

# 工业固废利用处置过程环境风险评估体系研究

徐思琪<sup>1,2,3</sup>, 刘婷婷<sup>1,2</sup>, 迭庆杞<sup>1,2</sup>, 李唯实<sup>1,2\*</sup>, 黄启飞<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国环境科学研究院, 环境基准标准与风险管控全国重点实验室, 北京 100012
2. 中国环境科学研究院, 生态环境部危险废物鉴别与风险控制重点实验室, 北京 100012
3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100085

**摘要:** 工业固体废物在利用处置过程中会长期释放污染物并带来环境风险。现有研究多依据最不利原则开展环境风险简化评估, 难以客观反映风险在不同环境条件下的真实水平, 从而影响科学决策。针对这一问题, 在系统分析国内外研究现状的基础上, 本文提出了工业固废利用处置过程环境风险评估的理论框架与分析路径, 其核心在于污染源释放强度及迁移转化过程的动态分布表征。结果表明: 表征污染源强时应首先识别控制污染物释放的关键因素, 采用适用的实验方法或模型工具刻画多因素驱动下的释放机制, 并通过 Monte Carlo 分析获得污染物浓度的动态分布; 表征污染物在环境介质中的迁移转化过程时, 需依据具体场景的水文地质条件选择模型进行模拟, 并辅以不确定性分析以获得受体 (评估终点) 处的污染物浓度分布。以云南省某磷石膏堆场为案例的分析结果显示, 简化评估方法计算得到的受体井总磷和氟化物浓度分别为 0.085 和 0.074 mg/L, 判定为风险可接受; 而动态评估方法预测在 100 d 时受体井总磷和氟化物浓度的 95% 置信区间分别为 0.73~2.77 和 0.49~0.96 mg/L, 且该区间范围能够覆盖同期受体井的实际监测浓度 (1.38 和 0.7 mg/L)。本研究提出了适用于典型工业固废利用处置场景的环境风险动态分布评估框架, 以真实反映复杂环境条件下污染物的长期释放与迁移行为, 可为风险预测与动态管控提供重要支撑。

**关键词:** 工业固体废物; 环境风险评估; 污染源强度; 迁移转化; 动态分布

中图分类号: X82 文章编号: 1001-6929(2026)03-0764-11  
文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.12.21

## An Environmental Risk Assessment System for Industrial Solid Waste Utilization and Disposal

XU Siqu<sup>1,2,3</sup>, LIU Tingting<sup>1,2</sup>, DIE Qingqi<sup>1,2</sup>, LI Weishi<sup>1,2\*</sup>, HUANG Qifei<sup>1,2,3\*</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100085, China

**Abstract:** Industrial solid waste can continuously release contaminants during utilization and disposal, thereby posing potential environmental risks. Most existing studies assess such risks using simplified approaches based on worst-case assumptions, which often fail to objectively represent actual risk levels under variable environmental conditions and may hinder sound decision-making. To address this limitation, this study proposes a theoretical framework and analytical pathway for environmental risk assessment throughout the utilization and disposal of industrial solid waste, based on a systematic review of domestic and international research. The core of the framework is the dynamic characterization of pollution source strength and the subsequent migration and transformation of contaminants. The results indicate that characterization of pollution source strength should begin with the identification of key factors controlling contaminant release. Then, appropriate experimental methods or modelling tools should be applied to elucidate multiple-factor-driven mechanisms, followed by Monte Carlo analysis to derive dynamic probability distributions of contaminant concentrations. For contaminant migration and transformation in environmental media, model selection should be adapted to site-specific hydrogeological conditions and combined

收稿日期: 2025-10-15 修订日期: 2025-12-24

作者简介: 徐思琪 (1995-), 女, 北京人, 202231470036@mail.bnu.edu.cn

\* 责任作者: ①李唯实 (1993-), 男, 湖北武汉人, 助理研究员, 博士, 主要从事固体废物利用处置技术及风险评价研究, liws@craes.org.cn; ②黄启飞 (1973-), 男, 湖北宜昌人, 研究员, 博士, 主要从事固体废物管理与处理处置技术研究, huangqf@craes.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2024YFC3906401)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2024YFC3906401)

with uncertainty analysis to estimate concentration distributions of contaminants at the receptor (assessment endpoints). A phosphogypsum stockpile in Yunnan Province was selected as a case study. The simplified assessment predicted total phosphorus and fluoride concentrations of 0.085 and 0.074 mg/L, respectively, in the receptor well, suggesting acceptable environmental risk. In contrast, the dynamic assessment approach predicted 95% confidence intervals of 0.73-2.77 mg/L for total phosphorus and 0.49-0.96 mg/L for fluoride at 100 days, which encompassed the observed concentrations (1.38 and 0.70 mg/L, respectively). This study establishes a dynamic, distribution-based environmental risk assessment framework tailored to typical industrial solid waste utilization and disposal scenarios. By capturing the long-term release, migration, and transformation of contaminants under complex environmental conditions, the proposed framework provides a robust scientific basis for risk prediction and dynamic environmental management.

