

景宏君, 闫湘晨, 吴燕, 等. 陕北煤矸石路基重金属释放与迁移特性[J]. 西安科技大学学报, 2026, 46(2): 318–329.
JING Hongjun, YAN Xiangchen, WU Yan, et al. Release and migration characteristics of heavy metal in coal gangue subgrades in northern Shaanxi[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 318–329.

陕北煤矸石路基重金属释放与迁移特性

景宏君^{1,2}, 闫湘晨^{1,2}, 吴燕³, 张晓轴⁴, 班峰⁴

- 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
- 西安科技大学 道路工程研究中心, 陕西 西安 710054;
- 榆林市公路工程试验检测中心, 陕西 榆林 719099;
- 榆林市公路局, 陕西 榆林 710009)

摘要:为研究陕北地区煤矸石路基在降雨条件下的重金属释放与迁移特性, 揭示路基结构对重金属的阻滞与缓释作用, 以榆林地区煤矸石路基为对象, 测试煤矸石重金属元素的静态浸出与动态淋滤行为, 采用单因子污染指数与地累积指数评估环境风险, 分析 Pb、Cr、Ba、Fe、Al 的淋出规律及累积特征, 利用 Hydrus-1D 一维模型模拟典型路基中重金属垂向迁移, 确定主要重金属浓度与深度和时间的关联关系。结果表明:煤矸石整体污染程度较低, 但 Fe、Al 元素的污染指数较高, 存在一定环境风险, 淋滤初期 Pb、Fe 释放迅速, 随后 5 种元素浓度趋于稳定;煤矸石重金属迁移行为具有明显时空衰减特征, 连续降雨 300 d 后重金属最大迁移深度未超过 4.63 m, 重金属元素对周边土壤环境影响较小, 迁移风险较低;达到一级公路路堤压实度 >90% 的情况下煤矸石路基中重金属释放与迁移可控, 环境适应性良好。研究证明了路基结构可阻滞和缓释重金属元素的迁移, 为煤矸石路基环境风险防控与实践提供了科学依据。

关键词:环境地质;煤矸石路基;重金属淋滤试验;Hydrus-1D 迁移模拟;非饱和渗流

中图分类号:U 416.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0318-12

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdx.2026.0208

Release and migration characteristics of heavy metal in coal gangue subgrades in northern Shaanxi

JING Hongjun^{1,2}, YAN Xiangchen^{1,2}, WU Yan³, ZHANG Xiaozhou⁴, BAN Feng⁴

- College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
- Road Engineering Research Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
- Yulin Highway Engineering Testing and Inspection Center, Yulin 719099, China;
- Yulin Highway Bureau, Yulin 710009, China)

Abstract: To study the release and migration characteristics of heavy metals from coal-gangue subgrades in northern Shaanxi under rainfall conditions, and to elucidate the attenuation and buffering effects of subgrade structures on heavy-metal transport, a coal gangue subgrade in the Yulin region was used as the study object to test the static leaching and dynamic percolation behaviors of heavy metals in coal gangue. Environmental risks were evaluated using the single-factor pollution index and geo-accu-

收稿日期:2025-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(42372323)

通信作者:景宏君,男,陕西吴堡人,博士,教授, E-mail:jinghongjun@xust.edu.cn

mulation index, the leaching patterns and accumulation characteristics of Pb, Cr, Ba, Fe, and Al were analyzed, and vertical migration in a typical subgrade was simulated using the Hydrus-1D model to determine the relationships among heavy-metal concentrations, soil depth, and migration time. The results show that: Although the overall pollution level of the coal gangue is low, Fe and Al exhibit relatively high pollution indices, indicating potential environmental risks. Pb and Fe are rapidly released during the initial leaching stage, subsequently, the concentrations of the five elements tend to stabilize. Heavy-metal migration displays pronounced spatiotemporal attenuation, even after 300 days of continuous rainfall, the maximum migration depth does not exceed 4.63 m, suggesting minimal impact on the surrounding soil environment and a low migration risk. Under the situation where the compactness of the subgrade on the first-class highway reaches >90%, heavy-metal release and migration within coal-gangue subgrades remain controllable, demonstrating good environmental adaptability. The findings confirm that subgrade structures effectively retard and buffer the migration of heavy metals, providing scientific guidance for environmental risk management and practical application of coal-gangue subgrades.

Key words: environmental geology; coal gangue subgrade; heavy metal leaching test; Hydrus-1D transport simulation; unsaturated seepage

0 引言

陕北地区凭借丰富的煤炭资源,实现了区域经济的快速增长^[1],但随之产生的大量煤矸石固体废弃物对生态环境构成了严峻挑战。为实现资源化利用,约60%的煤矸石被应用于路基工程^[2]。煤矸石作为路基填料能满足各种特殊地区的设计要求^[3],但是针对煤矸石路基重金属析出与迁移的研究仍较薄弱,且多集中在其他区域,缺乏本地化试验支持。尤其在复杂地貌条件下,重金属的动态迁移特征尚未明确,影响其资源化利用的环境安全性评价。

目前,国内外学者对煤矸石资源化利用所可能带来的环境问题开展了大量研究。LI和WANG等指出,尽管近年来中国煤矸石的资源化利用率逐步提高,但仍存在因缺乏分级管理和污染控制而引发的环境风险问题,尤其是重金属污染的问题亟待关注^[4];在对波兰上西里西亚煤矸石填埋场的研究中发现,煤矸石释放的Fe、Zn、Mn等重金属对周边地下水质量的影响严重,但是缺乏长期监测数据的支持^[5];KMIECIK等基于地下水监测数据,采用地统计分析方法揭示了污染物在淋溶过程中呈现出明显的时间—空间演变特征,强调了煤矸石作为路基填料需综合考虑重金属的淋溶风险^[6];利用X射线衍射(XRD)技术对煤矸石的矿物组成与元素赋存状态进行了深入分析后发现,地下水的污染物主要来源与煤矸石中的矿物

结构密切相关,为煤矸石引发水体污染机制研究提供了重要依据^[7];但这些研究主要聚焦于自然状态下的煤矸石重金属污染性及治理方法。在煤矸石工程应用的背景下,杜雪红等的研究侧重点放在了煤矸石不同粒径下的淋溶规律与生物毒性分析,揭示了不同粒径煤矸石在淋溶过程中Zn、Pb、Mn等重金属的释放规律,并指出中粒径煤矸石的毒性最强,且初期释放速率最高^[8];顾霖骏等则揭示了Cd、Pb、Zn等重金属在不同区域的含量差异与生态风险等级,并强调煤矸石的污染性控制应结合区域差异进行开展^[9];冉德钦等的研究提供了关于煤矸石中汞元素扩散的模型和实测数据,特别是关于pH值对重金属释放的影响,以及重金属在多孔介质中的迁移规律^[10];MIGNARDI综合XRD、SEM、EDS进行分析,明确提出了重金属的固定机制包括表面络合、离子交换、部分沉淀形成磷酸盐,指出磷酸盐与重金属之间的表面络合、离子交换及磷酸盐沉淀形成机制共同作用,有效阻断了金属的迁移路径^[11];这些研究解释了煤矸石部分重金属元素的迁移和赋存特性。

