

金属矿区/冶炼场地环境风险扩散途径及其 关键因子识别研究^①

安亚男¹, 万勇², 郭朝晖¹, 曹杰¹, 徐锐¹, 何晓¹

(1.中南大学 冶金与环境学院, 湖南长沙 410083; 2.湖南省环境保护科学研究院, 湖南长沙 410014)

摘要:以湖南省典型区域金属矿区/冶炼场地为例,基于文献爬取和案例场地调查,系统梳理和选取了影响场地重金属污染环境风险扩散途径的22个关键因子,利用内梅罗污染指数法计算场地土壤综合污染指数(NIPI)用以辅助识别关键因子。结果表明,基于层次分析法筛选得到的大气沉降和土壤渗透为场地重金属污染环境风险扩散关键途径,距污染源距离、空气中可吸入颗粒物含量(PM₁₀)、地表硬覆盖情况、地下防渗措施、土壤酸碱度(pH值)和土壤有机质含量(SOM)为环境风险扩散途径关键因子。场地NIPI值与pH值、SOM、PM₁₀等因子呈正相关关系,与距污染源距离、地表硬覆盖情况和地下防渗措施呈负相关关系,其相关系数与因子权重拟合效果较好($R^2=0.63$)。

关键词:重金属污染场地;重金属;污染;迁移扩散;环境风险扩散途径;关键因子;层次分析法

中图分类号: X825

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.022

文章编号: 0253-6099(2023)05-0092-06

Environmental Risk Diffusion Path and Key Factor Identification for Metal Mine and Smelter Area

AN Ya'nan¹, WAN Yong², GUO Zhaohui¹, CAO Jie¹, XU Rui¹, HE Xiao¹

(1.School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Hunan Research Academy of Environmental Science, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: A typical metal mine with a smelter in Hunan Province was taken as an example, and 22 key factors affecting the environmental risk diffusion path of heavy metal pollution area were chosen based on data crawling and on-site case investigation, as well as systematical sorting. Nemerow integrated pollution index (NIPI) of soil was calculated using Nemerow pollution index method, and then was used to aid the identification of key factors. Results show that atmospheric deposition and soil permeability are selected as the environmental risk diffusion path for heavy metal pollution of soil based on the analytic hierarchy process, and the key factors for environmental risk diffusion include distance from pollution source, PM₁₀ content in air, hard cover on ground surface, anti-seepage measures, soil pH value and soil organic matter (SOM) content. It is found that the NIPI of the soil is positively correlated to soil pH value, SOM, PM₁₀, but negatively correlated to the distance from pollution source, hard cover on soil surface and anti-seepage measures. The correlation coefficient fits well with the factor weight ($R^2=0.63$).

Key words: heavy metal pollution area; heavy metal; pollution; migration and diffusion; environmental risk diffusion path; key factors; analytic hierarchy process

我国重金属污染物排放总量处于高位水平,重金属污染防治形势依然严峻^[1]。金属矿产采选冶炼过程中造成的土壤重金属污染严重,给周边环境及居民健康带来极大威胁^[2-3]。金属采选冶炼等活动将重金

属释放到周边环境,然后通过大气沉降途径使重金属污染物沉积在土壤中^[4]。土壤有机质含量(SOM)、酸碱度(pH值)、阳离子交换量(CEC)、土壤质地和矿物类型等对土壤中重金属的迁移扩散具有显著影

① 收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1800400)

作者简介: 安亚男(1998—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制与生态修复。

通信作者: 郭朝晖(1971—),男,湖南宁乡人,博士,教授,主要研究方向为环境污染控制技术。

响^[5]。在尾矿库,重金属以淋滤、风蚀等方式扩散,雨水淋滤是主要污染扩散途径,因此,地表硬覆盖情况及地下防渗措施至关重要^[6-7]。掌握影响重金属迁移途径的主要影响因子,有助于快速切断污染物的传播途径,对于重金属污染防治具有重大意义。因此,研究识别重金属污染场地环境风险扩散途径关键环境因子非常重要。

