煤矸石、水、土壤样品中 Cu、Pb、Zn、As、Cr、Ni、Hg、Cd 元素质量分数, 利用单因子指数法和潜在生态危害指数法分别分析了土壤重金属污染状况和潜在生态风险; 重点分析了矿区洗煤厂下游土壤重金属污染特征, 并采用改进 BCR 连续提取法分析了洗煤厂下游土壤样品重金属元素 (Cu、Zn、Cd) 形态, 借鉴风险评价编码法评价了重金属元素的生物有效性和环境风险。结果表明: ① 以平均值计, 废弃煤矿区煤矸石中重金属质量分数较低, 仅 Cr 元素质量分数稍高于土壤中的质量分数, 且煤矸石中重金属元素质量分数均未超过相应的农用地土壤风险筛选值, 对矿区土壤重金属污染影响小。② 废弃煤矿区土壤重金属超标元素为 Cu、Zn、Cd、Ni、As, Cu、Zn、Ni 和 As 元素污染较轻微, Cd 元素污染较严重; Cu、Zn、Ni 元素污染区主要集中在矸石山西部和东南部地块, 在空间分布上有一定重合; As 元素污染分布在矸石山东北部地块, Cd 元素污染在矿区广泛分布, 以中度-重度污染为主。③ Cd、Hg 元素存在潜在生态危害风险, Cd 元素潜在生态危害风险程度高, 重金属元素综合潜在生态危害风险等级较高, 主要为中等-强风险。④ 洗煤厂下游区域沿水流方向土壤重金属元素总体呈递减趋势, Cd 元素污染较严重, Cu、Zn、Ni、As 元素污染集中在洗煤厂下游 200 m 内, 剖面样品中垂向方向上重金属元素质量分数呈递减趋势, 在垂向上没有累积。⑤ 矿区地下水水质较好, 矿井排水重金属元素质量分数及 pH 满足Ⅲ类地表水水质标准限值, 矿井水外排对周边土壤重金属污染影响小。⑥ Cu 和 Zn 元素酸可提取态占比低, 生物有效性低, Cd 元素酸可提取态占比高, 呈高度风险-极高风险, 生物有效性强, 环境风险高。基于矿区重金属污染现状, 建议进一步加强土壤重金属污染防治工作, 加强源头治理、农产品食品安全监测和 Cd 元素污染调查研究工作。

关键词: 重金属污染; 煤矿; 潜在生态危害风险; 重金属形态; 生物有效性; 风险评价**中图分类号:** X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3188-11

Risk assessment of heavy metals in the soil of an abandoned coal mine area

ZHANG Yongkang^{1,2,3}, CAO Yaohua^{1,2,3}, FENG Naiqi^{1,2,3}, LIU Yan^{1,2,3}, ZHANG Yao^{1,2,3},
WANG Qing^{1,2,3}, LIU Jia^{1,2,3}

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources CAGS, Zhengzhou 450006, China; 2. China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, China; 3. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, China)

收稿日期: 2023-06-02 修回日期: 2023-10-15 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0693

基金项目: 中国地质调查局地质调查资助项目 (DD20230038, DD20221699); 国家重点研发计划资助项目 (2020YFC1908801)

作者简介: 张永康 (1987—), 男, 江西上饶人, 工程师, 硕士。E-mail: zhangyongkang0102@163.com

通讯作者: 冯乃琦 (1981—), 男, 河南新乡人, 高级工程师, 硕士。E-mail: fengnaiqi@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 张永康, 曹耀华, 冯乃琦, 等. 某废弃煤矿区土壤重金属污染风险评价[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3188-3198.

ZHANG Yongkang, CAO Yaohua, FENG Naiqi, et al. Risk assessment of heavy metals in the soil of an abandoned coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3188-3198.



移动阅读

Abstract: During the coal mining process, a large amount of waste such as coal gangue and coal washing water is generated. The heavy metal pollutants in those wastes migrate and diffuse into the surrounding soil and water environment through sedimentation, runoff, leaching and other processes, posing a threat to the ecological environment. In order to study the heavy metal pollution in an abandoned coal mine area and to evaluate its ecological hazard risk, the contents of Cu, Pb, Zn, As, Cr, Ni, Hg, Cd elements in the coal gangue, water and soil samples of the mining area were detected. The single factor index method and potential ecological hazard index method were used to analyze the heavy metal pollution and its potential ecological hazard risk. The heavy metal pollution in the soil downstream of the coal washing plant in the mining area was mainly studied. The improved BCR continuous extraction method was used to analyze the forms of heavy metal elements (Cu, Zn, Cd) in the soil samples and the risk assessment coding method was employed to evaluate the bioavailability and environmental risks of heavy metal elements. The results show that: ① on average, the heavy metal contents in the coal gangue of the coal mine area are relatively low, with only Cr element content being slightly higher than that in soil. Moreover, the heavy metal element contents in the coal gangue do not exceed the risk intervention values for the soil of agricultural land, which has a little impact on heavy metal pollution in the soil. ② The heavy metal contents in the mine area exceed the standard, including that of Cu, Zn, Cd, Ni and As elements, and the Cd pollution is relatively serious. The pollution areas of Cu, Zn, and Ni elements are mainly concentrated in the western and southeastern parts of the gangue hill, with a certain overlap in spatial distribution. The As element pollution is distributed in the northeastern part of the gangue hill, while the Cd element pollution is widely distributed in the mine area, with moderate to severe pollution. ③ The Cd and Hg elements have potential ecological hazard risk, with a higher risk for Cd element. The comprehensive potential ecological hazard risk (RI) of heavy metal elements is mainly moderate to strong. ④ The contents of heavy metal elements in the soil downstream of the coal washing plant show an overall decreasing trend along the water flow direction, with the Cd element pollution being more severe, and the Cu, Zn, Ni, As element pollution concentrated within 200 m downstream of the coal washing plant. The heavy metal element contents of the profile sample shows a decreasing trend in the vertical direction, with no accumulation in the vertical direction. ⑤ The groundwater quality in the mine area is good, and the pH and the contents of heavy metal elements in the mine water meet the limit values of Class III surface water quality standards. The discharge of mine water drainage has a little impact on heavy metal pollution in the soil. ⑥ The proportions of acid extractable Cu and Zn elements are low, with low bioavailability, while that of Cd element is high, presenting a high-extremely high risk, with strong bioavailability and high environmental risk. Based on the current situation of heavy metal pollution in the mining area, it is recommended to further strengthen the prevention and control of heavy metal pollution, strengthen the source control, monitoring of agricultural food safety, and the investigation and research on the Cd element pollution.