现有研究已系统地探讨了煤矸石颗粒中重金属污染物的释放机制及其环境影响^[12],但这些研究主要集中于煤矸石颗粒本身的重金属释放行为,较少涉及煤矸石在路基工程中的实际应用背景。与煤矸石颗粒填料相比,煤矸石路基的结构与环境特征具有显著的特殊性,在实际道路工程中,煤矸石路基需经过各种机械压实,这些处理显

著改变了煤矸石路基的粒径分布特征,并对其重金属元素的赋存能力产生重要影响。基于此选取陕北地区典型煤矸石路基作为研究对象,采用静态毒性浸出试验与动态淋滤试验相结合的方式,系统分析了 Pb、Cr、Ba、Fe、Al 5 种重金属元素的释放行为与时间变化特征,引入单因子污染指数法与地累积指数法对煤矸石路基重金属污染风险进行定量评价。在此基础上,构建一维垂向非饱和迁移模型,利用 Hydrus-1D 软件对典型路基结构中重金属的迁移过程进行了数值模拟,以研究不同元素在非饱和多孔介质中的迁移趋势与空间分布。

1 材料与试验

1.1 煤矸石样品

所用煤矸石样品采集自榆林市大保当镇泰新隆环保有限公司的堆料厂区,选取厂区内不同煤矸石堆进行采样(图 1),料来自不同矿区,累计采集样品约 50 kg,采样后样品经自然风干处理,随后使用鄂式破碎机初步破碎,再利用研磨机进行细碎,以满足试验粒径要求。最终所得样品充分混合搅拌,以确保试样的代表性与均匀性,作为后续各类试验的原材料。



图 1 煤矸石样品

Fig. 1 Coal gangue samples

1.2 路基路用性能试验

为评估榆林地区煤矸石路用性能,开展了筛分、击实与 CBR 等基本工程性能试验。

煤矸石样品的不均匀系数为 20.47,曲率系数为 1.57(图 2),满足《公路土工试验规程》对填料级配的标准,说明其颗粒分布较为合理。

煤矸石路基对材料的烧失量要求,是为了控制煤矸石中有机质、未完全燃烧物质和其他挥发性成分的含量,以确保其工程性能稳定、安全、环保,样品所测得的烧失量平均值为 9.3%,满足《公路路基施工技术规范》中对路基填料的要求,因此不考虑已燃与未燃煤矸石对试验造成的影响。

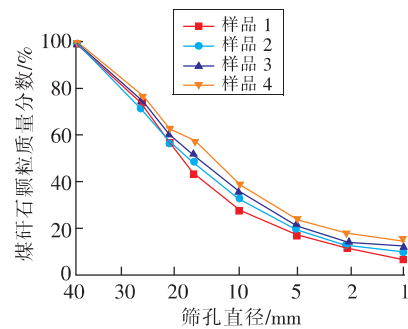


图 2 煤矸石级配曲线

Fig. 2 Grain size distribution curves of coal gangue

煤矸石样品的 CBR 平均值满足高速公路及一级公路路基填料对 CBR 最小值的规范要求。其最佳含水率为 7.7%,最大干密度为 2.03 g/cm^3 (表 1),表明该煤矸石具备良好的力学性能作为路基填料应用。

表 1 煤矸石的 CBR 值

Table 1 CBR value of coal gangue

	试样一	试样二	试样三
CBR/%	18.8	15.8	20.6
均值/%	18.4		
最佳含水率/%	7.7		
最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.03		

1.3 煤矸石重金属淋滤试验

为研究自然降雨条件下煤矸石路基中重金属的淋出浓度、累积释放量及其随时间的变化特征,设计并开展了动态淋滤试验。试验模型(图 3),采用圆柱形路基结构,高度 700 mm,内径 130 mm,装置由模拟降雨储液罐(马氏瓶)、蠕动泵、淋滤柱以及淋滤液收集瓶(烧杯)组成。模拟雨水存放于马氏瓶中,通过胶管连接蠕动泵,控制液体流速并输送至柱体上部的自制喷嘴,蠕动泵流量控制精度为 $\pm 0.8 \text{ mL/min}$,保证模拟降雨流速稳定;自制喷嘴出水均匀度控制在 $\pm 5\%$,模拟雨水储液罐(马氏瓶)容量为 40 L,可保证连续供水稳定,淋滤柱温度控制在室温 $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$,避免环境温度波动对淋出浓度的影响。

试验误差主要有不同批次煤矸石压实密度和粒径分布差异;包括蠕动泵流量微小波动、滤液采集体积偏差;环境扰动;室内温湿度波动、外界震动等对淋滤液流速的微弱影响。

参考陕西省气象局历年降雨资料,模拟降雨持续时间为 1 h,试验条件接近实际工程降雨强度

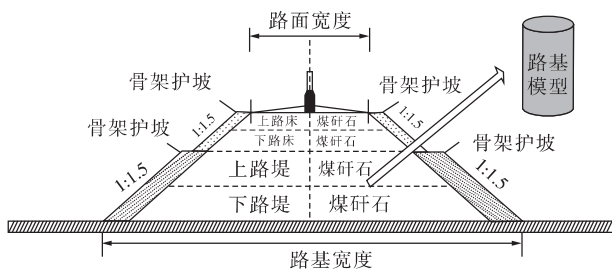
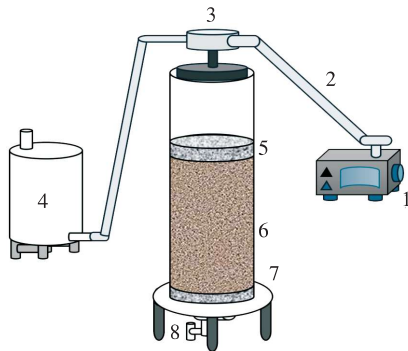


图 3 经典煤矸石路基构造

Fig. 3 Structural diagram of classic coal gangue subgrade

淋滤周期,试验持续时间则基于当地季节性降雨特征及现场路基长期受雨淋影响情况,设定为 100 d,按每 10 d 进行一次淋滤操作,根据区域气候资料显示,降雨过程多呈阶段性集中,具有“强度高、频次低”的特征。因此,试验中采用离散淋滤方式可以在一定程度上模拟实际工况下的雨水入渗特征,避免连续淋滤所导致的过度水解与非代表性溶出现象,煤矸石填筑厚度参考现场路基工程标准,保证物理模拟合理。