科学的评估方法是金属矿区/冶炼场地环境风险识别的前提条件。层次分析法是一种能较好满足这一需求的方法之一^[8],其基本原理是将区域划分系统有关方案的各个要素分解为目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析^[9]。层次分析法被广泛应用于多种情景下的风险评估^[10-13]。本文将层次分析法应用于金属矿区/冶炼场地重金属污染环境风险扩散途径及其关键因子识别,利用层次分析法半定量评估 22 个环境因子对重金属污染环境风险扩散途径的影响程度,建立金属矿区/冶炼场地重金属污染环境风险扩散途径因子指标体系并识别影响重金属迁移途径的关键环境因子,为金属矿区/冶炼行业场地重金属污染风险防控提供科学管理依据。

1 研究方法

1.1 研究对象及数据来源

为建立污染途径环境因子指标体系,通过 Web of Science, Elsevier Science Direct 和中国知网 (CNKI) 等数据库,利用“重点行业”“矿山”“冶炼场地(地块)”“重金属污染”“迁移扩散”等关键词获取文献,对重金属迁移途径信息(扩散方式、影响因子等)进行综合分析。

以文献为基础,以科学性、系统性为原则,建立金属矿区/冶炼场地重金属污染环境风险扩散途径环境因子指标体系。将目标层设为场地重金属污染环境风险;准则层为途径指标,包括大气沉降、地表径流、土壤渗透和胶体负载;指标层为因素指标,包括影响大气沉降扩散的 PM₁₀、风速、主风向、距污染源距离,影响地表径流扩散的地形、坡度、距地表水距离、年降水量,影响土壤渗透扩散的地表硬覆盖情况、地下防渗措施、土壤质地、土壤容重、土壤颗粒密度、土壤孔隙度、地下水埋深、地下水流速,影响胶体负载扩散的 SOM、土壤含水率、pH 值、CEC、土壤矿物类型和微生物群落组成等 22 个指标。

1.2 分析方法

采用多层次权重分析法 (AHP 法)^[14],基于建立的指标层次结构,采用 1~9 标度法构造判断矩阵,对同一层次指标进行两两比较。假设 A 层中的元素 B

与下一层次中的元素 B₁, B₂, ..., B_n 有关系,若要分析 B 层次各元素间对 B 而言的相对重要性,可以构造如表 1 所示的判断矩阵 B。

表 1 两两比较判断矩阵 B

B	B ₁	B ₂	...	B _n
B ₁	B ₁₁	B ₁₂	...	B _{1n}
B ₂	B ₂₁	B ₂₂	...	B _{2n}
		⋮		
B _n	B _{n1}	B _{n2}	...	B _{nn}

然后,采取层次分析法计算指标的权重,并对其进行一致性检验,具体计算方法如下:

1) 计算判断矩阵中每一行元素的乘积 M_i:

$$M_i = \prod_{j=1}^n B_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

2) 计算 M_i 的 n 次方根 \bar{W}_i :

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

3) 对 \bar{W}_i 进行归一化处理,得到权重向量 W_i:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

4) 计算判断矩阵的最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{W_i} \quad (4)$$

式中 B 为判断矩阵;W 为权重列向量;W_i 为权重向量的第 i 个分量;n 为矩阵阶数。

5) 进行一致性检验,要求一致性检验指标 CI ≤ 0.1, CI 计算公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

当 n ≥ 3 时,为消除 CI 所受阶数的影响,还需引入判断矩阵的平均随机一致性指标 RI,取 CR = CI/RI,对所构造的判断矩阵进行一致性检验,一般认为 CR < 0.1 时,判断矩阵有可接受的一致性,否则需对判断矩阵进行修正。

表 2 随机一致性指标 RI 值

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

1.3 典型案例场地调查与数据分析

以湖南省某大型退役铅锌矿为研究区域,分别选

取其中1个矿区和1个冶炼场地为污染源调查研究对象,按距污染源距离0、500、1 000、2 000 m 环形采集土壤样品,每个距离采集4个土壤样品,每个土壤样品由5个蛇形取样的0~50 cm 表层土壤样品混合而来,共采集32个样品,采样点如图1所示。土壤样品用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF}$ 混合酸(5:3:2)进行消解。通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION 2000, PerkinElmer, 美国)检测Cd、Cu、Pb、Zn总含量。采用原子荧光光谱仪(AFS-2202E, 中国)测定As总含量。参照《土壤农业化学分析方法》^[15]测定SOM、pH值和其他理化性质。采用 $\text{PM}_{2.5}$ 测试仪—3016IAQ测定 PM_{10} 。其余环境因子指标通过现场调查及查阅所在区域文献、年报等资料获取。