**Keywords:** industrial solid waste; environmental risk assessment; pollution source strength; migration and transformation; dynamic distribution

2023年我国工业固体废物(简称“工业固废”)产生量约为40亿吨,其中危险废物产量突破1亿吨<sup>[1]</sup>。在资源环境约束与利用处置需求的双重驱动下,逐步形成了多样化的利用与处置模式,既涵盖充填回填及建材利用等资源化利用方式,也包括填埋和长期贮存等末端处置方式<sup>[2-3]</sup>。由于工业固废种类繁多且性质复杂,其在利用和处置过程中存在污染物持续释放与迁移的风险,易对土壤、地下水及地表水造成环境隐患<sup>[4-5]</sup>。因此,科学评估工业固废利用处置过程环境风险,是推动工业固废资源化利用与无害化处置的关键保障。

我国工业固废环境风险评估制度的基础源于《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》<sup>[6]</sup>,该法律明确了工业固废利用与处置全过程管理及环境风险防控的要求。在此框架下,《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)对填埋、贮存和回填在选址、建设、运行、封场及复垦等环节提出了具体要求,并要求对不同类型的一般工业固废开展环境本底调查及风险评估。对于资源化利用生产的产品,《工业固体废物综合利用产品环境与质量安全评价技术导则》(GB/T 32328—2015)和《固体废物玻璃化处理产物技术要求》(GB/T 41015—2021)等标准提出了相应的环境安全和质量控制要求。《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)提供了危害识别、暴露评估、毒性评估和风险表征的通用程序;《固体废物再生利用污染防治技术导则》(HJ 1091—2020)则提出,资源化产品的环境风险评价应包括环境保护目标确定、评价场景构建、污染物释放模型建立、污染物在环境介质中的迁移转化模拟及影响评估等主要步骤。然而,现行标准体系尚未对污染物释放与迁移转化过程的定量表征提出明确的技术要求。在具体实践中,多数研究者依据最不利原则,将实验所得的污染物浓度数据与阈值比对,超出阈值即认为存在风险,将环境风险简化为单一确定

值。这种做法在科学性方面存在明显瓶颈:一是仅以单一或固定情景下的浓度值作为源强表征,难以反映降雨入渗、酸碱性及风化作用导致的固废性质变化等多因素影响下源强的动态释放过程;二是迁移转化过程多采用简化方法或依据国外模型及其数据库进行评估,对实际水文地质条件和工程构造差异的适应性不足;三是风险表征普遍采用单一确定值或少数情景值,缺乏对关键参数不确定性和风险概率分布的刻画。这些问题共同导致评估结果难以真实反映工业固废在实际复杂环境条件下的长期风险演化规律<sup>[7]</sup>。

美国在长期实践中形成了较为系统的工业固废环境风险评估技术体系。该体系依托《资源保护与再生法》(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)建立了工业固废管理框架,并配套开发了渗滤液迁移与转化综合模型(Composite Model for Leachate Migration with Transformation Products, EPACMTP)和工业废物管理评估模型(Industrial Waste Management Evaluation Model, IWEM)。这两类模型已成为工业固废填埋及相关场景风险评估的核心工具,能够预测不同利用与处置场景下污染物对地下水的长期影响<sup>[8]</sup>。其中,EPACMTP模型包括源释放、不饱和带迁移、饱和带迁移和Monte Carlo不确定分析4个模块,能够基于对流-弥散方程,结合平衡吸附与一阶转化过程,模拟污染物在非饱和带与含水层中的运移与衰减,既考虑渗滤液与地下水混合所致的稀释效应,也涵盖污染物在土壤和含水层中的吸附及生物化学降解过程。模型内置气候与水文地质数据库,可提供具体参数的函数分布,并通过输入不同参数组合开展Monte Carlo不确定性分析,最终获得评估终点的污染物浓度分布(即环境风险分布)。作为筛选级工具,IWEM模型在EPACMTP模型基础上扩展了地貌改造填充及道路利用等应用场景,可在全国数据库与场地数据相结合的框架下,通过概率分布判定地下水受体是否达到保护性要求。需要指出的是,这两类模型