Key words: heavy metal pollution; coal mine; potential ecological hazard risk; speciation of heavy metal; bioavailability; risk assessment

煤炭是我国主导的能源^[1-3],也是重要的化工原料。煤炭资源的开发利用为国民经济发展作出了突出贡献。同时,煤炭资源的开采利用也造成一系列环境污染、地面沉降、含水层破坏、生态破坏等灾害问题^[4-5]。目前,煤矿区周边土壤重金属污染问题日益受到人们的关注。在煤炭的开采、运输、加工和利用过程中,煤与煤矸石粉尘所蕴含的重金属经沉降、淋溶、渗滤、迁移等多种方式进入土壤富集积累,进而污染煤矿周边土壤^[6-8]。针对煤矿区周边的重金属污染问题,国内外学者开展了大量研究,我国新疆、内蒙古、陕西、宁夏、山西、河南、安徽、贵州等主要产煤基地均开展大量的重金属污染评价工作^[9-18],取得了丰硕成果。这

些研究主要针对大型的煤矿开采基地基于重金属元素全面开展污染评价,分析煤矿区周边土壤重金属污染特征、污染程度,重金属元素来源等,为煤矿区土壤重金属污染防治、土壤修复提供了重要支撑。李海霞等^[19]利用潜在因子法对淮南某废弃矿区污染场进行了土壤重金属污染风险评价,孙贤斌等^[20]对淮南煤矿废弃地土壤重金属潜在生态风险,并结合GIS技术分析其空间变化趋势。总体而言,针对废弃煤矿区开展土壤重金属污染研究较少,对煤矿周边土壤中重金属元素形态分布及其污染评价研究偏少。开展废弃煤矿区周边土壤重金属污染研究,对废弃煤矿区水土污染防治、生态修复工作具有重大意义。

笔者以江西省某典型废弃煤矿区为研究对象,以矿区周边土壤重金属全量及重金属元素形态分析为切入点,分析了重金属全量污染状况及潜在生态风险,以洗煤厂下游地块为典型矿业活动影响区,重点研究了其下游区域重金属污染特征,基于重金属元素形态开展了重金属元素生物有效性和环境风险评价。本研究可为该废弃煤矿区土壤重金属污染防治提供针对性的指导。

1 矿区概况

某废弃煤矿区位于江西省西部,面积约 6.6 km²,地貌类型为低山丘陵。该煤矿区内分布众多小煤窑,煤矿开采方式主要为地下开采,前期无序开采,破坏了大量林地。原煤开采加工后,煤矸石堆存于附近山林。经几十年开采,该煤矿区周边山林中堆存了大量煤矸石,占地面积约 2.09 km²。初步统计煤矸石堆存量可达 500 万 m³,形成了成片矸石山。目前,该废弃煤矿区有 2 家砖厂利用煤矸石制砖外售,矸石山以自然恢复为主,除露天开挖的采坑外,大部分矸石堆已自然复绿,植被主要以泡桐树和灌丛为主,覆盖率 15%~25%,部分矸石山进行了人工复绿,主体工程为削坡、边坡防护、在堆场沟口设置挡矸墙、截排水沟,在矸石堆上覆土绿化、播撒草种。矿区周边人口稠密,分布大片村庄和农田。该矿区周边土地利用类型主要为农用地、林地和采矿用地。土壤类型主要为红壤和水稻土。目前该矿区煤矿企业已全部关停,大量长期堆存的煤矸石给周边土地环境质量造成巨大威胁。开展矿山水土污染评价、修复治理是迫切需要解决的问题。

该煤矿区属亚热带季风湿润性气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,年平均气温 17.4 ℃。年平均降水量 1 570.4 mm,降雨集中在 4—6 月,日最大降水量 175.5 mm;年平均蒸发量为 1 242.4 mm,且集中于 6—9 月,9 月至翌年 1 月为枯水期。矿区无主导风向,年最大风频风向为西南风,风频 11.2%,年平均风速 1.6 m/s,其次为东北偏东风,风频 11.1%,静风频率 38.5%。

2 材料与方法

2.1 样品采集与预处理

结合废弃煤矿区地形地貌和煤矸石堆场、农用地分布情况,总体以网格法布设土壤采样点,在煤矸石堆场下游、洗煤厂下游周边农用地加密采样。洗煤厂有一排水渠大致呈西南—东北流向,煤矿矿井水由此排水渠外排,附近农田主要以排水渠及大气降水作为

灌溉水源,沿西南—东北方向在排水渠两侧的农田加密采集土壤样品。采样方法:表层土(0~20 cm)以梅花点法采样,每个采样点设 5 个采样分点,每个分点土壤样品质量不小于 1 kg,各分点样品自然阴干、除杂后过筛混合均匀,四分法取样,60 ℃ 烘干后研磨至 -74 μm 送样分析。剖面土壤(0~100 cm)样品取样点深度分别为 0~20、0~40、40~60、60~80、80~100 cm;每个样品质量不小于 2 kg,阴干、除杂、混匀、筛分、烘干、研磨和取样等预处理同表层土。

在矸石堆场布设 5 个采样点,每个采样点设置 5 个采样分点,每个分点采集矸石样品不小于 5 kg,采样深度 0~1.2 m,各分点样品阴干后,破碎、细碎至 2 mm,混合均匀,四分法取样,烘干、研磨和取样等预处理同表层土。

在调查区内采集矿井排水、露天采坑或塌陷坑积水、泉水、民井水,采样时检测 pH(雷磁便携式酸度计, PHBJ-260),水质样品采集 500 mL,添加分析纯浓硝酸酸化至 pH<2,5 日内送样分析。

样品采集时详细记录采样地点、坐标、周边地形地貌、农作物种植情况、潜在污染源及其规模、距离、污染方式等,共采集矸石、水土样品 48 件。采样点布设示意如图 1 所示。

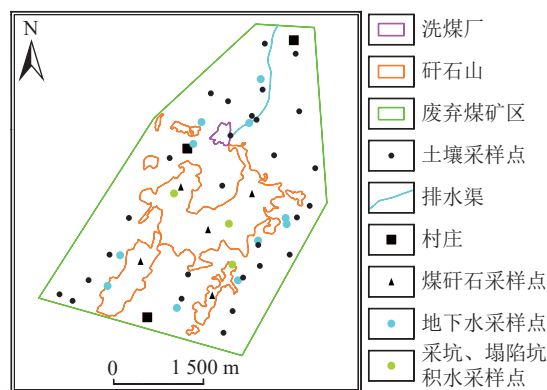


图 1 采样点分布示意

Fig.1 Distribution of soil sampling points

2.2 样品测试方法

样品中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni 元素全量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)检测(ICP-MS 生产厂家:安捷伦,型号:Agilent 7700x),As 和 Hg 元素采用原子荧光法检测(原子荧光光度计生产厂家:北京海光,型号:AFS-230E)。

土壤样品重金属元素形态分析则采用改进 BCR 连续提取法^[21]。该方法分别使用乙酸、盐酸羟胺、过氧化氢-乙酸铵为提取剂连续提取后将重金属元素形态分为酸可提取态、可还原态、可氧化态,提取后的残渣经氢氟酸-高氯酸消解后称为残渣态。重金属元素

形态检测详细流程详见文献[22–23]。土壤重金属元素全量、元素形态含量测试过程中均做空白试验和平行样测定,测试结果精密度满足允许误差,同时采用国家标准物质进行质量控制。