确保淋滤液出水均匀、流速稳定,在淋滤柱底部滤板上先铺设酸洗石英砂,并用去离子水预洗;然后进行煤矸石路基压实充分模拟现场路基工程,填筑的煤矸石路基模型和淋滤仪器(图 4),使用标定量筒采集淋滤液样品,并测定其重金属浓度,以揭示其释放规律,为降低误差,进行 3 组。



1-蠕动泵(控制降雨速率);2-导水软管;3-渗流装置;4-马氏瓶(储存淋洗液);5-石英砂;6-煤矸石路基本体;7-带孔隔板;8-出水口

图 4 试验仪器

Fig. 4 Experimental apparatus

重金属在自然界中难以自然降解,易在环境中长期累积并造成毒性风险,因此在煤矸石路基的工程利用中需重点关注其释放行为^[13]。淋溶过程中,重金属的累积释放量是指所有淋滤液中所释放的总质量,反映其对环境的潜在威胁。计算

累积释放量,并绘制图以展示其变化趋势,计算公式为

$$q = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i / M \quad (1)$$

式中 q 为累积释放量,mg/kg 或 g/m²; C_i 为污染物浓度,mg/L; M 为淋出液质量,mg。

2 分析评价标准与方法

2.1 风险评估方法

2.1.1 单因子污染指数法

单因子污染指数是根据土壤中各种重金属元素的浓度及含量与土壤环境质量标准之间的关系,对土壤的污染程度进行评价的一种方法,能够直观反映样品环境中各项污染指标情况^[14]。评价指标(表 2),计算公式为

$$CF = \frac{C_{\text{metal}}}{C_{\text{background}}} \quad (2)$$

式中 C_{metal} 为重金属的浓度,mg/L; $C_{\text{background}}$ 是土壤金属元素的背景值^[15],mg/kg。

表 2 单因子污染指数法评价等级标准

Table 2 Evaluation grade standard of CF index

等级	CF	污染程度
1	CF < 1	低污染
2	1 < CF < 3	中污染
3	3 < CF < 6	高污染
4	CF ≥ 6	极高污染

2.1.2 地累积指数法

地累积指数广泛被用来研究沉积物中重金属污染程度的定量指标^[16-17],土壤重金属地累积指数评价等级标准(表 3)。采用地累积指数法分析煤矸石填料中 5 种重金属元素污染特征,计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{k \times B_n} \right) \quad (3)$$

式中 C_n 为元素的浓度,mg/L; B_n 为重金属元素背景值,mg/kg; k 为修正指数,无量纲,一般取 1.5。

2.2 煤矸石重金属污染风险评价

初次淋滤后,煤矸石中 Fe 元素的污染指数达到“极高污染”水平(图 5),Al 处于“高污染”等级, Ba、Cr、Pb 3 种元素则归属“中污染”类别。

地累积指数评价结果显示,Fe 的地累积指数对应“中污染”等级,Al 为“中-重污染”水平,而 Ba、Cr、Pb 均处于“轻污染”范围。相比单因子法,

地累积指数则从元素背景值角度反映累积污染潜势。

表3 地累积指数评价等级标准

Table 3 Geo-accumulation index evaluation grade standard

I_{geo}	级别	风险程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} < 1$	1	轻污染
$1 < I_{geo} < 2$	2	中污染
$2 < I_{geo} < 3$	3	中-重污染
$3 < I_{geo} < 4$	4	重污染
$4 < I_{geo} < 5$	5	重-极重污染
$I_{geo} \geq 5$	6	极重污染

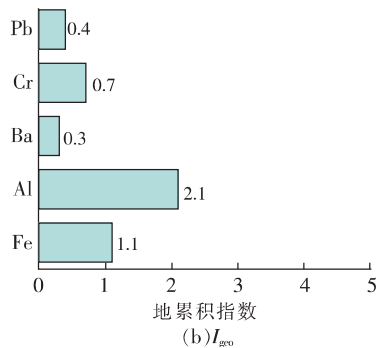
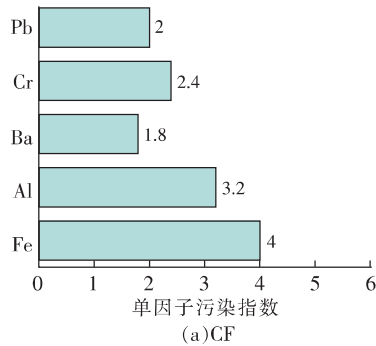


图5 单因子污染指数与地累积指数

Fig. 5 CF index and geo-accumulation index

3 试验结果与讨论

3.1 煤矸石重金属元素分析

为准确获取试验所用煤矸石样品中重金属元素的含量,称取 200mg 样品,对样品进行预先酸解处理消除有机质造成的干扰,采用电感耦合等离子体质谱法对各类金属元素进行定量测定(表4)。

开展了毒性浸出试验,并对比《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)和《危险废物鉴别标准——浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007),所测煤矸石样品中各重金属元素的浸出浓度均未超过《危险废物鉴别标准——浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)规定的限值,表明其整体毒性水平

较低。然而,Fe、Al、Ba、Cr、Pb 5 种元素的浸出浓度略高于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类地下水限值(等同于生活饮用水标准),表明在长期使用过程中存在一定的地下水污染风险,因此,选取上述 5 种重金属元素作为典型代表,开展其淋出行为及迁移特征的深入研究(表5)。

表4 样品元素含量

Table 4 Elemental concentrations in samples

编号	质量/g	元素	含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
1	0.2	Al	65 508 985.5
2	0.2	Pb	14 331.6
3	0.2	Ba	665 888.5
4	0.2	Cu	10 633.1
5	0.2	Mn	866 435.4
6	0.2	Cr	27 017.9
7	0.2	Fe	55 446 701.1
8	0.2	Zn	20 625.7

表5 地下水与浸出毒性标准

Table 5 Groundwater and leaching toxicity limit values

元素	浸出浓度	Ⅲ类标准	浸出毒性标准值
Al	0.261	≤ 0.20	
Pb	0.052	≤ 0.01	≤ 5
Ba	8.401	≤ 0.70	≤ 100
Cu	0.791	≤ 1	≤ 100
Mn	0.007 2	≤ 0.1	
Cr	0.072	≤ 0.05	≤ 5
Fe	1.283	≤ 0.3	
Zn	0.253	≤ 1	≤ 100

3.2 浓度变化及累积释放分析

3.2.1 Pb 元素

矸石中 Pb 元素在淋滤初期释放迅速(图6),试验显示初期浓度达到 0.036 mg/L。重金属元素的释放主要集中在淋滤前期阶段,这一现象与其表面易溶 Pb 及硫化物的氧化溶解有关,随着淋滤次数增加,吸附态 Pb 逐渐释放减少,浓度明显下降。在 pH = 7 条件下,Pb 溶解度较低,后期浓度进入波动下降阶段,主要受矿物结合态 Pb 缓慢释放影响。整体趋势表现出“初期高浓度-后期低浓度缓释”的规律,证明矸石表面有机质和胶体吸附作用随着淋滤时间的推进会阻碍重金属元素进入到外界环境^[18]。