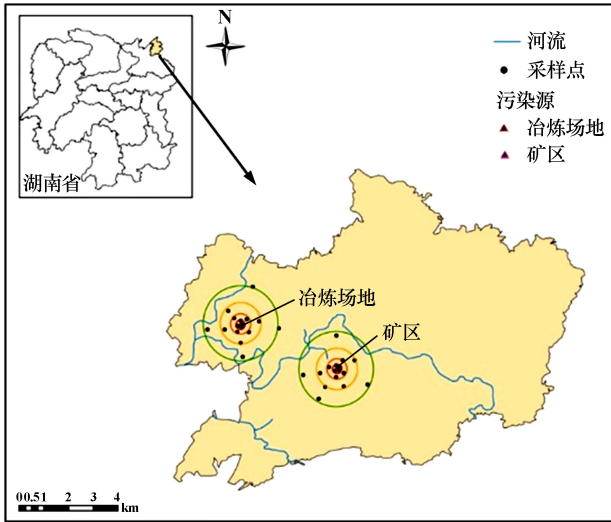


图1 研究区域及采样点

采用内梅罗污染指数法对场地土壤重金属污染状况进行综合评价^[16],将得到的土壤综合污染指数(NIPI)与识别出的场地环境风险扩散途径关键因子的指标测定值进行相关性分析。本文参考国家重点行业企业用地调查风险筛查与风险分级技术规定确定的评价指标和评分标准^[17],将地表硬覆盖情况指标进行量化处理,存在未硬化地面取值0.6,硬化地面有裂缝、破损取值1.8,硬化地面完好取值3.0,无防渗措施取值0.6,有一定防渗措施取值1.8,有全面、完好的防渗措施取值3.0。

2 结果与讨论

2.1 评价指标权重确定

根据文献检索结果,确定重要途径为准则层指标、重要因素为指标层指标。邀请土壤修复专家和相关专业人员填写调查问卷,用1~9的标度法确定各指标的

相对重要性,建立两两对比的判断矩阵(见表3)。因素指标共计22项,分别属于大气沉降、径流扩散、土壤渗透和胶体负载4个途径,类比上述步骤进行权重分配。然后计算最大特征向量,检验各个判断矩阵的一致性,检验结果显示各个判断矩阵取值合理,通过一致性检验(见表4)。最终得到目标层、准则层和指标层各因子权重见表5。

表3 场地重金属污染环境风险途径指标判断矩阵

指标名称	大气沉降	径流扩散	土壤渗透	胶体负载
大气沉降	1	2	1/2	2
径流扩散	1/2	1	2/3	1/2
土壤渗透	2	3/2	1	2
胶体负载	1/2	2	1/2	1

表4 判断矩阵一致性检验

指标层次	λ_{\max}	CI	RI	CR	一致性检验结果
途径指标	4.184	0.061	0.89	0.069	通过
大气沉降	4.009	0.003	0.89	0.003	通过
径流扩散	4.021	0.007	0.89	0.008	通过
土壤渗透	8.593	0.085	1.41	0.06	通过
胶体负载	6.098	0.02	1.26	0.016	通过

表5 场地环境风险扩散途径因子指标体系各级指标权重值

目标层	准则层	指标层	分权重	综合权重
场地 重金属 污染 环境 风险	大气沉降 (27.72%)	PM_{10}	36.78%	0.1019
		风速	12.93%	0.0359
		主风向	10.81%	0.0300
		距污染源距离	39.48%	0.1094
	径流扩散 (15.49%)	地形	14.64%	0.0227
		坡度	16.31%	0.0253
		距地表水距离	39.76%	0.0616
		年降水量	29.29%	0.0431
	土壤渗透 (36.74%)	地表硬覆盖情况	31.36%	0.1152
		地下防渗措施	26.05%	0.0957
土壤质地		5.46%	0.0201	
土壤容重		8.27%	0.0304	
土壤颗粒密度		5.36%	0.0197	
土壤孔隙度		5.35%	0.0196	
地下水埋深		7.78%	0.0286	
胶体负载 (20.05%)	地下水流速	10.37%	0.0381	
	SOM	27.05%	0.0542	
	pH值	31.82%	0.0638	
	CEC	13.27%	0.0266	
	土壤含水率	10.04%	0.0201	
	土壤矿物类型	8.94%	0.0179	
	微生物群落组成	8.87%	0.0178	