2.3 重金属污染评价方法

2.3.1 重金属全量污染分析评价

笔者采用单因子指数法^[24–25]和潜在生态危害指数法^[26–27]对研究区域土壤重金属污染状况进行分析评价。

(1) 单因子指数法计算公式为

$$P_i=C_i/S_i$$

式中, P_i 为土壤中重金属*i*的环境质量指数; C_i 为重金属*i*的质量分数,mg/kg; S_i 为重金属*i*的评价标准,mg/kg,本文中为《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB15618—2018)》中农用地土壤污染风险筛选值。

(2) 潜在生态危害指数法计算公式为

$$I_R=\sum E_i^i, E_i^i=T_i^iC_i^i, C_i^i=C_{mu}^i/C_n^i$$

式中, I_R 为土壤中多种重金属综合潜在生态危害指数; E_i^i 为重金属元素*i*的潜在生态危害系数; T_i^i 为重金属元素*i*的毒性响应系数; C_i^i 为重金属元素*i*的污染参数; C_{mu}^i 为重金属元素*i*的实测质量分数; C_n^i 为*i*元素对应的评价标准。

潜在生态危害指数法由瑞典科学家 HAKAN-SON 于 1980 年提出^[28],该方法通过将金属总量测试结果与区域背景值进行比较,消除了区域差异及异源污染影响。且为反映特定区域的分异性,避免大尺度

平均参考值的偏差,笔者采用废弃煤矿矿区所在地市(江西宜春地区)土壤重金属背景值^[29]作为 C_n^i 对应的评价标准。文中 8 种重金属元素的毒性系数采用徐争启等研究成果^[30],Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Ni、As 和 Hg 的毒性系数依次为 5、5、1、30、2、5、10、40。单项元素潜在生态危害指数 E_i^i 和综合潜在生态危害指数 I_R 分级标准见表 1。 E_i^i 和 I_R 分级标准见文献^[31]。

表 1 潜在生态危害指数 E_i^i 和 I_R 分级标准

Table 1 Classification standards of potential ecological

hazard index E_i^i and I_R

标准	危害程度	标准	危害程度
<40	轻微	<150	轻微
$40\leq E_i^i<80$	中等	$150\leq I_R<300$	中等
$80\leq E_i^i<160$	强	$300\leq I_R<600$	强
$60\leq E_i^i<320$	很强	≥ 600	很强
≥ 320	极强		

2.4 数据处理

废弃煤矿区洗煤厂下游土壤重金属污染特征分析和土壤重金属形态分布采用 Origin 8.5 作图,重金属元素 Cu、Zn、Cd、As 和 Ni 元素污染空间分布图采用 MapGIS 6.7 作图。

3 结果与分析

3.1 煤矸石样品检测结果分析

废弃煤矿区煤矸石样品检测结果见表 2。

表 2 煤矸石样品中重金属质量分数结果统计

Table 2 Statistic results of heavy metals in coal gangue

mg/kg

样品	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	Ni
1号	43.30	27.00	104.00	0.42	136.00	0.007	10.80	42.90
2号	28.70	22.20	82.50	0.40	92.40	0.013	10.30	34.50
3号	30.40	18.10	74.20	0.34	97.60	0.014	8.02	31.30
4号	35.00	25.20	99.70	0.53	112.00	0.008	9.45	40.10
5号	30.10	25.60	83.60	0.30	78.20	0.008	8.87	28.90
平均值	33.50	23.62	88.80	0.40	103.24	0.010	9.49	35.54
背景值	22.14	33.01	71.30	0.11	58.08	0.100	11.67	21.43
土壤风险筛选值	50.00	100.00	200.00	0.40	250.00	0.500	30.00	70.00

由表 2 可知,该废弃煤矿区 5 个煤矸石样品有 2 个样品 Cd 元素超过农用地土壤风险筛选值,Cd 元素质量分数是农用地土壤筛选值 1.05 倍和 1.33 倍,其他重金属元素质量分数均小于对应的农用地土壤风险筛选值。以平均值计,煤矸石中的重金属元素质量

分数低,均未超过相应的农用地土壤风险筛选值,Cd 元素质量分数远高于背景值。有文献报道^[32],矸石山造成周边土壤污染的途径主要有 2 种:一种是雨水淋滤作用;另一种是矸石山中元素挥发后随大气迁移,最终沉降至土壤中。季丽英等^[33]则认为矸石山受水

蚀、风化等自然力侵蚀后,转化为粉尘微粒,会向下风向区块迁移、积累,从而影响水土环境。

3.2 总体土壤样品检测结果分析

废弃煤矿区土壤样品重金属元素质量分数结果统计见表 3。由表 3 可知,废弃煤矿区土壤样品中重金属质量分数超标有 Cu、Zn、Cd、Ni、As 元素,Cd 元素污染较严重,超标率达到 93.10%;以重金属元素质量分数平均值计,除 Cd 元素外,其他元素质量分数均低于对应的农用地土壤风险筛选值;相较于宜春地区的土壤重金属元素背景值,土壤样品中重金属元素质量分数平均值均显著高于背景值。

表 3 样品中重金属质量分数结果统计
Table 3 Statistic results of heavy metals in soil

元素	质量分数/(mg · kg ⁻¹)					土壤风险 筛选值	超标 率/%	最大超 标倍数
	最大	最小	平均	中位数	背景值			
Cu	71.56	27.60	44.71	45.00	22.14	50.0	24.14	1.43
Pb	92.23	25.10	49.87	48.80	33.01	100.0	0	—
Cr	116.40	77.00	99.84	98.40	58.08	250.0	0	—
Zn	665.00	88.00	191.45	176.00	71.30	200.0	31.03	3.33
Cd	1.83	0.32	1.06	1.07	0.11	0.4	93.10	4.57
Ni	121.00	29.60	55.09	51.60	21.43	70.0	13.79	1.73
As	45.60	9.13	24.01	22.47	11.67	30.0	24.14	1.52
Hg	0.48	0.12	0.21	0.19	0.10	0.5	0	—

对比表 2 和表 3,以平均值计,煤矸石中重金属质量分数低,仅 Cr 元素质量分数稍高于土壤中的质量分数,其他重金属元素均小于土壤中的质量分数,反而,土壤中 Pb、Zn、Cd、As、Hg 元素质量分数远高于煤矸石中的质量分数。由此可知,煤矸石对矿区土壤重金属污染影响小,推测目前堆存的煤矸石不是煤矿区周边土壤重金属的主要来源。

采用单因子指数法和潜在生态危害指数法评价该废弃煤矿区土壤重金属污染状况,评价结果见表 4、5。重金属元素污染空间分布如图 2 所示。

由表 4 可知,Pb、Cr、Hg 元素均为非污染等级;Cu、Zn、Ni 和 As 元素污染较轻微,主要为非污染等级样品,其占比分别为 75.86%、68.97%、86.21% 和 75.86%,Cu、Ni 和 As 元素无中度、重度污染样品,Zn 元素重度污染样品仅占 3.45%;Cd 元素污染较严重,非污染样品仅占 6.90%,重度污染样品占比 44.83%。该废弃煤矿区土壤 Cd 元素污染应引起重视。