3.2.2 Cr 元素

Cr 元素在淋滤初期快速释放(图6),导致淋

滤液浓度较高。随着试验进行,Cr 释放速率降低,浓度呈下降趋势并逐渐波动趋稳,这是由于纯水溶液对于煤矸石中铬的浸出效率总体不高,Cr 属于间接释放型元素^[19],随浸泡时间的增加浸出浓度上升、下降趋势交替,煤矸石中 Cr 元素的释放规律受扩散作用控制^[20],当淋滤液中污染物浓度越高时,浓度梯度越小,释放速率越慢,Cr 元素总体趋势为“初期升高-中期波动-后期稳定”。

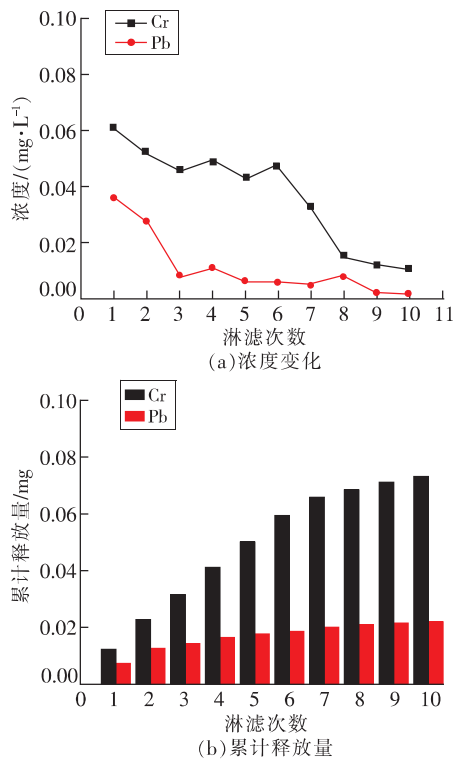


图 6 Cr、Pb 元素浓度变化与累计释放量
Fig. 6 Variation in Cr and Pb concentrations and cumulative release

3.2.3 Ba 元素

煤矸石中 Ba 元素在淋滤初期浓度迅速升高(图 7),而其矿物组成以高岭石^[21]和石英为主,并且 Ba 元素的含量较大,因此在淋滤试验中释放量增大,主要由于煤矸石中碳酸钡($BaCO_3$)的快速溶出,3 次淋滤达到峰值。此后, Ba^{2+} 与酸性物质生成难溶的硫酸钡($BaSO_4$),浓度下降,并趋稳在 0.45~0.47 mg/L 之间。结果显示总体浓度范围为 0.23~0.81 mg/L,峰值略超地下水 III 类限值,后期污染风险较小,整体释放呈“上升-下降-缓降”趋势。

3.2.4 Fe 元素

煤矸石中 Fe 元素的析出浓度随时间呈下降趋

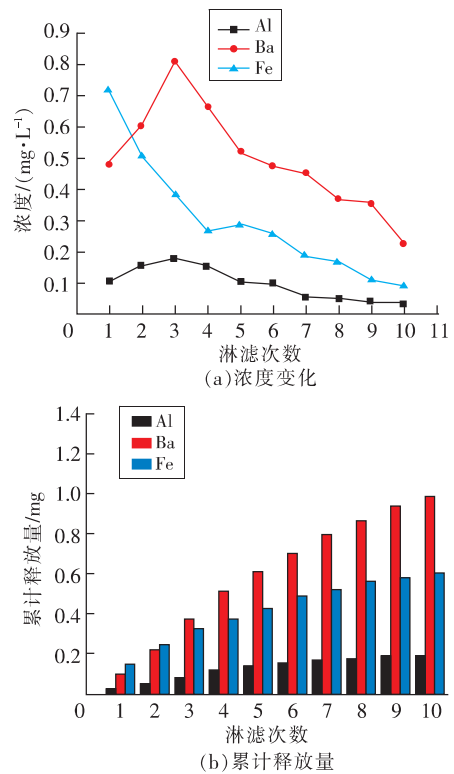


图 7 Al、Ba、Fe 元素浓度变化与累计释放量
Fig. 7 Variation in Al, Ba, and Fe concentrations and cumulative release

势(图 7),释放量逐渐增加,Fe 元素在煤矸石中主要以氧化物(如赤铁矿 Fe_2O_3 、磁铁矿 Fe_3O_4)及碳酸盐(如菱铁矿 $FeCO_3$)形式存在。试验中易溶含铁化合物迅速溶解,Fe 浓度显著升高与黄铁矿 FeS_2 在水作用下发生酸性矿山排水(AMD)反应有关^[22]。随着淋滤过程的推进,Fe 释放逐渐减缓,浓度下降趋势趋于平稳。在试验后期,Fe 浓度降至 0.11 mg/L 及 0.09 mg/L,可溶 Fe 已基本耗尽,淋滤影响显著减弱。图 7 显示 Fe 元素在前期释放量略高,短时超过限值,但后续浓度快速下降并保持在标准限值以下。

3.2.5 Al 元素

Al 元素在淋滤过程中的浓度变化呈现波动(图 7),煤矸石中的铝主要以硅酸盐形式存在,典型代表为高岭石($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)^[23]。淋滤初期,高岭石溶解, Al^{3+} 进入滤液,浓度上升,第 3 次淋滤时达到峰值浓度为 0.178 mg/L,此后,溶液中的 Al^{3+} 发生水解反应,逐渐生成氢氧化铝沉淀与胶体,同时被固定为次生矿物,浓度持续下降。除此之外,煤矸石中铝溶出量还与其本身 SiO_2 含量、 K_2O 含量呈现一定相关性,其中铝溶出量与 SiO_2

含量的负相关性较强,随着淋出溶液硅元素浓度的升高,Al元素浓度则呈现协同下降态势,后期表明煤矸石中可溶性铝已趋于释放饱和,淋滤对铝元素的溶出效应明显减弱。

3.3 XRD 图谱分析

3.3.1 矿物组成分析

煤矸石主要由石英(Q)、高岭石(K)、方解石(Ca)、白云母(M)组成(图8),其中石英峰明显,含量高且稳定;高岭石、方解石和白云母峰较弱,表明这些矿物存在于可反应状态或结晶度较低。XRD未显示Pb或Cr矿物明显峰,说明Pb、Cr主要以吸附态或微量掺杂形式存在,易在淋滤初期释放,符合试验趋势;淋滤试验显示Ba在前期快速释放后趋稳,XRD未显示Ba矿物明显峰,说明Ba主要以碳酸钡形式存在,在淋滤中部分溶解形成 Ba^{2+} ,随后与硫酸盐反应沉淀为 $BaSO_4$,导致浓度下降;XRD显示含Fe矿物峰(赤铁矿、磁铁矿)仍存在,说明可溶性Fe主要来源于氧化态矿物表面与易溶Fe化合物,解释了试验中Fe初期释放量高、后期浓度下降且环境风险可控。