均假设污染物释放浓度在模拟期间保持恒定,忽略了工业固废在长期堆存、风化及环境条件变化下释放强度的动态演化。

综上所述,尽管工业固废利用处置过程的环境风险评估体系已取得一定进展,但在源强动态表征、迁移转化过程模拟等关键环节仍存在明显不足。一方面,污染物释放过程常被简化为最不利场景下的固定源强,忽略了环境因子驱动下释放强度的动态变化;另一方面,迁移转化过程直接采用简化系数法或国外开发的评估模型,与实际水文地质参数存在较大偏差,且输出结果多为单一确定值,未能体现风险随环境条件变化而呈现的概率分布特征,因而难以揭示长期演化过程中的真实风险水平。针对上述问题,本文通过文献与案例分析,识别了现有评估方法的局限,构建了面向工业固废利用处置过程的环境风险评估概念框架与理论方法体系,阐明了污染物源强释放及其在环境介质中迁移转化过程的动态分布表征思路,为后续在不同工程情境下构建具体评估模型提供理论基础。

## 1 工业固废环境风险评估现状

工业固废在利用与处置过程中的环境风险主要源于污染物的释放及其在环境介质中的迁移累积,基本采用“危害识别—源强表征—迁移转化模拟—风险表征”的四步法框架开展评估。其中,危害识别与风险表征已形成较为成熟的通用方法,但在源强表征和迁移转化模拟两环节仍存在不足。因此,本研究系统梳理了国内外相关研究(见表1),重点分析这两个环节的研究现状与存在问题,以提升环境风险评估的科学性。

### 1.1 源强释放研究现状与问题

目前,室内淋溶实验和现场监测是常用的源释放表征手段。例如,陈林<sup>[9]</sup>通过开展模拟雨水淋溶实验并结合渗滤液监测数据,在“最不利原则”假设下对飞灰掺入沥青混凝土的道路利用情景进行评估,认为在给定配比和场景下污染物释放量较低,风险可接受。然而,飞灰中 $Cl^-$ 、 $F^-$ 等离子在实际降雨作用下往往呈现明显的“初期冲刷而后耗竭”模式,短时强降雨可使初期浓度达到实验值的数倍甚至数十倍。由于未考虑降水等环境因素对污染物释放的影响,其预测结果可能低估道路利用初期的实际暴露水平。刘博等<sup>[11]</sup>采用欧盟标准化方法 NEN 7375,在 pH 为 4.60 的浸提剂条件下模拟极端情景,获取电解锰渣-赤泥路面砖中 Mn 的浸出浓度,并将其作为源项输入。但已有研究显示风化、碳酸化与孔隙结构演化

会显著改变 Mn 的释放机制,导致基于单一酸性条件的短期淋溶结果难以代表其长期释放行为,从而影响风险预测的准确性。部分研究尝试突破传统源强表征方法的局限,引入概率统计或耦合模型。例如,徐亚等<sup>[13]</sup>利用 LandSim-HELP 耦合模型模拟填埋场渗漏源强,并通过概率分布拟合反映防渗膜老化对渗漏量的影响。尽管该研究考虑了工程因素的影响,但未体现固废在环境因素作用下污染物释放的动态变化。

如表1所示,固定且单一的源强浓度值仍是当前研究最常采用的输入方式,但这类做法普遍缺乏对降雨入渗情况、酸碱度变化以及固废风化等环境因素作用下动态释放过程的刻画。这种简化处理本质上延续了“最不利原则”的思路,但“最不利”并不等同于“真实最危险”。以酸雨情景为例,部分研究<sup>[9]</sup>直接采用酸性浸出液作为所谓“最不利情景”,然而在许多地区酸雨发生频次并不高,导致源强设定既可能低估极端冲刷条件下的实际释放,也可能在日常情景中过度保守,从而掩盖风险分布的时变性和多样性。更关键的是,将复杂的释放过程简化为单点输入忽视了源强的不确定性与概率分布特征,使评估结果难以反映长期演化及不同情景下的真实风险水平。

### 1.2 迁移转化研究现状与问题

对比分析当前研究在“迁移转化”环节的评估方法(见表1)发现,简化计算或直接采用国外模型工具是常见的表征方法。一些研究<sup>[9,12]</sup>依据 HJ 25.3—2019 中的分配方程法和质量极限法对工业固废在回填和道路利用场景下的环境风险进行简化评估,忽视了环境介质对迁移过程的动态影响,且缺少对评估结果的不确定性和概率分布分析。季文佳等<sup>[10]</sup>以电镀污泥浸出浓度为源项,利用 EPACMTP 模型预测填埋场景下污染物在地下水中的浓度,然而该模型默认“均质含水层、稳定流、点源连续释放”的理想化假设,导致计算结果难以反映真实的迁移转化过程。Spreadbury 等<sup>[7]</sup>应用 IWEM 模型内置的美国全国平均地质与水文参数,评估再生沥青路面不同距离处的地下水浓度,发现多项组分超过 EPA 区域筛选水平。该评估方法首先假设了污染物的浸出浓度恒定不变,未考虑其随时间的变化;其次简化了迁移过程,未考虑实际场景的水文地质特征及污染物在环境介质中的化学及生物转化(如多环芳烃的光解或生物降解)。