由图 2 可见,Cu、Zn、Ni 元素污染区主要集中在矸石山西部和东南部地块,在空间分布上有一定重合;As 元素污染分布在矸石山东北部地块,与 Cu、Zn、

表 4 样品中重金属元素单因子指数法评价结果
Table 4 Evaluation results of single factor index method for heavy metal elements in samples

元素	样品占比/%			
	$P_i \leq 1$ 非污染	$1 < P_i \leq 2$ 轻度污染	$2 < P_i \leq 3$ 中度污染	$P_i > 3$ 重度污染
Cu	75.86	24.14	0	0
Pb	100	0	0	0
Cr	100	0	0	0
Zn	68.97	27.59	0	3.45
Cd	6.90	20.69	27.59	44.83
Ni	86.21	13.79	0	0
As	75.86	24.14	0	0
Hg	100	0	0	0

表 5 潜在生态危害指数法评价结果
Table 5 Evaluation results of potential ecological hazard index method

元素	样品占比/%				
	$E_i^i < 40$ 轻微	$40 \leq E_i^i < 80$ 中等	$80 \leq E_i^i < 160$ 强	$160 \leq E_i^i < 320$ 很强	$E_i^i \geq 320$ 极强
Cu	100	0	0	0	0
Pb	100	0	0	0	0
Cr	100	0	0	0	0
Zn	100	0	0	0	0
Cd	0	0	17.24	37.93	44.83
Ni	100	0	0	0	0
As	100	0	0	0	0
Hg	0	55.17	37.93	6.9	0

Ni 元素在空间分布上不重合,Cd 元素污染较严重,矿区几乎所有地块均存在污染,污染程度以中度—重度为主,重污染地块主要分布在西南部、东北部和东南部地块,重度污染主要分布在东北部地块。矿区无主导风向,年最大风频风向为西南风,从风向上看,Cu、Zn、Ni 元素污染地块并不分布在其下风向,推测风向对矿区 Cu、Zn、Ni 元素迁移影响不大,风向可能影响 As 元素迁移,Cd 元素污染在矿区广泛分布,无法判断是否受风向的影响。

由表 5 可知,废弃煤矿区土壤重金属 Cu、Pb、Cr、Zn、Ni、As 元素潜在生态危害程度低,均为轻微污染样品,Cd 元素潜在生态危害程度高,无中等危害以下的样品,强—很强危害程度的样品合计占 55.17%,44.83% 的样品达到极强危害程度;Hg 元素潜在生态危害指数风险等级主要为中等—强,2 者合计达 93.10%;Cd 元素潜在生态危害风险最高,Hg 元素次之,其他元素

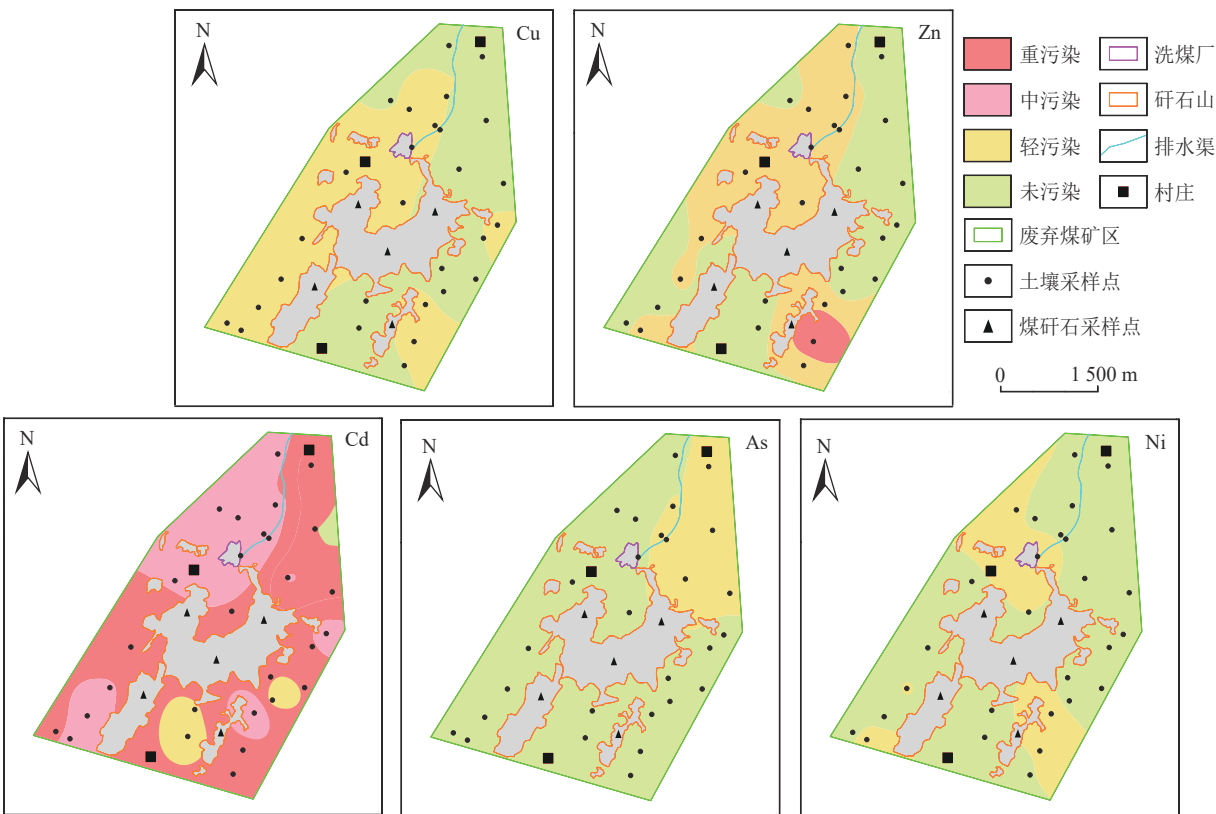


图 2 重金属元素污染空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal elements pollution

均为轻微风险等级。

由表 4 可知, 土壤样品中 Hg 元素均为非污染等级, 而表 5 则显示 Hg 元素潜在生态危害指数等级主要为中等—强, 造成这种差异的主要原因是 Hg 元素质量分数虽未超标但远高于当地的土壤背景值, 且 Hg 元素毒性系数高。因此, 废弃煤矿区土壤 Hg 元素不超标, 仍存在中等—强程度的潜在生态危害风险。

由表 6 可知, 废弃煤矿区土壤重金属元素综合潜在生态危害风险达到强风险的样品占 68.97%, 极强风险的样品占 10.34%, 中等—强风险的样品合计达 89.66%, 无轻微风险等级的样品。废弃煤矿区土壤重金属综合潜在生态危害风险等级较高, 主要为中等—强风险。

表 7 计算了 8 种重金属元素对综合潜在生态危害指数 I_R 的贡献率, 可见, 重金属元素潜在生态危害

表 7 I_R 贡献率

Table 7 Contribution rates of I_R								%
元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
I_R 贡献率/%	2.33	1.74	0.62	0.79	2.97	66.98	4.75	19.81