结果表明,对场地重金属污染环境风险影响最大的途径要素是土壤渗透,其次是大气沉降,胶体负载和径流扩散贡献率较低。土壤渗透贡献率最高可能是考

虑到重金属迁移对地下水的影响^[18], 研究显示, 工业企业场地主要环境污染途径为污染物进入土壤和地下水^[19]。

对大气沉降途径具有显著影响的因素是距污染源距离以及 PM₁₀, 权重分别为 39.48% 和 36.78%。重金属在大气中主要通过吸附在颗粒物表面进行迁移^[20], 距污染源距离远近对重金属迁移能力具有直接影响。对径流扩散途径具有主要影响的是距地表水距离和年降水量, 权重分别为 39.76% 和 29.29%。由于部分企业污水排放以及降雨冲刷等原因, 场地距地表水的距离可能直接影响重金属含量^[21]。对土壤渗透途径具有显著影响的是地表硬覆盖情况和地下防渗措施, 权重分别为 31.36% 和 26.05%, 其他土壤渗透性指标及地下水埋深、地下水流速等因素贡献率相当。这可能是因为重金属在土壤及地下水中的迁移过程较为复杂^[22]。对胶体负载途径具有主要影响的是土壤 pH 值和 SOM。文献[23]通过实验室土柱实验阐明了天然胶体对重金属迁移的限制作用。文献[24]通过对大量沉积物样品的分析, 也证实了土壤 pH 值对重金属形态转化的作用。总的来说, 综合权重大于 0.05 的指标有地表硬覆盖情况、距污染源距离、PM₁₀、地下防渗措施、距地表水距离、SOM 和 pH 值, 为场地环境风险扩散途径的主要因素指标。

2.2 基于典型场地的环境风险扩散途径关键因子识别

基于筛选得到的主要因素指标, 选取 2 个典型场地, 以湖南省土壤背景值为评价标准, 主要评价 As、Cd、Pb、Zn、Cu 这 5 种具有代表性的重金属元素含量及关键环境因子数据, 运用内梅罗综合指数法计算其 NIPI 值, 结果如表 6 所示。将筛选出来的关键因子实测值与典型场地 NIPI 值进行相关性分析, 结果如表 7 所示。

由表 6 可以看出, 不论污染源来自冶炼场地还是矿区, NIPI 值均随距污染源距离增加显著下降, 说明距污染源距离对重金属空间分布具有显著影响。然而, 冶炼场地 NIPI 值高于矿区场地, 这可能是因为冶炼场地重金属含量较高、迁移性较强。结合主要评价指标及其场地污染实际情况, 在距污染源距离相同的情况下, 有防渗措施的场地 NIPI 低于未做防渗措施的场地; 地表硬化完好的地块 NIPI 值低于未硬化地面的地块; PM₁₀ 随着距污染源距离增加呈下降趋势, 与场地 NIPI 值正相关。矿区距污染源距离 0 m 的 4 个采样点能够很好地展示土壤 pH 值对场地 NIPI 值变化的影响, 土壤 pH 值越高, 污染风险越大, 进一步表明土壤 pH 值与土壤重金属迁移性之间存在显著的负相关关系^[25]。