上述分析可见,当前环境风险评估研究及案例在污染源释放及迁移转化过程均存在科学性,有必要在现有体系的基础上进一步完善环境风险评估的整体思路。为此,本文选择典型的工业固废利用处

表1 工业固废环境风险评估相关研究汇总  
Table 1 Summary of studies related to environmental risk assessment of industrial solid waste

序号	固废类型	应用场景	表征方法		结论	数据来源
			源释放过程	迁移转化过程		
1	飞灰	道路利用	雨水淋溶实验结合短期现场监测获取浸出浓度,按“最不利情景”确定固定源强	基于年入渗量估算地下水浓度,按HJ 25.3—2019进行健康风险计算	在既定配比与场景下,重金属释放量较低,健康风险低于阈值,认为道路利用可接受	文献[9]
2	电镀污泥	填埋	直接采用浸出试验浓度作为固定源强	EPACMTP模型模拟二维对流-弥散迁移,假定均质含水层与连续点源	监测井浓度低于健康风险判据,非致癌风险<1,认为一般工业固废填埋可接受	文献[10]
3	电解锰渣、赤泥	道路利用	长期浸泡实验拟合释放动力学,并以pH为4.60的浸出液模拟酸雨情景,等效换算源强	使用IWEM内置简化对流-弥散模型模拟由包气带至含水层的迁移	四种地下水流向情景下监测点检出Mn <sup>2+</sup> ,风险可接受	文献[11]
4	磷石膏	回填	短期浸出实验与现场渗出水试验获取源强	依据HJ 25.3—2019采用土壤-地下水迁移模型表征柔性及刚性区的迁移	总量满足用地土壤筛选值,但浸出指标(F <sup>-</sup> 、PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )超标,存在迁移风险	文献[12]
5	再生沥青	道路利用	批量浸出实验筛选最大值作为固定源强	IWEM模拟稀释-衰减过程,预测地下水受体点浓度	多数金属及PAHs浓度远低于风险阈值;评价结果对检测方法敏感	文献[7]
6	铬渣	填埋	基于工程老化情景调整源强输入	HELP-LandSim模拟渗漏、包气带与含水层的迁移;剂量-效应模型评估健康风险;Monte Carlo表征不确定性	短期风险较低;长期老化导致Cr(VI)致癌风险显著升高(可达10 <sup>-4</sup> )	文献[13]
7	一般工业固废	填埋	根据文献调查与“最不利原则”设定固定源强	LandSim模拟三界面浓度,并用Monte Carlo分析参数不确定性	多数情景浓度低于美国饮用水标准(NPDWRs)最大浓度限值,但防渗系统老化会导致远期风险上升	文献[14]
8	镉渣	贮存	渗滤液实测浓度作为源强,考虑HDPE老化影响渗漏量变化	HELP-LandSim耦合模拟渗漏、入渗、扩散与迁移	100年内监测点浓度均低于地下水III类标准(GB/T 14848—2017),风险可接受	文献[15]
9	氰化尾渣	贮存	以土壤与地下水实测浓度反演污染源强	基于健康风险模型计算土壤与地下水中暴露风险	部分点位存在成人/儿童的致癌与非致癌风险,以摄入途径为主	文献[16]

置场景, 提出新的环境风险评估理论框架与分析路径。

### 2 环境风险动态分布研究的理论框架

风险通常指在不确定条件下损害发生的概率及其后果<sup>[17]</sup>; 环境风险则强调污染物或有害因子对生态系统和人体健康造成不利影响的发生可能性及其严重程度<sup>[18]</sup>。在工业固废领域, 环境风险可理解为固废在多种利用处置场景下, 与环境介质长期作用所形成的“释放—迁移—暴露”过程中污染物浓度的概率分布, 以及该浓度是否超标所带来的后果<sup>[19]</sup>。由于不同

利用处置场景下污染物的来源、环境条件、水文地质结构和暴露途径等方面差异显著, 难以由单一模型或通用公式完成全面的环境风险评估。因此, 本文从理论方法层面提出适用于道路利用、回填、填埋与贮存等四种典型利用处置场景 (见图 1) 的环境风险评估框架和关键要素集合。该框架包括四个核心环节, 即危害识别、源强表征、迁移转化模拟与风险表征 (见图 2), 不同利用处置途径可根据具体场景特点选取相应的方法或模型开展环境风险评估。