风险排序为 $Cd>Hg>As>Ni>Cu>Pb>Cr>Zn$, Cd 元素潜在风险指数贡献率最高。

3.3 洗煤厂下游土壤重金属污染分析

废弃煤矿区地势起伏, 总体北低南高, 洗煤厂北部地势较平坦, 选择洗煤厂北部下游区域为典型地块, 研究其周边土壤重金属土壤污染情况。在洗煤厂下游沿排水渠水流方向布设了 4 件土壤样品。以洗煤厂为原点, 采样点至洗煤厂的距离分别为 30、200、700、1 200 m, 样品编号分别为 1 号、2 号、3 号和 4 号。采样点尽量选择荒地, 距离村庄、公路较远的地块, 尽量减少除矿业活动外的影响。

由图 3 可知, 洗煤厂下游沿水流方向土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As、Hg、Cd 元素总体呈下降趋势, 距离洗煤厂 200 m 外样品重金属元素质量分数基本稳定, 变化较小; 距该洗煤厂 30 m 土壤样品中 Cu、Zn、Ni、Cd 元素质量分数均超标, 距洗煤厂 200 m, Zn、As、Cd 元素质量分数超标, 距洗煤厂超过 700 m, 仅 Cd 元素质量分数超标。总体而言, 洗煤厂下游区域内 Cd

表 6 综合潜在生态危害指数评价

Table 6 Evaluation of comprehensive potential ecological hazard index		
危害等级	潜在危害分级	样品占比/%
轻微	$I_R<150$	0
中等	$150\leq I_R<300$	20.69
强	$300\leq I_R<600$	68.97
极强	$I_R\geq 600$	10.34

元素污染较严重, Cu、Zn、Ni、As 元素主要污染区分布在下游 200 m 范围内。将排水渠附近区域看作一微流域, 南部矸石山、东部山林等周边区域均为排水渠的汇水区域, 上游的矸石山是重金属污染潜在来源。从流域流向角度分析, 随水流方向, Cu、Zn、Ni、As 元素主要富集在下游 200 m 区域, 其质量分数随距离远近呈递减趋势, 推测 Cu、Zn、Ni、As 元素污染可能受煤矸石风化、淋溶影响较大。文献[32]指出, 在降雨少的矸石山, 对附近土壤重金属影响范围大概是 10 m, 废弃煤矿区雨量充沛, 煤矸石雨水淋溶影响范围会更远, 可能达到 200 m。

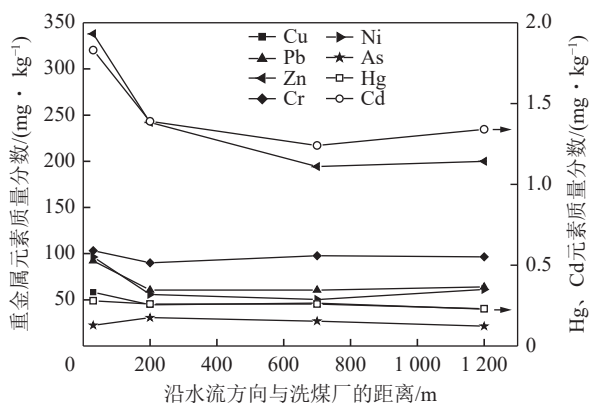


图3 洗煤厂下游沿水流方向土壤样品重金属质量分数

Fig.3 Heavy metal contents in soil samples downstream of the coal washing plant along the water flow direction

在距洗煤厂下游 200 m(2 号采样点)处荒地内布设了 1 个纵向剖面样, 深度为 100 cm 时, 可见地下水渗出。剖面土壤重金属质量分数分析如图 4 所示。

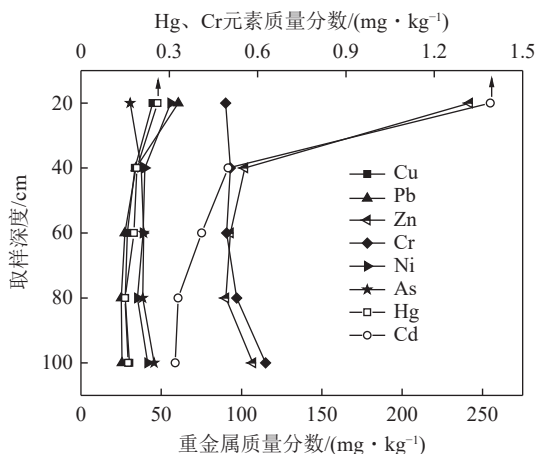


图4 剖面土壤样品重金属质量分数

Fig.4 Heavy metal contents of soil profile

由图 4 可知, 洗煤厂下游 200 m 处剖面样品重金属元素质量分数随深度总体呈递减趋势, Cu、Ni、Hg、As、Cr 元素在垂向分布上变化不大, 大致相当; Cd 元素质量分数随深度变化明显, 表层土 (0~20 cm) Cd 质

量分数为 1.39 mg/kg, 20~40 cm 深度 Cd 元素质量分数急剧下降至 0.5 mg/kg, 属于轻度污染, 80~100 cm 深度的样品 Cd 元素质量分数下降到 0.32 mg/kg, 为非污染样品; 剖面样品中 As 元素质量分数在 30.7~45.6 mg/kg, 属于轻度污染样品; Zn 元素仅在表层土 (0~20 cm) 出现超标。总体而言, 在垂向方向上, 重金属元素并无明显累积。

重金属元素在土壤中的迁移过程影响因素复杂, 受地形影响, 排水渠流域内表层土壤中 Cu、Zn、Ni、As 元素迁移主要受煤矸石淋溶、地表径流溶解和表层土壤侵蚀影响。剖面样品中重金属元素迁移可能主要受入渗作用影响。

3.4 废弃煤矿区水质样品重金属污染分析

有文献报导[34-35], 废弃矿井水溶出并释放煤、煤矸石中的重金属, 重金属在水和土壤中不能被降解, 进一步在周围环境累积、迁移。煤矿塌陷区的积水也可能成为污染源。煤矸石长期堆存在风化、雨淋等作用下也会污染周边地表水、地下水[36-37]。采集了废弃煤矿区周边泉水、居民井水、煤矿矿井水、采坑及塌陷坑积水等水质样品 14 件, 检测结果见表 8。

由表 8 可知, 位于矸石山的泉水 pH 仅为 4.59, 呈酸性, Zn、Ni、Cd 元素质量分数均高于Ⅲ类地下水标准限值, 水样 SY05 中 Ni 元素超过Ⅲ类地下水标准限值, 其他地下水样品重金属元素质量分数及 pH 均满足Ⅲ类地下水水质标准。位于矸石山的泉水, 主要受大气降水影响, 秋冬干旱季断流, 泉水上方覆盖大量煤矸石, 其重金属元素和 pH 超标的原因是由煤矸石风化、淋溶、入渗造成的。塌陷坑积水和矿井排水重金属元素含量及 pH 满足Ⅲ类地表水水质标准限值 (该矿井排水主要作为灌溉用水, 未作为集中式生活饮用水地表水源地, 未对比 Ni 元素标准限值), 满足农田灌溉水质标准, 煤矿矿井水外排对周边土壤重金属污染影响小。总体而言, 废弃煤矿区地下水水质较好。