3.3.2 淋滤前后结果分析

淋滤前煤矸石中石英峰最强,淋滤后石英峰保持稳定,表明其化学惰性强,不易发生溶解,方解石峰明显减弱,说明碳酸盐矿物易与淋滤液反应并释放 Ca^{2+} ;高岭石峰增强,反映出方解石溶解后的相对富集效应(图8);同时白云母峰出现并增强,与胶结物破坏和层状硅铝酸盐的稳定化有关。动态淋滤过程表现出选择性溶解效应,活性碳酸盐矿物逐渐减少,而石英及黏土矿物相对富集,使煤矸石矿物组成趋于稳定,揭示了煤矸石路基在长期水化反应下的矿物演化机理。

4 重金属迁移行为模拟

4.1 模型建立

为分析煤矸石中典型重金属元素(Fe、Al、Ba、Cr、Pb)在路基填筑场景下的垂向迁移行为,基于Hydrus-1D软件构建了一维非饱和土壤溶质运移模型。Hydrus-1D是一款广泛应用于模拟饱和及非饱和土壤水分、热量及溶质迁移过程的数值模拟工具^[24],该模型以Richards方程描述土壤水流运动过程,并结合溶质对流—弥散—吸附迁移方程,模拟重金属在煤矸石填料中的动态迁移规律。通过输入实测参数与边界条件,模拟典型污染物

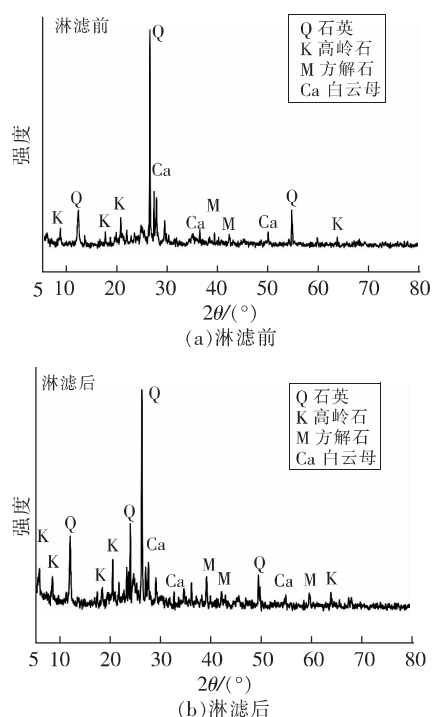


图8 淋滤前后煤矸石路基模型XRD

Fig.8 XRD of the coal gangue subgrade model before and after leaching

在非饱和介质中的迁移路径及浓度演变。

4.1.1 水流入渗模型

水流入渗通过Richards方程进行描述,其能同时测算地下水补给和数学求解等多方面的影响,并能模拟入渗水在土壤中的动态变化^[25]。Richards方程在垂直方向上的表现形式为

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中 $\theta(h)$ 为水头 h 的函数,无量纲; $K(h)$ 为非饱和导水率, m/s ; h 为基质吸力, N/m ; z 为垂向坐标,无量纲; t 为时间, s 。

土壤水分特征曲线(SWCC)被用来表征压力水头 h 与含水率 θ 之间的关系, Van Genuchten模型已被广泛应用到不同土壤的研究中^[25]。Van Genuchten模型的计算公式如下

$$h < 0 \quad \theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (5)$$

$$h \geq 0 \quad \theta(h) = \theta_s$$

式中 θ_r 为残余含水率, $\%$; θ_s 为饱和含水率, $\%$; α 为进气吸力值的倒数, $1/L$ 或 $1/cm$; n 为孔径分布参数,无量纲; $m = 1 - n^{-1}$; h 为压力水头, cm 。

非饱和导水率函数 $K(h)$ 表示非饱和条件下的导水能力,表达式为

$$K(h) = K_s \cdot S_e^l [1 - (1 - S_e^{l/m})^m]^2 \quad (6)$$

式中 K_s 为饱和导水率, m/s; S_e 为有效饱和度, %; l 为土壤孔隙连接度参数。

4.1.2 设置初始条件

在 Initial Conditions 中设置初始压力水头, 采用非饱和状态, $h = -100$ cm。土壤含水率 θ_0 利用公式(4)控制。

4.1.3 溶质运移模型

重金属迁移通过一维对流-弥散方程进行模拟。

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc) \quad (7)$$

式中 θ 为土壤含水率, %; z 为土壤深度, cm; t 为时间, d; c 为溶质浓度, mg/L; D 为水动力弥散系数, m^2/d ; q 为渗流速率, m/d。

4.2 模型参数设置

4.2.1 模型尺寸及观测点布置

基于前述模型构建, 结合陕北地区煤矸石路基的实际施工工况, 设定模拟区域为典型一维垂向非饱和剖面(图 9)。剖面结构自上而下依次为 0.5 m 厚黄土透水层、5.0 m 厚煤矸石填层及 0.5 m 厚底部黄土透水层, 用以模拟实际工程中煤矸石路基结构特征。模拟过程中, 在垂向剖面上设定 5 个观测点, 分别位于 0.5, 2.0, 3.0, 4.0 m 和 5.0 m 深度处, 用于实时监测各层位重金属浓度的动态

变化。

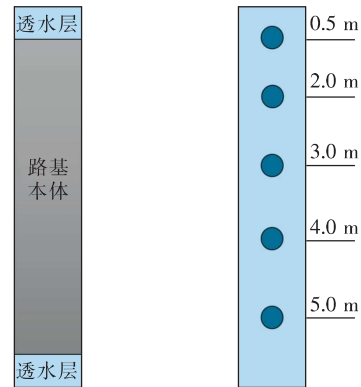


图 9 模型本体与观测点布置

Fig. 9 Model dimensions and observation points layout

4.2.2 土壤参数设置

在 Material Properties 模块中, 输入土壤特征参数以及 Van Genuchten 参数, 部分水力参数来自软件自带数据库中的典型岩土参数(表 6), 并结合现场采样土体类别进行修正。由于缺乏实测长期渗透试验数据, 部分参数采取经验估计方式确定, 可能导致模型结果对输入边界条件具有一定敏感性, 为验证模型稳定性, 开展了参数扰动分析, 结果表明当渗透系数变化时, 污染物迁移范围变化约 10% 以内, 模型整体趋势一致。但在精确定量评估方面需结合现场实测参数修正。

表 6 模型参数

Table 6 Model parameters

参数	$\theta_r/\%$	$\theta_s/\%$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(m \cdot s^{-1})$	$P/(g \cdot cm^{-3})$	$D_L/(m^2 \cdot d^{-1})$
矸石	0.068	0.38	0.008	1.09	5	1.2	8
黄土	0.034	0.46	0.016	1.37	6	1.5	10