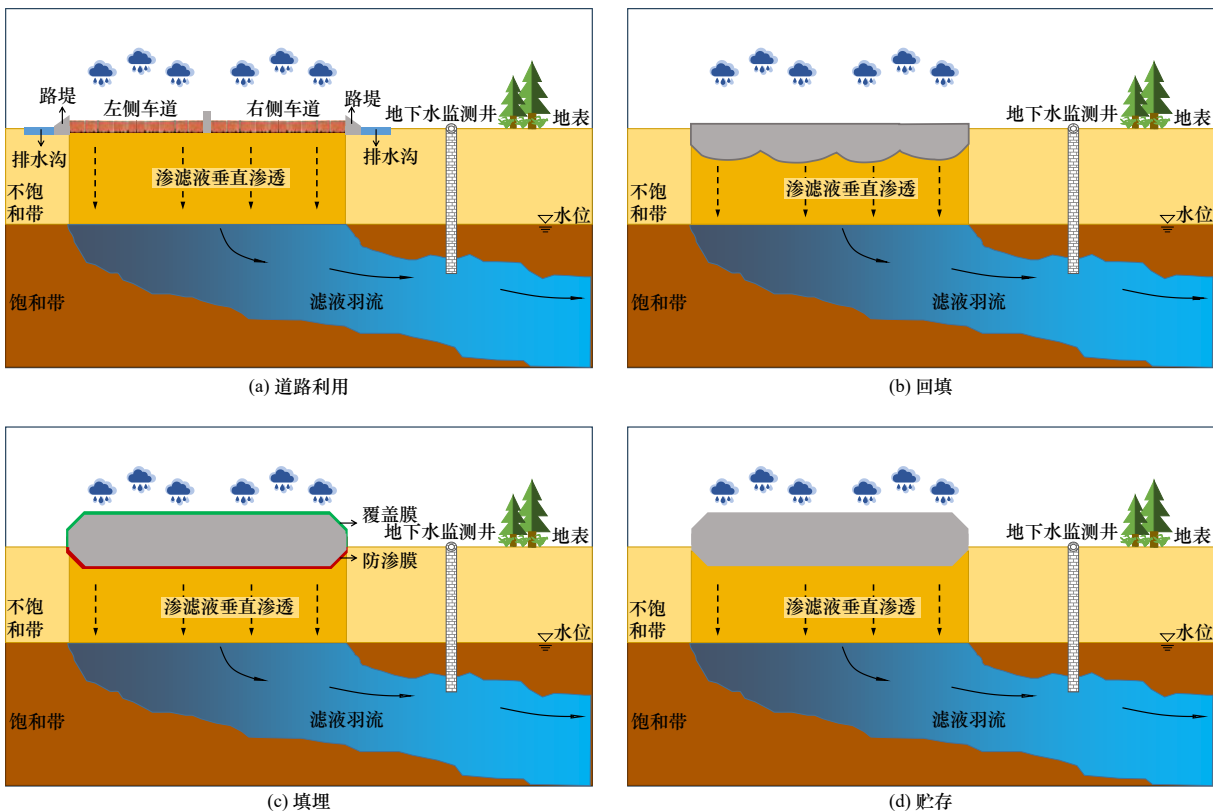


图 1 工业固废典型处置及利用场景下污染物释放迁移示意

Fig.1 Schematic of contaminant release and migration in typical industrial solid waste disposal and utilization scenarios

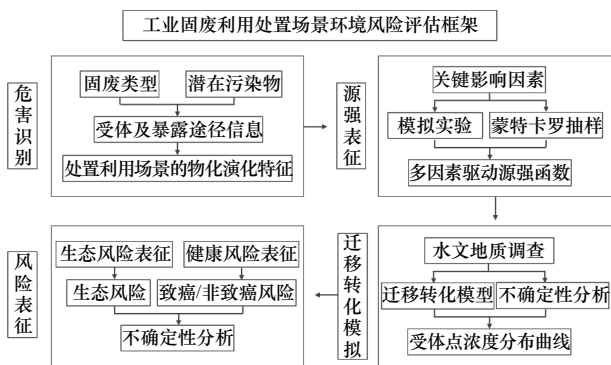


图 2 工业固废环境风险评估框架

Fig.2 Framework of environmental risk assessment for industrial solid waste

#### 2.1 危害识别模块

危害识别是工业固废环境风险评估的起点, 其核心任务在于追溯固废的工业来源, 分析生产过程的相关化学反应与物质转化路径, 从而锁定固废中的潜在污染物。在此基础上, 还需明确固废的具体利用或处置情景, 判断潜在污染物的迁移路径与暴露途径, 并界定风险评估的空间、时间及受体范围。

不同场景下污染物的释放与迁移机制存在显著差异: 在道路利用场景中, 污染物主要通过降水淋滤、地表径流冲刷及道路扬尘驱动; 在回填场景中, 污染物释放受孔隙水、岩体和固废界面之间的反应控制; 在填埋与贮存场景中, 污染物主要随降雨入

渗形成渗滤液并向下迁移。有效的危害识别需耦合固废来源、理化特性、场地水文地质条件、气候特征及受体分布等多维信息,识别可能超标的关键污染物,并明确其主要影响途径,为模型选择与参数化提供支撑。

