

康旺,田向勤,赵康,等.某煤矸石堆场重金属污染特征与环境风险评估[J].中国环境科学,2026,46(5):2610-2617.

Kang W, Tian X Q, Zhao K, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in a coal gangue stockpile [J]. China Environmental Science, 2026,46(5):2610-2617.

## 某煤矸石堆场重金属污染特征与环境风险评估

康旺,田向勤,赵康\*,马超,侯轩,冯印成(生态环境部固体废物与化学品管理技术中心,北京 100029)

**摘要:** 以我国北方某典型煤矿区的煤矸石堆场为研究对象,系统分析了煤矸石及周边土壤中 7 种重金属(Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn)的污染特征,并综合运用地累积指数、内梅罗指数、潜在生态风险指数及 Hydrus-1D 模型进行了现状评估与动态预测.结果表明:(1)研究区周边土壤中 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 的平均含量分别为 0.03、0.17、17.79、27.36、24.10、67.63 和 71.20mg/kg,超过当地背景值,但均未超出 GB 15618-2018 的风险筛选值.(2)3 种评估方法结果一致表明,Cd 是周边土壤中的主要污染元素,地累积指数为 0.31,单因子污染指数为 1.862,单一生态风险系数为 55.87,贡献了总潜在生态风险的 40.9%.(3)迁移模拟预测表明 Cd 在降水淋溶下迁移与累积速率随深度增加而不同,在浅层土壤(0~2m)速率较快,在深层土壤中虽浓度较低但仍会持续累积,存在不可忽视的长期潜在风险.研究构建了“现状评估-风险预测-分级管控”的综合方法体系,为矿区土壤重金属风险防控提供了从被动应对到主动预警的科学模式.

**关键词:** 煤矸石; 重金属; 污染特征; 迁移规律; 环境风险评估

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6293(2026)05-2610-08

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20260106.003

**Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in a coal gangue stockpile.** KANG Wang, TIAN Xiang-qin, ZHAO Kang\*, MA Chao, HOU Xuan, FENG Yin-cheng (Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2026,46(5): 2610~2617

**Abstract:** A typical coal gangue stockpile in a coal mining area in northern China was taken as the research object, and the pollution characteristics of seven heavy metals (Hg, Cd, As, Cu, Pb, Cr, Zn) in coal gangue and surrounding soils were systematically analyzed in this paper. A comprehensive methodological framework—integrating the geo-accumulation index, Nemerow composite pollution index, potential ecological risk index, and Hydrus-1D modeling—was employed for current environmental assessment and dynamic predictive simulation. The key findings were as follows: (1) The mean concentrations of Hg, Cd, As, Cu, Pb, Cr, and Zn in the studied soil were 0.03, 0.17, 17.79, 27.36, 24.10, 67.63, and 71.20mg/kg, respectively. While these values exceeded the local background levels, they remained below the risk screening thresholds established by GB 15618-2018. (2) Convergent results from the three evaluation indices identified Cd as the predominant pollutant elements, its geo-accumulation index was 0.31, its single-factor pollution index was 1.862, and its single ecological risk coefficient reached 55.87, contributing 40.9% to the total potential ecological risk. (3) Migration simulations predicted that under precipitation leaching, the transport and accumulation rates of Cd varied with soil depth. Migration was relatively rapid in shallow layers (0~2m). Although concentrations were lower at greater depths, continuous accumulation was projected, indicating a persistent and non-negligible long-term risk. In conclusion, an integrated methodological framework of “status assessment, risk prediction, and tiered management” was established in this study. A scientific paradigm was provided for transitioning from passive remediation to proactive early warning in the prevention and control of heavy metal risks in mining-area soils.

**Key words:** coal gangue; heavy metals; pollution characteristics; migration patterns; environmental risk assessment

煤炭在我国能源结构中长期占据主导地位<sup>[1]</sup>,近几年在一次能源生产总量中占比长期维持在 65% 以上,2022 年突破 45 亿 t,2024 年进一步增至 47.8 亿 t,伴随其开采和洗选过程产生了巨量的煤矸石固体废物.据统计,我国煤矸石累计堆存量已超过 50 亿 t,且每年仍以数亿吨的速度增加<sup>[2]</sup>.煤矸石的长期露天堆存不仅占用大量土地资源,更因其物理化学性质不稳定,在风化、淋溶等自然作用下,其所含的多

种重金属元素(如 Cd、Pb、Hg、Cr、As 等)会释放并迁移至周边土壤、水体和大气环境中,造成多介质、多路径、多受体的复合型环境污染<sup>[3-4]</sup>.土壤作为重金属迁移转化的主要归宿和载体,其污染状

收稿日期: 2025-10-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52574163);国家重点研发计划项目(2024YFC3909301)