4.2.3 初始条件与边界条件建立

初始阶段, 假设模型中各层土体的重金属浓度背景值为零。水分通量上边界设定为降水入渗边界, 根据王涛等以 1959—2011 年各站点降水指数的平均值作为参考^[26], 基于陕北地区年均降水量 500 mm, 模拟降雨过程; 下边界则采用自由排水条件, 以反映典型路基的渗流状态。溶质边界条件方面, 上边界设置为恒定浓度边界, 假定在每个时间步内进入系统的溶质浓度保持不变, 用以模拟连续输入污染物的情景; 下边界采用零浓度梯度边界, 以确保溶质在底部边界处不会发生反向扩散。根据煤矸石路基前期工程实际应用, 模拟总时长设置为 300 d, 初始时间步长为 0.1 d, 时间

控制参数与水分运移和溶质迁移过程耦合进行调节。

4.2.4 模型验证

根据前期静态浸出试验结果, 煤矸石中重金属 Pb、Al、Ba、Cr、Fe 的初始浓度分别为 0.052, 0.261, 8.401, 0.072 mg/L 和 1.283 mg/L, 本模型初始浓度参数参照静态浸出试验结果设定, 作为污染源项的初始输入值。考虑到动态淋滤过程中, 重金属释放受水力扰动与物理-化学作用共同影响, 浓度存在阶段性波动, 因此模型在运行过程中采用浓度时间耦合函数对源项浓度进行调整, 以反映逐步释放趋势, 这种方法在区域尺度污染迁移模拟中具有可操作性与稳定性, 但在微观尺

度分析中可能低估短时浓度峰值,文中选取 Cr 元素做参考,开展对照试验。通过将 Cr 元素的实测浓度与模型模拟值进行比较,在整个模拟周期内的变化趋势高度一致(图 10),模型在描述 Cr 的迁移行为方面拟合效果较好。结果验证了构建模型的有效性。

4.3 模拟结果与分析

4.3.1 重金属浓度随时间变化情况

不同深度的各重金属溶质浓度随时间变化(图 11),在相同的时间变化下重金属的溶质在路基中越向下迁移,其浓度越低。在同一深度下,溶质随时间的变化浓度不断升高,这与罗杰^[27]等的模拟结果相似。5 种金属溶质随降雨以及土壤吸附作用的形式进入路基 300 d 后,重金属 Pb、Al、Ba、Cr、Fe 元素的浓度曲线表现为“s”型波动,超过一定时间后重金属趋于稳定,模拟所得重金属 Pb、Al、Ba、Cr、Fe 元素在路基中达到的最大浓度分别为 0.062,0.264,0.643,0.397,1.472 mg/L,满足《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试

行)》(GB 15618—2018)相关限值^[28]。模拟进一步表明,迁移系数是影响重金属分布的重要参数。参数敏感性分析结果显示随着深度增加,土壤对重金属的吸附能力增强,迁移速率显著减缓;各元素浓度达到饱和所需时间随深度增加而延长。在模拟剖面最大深度处,重金属浓度呈现未检出状态,在 6 m 填筑高度下,煤矸石中重金属的淋溶迁移不会对周围土壤造成明显环境风险。