## 2.2 源强表征模块

源强是指在利用或处置场景下目标污染组分的浓度或其概率分布特征。污染物源强的形成源于固相中污染物向液相的界面迁移,该过程受矿物溶解平衡、吸附-解吸与配位交换等界面反应,以及固体内部的扩散与孔隙尺度传质的共同控制。矿物溶解决定污染物长期释放的浓度上限;吸附-解吸及表面配位过程对外界水质和化学条件高度敏感,是初期冲刷峰值形成的主要原因;而内部扩散则对释放速率形成动力学限制,主导中后期的缓释特征。这些机制随环境因素的变化而产生明显差异,因此在具体评估中需首先识别控制释放的关键因素,选择适用的标准化试验方法或模型工具,揭示多因素驱动下的污染物释放机制,并利用 Monte Carlo 方法等不确定性分析手段,获得源强浓度的概率分布。

本研究分析了四种典型利用处置场景下工业固废的污染物释放特征。在道路利用场景下[见图 1(a)],固废通常被掺入沥青混凝土或制作为路面砖并直接暴露于环境中,污染物释放受材料形态(单块/复合)、表面积暴露、风化劣化速率、降雨与接触时间、pH/离子强度、温度及冻融-干湿循环等因素控制;回填、填埋及贮存三类场景[见图 1(b)(c)(d)]均涉及固废在地表或地下的长期堆置,但在防渗措施上存在差异,即填埋场通常具有覆盖层与防渗膜,贮存场多为露天或简易堆场,而回填主要发生在矿坑或采空区。三类场景中,降雨强度、入渗速率、酸碱条件、固废风化、覆盖/导排效率以及防渗系统老化或破损等因素可能是影响污染源释放的关键因子。此外,本研究梳理了常用于源强表征的标准试验方法及模型工具(见表 2),为不同利用与处置场景下的源强表征提供参考。

## 2.3 迁移转化模拟模块

污染物在环境介质中的迁移转化过程决定了受体(评估终点)处的暴露水平及风险分布。如图 1 所示,污染物从源区进入环境介质后,其时空分布由对流、弥散与扩散等物理输运过程共同驱动,并在土壤-地下水体系中持续经历界面反应和化学形态转化。迁移路径与速率对含水层结构、渗透性、水化

条件和氧化环境等因素高度敏感,在风险评估中,必须结合具体场景的水文地质结构、工程构造及水化学环境合理刻画这一过程。由于上述因素在时间与空间上均具有不确定性和变异性,最终受体处的污染物浓度通常呈现一个动态分布区间,而非单一确定值。

在迁移转化过程的表征中,需要根据不同的利用与处置场景选取相应的模型体系。在道路利用情景下,污染物主要通过雨水淋溶及径流渗入地下水,可结合标准化淋溶试验与道路结构特性,采用 IWEM 或 HYDRUS 等模型进行预测;在回填情景中,固废与孔隙水及周围岩体长期接触,污染物释放受界面反应和局部水动力影响显著,通常可依据现场水文地质条件选择 HYDRUS、MODFLOW 或 FEFLOW 等模型模拟其运移行为;在填埋与贮存情景中,迁移过程涉及降雨入渗、渗滤液形成以及防渗系统性能变化,可先利用 HELP 模型估算渗滤液产量,再与 EPACMTP、IWEM 或 LandSim 等模型联合使用,形成从源区到受体的浓度预测链条。由于源强、入渗速率、水力传导系数及降解参数等输入变量随时间和空间变化而具有不确定性,可采用 Monte Carlo 方法进行随机抽样与迭代计算,以获得受体污染物浓度的概率分布。本文在表 2 中总结了常用模型的功能特点及其适用性,可为不同利用与处置场景下的迁移转化模拟提供参考依据。

## 2.4 风险表征模块

从风险表征角度看,现有研究多输出单一监测点浓度及对应的单值健康风险或环境风险指标,缺乏对模型参数不确定性和环境条件波动的概率刻画<sup>[9,16]</sup>。风险表征需将模拟得到的受体浓度分布与环境质量标准(如《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)等)进行比对,并以超标概率、风险值或健康风险等指标作为判定依据。

相比于表 1 所示的典型研究,现有方法在源强表征上多采用单一浸出条件或“最不利情景”下的固定浓度,将其直接作为源强输入模型。该类方法忽略了环境因素对污染物释放的影响,因而难以反映源强随时间和情景变化的动态特征。本文提出的框架则强调在识别关键控制因子的基础上,探究污染物的实际释放及迁移机制,并结合 Monte Carlo 方法揭示污染物在不同时间和空间尺度下的浓度演化规律与风险变化特征,更能满足动态管理与精细化决策的需求。