\* 责任作者,教授, zhaok\_666666@163.com

况直接关系到生态系统安全和人体健康<sup>[5-7]</sup>。对煤矸石堆场周边土壤重金属污染进行系统调查和科学评估,对于准确识别风险、制定有效的防控与修复策略具有至关重要的意义<sup>[8-9]</sup>。分析我国不同区域(淮北市<sup>[2]</sup>、焦作市<sup>[3]</sup>、曲靖市<sup>[10]</sup>、阜新市<sup>[11]</sup>、灵武市<sup>[12]</sup>)煤矸石堆场周边土壤的污染特征可以发现,Cd、Pb、Zn、Ni 等是多个堆场普遍关注的污染物,但其风险程度在不同区域表现各异,如淮北市恒源矿矸石堆积区以 Cd 为首要风险因子,而阜新市海州井工矿煤矸石山则以 Ni 的污染风险最为突出。

这种污染特征的区域性差异主要受当地煤矸石成分、气候条件、土壤性质及堆存方式等多种因素影响。因此,针对不同堆场,必须开展精准化的风险评估,并据此制定“一场一策”的差异化环境管控措施与修复方案,才能实现精准、高效的环境风险防控。同时从研究维度与时间尺度来看,多数研究仍聚焦于“现状表征”:即通过野外采样与实验室分析,获取某一特定期土壤重金属的含量水平、空间分布特征及当前生态危害程度,却普遍缺乏对“未来动态”的关注,无法提前预警未来土壤重金属污染的潜在热点区域。

基于此,本研究选取北方某典型煤矸石堆场作为案例,查明煤矸石及周边土壤中 7 种关键重金属(Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn)的富集状况,在此基础上,采用地累积指数、内梅罗指数和潜在生态风险指数等定量评估其环境现状风险,并利用

Hydrus-1D 进行污染元素迁移模拟,实现从“现状评估”到“现状-预测-防控”一体化研究的延伸,以期为该区域及类似煤矸石堆场的环境管理、风险预警和生态修复提供数据支撑和科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于我国北方某大型煤炭生产基地,属温带半湿润~湿润季风气候区,立体气候显著,年平均降水量约 641.6mm。该煤矸石堆场已堆存近 8a,堆体高约 67.1m,占地面积约 10hm<sup>2</sup>,周边主要为农田及林地,无敏感目标。

### 1.2 样品采集与检测

采用网格布点法结合判断采样法,在矸石堆体表层布设 15 个采样点采集煤矸石样品;在堆场下风向 100、300、500、1000m 处的土壤表层(0~20cm)各布设 10 个采样点采集土壤样品。每个样品均为周边 5 个子样混合而成的混合样。

样品采集后装入聚乙烯袋中密封,带回实验室。自然风干后,剔除石块和植物残根,用玛瑙研钵研磨,过 100 目尼龙筛,装袋备用。

煤矸石中重金属含量检测方法与仪器设备要求见表 1。土壤中重金属分析方法参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)<sup>[13]</sup>。

表 1 样品检测方法与仪器设备

Table 1 Analytical methods and instrumentation for sample detection

元素	分析方法及标准	检出限(mg/kg)	仪器设备名称/型号
Cd		0.1	
Pb	《固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》HJ 781-2016	1.4	电感耦合等离子体原子发射光谱仪 Plasma 2000
Cr		0.5	
Cu		0.4	
Zn	《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》HJ 766-2015	3.2	电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS) 7500Series
As	《固体废物 汞、砷、硒、铋、锑的测定微波消解/原子荧光法》HJ 702-2014	0.01	原子荧光光谱仪 SK-2003A
Hg		0.002	

### 1.3 环境风险评估方法

1.3.1 地累积指数 地累积指数由 Müller 提出,用于评价表层土壤重金属污染程度<sup>[14-15]</sup>,计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{\alpha B_n} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{geo}}$  为地累积指数; $C_n$  为土壤中实际测量的重金属元素含量; $B_n$  为该元素的地球化学背景值,本研究取用该省份土壤背景值; $\alpha$  为波动系数,一般取值 1.5,用以校正背景值的波动。地累积指数污染分级标准见表 2。

表 2 地累积污染指数分级标准

Table 2 Classification standards for  $I_{geo}$

$I_{geo}$	等级	污染程度
<0	0	无
0~1	1	轻度
1~2	2	偏中度
2~3	3	中度
3~4	4	偏重度
4~5	5	重度
>5	6	极度

1.3.2 内梅罗指数 内梅罗指数是由 Nemerow 提出,核心优势在于兼顾“整体平均污染水平”与“最严重污染因子的影响”,能更贴合实际环境中“部分污染物超标严重、整体污染不均衡”的复杂场景<sup>[16]</sup>.计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

$$P_{mix} = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (3)$$

式中: $P_i$ 为第  $i$  项重金属污染指数; $C_i$ 为第  $i$  项重金属含量的实测值; $S_i$ 为重金属  $i$  的标准值,本研究取用该省份土壤背景值; $P_{ave}$ 为各项重金属污染指数的平均值; $P_{max}$ 为各项重金属污染指数的最大值; $P_{mix}$ 为内梅罗综合污染指数.内梅罗指数污染分级标准见表 3.