对照分析图 3 和表 8, 推断目前的矿井排水不是洗煤厂下游区域重金属元素特别是 Cd 元素超标的原因, 矿井排水对矿区周边土壤重金属污染影响小。此外, 孙亚军等[38]研究发现, 采空区、闭坑矿井的矿井水在长期的物理-化学-微生物作用下有一定自净能力, 水质有逐渐转好趋势, 未来该矿井水水质可能进一步好转。

3.5 典型样品重金属元形态分析

重金属元素在土壤中的迁移、转化行为和生物有效性不仅与其全量有关, 还与其在土壤中各形态的分布密切相关[39-40]。有研究表明, 土壤中重金属元素各形态的活性、迁移特点、生物有效性以及环境效应都

表 8 水质样品检测结果统计
Table 8 Statistic results of water samples

样品	质量分数/(mg·kg ⁻¹)								pH	备注
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As	Hg	Cd		
SY01	0	0	0.017 80	0.004 15	0.022 60	0.000 59	0.000 045	0.000 590	6.86	采坑积水
SY02	0	0	0.008 12	0.003 89	0.001 34	0.000 08	0.000 028	0.000 037	7.14	井水
SY03	0	0	0	0.004 50	0.000 34	0.001 44	0.000 022	0.000 038	6.76	井水
SY04	0	0	0	0.004 42	0.000 33	0.000 22	0.000 017	0.000 046	6.67	井水
SY05	0	0.000 25	0.078 50	0.003 93	0.032 20	0.000 07	0.000 012	0.003 700	6.30	井水
SY06	0	0	0	0.004 21	0.003 38	0.000 76	0.000 002	0.000 120	7.38	采坑积水
SY07	0	0	0	0.004 60	0.000 62	0.000 74	0.000 004	0.000 095	7.22	井水
SY08	0	0	0.000 55	0.003 51	0.000 48	0.004 43	0	0.000 060	7.11	井水
SY09	0	0	0.000 42	0.003 54	0.009 55	0.001 54	0	0.000 028	7.20	塌陷坑积水, 现建设为 水库供农田灌溉
SY10	0	0	0	0.003 46	0.000 40	0.000 59	0	0.000 024	6.91	泉水
SY11	0.067 1	0.002 44	2.981 00	0.003 56	0.734 00	0.000 44	0	0.044 100	4.59	矸石山泉水, 流量小, 秋冬季断流
SY12	0	0	0.008 22	0.003 29	0.005 52	0	0	0.000 560	5.53	井水
SY13	0.001	0.001	0.026 00	0.004 00	0.050 00	0.005 00	0.000 100	0.001 000	7.19	矿井排水
SY14	0.001	0.001	0.003 00	0.004 00	0.002 00	0.005 00	0.000 100	0.001 000	7.23	井水
Ⅲ类地表水水质标准	1.0	0.05	1.0	0.05	0.02*	0.05	0.000 1	0.005	6.0~9.0	GB 3838—2002
Ⅲ类地下水水质标准	1.0	0.01	1.0	0.05	0.02	0.01	0.001 0	0.005	6.5~8.5	GB/T 14848—2 017
农田灌溉水质标准	0.5	0.20	2.0	0.10	0.20	0.01	0.001 0	0.010	5.5~8.5	GB 5084—2021水田 作物灌溉

注: 0.02*为集中式生活饮用地表水源地特定项目Ni元素标准限值。

存在差异^[41]。为研究废弃煤矿区土壤重金属的生物有效性和环境风险,以洗煤厂下游沿水流方向的样品为例,针对主要污染元素 Cu、Zn、Cd,采用改进 BCR 提取法分析了各元素形态质量分数,结果如图 5 所示。

从图 5 可知,土壤样品中 Cu 和 Zn 元素残渣态占比最高,Cu 元素残渣态达 69.52%,Zn 元素残渣态占 47.05%,Cu 和 Zn 元素酸可提取态占比低,Cu 和 Zn 元素以残渣态为主;相对于 Cu 和 Zn 元素,样品中 Cd

元素酸可提取态占比显著增加,达到 30.84%~58.87%,Cd 元素可还原态占比有所增加,Cd 元素残渣态占比减少。有研究表明^[42],重金属元素酸可提取态生物有效性强,易于在土壤中迁移转化,易被植物吸收,对人类和植物危害大;可还原态是植物较易利用的形态;可氧化态是植物较难利用的形态;残渣态性质最稳定,不易被植物吸收,潜在危害小。因此,废弃煤矿区土壤样品中 Cd 元素生物有效性显著大于 Cu 和 Zn 元素。

此外,由图 5 可知,土壤样品中重金属元素形态分布同距污染源的距离无明显规律性变化。

有文献报道^[42-44],依据土壤重金属各形态占比,可采用风险评价编码法 (RAC) 对重金属元素生物有效性和环境风险进行评价。风险评价编码法计算公式: RAC=酸可提取态占比/重金属全量×100%,其评价标准为无风险 RAC<1%;低风险 1%≤RAC<10%;中等风险 10%≤RAC<30%;高风险 30%≤RAC<50%;极高风险 RAC≥50%。据此计算样品中 Cd 元素 RAC 为 30.90%~55.22%,呈高度风险—极高风险。可见,废弃煤矿区 Cd 元素污染较严重,生物有效性强,环境风险高。

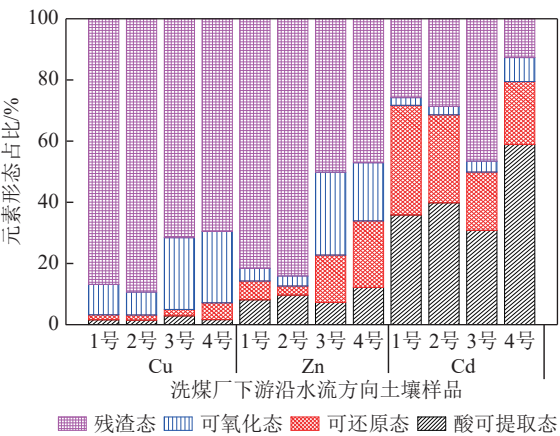


图 5 土壤样品重金属元素形态分布

Fig.5 Distribution of heavy metals elements in soil samples

4 结论与建议

(1) 以平均值计, 废弃煤矿区煤矸石中重金属质量分数较低, 仅 Cr 元素质量分数稍高于土壤中的质量分数, 且煤矸石中重金属元素质量分数均未超过相应的农用地土壤风险筛选值, 对矿区土壤重金属污染影响小。

(2) 废弃煤矿区土壤重金属超标元素为 Cu、Zn、Cd、Ni、As, Cu、Zn、Ni 和 As 元素污染较轻微, Cd 元素污染较严重; Cu、Zn、Ni 元素污染区主要集中在矸石山西部和东南部地块, 在空间分布上有一定重合; As 元素污染分布在矸石山东北部地块, Cd 元素污染在矿区广泛分布, 以中度—重度污染为主。