表 6 典型场地 NIPI 值及基本情况

污染源	NIPI	距污染源距离/m	距地表水距离/m	PM ₁₀	地表硬覆盖情况	地下防渗措施	pH 值	SOM/(g·kg ⁻¹)
冶炼场地	4 192.67	0	830	79	0.6	0.6	7.26	39.39
	2 195.59	0	1 080	79	1.8	1.8	7.28	22.33
	2 205.98	0	830	72	0.6	0.6	8.73	26.31
	680.99	0	1 000	59	0.6	0.6	7.68	69.85
	1 904.03	500	1 160	64	0.6	0.6	7.76	14.39
	406.69	500	830	53	1.8	1.8	7.94	18.1
	168.25	500	830	57	1.8	1.8	6.92	16.1
	143.28	500	830	53	3.0	3.0	6.21	16.2
	112.9	1 000	830	48	1.8	1.8	6.61	18.1
	60.26	1 000	1 660	48	0.6	1.8	6.62	11.2
	88.49	1 000	500	42	3.0	3.0	6.2	12.3
	224.28	1 000	500	79	0.6	1.8	7.98	11.64
	77.84	2 000	330	48	1.8	3.0	4.3	10.9
	11.94	2 000	580	40	1.8	1.8	6.62	12.1
	2.19	2 000	330	53	3.0	3.0	4.8	13.63
	22.06	2 000	1 000	89	1.8	1.8	6.03	19.8
矿区	1 007.98	0	500	77	0.6	0.6	5.23	23.4
	1 852.84	0	580	79	0.6	1.8	7.94	37.7
	1 109.84	0	660	74	0.6	0.6	7.72	26.5
	146.01	0	660	76	1.8	0.6	5.27	24.2
	497.51	500	330	68	1.8	0.6	7.75	21.5
	138.53	500	660	67	3.0	0.6	7.19	19.8
	32.38	500	660	67	1.8	3.0	5.54	28.1
	35.89	500	660	64	0.6	1.8	5.91	19.3
	61.45	1 000	500	74	0.6	1.8	7.13	25.4
	119.99	1 000	1 660	54	0.6	0.6	6.79	37.5
	44.09	1 000	1 000	52	3.0	3.0	6.86	17.4
	21.69	1 000	1 500	58	1.8	0.6	6.96	28.1
	11.57	2 000	500	40	1.8	1.8	7.63	21.1
	8.61	2 000	660	65	3.0	1.8	7.12	18.2
	5.29	2 000	1 660	65	3.0	3.0	6.63	16.9
	18.39	2 000	1 830	52	1.8	1.8	7.11	24.7

表 7 NIPI 值与关键因子指标测定值相关性分析 (n = 32)

分析方法	距污染源距离	距地表水距离	PM ₁₀	地表硬覆盖情况	地下防渗措施	pH 值	SOM
Pearson 相关性	-0.574 **	-0.024	0.478 **	-0.455 *	-0.426 *	0.396 *	0.356 *
显著性 (双侧)	0.001	0.896	0.006	0.009	0.015	0.025	0.045

* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

由表 7 可知, pH 值、SOM、PM₁₀ 等因子与 NIPI 呈正相关关系, 距污染源距离、地表硬覆盖情况、地下防渗措施与 NIPI 呈负相关关系, 相关性显著; 距地表水距离与 NIPI 相关性不显著。这与前人的研究结果大致相符^[25]。

综上所述, 距污染源距离、PM₁₀、地表硬覆盖情况、地下防渗措施、pH 值和 SOM 等因子会显著影响场地土壤重金属污染环境风险, 是场地环境风险扩散途径的关键因子。

2.3 关键因子相对权重与相关系数拟合验证

为了进一步验证场地环境风险扩散途径关键因子的合理性, 用 Pearson 相关性结果与获得的权重值进

行归一化处理,得到关键因子与场地 NIPI 值的相关系数和相对权重值,距污染源距离、PM₁₀、地表硬覆盖情况、地下防渗措施、pH 值和 SOM 的相关系数分别为 0.214、0.178、0.169、0.158、0.147 和 0.132,相对权重分别为 0.203、0.189、0.213、0.177、0.118 和 0.100,将二者进行拟合以验证筛选得到的指标的科学性,结果如图 2 所示。

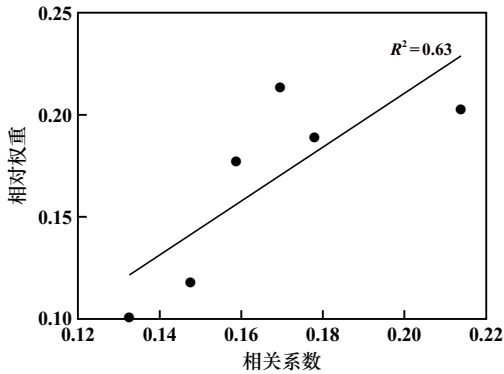


图 2 相关系数与因子权重拟合结果

由图 2 可知,关键因子与场地 NIPI 值的相关系数与因子权重拟合效果较好($R^2 = 0.63$),说明基于层次分析法筛选得到的关键环境因子具有一定的代表性,对于类似污染场地环境风险防控具有一定的参考意义,但其权重值可能会随场地参数的变化而改变,还需进行更多案例场地的验证。