表 3 内梅罗指数分级标准

Table 3 Classification standards for  $P_{mix}$

$P_i$	污染等级	$P_{mix}$	污染等级
≤1	清洁	≤0.7	清洁
1~2	轻度	0.7~1.0	警戒线
2~3	中度	1.0~2.0	轻度
>3	重度	2.0~3.0	中度
		>3.0	重度

1.3.3 潜在生态风险指数 潜在生态风险指数由 Hakanson 提出,同时考虑了重金属的毒性、浓度和生态效应<sup>[17-18]</sup>.计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot P_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (5)$$

式中: $T_r^i$ 为重金属  $i$  的毒性系数,反映其毒性水平和环境污染敏感程度,各种金属的  $T_r^i$  分别为  $Hg=40, Cd=30, As=10, Cu=Pb=5, Cr=2, Zn=1$ ;  $E_r^i$  为单一重金属的潜在生态风险指数; $RI$  为多项重金属的综合潜

在生态风险指数.潜在生态风险程度分级见表 4.

表 4 潜在生态风险指数分级标准

Table 4 Classification standard for RI

$E_r$	RI	生态风险等级
<40	<150	轻微
40~80	150~300	中等
80~160	300~600	强
160~320	≥600	很强
≥320	—	极强

1.3.4 环境风险预测 基于 Hydrus-1D 进行迁移模拟,采用《环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)》(HJ 964-2018)<sup>[19]</sup>给出的一维非饱和溶质垂向运移控制方程:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc) \quad (6)$$

式中: $\theta$ 为土壤含水率,%; $Z$ 为垂项坐标(沿  $Z$  轴的距离),cm; $t$ 为时间变量, $d$ ; $c$ 为溶质浓度,mg/L; $D$ 为水动力弥散系数,m<sup>2</sup>/d; $q$ 为渗流速率,m/d.

根据场地水文地质勘察报告,以矸石堆场底部为零点,将包气带概化为 6 层,厚度为 11.7m,结合《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610-2016)<sup>[20]</sup>等相关标准,推导出的土壤模型主要参数如表 5 所示.

表 5 土壤模型的主要参数

Table 5 Main parameters of the soil model

层位	岩性	残余含水率 $Q_r$	饱和含水率 $Q_s$	渗透系数 (cm/d)	持水指数 $n$
1	粉质粘土	0.068	0.38	1.77	1.09
2	新黄土	0.067	0.45	2.48	1.41
3	老黄土	0.095	0.41	2	1.31
4	古土壤	0.068	0.38	1.77	1.09
5	全风化砂岩	0.1	0.39	4.48	1.48
6	强风化砂岩	0.089	0.43	3.48	1.23

## 2 重金属污染特征

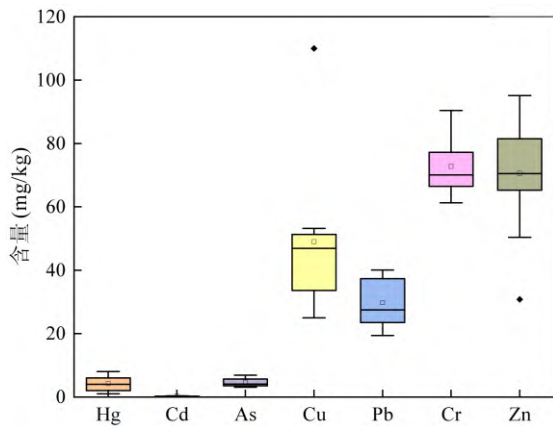
### 2.1 煤矸石中的重金属含量

煤矸石中重金属含量描述性统计分析如表 6 与图 1(a)所示,重金属平均含量从大到小为  $Cr>Zn>Cu>Pb>As>Cd>Hg$ ,与当地土壤背景值对比可知,煤矸石中除  $As$  外,其余 6 种重金属的平均含量均超过了背景值,超过倍数大小为: $Cu>Cd>Hg>Pd>Cr>Zn$ .

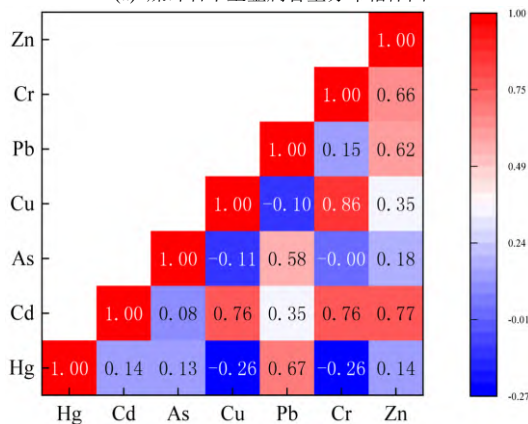
如图 1(b)所示,煤矸石中各元素含量相对独立,这是由于煤矸石中重金属主要源于煤伴生元素的富集,是一个复杂的地质历史过程,受到物源区母岩、成煤植物、岩浆热液、构造运动等长时期、多阶段、多因素综合作用<sup>[21-23]</sup>.