表2 标准试验方法及模型工具的比较分析

Table 2 Comparative analysis of standard testing methods and modeling tools

分类	序号	模型名称	国家/机构	用途与要点	优缺点	数据来源
源强释放建模 与支撑工具	1	LEAF方法	美国EPA	标准化淋溶测试, 表征pH、L/S、扩散、长期释放等	优点: 标准化程度高, 覆盖多种情景, 易对接模型 缺点: 条件理想化, 难完全再现实际场地; 实验成本高	文献[20]
	2	LeachXS/ORCHESTRA	荷兰ECN与Vanderbilt University	将实验数据与热力学/反应传输模型耦合, 揭示控制机制	优点: 机理全面, 适合建材和固废的长期预测 缺点: 参数化复杂, 对用户地球化学背景要求高; 数据库侧重欧美国家	文献[21]
	3	CEN/TS 16 637 系列	欧盟CEN	建材及固化体释放测试; 通过动态淋溶实验获取浓度-时间曲线	优点: 统一标准, 结果可用于合规与生命周期评价 缺点: 偏向建材领域, 实验周期长, 不完全适合大宗固废	文献[22]
	4	HYDRUS-1D/HP1	美国USDA与PC-Progress	非饱和带水流与溶质运移模拟; 考虑水文-化学过程	优点: 可模拟降雨入渗驱动的短期预测, 机理更真实 缺点: 源强化学机制不全; 参数化复杂, 需输入大量数据	文献[23]
	5	HELP	美国EPA	填埋场水量平衡与渗滤液产量预测; 输入降雨、蒸发、覆盖层特性, 输出渗滤液产量	优点: 水量模拟好, 常用于源项输入 缺点: 无化学机制, 仅为水量预测	文献[13]
	6	JLT-13	日本JIS	土壤与再生材料浸出测试; 测定短期内污染物释放浓度, 用于合规判定	优点: 操作简便, 适合常规检测 缺点: 代表性有限, 难反映长期变化	文献[24]
迁移转化 建模工具	1	EPACMTPT	美国EPA	工业/危险废物填埋场渗滤液迁移预测; 耦合包气带与含水层运移, 考虑转化与有限源机制	优点: 机理化强, 可信度高, 支持不确定性分析 缺点: 参数量大, 依据美国数据库, 适用性受限	文献[25]
	2	IWEM	美国EPA	工业固废处置与利用场景的地下水风险筛选; 输入源强-入渗-含水层参数, 输出浓度分布	优点: 简便, 内置Monte Carlo, 适合筛选评估 缺点: 假设源强恒定, 忽视冲刷效应, 迁移简化	文献[26]
	3	LandSim	英国Environment Agency	填埋场长期污染物迁移与风险预测	优点: 长期预测能力强, 适合封场后管理 缺点: 源强恒定假设; 化学过程简化; 数据需求大	文献[27]
	4	3MRA	美国EPA	工业废物多介质、多途径风险评估; 融合空气、土壤、水等多介质暴露	优点: 综合性强, 政策层面常用 缺点: 模型复杂, 数据需求极高, 不适合常规场地	文献[28]
	5	MODFLOW/MT3DMS	美国USGS	地下水流动与溶质运移模拟	优点: 高度灵活, 能模拟复杂水文地质条件 缺点: 专业性高, 参数需求大, 计算量大	文献[29]
	6	FEFLOW	德国WASY GmbH	三维有限元地下水流动、溶质和热传输模拟; 涵盖饱和-非饱和带运移、密度依赖流体、反应传输(吸附、降解、沉淀等), 支持不确定性分析	优点: 可处理复杂地质结构和三维非均质性, 支持饱和/非饱和和联合模拟, 贴合固废渗滤液情境, 能模拟污染物化学反应和耦合过程, 提供参数估计和敏感性/不确定性分析 缺点: 参数需求量大, 数据获取难度高, 模型构建和运行复杂, 计算资源消耗大	文献[30]

### 3 案例研究

#### 3.1 磷石膏堆场环境风险案例评估结果

为验证本文提出的环境风险评估方法,并比较不同评估路径的差异,选取某磷石膏堆场作为贮存场景案例,分别采用环境风险简化评估与环境风险动态评估两种方法进行对比分析。该堆场自1982年投入运行,至2005年完成堆存,2006年起停用。堆场采用干法排渣方式堆存,历史累积堆存量约1700万吨(干基)。由于堆存时间长、规模大,渗滤液造成的环境风险一直是当地环境监管部门关注的重点。堆场及其地下水监测井(2k01)的位置分布如图3所示,研究期间连续监测井中污染物浓度,以对比和校正溶质运移模型。本研究以特征污染物总磷和氟化物为例开展环境风险评估。



图3 磷石膏堆场与地下监测井位置示意

Fig.3 Schematic diagram of the phosphogypsum stockpile and groundwater monitoring wells