(3) Cd、Hg 元素存在潜在生态危害风险, Cd 元素潜在生态危害风险程度高, 重金属元素综合潜在生态危害风险等级较高, 主要为中等—强风险。

(4) 洗煤厂下游区域沿水流方向土壤重金属元素总体呈递减趋势, Cd 元素污染较严重, Cu、Zn、Ni、As 元素污染集中在洗煤厂下游 200 m 内, 剖面样品中垂向方向上重金属元素含量呈递减趋势, 在垂向上没有累积。

(5) 矿区地下水水质较好, 矿井排水重金属元素含量及 pH 满足Ⅲ类地表水水质标准限值, 矿井水外排对周边土壤重金属污染影响小。

(6) Cu 和 Zn 元素酸可提取态占比低, 生物有效性低, Cd 元素酸可提取态占比高, 呈高度风险—极高风险, 生物有效性强, 环境风险高。

矿区 Cd 元素污染较严重, 建议加强该地区土壤重金属污染防治工作: ① 加强源头治理, 矿区目前有大量煤矸石堆存, 建议加大综合利用力度, 减少煤矸石堆存, 煤矸石堆场加强扬尘治理、收集处理矸石堆场淋滤水; ② 加强矿区农产品食品安全监测, 对于重污染区适时调整作物种植结构, 选种重金属富集低的作物; ③ 加强矿山生态修复与治理, 加强 Cd 元素污染调查与研究工作。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.
- XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [2] 李杰锋. 矿区煤矸石堆对土壤重金属污染时空特征研究[J]. 矿产综合利用, 2022(2): 181–186.
- LI Jiefeng. Study on temporal and spatial characteristics of heavy metal pollution in coal gangue piles in mining area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2): 181–186.
- [3] 李杰锋. 煤矿复垦区土壤重金属形态分布与富集污染研究[J]. 矿产综合利用, 2022(1): 116–120, 163.
- LI Jiefeng. Study on distribution of heavy metals in soil and concentrated pollution in coal mine reclamation area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(1): 116–120, 163.
- [4] 陈城, 鲁潇, 于坤, 等. 安徽迪沟采煤沉陷区土壤和沉积物重金属特征及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 570–579.
- CHEN Cheng, LU Xiao, YU Kun, et al. Heavy metal characteristics and potential ecological risk assessment of the soil and sediment in the Digou coal mining subsidence area, Anhui, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(3): 570–579.
- [5] 李建中, 周爱国, 周建伟, 等. 华北煤田矿山开采导致含水层破坏风险评估: 以淄博洪山煤矿为例[J]. 地球科学, 2020, 45(3): 1027–1040.
- LI Jianzhong, ZHOU Aiguo, ZHOU Jianwei, et al. Risk assessment of aquifer destruction in underground mining coal of North China: a case study of Hongshan Mine in Zibo City[J]. Earth Science, 2020, 45(3): 1027–1040.
- [6] 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评估[J]. 环境化学, 2019, 38(4): 805–812.
- ZHANG Chengli, ZHANG Weiping, CHENG Hongdan, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou City[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(4): 805–812.
- [7] 孙涛, 宋世杰, 常青, 等. 煤矸石堆积区土壤重金属形态组成与生物有效性的空间变化特征——以峰峰矿区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 85–95.
- SUN Tao, SONG Shijie, CHANG Qing, et al. Spatial variation characteristics of soil heavy metal speciation and bioavailability in coal gangue accumulation area—Taking Fengfeng mining area as an example[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 85–95.
- [8] OUYANG W, WANG Y D, LIN C Y, et al. Heavy metal loss from agricultural watershed to aquatic system: a scientometrics review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 637: 208–220.
- [9] 许紫峻, 汪溪远, 师庆东, 等. 准东煤矿区土壤镉污染风险评价及敏感性分析[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(2): 159–170.
- XU Zijun, WANG Xiyuan, SHI Qingdong, et al. Human health risk assessment and environmental sensitivity analysis of soil cadmium pollution in Zhundong Mine Region of East Junggar Basin in Xinjiang, China[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(2): 159–170.
- [10] 李晶, 杨超元, 殷守强, 等. 草原型露天煤矿区土壤重金属污染评价及空间分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3676–3684.
- LI Jing, YANG Chaoyuan, YIN Shouqiang, et al. Evaluation and spatial distribution characteristics of soil heavy metals pollution in grassland open-pit coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3676–3684.
- [11] 王丽, 王力, 和文祥, 等. 神木煤矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(S2): 1343–1347.
- WANG Li, WANG Li, HE Wenxiang, et al. Contaminant characteristic of heavy metals in soils in Shenmu mining area[J]. Ecology and