表 6 煤矸石中重金属含量描述性统计分析(mg/kg)  
Table 6 Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in coal gangue (mg/kg)

元素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数(%)	背景值
Hg	0.06	0.03	0.05	0.01	28.62	0.0217
Cd	0.33	0.08	0.20	0.08	39.27	0.0886
As	6.91	3.08	4.66	1.39	29.91	10.8
Cu	110.00	25.00	49.02	24.81	50.61	20.1
Pb	40.10	19.40	29.76	8.01	26.90	20.9
Cr	90.40	61.30	72.74	8.96	12.32	61.1
Zn	95.10	30.80	70.58	20.46	28.99	61.1



(a) 煤矸石中重金属含量分布箱体图



(b) 煤矸石中重金属含量相关性热点图

图 1 煤矸石中重金属含量分布箱体图与相关性热点图

Fig.1 Box plot and correlation heatmap of heavy metal contents in coal gangue

2.2 土壤中的重金属含量

周边土壤中重金属含量的描述性统计分析如表 7 所示,重金属平均含量顺序为 Zn>Cr>Cu>Pb>As>Cd>Hg,7 种重金属含量均远小于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)<sup>[13]</sup>中风险筛选值,表明当前风险可控.为识别人为活动的影响,将土壤中重金属含量与当地背景值进行对比(表 8),土壤中 7 种重金属平均含量均超过当地土壤背景值,富集程度(a/c)顺序为: Cd>As> Cu>Hg>Pb>Cr>Zn,这是由于在物理风化(冻融、干湿循环)、化学风化(尤其是黄铁矿氧化产酸)和生物风化(微生物催化)的协同作用下,矸石中伴生的重金属元素被持续活化、释放并迁入周边土壤-水-大气-生物系统,从而导致土壤中重金属含量超过当地背景值<sup>[6,24]</sup>.Cd(186.2%)和 As(164.7%)的富集水平尤为显著,远超其他元素,可界定为研究区的关键污染物.

土壤中重金属的相关性分析(图 2)揭示了其来源与迁移路径的差异性.Cu、Pb、Cr 与 Zn 之间呈现极显著正相关( $P<0.01$ ),表明这些元素具有高度的同源性,其富集主要受当前煤矸石堆场的主导控制.与之相反,As 与其他元素均无显著相关性,且其在土壤中的含量远高于煤矸石中的含量( $a/b=381.7%$ ),这清晰地表明其来源更为复杂,除当前堆场贡献外,还受到区域性高背景( $a/c=164.7%$ )的控制,因此相对独立.

表 7 土壤中重金属含量描述性统计分析(mg/kg)

Table 7 Descriptive statistical analysis of heavy metal contents in soil (mg/kg)

元素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数(%)	背景值	标准限值
Hg	0.07	0.01	0.03	0.02	61.80	0.0217	3.4
Cd	0.31	0.12	0.17	0.06	33.35	0.0886	0.6
As	31.30	13.10	17.79	4.90	27.54	10.8	25
Cu	32.50	19.20	27.36	4.18	15.29	20.1	100
Pb	26.70	18.80	24.10	2.61	10.82	20.9	170
Cr	76.00	52.00	67.63	8.54	12.63	61.1	250
Zn	81.70	48.30	71.20	12.70	17.84	61.1	300

注:标准限值为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)<sup>[13]</sup>中( $pH>7.5$ )风险筛选值.

对比煤矸石与土壤中重金属的富集程度(b/c 与 a/c)可知,多数元素在煤矸石中富集程度越高,其在土壤中的富集程度也相应增强,反映其土壤累积受

煤矸石含量控制.然而,个别元素呈现特异性:Cu 在煤矸石中最为富集,而Cd却在土壤中富集程度最高,说明不同重金属从煤矸石向土壤的释放能力存在显著差异.重金属的环境行为(如释放潜力、迁移能力、生物毒性)除受总量影响外,更深受其微观赋存形态的控制<sup>[11-12]</sup>.通过 BCR 连续提取法可以将重金属分为四种形态:弱酸提取态、可还原态、可氧化态与残渣态<sup>[25]</sup>.重金属的每种形态含量、稳定性、释放条件各不相同<sup>[26]</sup>,且弱酸提取态具有较高的生物有效性和环境风险,占比越高,环境风险越大<sup>[27-28]</sup>.