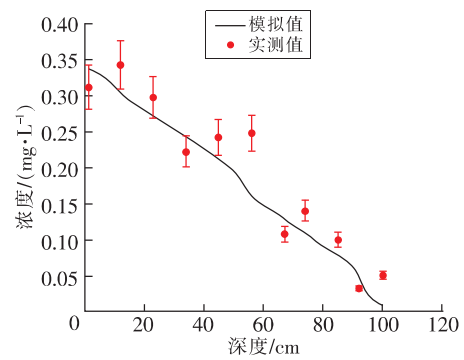


图 10 Cr 模拟与实测对比

Fig. 10 Comparison between simulated and measured Cr

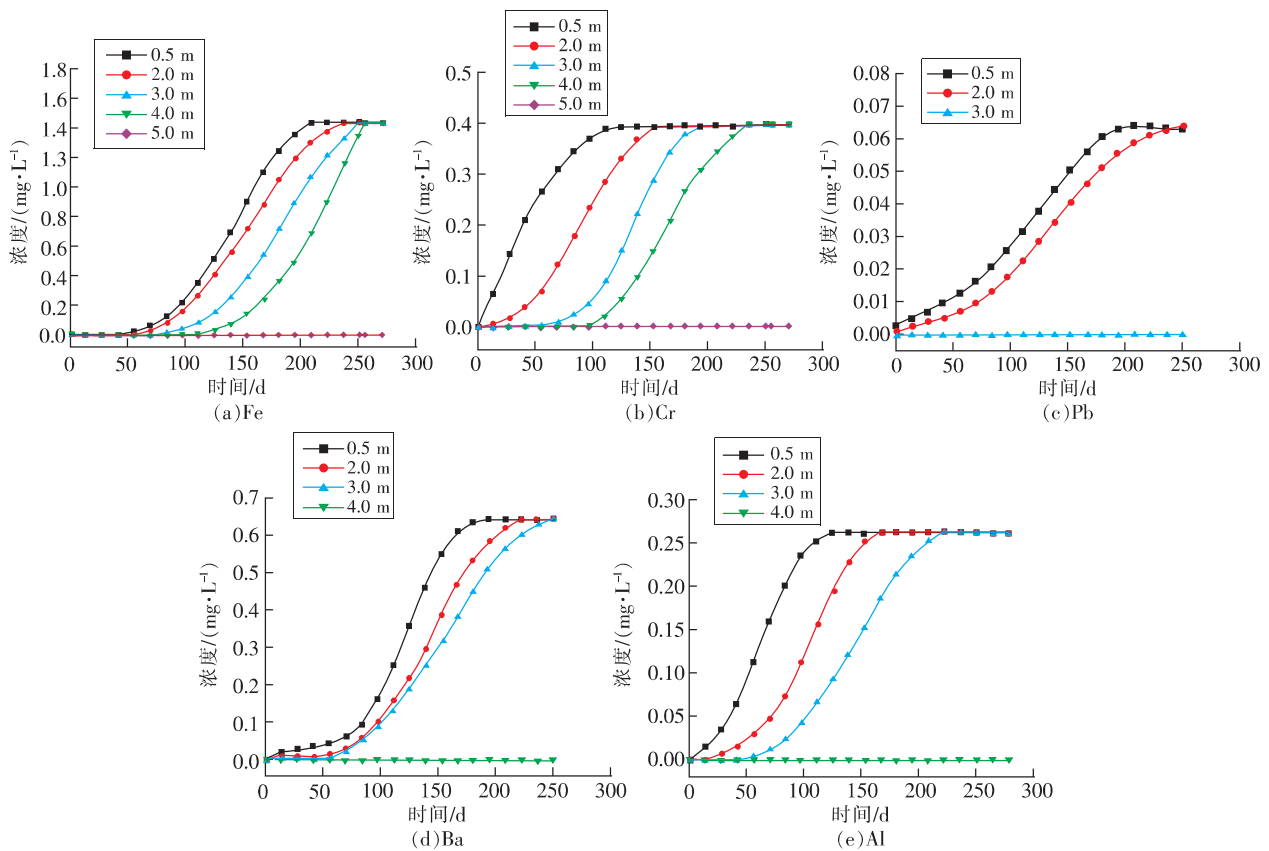


图 11 重金属浓度随时间变化

Fig. 11 Variation of heavy metal concentrations over time

4.3.2 重金属浓度随时间变化规律

重金属元素在垂向迁移过程中达到稳定浓度的时间存在明显差异。5种重金属的最大淋溶浓度依次为:Ba > Fe > Cr > Al > Pb,均呈现出“前期快速升高—后期浓度趋稳”的典型变化趋势。随着深度的增加,重金属溶质达到稳定浓度所需的时间显著延长,表明迁移速率随深度减缓。在浅层区域(<2.0 m),Al元素达到稳定状态所需时间最短,其次为Cr元素,而Ba与Pb的稳定时间较为接近。

重金属的迁移深度主要集中在5 m范围内,表明煤矸石中污染物的垂向影响具有一定局限性。此外,煤矸石路基本身的物理化学性质(如孔隙结构、吸附能力等)对金属离子的入渗速率与迁移行为具有显著影响。降雨是驱动重金属释放和迁移的主要外界因素。降雨量越大,淋溶作用越强,重金属向下迁移的深度与速率也随之增加^[29]。降雨频率和强度是影响煤矸石路基环境安全性的重要因素^[30]。

4.3.3 重金属溶质下渗深度随时间变化规律

多次降雨淋溶作用下,煤矸石路基中各类重金属元素发生下渗迁移行为。模拟结果显示,各元素的最大迁移深度存在显著差异,按由高到低的顺序依次为Fe(4.63 m) > Cr(4.12 m) > Ba(3.77 m) > Al(3.54 m) > Pb(2.72 m)(图12)。在超过最大下渗深度后,各金属浓度迅速降至不可检测水平,表明其迁移范围有限。

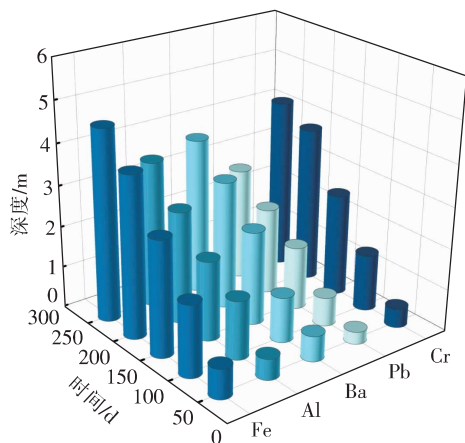


图12 重金属元素下渗深度随时间变化

Fig. 12 Variation in heavy metal infiltration depth over time

不同金属在垂向上的浓度变化趋势基本一致,均呈现出随深度增加而递减的特征。随着煤矸石在路基中经压实形成稳定颗粒结构,各层位

对重金属的吸附与赋存能力逐渐增强,有效抑制了污染物的进一步迁移。Fe元素的迁移距离最远,说明其在煤矸石介质中的迁移能力较强。整体而言,尽管重金属在初期具有一定迁移速率,但随着迁移深度的增加,其浓度显著衰减,在最大迁移深度以外,重金属污染物无法检出,在当前填筑结构与条件下,煤矸石路基对周边环境的污染风险极低,具备较高的环境安全性。

静态评价结果揭示了煤矸石样品中5种元素的潜在风险水平,单因子污染指数与地累积指数提供了研究对象的初始风险判定,但其难以反映随时间和深度演化的动态过程。利用Hydrus-1D数值模型进行了动态模拟,揭示了重金属元素在时空维度的演化过程,静态与动态方法结合,构成了“源强判定-迁移预测-风险评估”的完整框架,更全面地反映了煤矸石路基的环境风险。

5 结论

1)5类重金属在试验过程中普遍表现出“快速释放-缓慢释放-稳定阶段”的规律性,路基颗粒的破碎重组提高了对重金属污染物的赋存作用,煤矸石颗粒浸水生成的大量胶结物减弱了重金属的浸出行为。

2)煤矸石中重金属迁移行为具有明显的时空衰减特征,部分重金属元素在浸出过程中出现超限值的现象,这些超标元素多数在早期阶段出现浓度峰值,且迁移深度有限,未形成长期高风险迁移带,元素浓度均满足《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)限值,具备较高的环境安全性,但仍建议在实际应用中加强防渗设计及排水控制,降低初期释放风险。

3)不同金属在垂向上的浓度变化趋势基本一致,均呈现出随深度增加而递减的特征。降水浸入路基本体后,路基各层位对重金属元素和吸收作用逐层提高,随着填筑高度的升高,污染物的整体运移作用微弱。

参考文献(References):

- [1] 郭迟辉,张茂省,王尧,等.基于自然解决方案的黄河中游国土空间生态修复——以陕西榆林国土空间生态修复为例[J].地质通报,2023,42(10):1745-1756.
- GUO Chihui,ZHANG Maosheng,WANG Yao,et al. Ecological restoration of China's territorial space in Yulin