2.4 场地重金属污染环境风险防控对策

金属采选冶炼行业污染场地环境风险较高,影响范围较大,对场地进行风险防控十分必要。基于筛选出的关键因子,对金属矿区/冶炼场地的风险防控提出如下管控对策与建议。

1) 明确污染风险管控范围。研究结果显示,距污染源 500、1 000、2 000 m 的场地 NIPI 值均显著降低,可以结合场地使用功能属性选择管控范围,一般可以选择管控半径 500~1 000 m,对周边存在其他敏感用地的,则应适当增加管控措施,确保环境敏感受体不受污染影响。

2) 加强场地污染源头风险管控。对于在产企业地块,对潜在的污染排放源进行提标改造,对无组织排放源进行密闭或负压操作改为有组织收集,从源头削减污染发生的概率和强度。同时,开展场地土壤污染隐患排查,完善地块地表硬化程度和地下防渗措施等,及时有效管控场地污染的潜在环境风险。对于关闭搬迁企业遗留场地,摸清场地污染基本情况,通过污染溯源,明晰场地主要潜在污染源,贯彻“谁污染,谁治理”理念,有序开展污染地块治理修复或风险管控工作。

3) 建立长效环境监测机制,加大执法监管力度。对于在产企业气型污染和水型污染,建立完善自动监测系统,对土壤和地下水采用定期人工监测,及时识别污染发生并有效管控污染风险。对暂未开发的遗留场地,在管控好场地污染源的前提下,明确监管和监测责任主体,定期开展场地土壤重金属含量及污染风险监控工作,最大限度避免污染风险事件的发生。

3 结 论

基于文献爬取和案例场地调查,系统梳理了场地重金属污染环境风险扩散途径及其关键因子,最终确定了 22 个关键因子指标用以建立层次模型。层次分析法研究结果表明,大气沉降和土壤渗透为重金属污染环境风险的主要扩散途径,距污染源距离、PM₁₀、地表硬覆盖情况、地下防渗措施、土壤 pH 值和 SOM 为迁移途径关键因子。在此基础上,选取 2 个典型场地计算其 NIPI 值,对关键因子和 NIPI 值进行相关性分析,因子权重与相关系数拟合效果较好($R^2 = 0.63$),表明筛选出的场地重金属污染环境风险扩散途径及其关键因子具有较好的代表性。最后,提出了基于场地环境风险扩散途径及其关键因子的预警方案,为金属矿区/冶炼场地环境风险防控提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 徐克,叶旌,田伟,等.“十四五”时期我国重金属污染防治研究[J]. 中国资源综合利用, 2022,40(9):127-130.
- [2] 安定明. 矿山尾砂土壤重金属污染及形态分析[J]. 矿冶工程, 2020,40(4):110-113.
- [3] GUO Z, ZHANG Y, XU R, et al. Contamination vertical distribution and key factors identification of metal(loid)s in site soil from an abandoned Pb/Zn smelter using machine learning[J]. Science of the Total Environment, 2023,856:159264.
- [4] LIU H, ZHOU J, LI M. Dynamic behaviors of newly deposited atmospheric heavy metals in the soil-pak choi system[J]. Environmental Science & Technology, 2022,56:12734-12744.
- [5] 李忠义,张超兰,邓超冰,等. 铅锌矿区农田土壤重金属有效态空间分布及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2009,18(5):1772-1776.
- [6] QIAO P, WANG S, LI J, et al. Process, influencing factors, and simulation of the lateral transport of heavy metals in surface runoff in a mining area driven by rainfall: A review[J]. Science of the Total Environment, 2023,857:159119.
- [7] 靳文娟,魏忠义. 柴河铅锌矿尾矿库复垦治理中不同覆土与植被措施的效益估算[J]. 中国环境科学, 2020,40(6):2577-2587.
- [8] 李艳萍,乔琦,柴发合,等. 基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析[J]. 环境科学研究, 2014,27(3):334-340.
- [9] 李雪梅,王祖伟,汤显强,等. 重金属污染因子权重的确定及其在土壤环境质量评价中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2007(6):