表 8 重金属含量对比

Table 8 Comparison of heavy metal contents

元素	重金属含量(mg/kg)			比值(%)		
	土壤中平均值(a)	煤矸石中平均值(b)	背景值(c)	a/b	a/c	b/c
Hg	0.03	0.05	0.0217	57.2	120.7	211.0
Cd	0.17	0.20	0.0886	81.2	186.2	229.5
As	17.79	4.66	10.8	381.7	164.7	43.2
Cu	27.36	49.02	20.1	55.8	136.1	243.9
Pb	24.10	29.76	20.9	81.0	115.3	142.4
Cr	67.63	72.74	61.1	93.0	110.7	119.1
Zn	71.20	70.58	61.1	100.9	107.7	106.8

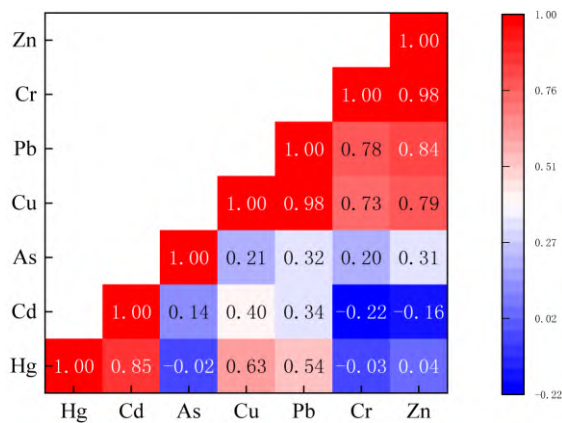


图 2 周边土壤中重金属含量相关性热点图

Fig.2 Correlation heatmap of heavy metal contents in surrounding soil

### 3 环境风险评估

#### 3.1 环境风险现状

基于地累积指数、内梅罗指数和潜在生态风险指数的综合评价结果如表 9 所示,对煤矸石堆场周边土壤环境风险现状分析可知,Cd 是研究区最突出的污染物,在 3 种评估方法中均表现为最高风险水

平,其  $I_{geo}$  为 0.31,处于“轻度污染”水平; $P_i$  为 1.862,显著高于其他元素; $E_r^i$  为 55.87,贡献了总风险的 40.9%,处于“中等生态风险”等级.张永康等<sup>[29]</sup>发现在煤矿区下游土壤中 Cd 的酸可提取态占比较高,生物有效性强,环境风险高;杨娅等<sup>[30]</sup>也证实了在煤矸石中 Cd 本身就活性形态(酸溶态、可还原态和可氧化态)为主,进一步佐证其在环境中的高迁移性与生态威胁.As 在污染程度上仅次于 Cd,然而其潜在生态风险相对较低,这与 As 的毒性系数较低有关.Hg 的地累积指数和单因子污染指数较低,但由于毒性系数最大,其潜在生态风险仅次于 Cd,贡献了总风险的 35.4%.Cu、Pb、Cr、Zn 等 4 种重金属表现出相似的污染特征,其地累积指数均小于 0,单因子污染指数显示为“轻度污染”,潜在生态风险系数均处于“轻微风险”水平.研究区内梅罗综合污染指数为 1.624,表明区域整体处于“轻度污染”水平;综合潜在生态风险指数为 136.50,属于“轻微生态风险”等级,反映其当前风险可控.

表 9 环境风险现状评估结果

Table 9 Results of current environmental risk assessment

元素	地累积指数		污染程度	内梅罗指数		潜在生态风险指数	
	$I_{geo}$	等级		$P_i$	污染程度	$E_r^i$	生态风险等级
Hg	-0.31	0	无	1.207	轻度	48.29	轻微
Cd	0.31	1	较轻	1.862	轻度	55.87	中等
As	0.14	1	较轻	1.647	轻度	16.47	轻微
Cu	-0.14	0	无	1.361	轻度	6.81	轻微
Pb	-0.38	0	无	1.153	轻度	5.77	轻微
Cr	-0.44	0	无	1.107	轻度	2.21	轻微
Zn	-0.48	0	无	1.077	轻度	1.08	轻微
				$P_{mix}$	1.624	RI	136.50

通过三种评价方法的系统比较,构建了从“识别污染源”到“评估整体状况”再到“量化生态风险”的完整评估链条,其协同应用效果显著.