- section of the Yellow River Basin through nature-based solutions [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42 (10): 1745–1756.
- [2] SONG W, XU R P, LI X J, et al. Soil reconstruction and heavy metal pollution risk in reclaimed cultivated land with coal gangue filling in mining areas [J]. *Catena*, 2023, 228: 107147.
- [3] FENG Y, SHI L, MA D, et al. Road performance evaluation of unburned coal gangue in cold regions [J]. *Sustainability*, 2023, 15 (18): 13915.
- [4] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 117946.
- [5] SZCZEPANSKA J, TWARDOWSKA I. Distribution and environmental impact of coal-mining wastes in Upper Silesia, Poland [J]. *Environmental Geology*, 1999, 38 (3): 249–258.
- [6] KMIECIK E, STEFANIAK S, SZCZEPANSKA J, et al. Evaluation of temporal and spatial trends of groundwater quality alteration in the area of mining waste disposal site [C]//*SPIE Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies II*. Philadelphia, Pennsylvania, Dec. 7, 2004: 126–135.
- [7] LARSEN D, MANN R. Origin of high manganese concentrations in coal mine drainage, eastern Tennessee [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2005, 86 (3): 143–163.
- [8] 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.
- [9] 顾霖骏, 申艳军, 王念秦, 等. 煤矸石堆积区土壤重金属潜在危害评价及污染特征 [J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42 (5): 942–949.
GU Linjun, SHEN Yanjun, WANG Nianqin, et al. Pollution characteristics and potential risk assessment of heavy metals in soil of coal gangue accumulation areas [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42 (5): 942–949.
- [10] 冉德钦, 安斌, 李轶然, 等. 基于多孔介质煤矸石路基汞元素的扩散规律研究 [J]. *材料导报*, 2020, 34 (S1): 255–257.
RAN Deqin, AN Bin, LI Yiran, et al. Research on the diffusion law of mercury in roadbed of coal gangue based on porous media [J]. *Materials Reports*, 2020, 34 (S1): 255–257.
- [11] MIGNARDI S, CORAMI A, FERRINI V. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn [J]. *Chemosphere*, 2012, 86 (4): 354–360.
- [12] 蒋晨煜, 杜倩卉, 张军辉, 等. 煤矸石路基填料中污染物的释放-迁移-抑制特性研究 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 21 (6): 66–76.
JIANG Chenyu, DU Qianhui, ZHANG Junhui, et al. Release-migration-solidification characteristics of pollutants in coal gangue as subgrade fill material [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2024, 21 (6): 66–76.
- [13] 何芸, 杨海全, 曾广能, 等. 模拟降雨淋滤下堆肥污泥中重金属释放特征、迁移转化与生态风险 [J]. *地球与环境*, 2025, 53 (3): 440–448.
HE Yun, YANG Haiquan, ZENG Guangneng, et al. Characterization of heavy metal release, transformation and ecological risk in composted sludge under simulated rainfall leaching [J]. *Earth and Environment*, 2025, 53 (3): 440–448.
- [14] 王绍静, 吴晓琴, 刘成, 等. 柱淋滤模式下脱硫石膏中重金属组分的迁移特性 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11 (4): 2512–2521.
WANG Shaojing, WU Xiaoqin, LIU Cheng, et al. Research into mobility of heavy metals components in FGD gypsum on the basis of column leaching model [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (4): 2512–2521.
- [15] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值 [J]. *地学前缘*, 2014, 21 (3): 265–306.
CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21 (3): 265–306.
- [16] HOWARI F M, BANAT K M. Assessment of Fe, Zn, Cd, Hg, and Pb in the Jordan and Yarmouk River Sediments in relation to their physicochemical properties and sequential extraction characterization [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 132 (1–2): 43–59.
- [17] ZHUANG Q F, LI G, LIU Z Y, et al. Distribution, source and pollution level of heavy metals in river sediments from South China [J]. *Catena*, 2018, 170: 386–396.
- [18] 孔德顺, 王茜, 宋说讲, 等. 煤矸石提取铝铁元素制备PAFS的实验研究 [J]. *中国陶瓷*, 2014, 50 (5): 60–62.
KONG Deshun, WANG Qian, SONG Shuojiang, et al. Experimental study on the preparation of PAFS by ex-

- tracting Aluminum and Iron elements from coal gangue [J]. *China Ceramics*, 2014, 50(5):60-62.
- [19] 张卫国,杨帆,张池,等. 陕南地区石煤矸石中主要伴生元素迁移规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(3):189-193.
ZHANG Weiguo, YANG Fan, ZHANG Chi, et al. Study on migration law of main associated elements in stone coal gangue in South Shaanxi [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3):189-193.
- [20] 李家新,王文峰,陆青锋,等. 新疆地区不同岩性煤矸石重金属元素释放规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S2):328-335.
LI Jiaxin, WANG Wenfeng, LU Qingfeng, et al. Study on the release regularity of heavy metals from coal gangue with different lithology in Xinjiang [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S2):328-335.
- [21] 夏阳超,方丹,李金勇,等. 煤矸石中战略金属元素锂镓的浮选预富集[J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35(5):1757-1769.
XIA Yangchao, FANG Dan, LI Jinyong, et al. Flotation pre-enrichment of strategic metal elements lithium and gallium in coal gangue [J]. *The Chinese Journal of Non-ferrous Metals*, 2025, 35(5):1757-1769.
- [22] 张思宇,岳正波,余智祥,等. 某酸性矿山排水中溶解性有机物的特征分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(8):3401-3407.
ZHANG Siyu, YUE Zhengbo, SHE Zhixiang, et al. Characteristics analysis of dissolved organic matter in the acid mine drainage [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(8):3401-3407.
- [23] 赵龙毅,翟慧兵,张建伟,等. 山西煤矸石中铝元素矿物赋存形态及酸浸溶出规律[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(4):434-444.
ZHAO Longyi, ZHAI Huibing, ZHANG Jianwei, et al. Mineral occurrence and acid leaching characteristic of aluminum for coal gangue in Shanxi Province [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(4):434-444.
- [24] 康得军,张芳,吕苕苕,等. 浸泡淋滤作用下煤矸石重金属元素的释放规律及特征研究[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(1):54-62.
KANG Dejun, ZHANG Fang, LÜ Jiaoguo, et al. Research on release law and characteristics of heavy metals in coal gangue under soaking and leaching [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(1):54-62.
- [25] 林挺,罗飞,朱艳,等. Hydrus-1D模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用[J]. *环境科学*, 2019, 40(12):5640-5648.
LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, et al. Calculation of the soil risk control value through a Hydrus-1D model for groundwater protection [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12):5640-5648.
- [26] 王涛,于冬雪,杨强. 陕北黄土高原地区降水时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(6):24-28.
WANG Tao, YU Dongxue, YANG Qiang. Characteristics of spatial-temporal change of precipitation in loess plateau area of northern Shaanxi [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(6):24-28.
- [27] 罗杰,刘本华,徐晶,等. Hydrus-1D软件模拟污染土壤重金属溶质运移[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2023, 37(4):444-448.
LUO Jie, LIU Benhua, XU Jing, et al. Heavy metal migration in contaminated soil simulated by using Hydrus-1D software [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2023, 37(4):444-448.
- [28] 冯印成,赵康,田向勤,等. 煤矸石回填料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 Yincheng, ZHAO Kang, TIAN Xiangqin, 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.
- [29] 杨博,赵西宁,高晓东,等. 耦合干空气机制的黄土水热运移过程模拟——以山地苹果园为例[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2):401-411.
YANG Bo, ZHAO Xining, GAO Xiaodong, et al. Simulation of water and heat process in loess by incorporating dry air-flow mechanism: A case study of an apple orchard on mountain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2):401-411.
- [30] 景宏君,单俊伟,李少平,等. 煤矸石混凝土静态抗压破坏机理及强度预测[J]. *西安科技大学学报*, 2024, 44(4):759-767.
JING Hongjun, SHAN Junwei, LI Shaoping, et al. Static compressive failure mechanism and strength prediction of coal gangue concrete [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2024, 44(4):759-767.

(责任编辑:李克永)