- 2281-2286.
- [10] 黄 蕾, 黄雨佳, 刘朋辉, 等. 区域综合环境风险评价方法体系研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5468-5474.
- [11] CHENG B, CHANG R, YIN Q, et al. A PSR-AHP-GE model for evaluating environmental impacts of spoil disposal areas in high-speed railway engineering[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 388: 135970.
- [12] CHEN X, LI M, LIANG Z, et al. An AHP-based evaluation system applied for phytoremediation method selection in heavy metal contaminated farmland[J]. Journal of Hazardous Materials Advances, 2022(7): 100138.
- [13] 彭丽梅, 赵 理, 周 悟, 等. 基于层次分析法的耕地土壤重金属污染风险区域划分[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 61-67.
- [14] 葛 峰, 徐珂珂, 云晶晶, 等. 我国土壤环境基准优先污染物的筛选及清单研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4228-4235.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 彭 驰, 刘 旭, 周子若, 等. 铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 367-375.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发重点行业企业用地调查系列技术文件的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201708/t20170818_420021.htm.
- [18] CHEN X, LI F, ZHANG J, et al. Status, fuzzy integrated risk assessment, and hierarchical risk management of soil heavy metals across China: A systematic review[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147180.
- [19] 卢 彬. 重金属污染物在土壤中迁移规律及修复技术研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(9): 109-112.
- [20] 肖 凯, 任学昌, 陈仁华, 等. 典型西北钢铁城市冬季大气颗粒物重金属来源解析及健康风险评价——以嘉峪关为例[J]. 环境化学, 2022, 41(5): 1649-1660.
- [21] QIAO P, WANG S, LI J, et al. Process, influencing factors, and simulation of the lateral transport of heavy metals in surface runoff in a mining area driven by rainfall: A review[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159119.
- [22] ZENG J, Tabelin C B, GAO W, et al. Heterogeneous distributions of heavy metals in the soil-groundwater system empowers the knowledge of the pollution migration at a smelting site[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: 140307.
- [23] Won J, Wirth X, Burns S E. An experimental study of cotransport of heavy metals with kaolinite colloids[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 373: 476-482.
- [24] Nabuyanda M M, Kelderman P, Sankura M G, et al. Investigating the effect of Eh and pH on binding forms of Co, Cu, and Pb in wetland sediments from Zambia[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 319: 115543.
- [25] 王小燕, 肖细元, 郭朝晖, 等. 模拟酸雨淋溶条件下锌冶炼挥发窑渣重金属释放特征[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6): 127-132.

引用本文: 安亚男, 万 勇, 郭朝晖, 等. 金属矿区/冶炼场地环境风险扩散途径及其关键因子识别研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 92-97.

(上接第91页)

参考文献:

- [1] 吴海鹰, 戴子林, 谷利君, 等. 含氟助浸剂对钒矿的硫酸浸出和萃钒的影响研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(2): 83-85.
- [2] 石美莲, 华 骏, 颜文斌, 等. 蔡俊含钒黏土矿直接酸浸提钒及其动力学研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 94-97.
- [3] 居中军, 王成彦, 尹 飞, 等. 石煤钒矿硫酸活化常压浸出提钒工艺[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2061-2068.
- [4] 马致远, 刘 勇, 吕建芳, 等. 废石化催化剂碱浸液中钒的分离提取研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6): 133-138.
- [5] 朱晓波, 张一敏, 刘 涛. 石煤活化焙烧提钒试验及机制研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(2): 283-288.
- [6] 惠学德, 王永新, 吴振祥. 石煤提钒工艺的研究应用现状[J]. 中国有色冶金, 2011, 4(2): 10-16.
- [7] 王明玉, 王学文. 石煤提钒浸出过程研究现状与展望[J]. 稀有金属, 2010, 34(1): 90-94.
- [8] 刘景槐, 谭爱华. 我国石煤钒矿提钒现状综述[J]. 湖南有色金属, 2010, 26(5): 11-14.
- [9] 杨莉花, 郭秋松, 王长宏, 等. Cyanex272 从沉钒尾液中萃取提钒的研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 100-103.

引用本文: 万洪强, 李 静, 张丽芬, 等. 低钙镁石煤钒矿熟化浸出工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 89-91.