**3.1.1 结论协同验证** 三种方法交叉验证了 Cd 是研究区最关键污染物.地累积指数与内梅罗指数确认其显著人为富集,潜在生态风险指数则揭示其巨大的生态危害潜力,极大增强了结论可靠性.

**3.1.2 视角互补价值** As 和 Hg 的评估结果突显了多方法联用的深层价值.As 在污染水平上被识别为主要污染物,而生态风险较低;Hg 虽含量不高,却因高毒性成为重要风险因子.这一差异说明,仅依靠含

量指标易导致误判,重金属的“生物毒性”在风险形成中具有关键作用。

**3.1.3 精准管理指导** 基于综合评价可建立分级管控策略:将 Cd 列为优先管控污染物,实施源头控制与迁移阻断;对 As 实施重点监控与溯源研究;适当降低其他重金属监测频次以优化资源配置。

### 3.2 环境风险预测

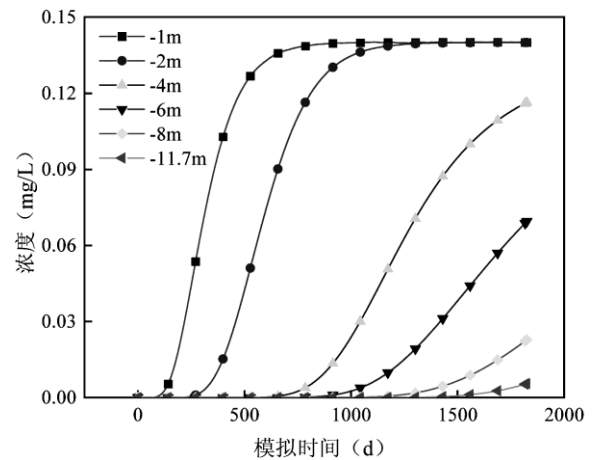
从上述3个评估方法可以看出,7种重金属中Cd污染水平最严重,因此考虑最不利因素:(1)污染物以连续源形式垂直进入土壤环境;(2)上部为大气自由降水边界,下部为排水边界,污染物随降水入渗.设置定浓度边界,煤矸石浸出液中 Cd 浓度为 0.14mg/L (《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557-2010)<sup>[31]</sup>),模拟结果如图 3(a)、(b)所示. Hydrus-1D 模拟结果表明,Cd 在降水淋溶作用下具有显著的垂向迁移能力,在最不利因素下,数天内即可迁移至 1m 深处,仅需约 714d 即可穿透 11.7m 厚的包气带,对深层土壤及地下水存在不容忽视的长期潜在风险.进一步剖析 Cd 在迁移过程中的时空分异特征,图 3(c)揭示了其在包气带中浓度累积的动态规律(由于模拟时间内 Cd 在各深度浓度不同,因此图中峰值统一取 0.023mg/L).如图所示,Cd 的迁移锋面在浅层土壤(0~2m)推进最为迅速,其浓度亦能更快地达到峰值,表明该区域具有较高的潜在风险.随着深度增加(>2m),迁移与累积速率均显著减缓.这一现象主要归因于包气带岩性变化(表 5)所导致的水流路径延长、弥散效应增强以及土壤吸附阻滞作用的累积,最终使得污染物在不同深度的动态呈现出明显的异步性<sup>[32]</sup>.

模拟结果不仅揭示了污染物的环境行为规律,更为构建分阶段、差异化的精准监管策略提供了科学依据。

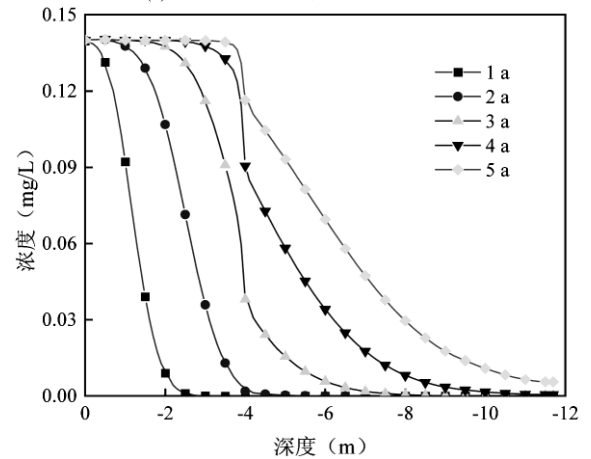
**3.2.1 浅层土壤** 该区域污染物迁移速率与浓度累积速率快,风险形成迅速.应高密度监测,并建立快速响应机制.一旦监测数据出现持续上升趋势,应立即启动源头控制措施,如对煤矸石堆体进行覆盖、压实及设置截洪沟,最大限度减少淋溶液的产生。

**3.2.2 深层土壤** 该区域污染物迁移速率较慢,浓度累积也需要较长时间,为风险管控预留了充足的决策与准备时间,可设立“预警-行动”两级管理阈值.当污染物浓度处于两级阈值之间时,启动强化监测

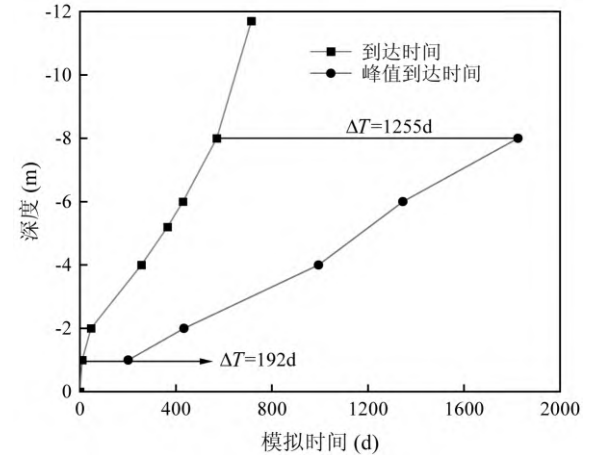
并筹备应急预案;当浓度逼近行动阈值时,可启用原位固化/稳定化等工程阻控技术,阻断污染羽流下渗。