- Environmental Sciences, 2011, 20(S2): 1343–1347.
- [12] 王延东, 李晓光, 黎佳茜, 等. 煤矸石堆存区周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(10): 3464–3471, 3478.
WANG Yandong, LI Xiaoguang, LI Jiaxi, et al. Heavy metal pollution characteristics and risk evaluation of soil around coal gangue stockpile area[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(10): 3464–3471, 3478.
- [13] 刘政, 赵文廷, 王爱军. 孟县煤矿区及其周边农田土壤重金属溯源分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2): 532–545.
LIU Zheng, ZHAO Wenting, WANG Aijun. Tracing analysis of heavy metals in farmland soils of Yu County, Yangquan[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S2): 532–545.
- [14] 陈昌东, 张安宁, 腊明, 等. 平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1216–1223.
CHEN Changdong, ZHANG Anning, LA Ming, et al. Soil heavy metal contamination and enrichment of dominant plants in coal waste piles in Pingdingshan area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(6): 1216–1223.
- [15] 熊鸿斌, 胡海文, 王振祥, 等. 淮南煤矿区土壤重金属污染分布特征及污染源研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(5): 686–693.
XIONG Hongbin, HU Haiwen, WANG Zhenxiang, et al. Research on distribution characteristics and pollution source of heavy metal pollution in soil in Huainan coal mining area[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2015, 38(5): 686–693.
- [16] 向鹏飞, 郭艳, 张发展, 等. 芦岭煤矿塌陷区土壤重金属污染特征研究[J]. *河南工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 32(3): 26–30.
XIANG Pengfei, GUO Yan, ZHANG Fazhan, et al. Pollution characteristics of heavy metals in soil of Luling coal mine subsidence area[J]. *Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2020, 32(3): 26–30.
- [17] 吴先亮, 黄先飞, 李朝婵, 等. 黔西煤矿区土壤重金属污染水平及其形态[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 335–341.
WU Xianliang, HUANG Xianfei, LI Chaochan, et al. Soil heavy metal pollution degrees and metal chemical forms around the coal mining area in Western Guizhou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 335–341.
- [18] 罗妍, 黄艺, 余大明, 等. 东北典型煤矿区重金属环境评价与分析[J]. *矿产综合利用*, 2021(4): 50–58.
LUO Yan, HUANG Yi, YU Daming, et al. Environmental assessment of heavy metals in typical coal mining areas in Northeast China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4): 50–58.
- [19] 李海霞, 胡振琪, 李宁, 等. 淮南某废弃矿区污染场的土壤重金属污染风险评价[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(4): 423–426.
LI Haixia, HU Zhenqi, LI Ning, et al. Integrate risk assessment of the heavy metal contamination in key regions of mining area in Huainan[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(4): 423–426.
- [20] 孙贤斌, 李玉成. 基于 GIS 的淮南煤矿废弃地土壤重金属污染生态风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 348–352.
SUN Xianbin, LI Yucheng. Potential ecological risk assessment of heavy metal distribution in the Datong deserted coal mining area in Huainan based on GIS[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(2): 348–352.
- [21] RAURET G, F LÓPEZ-SÁNCHEZ J, SAHUQUILLO A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(1): 57–61.
- [22] 陈莉薇, 陈海英, 武君, 等. 利用 Tessier 五步法和改进 BCR 法分析铜尾矿中 Cu、Pb、Zn 赋存形态的对比研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(2): 735–740.
CHEN Liwei, CHEN Haiying, WU Jun, et al. Comparative study on speciation of Cu, Pb and Zn from mining tailings via Tessier 5-step sequential extraction and improved BCR method[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(2): 735–740.
- [23] 胡德新, 武素茹, 刘跃勇, 等. 改进 BCR 法-电感耦合等离子体发射光谱法测定矿产品堆场土壤中镉、铅的化学形态[J]. *岩矿测试*, 2014, 33(3): 369–373.
HU Dexin, WU Suru, LIU Yueyong, et al. Determination of chemical species of cadmium, arsenic and lead in mineral yard soil by modified BCR and ICP-AES method[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(3): 369–373.
- [24] 江山, 刘焕焕, 张菁, 等. 安太堡煤矿复垦区土壤重金属含量及污染评价[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(3): 65–72.
JIANG Shan, LIU Huanhuan, ZHANG Jing, et al. Assessment of heavy metal contamination and their contents in the soil of coal rehabilitation areas in Pingshuo, Shanxi Province[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(3): 65–72.
- [25] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地学前缘*, 2021, 28(4): 238–249.
ZHANG Surong, WANG Changyu, LIU Jihong, et al. Assessments of heavy metal pollution in soils of the Southwestern Xiongan District and its ecological risk[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 238–249.
- [26] 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于 PMF 模型的准东煤矿周围土壤重金属污染及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 185–192.
BILAL Imin, ABDUGHENI Abliz, SHI Qingdong, et al. Pollution and source identification of heavy metals in surrounding soils of Eastern Junggar coal field based on PMF model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 185–192.
- [27] KUSIN F M, AZANI N N M, HASAN S N M S, et al. Distribution of heavy metals and metalloid in surface sediments of heavily-mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment[J]. *CATENA*, 2018, 165: 454–464.
- [28] 朱琦, 肖武, 张瑞娅, 等. 淮南潘集矿区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(3): 76–79.
ZHU Qi, XIAO Wu, ZHANG Ruiya, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in Huainan Panji mining area[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(3): 76–79.
- [29] 何纪力. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 135–142.
- [30] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属

- 毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112–115.
- XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112–115.
- [31] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [32] 郝威铎. 煤矸石堆放对土壤、水体和植物的环境影响——案例研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- HAO Weiduo. Environmental impacts of coal mine wastes stacking on the soil, waterbody and vegetation—cases study[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [33] 季丽英, 周来, 冯启言, 等. 某矿区煤矸石堆周围土壤重金属污染特征研究[J]. *矿业安全与环保*, 2007, 34(1): 14–16, 1.
- JI Liying, ZHOU Lai, FENG Qiyang, et al. Study on heavy metal pollution of soil nearby coal gangue dump in a coal mining area[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2007, 34(1): 14–16, 1.
- [34] 孙文洁, 任顺利, 武强, 等. 新常态下我国煤矿废弃矿井水污染防治与资源化综合利用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2161–2169.
- SUN Wenjie, REN Shunli, WU Qiang, et al. Waterpollution's prevention and comprehensive utilization of abandoned coal mines in China under the new normal life[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2161–2169.
- [35] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 304–316.
- SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 304–316.
- [36] 冉洲, 刘文礼, 潘永泰, 等. 温度对煤矸石动态淋溶特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1239–1246.
- RAN Zhou, LIU Wenli, PAN Yongtai, et al. Influence of temperature on dynamic leaching characteristics of coal gangue[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1239–1246.
- [37] 杜雪虹, 刘芳池, 李向东. 煤矸石淋溶液重金属释放规律与生物毒性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(10): 259–268.
- DU Xuehong, LIU Fangchi, LI Xiangdong. Study on release law and biological toxicity of heavy metals in coal gangue leaching solution[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(10): 259–268.
- [38] 孙亚军, 徐智敏, 李鑫, 等. 我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 1–16.
- SUN Yajun, XU Zhimin, LI Xin, et al. Mine water drainage pollution in China's coal mining areas and the construction of prevention and control technical system[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 1–16.
- [39] 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 铁观音茶园土壤-茶树体系中重金属的生物有效性[J]. *环境化学*, 2020, 39(10): 2765–2776.
- SUN Jingwei, HU Gongren, YU Ruilian, et al. Bioavailability of heavy metals in soil-tea plant system of Tieguanyin tea garden[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(10): 2765–2776.
- [40] 杨新明, 庄涛, 韩磊, 等. 小清河污灌区农田土壤重金属形态分析及风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(3): 644–652.
- YANG Xinming, ZHUANG Tao, HAN Lei, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the farmland soil from the sewage irrigated area of Xiaoqing River[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(3): 644–652.
- [41] 刘劲松, 胡俊良, 张鲲, 等. 柿竹园矿区及周边农田土壤重金属形态分布与生物有效性研究[J]. *金属矿山*, 2018(11): 155–160.
- LIU Jinsong, HU Junliang, ZHANG Kun, et al. Study on speciation and bioavailability of heavy metals of agricultural soils in Shizhuyuan mining and its adjacent area[J]. *Metal Mine*, 2018(11): 155–160.
- [42] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷山茶园土壤中五种重金属的化学形态和生物有效性[J]. *环境化学*, 2016, 35(10): 2071–2078.
- YE Hongmeng, LI Guoping, ZHENG Maozhong, et al. Speciation and bioavailability of five toxic heavy metals in the tea garden soils of Wuyishan[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(10): 2071–2078.
- [43] 张塞, 于扬, 王登红, 等. 赣南离子吸附型稀土矿区土壤重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(5): 726–738.
- ZHANG Sai, YU Yang, WANG Denghong, et al. Forms distribution of heavy metals and their ecological risk evaluation in soils of ion adsorption type in the rare earth mining area of Southern Jiangxi, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(5): 726–738.
- [44] GUPTA S K, CHABUKDHARA M, KUMAR P, et al. Evaluation of ecological risk of metal contamination in River Gomti, India: a biomonitoring approach[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 110: 49–55.