(a) 土壤中 Cd 浓度随时间变化情况



(b) 土壤中 Cd 浓度随深度变化情况



(c) Cd 在土壤中到达不同深度与浓度的时间

图 3 Cd 在土壤中迁移的时空动态模拟

Fig.3 Spatiotemporal simulation of Cd migration in soil

## 4 结论

**4.1 污染特征识别:**研究区土壤呈现明显的 Cd、

As 人为富集特征.重金属含量序列为 Zn>Cr>Cu>Pb>As>Cd>Hg,其中Cd的富集倍数最高(1.86倍),As次之,表明这两种元素是主要的特征污染物.

4.2 现状评估:地累积指数、内梅罗指数和潜在生态风险指数 3 种评估方法均表明 Cd 为最高风险水平,贡献了总风险的 40.9%.相较于 Cu、Pb、Cr、Zn 等 4 种重金属,As 的污染程度较高( $P_i$  为 1.647),Hg 的潜在生态风险(48.29)较高.研究区的内梅罗综合污染指数为 1.624,综合潜在生态风险指数为 136.50,当前风险可控.

4.3 风险预测:Hydrus-1D 迁移模拟揭示了 Cd 的长期环境行为,其在降水淋溶下迁移迅速,714d 即可扩散至包气带底部(11.7m).不同深度的浓度时程演化差异显著,1m 深度处可在 201d 达到峰值浓度,而深层土壤浓度累积较慢,但持续的输入趋势构成潜在威胁.

#### 参考文献:

- [1] 王平,付战勇,王菲,等.多源煤基固体废物应用于土壤修复的研究进展 [J/OL]. 洁净煤技术, 1-16[2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20240616.1833.002>.  
Wang P, Fu Z Y, Wang F, et al. Research progress of the application of coal-based solid waste for soil remediation [J/OL]. Clean Coal Technology, 1-16 [2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20240616.1833.002>.
- [2] 毕卫华,王彦君,刘恒凤,等.恒源矿矸石堆积区重金属污染风险及其迁移机制 [J]. 环境科学与技术, 2021,44(S2):331-337.  
Bi W J, Wang Y J, Liu H F, et al. Research on the pollution risk and migration mechanism of heavy metals from gangue stacking area in Hengyuan coal mine [J]. Environmental Science and Technology, 2021,44(S2):331-337.
- [3] 王心义,杨建,郭慧霞.矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究 [J]. 煤炭学报, 2006,(6):808-812.  
Wang X Y, Yang J, Guo H X. Study on heavy metals in soil contaminated by coal waste rock pile [J]. Journal of China Coal Society, 2006,(6):808-812.
- [4] Field R W, Withers B L. Occupational and environmental causes of lung cancer [J]. Clinics in Chest Medicine, 2012,33(4):681-703.
- [5] Tong R P, Yang X Y, Su H R, et al. Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai [J]. Science of the Total Environment, 2018,616-617:1365-1373.
- [6] 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 X H, Liu F C, Li X D. 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.
- [7] 尚誉,杨丰隆,董轶茹,等.矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用 [J]. 环境科学, 2020,41(6):2936-2941.  
Shang Y, Yang F L, Dong Y R, et al. Toxicity of soil leachate from coal gangue and its surrounding village of barley (*hordeum vulgare*) [J]. Environmental Science, 2020,41(6):2936-2941.
- [8] 冯印成,赵康,田向勤,等.煤矸石回填塌陷区重金属淋溶迁移时空规律 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1422-1430.  
Feng Y C, Zhao K, Tian X Q, et al. Research on spatiotemporal patterns of heavy metal leaching and migration in coal gangue backfill subsidence area [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1422-1430.
- [9] 王新富,王彦君,高良敏,等.煤矸石对草原煤矿区生态风险影响研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022,50(10):226-234.  
Wang X F, Wang Y J, Gao L M, et al. Research on influence of coal gangue on ecological risk in grassland coal mining area [J]. Coal Science and Technology, 2022,50(10):226-234.
- [10] 晏和滇,宋琳,姜昕,等.煤矸石堆不同植物群落优势种重金属累积特征及生态风险评价 [J]. 生态学杂志, 2025,44(6):2011-2020.  
Yan H D, Song L, Jiang X, et al. Accumulation characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in dominant species of different plant communities in coal gangue dump [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(6):2011-2020.
- [11] 丛鑫,张佑溪,胡峰,等.矿业城市煤矸石山周边土壤重金属分布特征与影响因素研究 [J]. 生态环境学报, 2017,26(3):479-485.  
Cong X, Zhang R X, Hu F, et al. Distribution characteristics and influence factors of heavy metals in soils around coal waste piles nearby mining city [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(3):479-485.
- [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 Y D, Li X G, Li J Q, 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] GB 15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].  
GB 15618-2018 Soil environmental quality- Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].
- [14] 韩伟,宋云涛,郭志娟,等.宣威地区土壤重金属潜在污染风险评价及影响因素解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2643-2653.  
Han W, Song Y T, Guo Z J, et al. Evaluation and analysis influencing factors of potential heavy metal pollution risk in soil of Xuanwei City [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2643-2653.
- [15] 吕晨龙,卿黎,王旭升,等.云贵地区矿区土壤重金属污染特征及风险评估 [J]. 环境科学, 2025,46(10):6603-6611.  
Lv C L, Qing L, Wang X S, et al. Characterization and risk assessment of heavy metals in soil of mine area in the Yunnan-Guizhou area [J]. Environmental Science, 2025,46(10):6603-6611.
- [16] 吴劲楠,龙健,刘灵飞,等.某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):1054-1063.  
Wu J N, Long J, Liu L F, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area [J]. China Environmental Science, 2018,38(3):1054-1063.
- [17] 郭志娟,周亚龙,王乔林,等.雄安新区土壤重金属污染特征及健康风

- 险 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):431-441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(1):431-441.
- [18] 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 Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008,31(2):112-115.
- [19] HJ 964-2018 环境影响评价技术导则 土壤环境(试行) [S].  
HJ 964-2018 Technical guidelines for environmental impact assessment-soil environment [S].
- [20] HJ 610-2016 环境影响评价技术导则 地下水环境 [S].  
HJ 610-2016 Technical guidelines for environmental impact assessment- groundwater environment [S].
- [21] Ren D Y, Zhao F H, Wang Y Q, et al. Distributions of minor and trace elements in Chinese coals [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999.DOI:10.1016/S0166-5162(98)00063-9.
- [22] 曹庆一,任文颖,梁朝铭,等.中国煤中有害微量元素含量的空间分布 [J]. 煤田地质与勘探, 2022,50(5):13-22.
- Cao Q Y, Ren W Y, Liang C M, et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coals [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022,50(5):13-22.
- [23] 刘桂建,彭子成,杨萍玥,等.煤中微量元素富集的主要因素分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2001,29(4):1-4.
- Liu G J, Peng Z C, Yang P Y, et al. Main factors controlling concentration of trace element in coal [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2001,29(4):1-4.
- [24] 张 晓,李 芳,赵庆令,等.煤矸石中典型重金属浸出特征及潜在生态风险 [J]. 煤炭学报, 2022,47(S01):235-245.
- Zhang X, Li F, Zhao Q L, et al. Leaching characteristics and potential ecological risks of typical heavy metals in coal gangue [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022,47(S01):235-245.
- [25] 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 H M, Li G P, Zheng M Z, 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.
- [26] 冯新斌,洪 冰,倪建宇,等.煤中部分潜在毒害微量元素在表生条件下的化学活动性 [J]. 环境科学学报, 1999,19(4):433-437.
- Feng X B, Hong B, Ni J Y, et al. Chemical mobility of potentially toxic trace elements in coal at surface conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999,19(4):433-437.
- [27] 宋 文,何天容,潘鲁生.贵州水城煤矸石风化土壤-农作物系统中汞分布规律研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010,29(7):1326-1332.
- Song W, He T R, Pan L S. Distribution of mercury species in the soils from weathered coal mine spoils and crops in Shuicheng, Guizhou Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010,29(7):1326-1332.
- [28] 林承奇,黄华斌,胡恭任,等.九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价 [J]. 环境科学, 2019,40(1):453-460.
- Lin C Q, Huang H B, Hu G R, et al. Assessment of the speciation and pollution of heavy metals in paddy soils from the Jiulong River basin [J]. *Environmental Science*, 2019,40(1):453-460.
- [29] 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 Y K, Cao Y H, Feng N Q, 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.
- [30] 杨 娅,季宏兵.新化矿区煤矸石中微量元素赋存形态及浸出特征 [J]. 地球与环境, 2016,44(1):36-46.
- Yang Y, Ji H B. A study on chemical forms and leaching characteristics of trace elements in coal gangue from Xinhua coal mine in Guizhou Province, China [J]. *Earth and Environment*, 2016,44(1):36-46.
- [31] HJ 557-2010 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法  
HJ 557-2010 Solid waste-Extraction procedure for leaching toxicity-Horizontal vibration method
- [32] Jacques D, Šimůnek J, Mallants D, et al. Modelling coupled water flow, solute transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil [J]. *Geoderma*, 2008,145(3/4):449-461.
- 作者简介:** 康 旺(1994-),内蒙古包头人,工程师,硕士,主要研究固废综合利用.发表论文 10 余篇.kang\_94@126.com.