##### 3.1.1 环境风险简化评估

首先,采用简化评估方法对堆场进行环境风险分析。依据《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557—2010),对按网格法采集的10份堆场表层磷石膏样品进行了浸出实验,结果表明,总磷和氟化物的浸出浓度范围分别为1.43~8.70和1.44~7.59 mg/L。根据“最不利原则”,选取最大值8.70和7.59 mg/L作为堆场渗滤液中总磷和氟化物的代表浓度。渗滤液在迁移至地下水的过程中将发生稀释作用。美国得克萨斯州环境质量委员会(TCEQ)制定的得克萨斯风险降低计划(TRRP)提出以稀释衰减系数(DAF)量化渗滤液经由土壤到达地下水的迁移与稀释过程<sup>[31]</sup>。该模型适用于模拟固废填埋、堆存等场景下污染物经包气带向地下水运移的过程。通过该模型可计算污染物的稀释衰减倍数(DF),并据此估算地下水中的污染物浓度。该方法已被广泛应用于简化环境风

险评估中污染物迁移与衰减过程的定量分析<sup>[32]</sup>。上述计算过程见式(1)(2)。

$$C_{gw} = \frac{C}{DF} \quad (1)$$

$$DF = \frac{C_{soil}}{C_{gw}} = \frac{LDF}{\frac{\rho_b}{\theta_{ws} + K_d \rho_b + H' \theta_{as}}} \times \frac{L_1}{L_2} \quad (2)$$

式中:  $C_{gw}$  为地下水中目标污染物浓度, mg/L;  $C$  为磷石膏堆场渗滤液中目标污染物浓度, mg/L; LDF 为渗滤液的稀释因子,描述污染物在渗滤液进入地下水后的水动力学稀释,取值为10;  $\rho_b$  为土壤容重,取值1.5 g/cm<sup>3</sup>;  $\theta_{ws}$  为含水孔隙度,取值0.25;  $K_d$  为分配系数,取值为5 L/kg;  $H'$  为亨利常数,取值为0;  $L_1$  为污染物在土壤中迁移的路径长度(污染源到地下水面),取值为6 m;  $L_2$  为地下水中污染物的稀释长度或受体井距离,取值为3 m。

结果表明,地下水监测井2k01(距堆场3 m)处的总磷和氟化物浓度分别为0.085和0.074 mg/L,低于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类标准限值,按此方法可判定该磷石膏堆场环境风险较低。

##### 3.1.2 环境风险动态评估

采用本文提出的环境风险动态评估方法对该磷石膏堆场进行分析。首先,参照美国EPA Method 1314标准,对堆场不同位置和深度采集的样品开展淋溶实验,获得污染物在不同液固比条件下的释放特征曲线。随后,通过Monte Carlo方法将实验结果转化为源强浓度的概率分布,以表征污染物释放过程的不确定性与动态变化特征。在此基础上,对场地的关键水文地质与运移参数进行随机抽样生成多组输入参数,并基于MODFLOW-MT3D模型分别开展模拟,获得地下水监测井(2k01)的污染物浓度分布区间(见表3)。

监测井2k01的历史监测结果显示,总磷和氟化物的浓度分别为1.64和3.25 mg/L,显著高于天然背景值,说明堆场渗滤液已在监测井处形成了稳定且持续的污染释放。模型计算结果显示,污染源持续释放100 d后,监测井中总磷浓度的95%置信区间为0.73~2.77 mg/L,预测平均值为1.55 mg/L,远超过GB 3838—2002中Ⅲ类限值(0.2 mg/L);氟化物浓度的95%置信区间为0.49~0.96 mg/L,预测平均值为1.04 mg/L,同样高于GB/T 14848—2017中Ⅲ类标准限值(1 mg/L)。

对比第100天时监测井中污染物浓度的模型预测值与实际监测值,结果发现:总磷及氟化物浓度的实际监测值分别为1.38和0.70 mg/L,模型预测值范

表 3 磷石膏堆场监测井污染物浓度

Table 3 Monitoring well contaminant concentrations of the phosphogypsum stack

数据时间	总磷浓度			氟化物浓度		
	模型预测值/(mg/L)	实际监测值/(mg/L)	偏差率/%	模型预测值/(mg/L)	实际监测值/(mg/L)	偏差率/%
历史监测		1.64			3.25	
第100天	0.73~2.77(1.55)	1.38	12.32	0.49~0.96(1.04)	0.70	48.57

注:数值范围为模型预测所得污染物浓度的 95% 置信区间,括号内数值为平均值。

围覆盖实际监测值,且预测平均值与实际监测值偏差分别为 12.32% 和 48.57%。总磷浓度数据整体拟合度较高,反映出基于美国 EPA Method 1314 释放规律构建的源强分布曲线能够合理表征总磷的释放与迁移特征。而氟化物浓度的模型预测平均值相对偏差较大,这一偏差可能与 F 在堆体中受到 CaF<sub>2</sub> 的矿物沉淀-溶解反应控制、介质异质性对流场形成的局部滞水区以及补给量随时间波动等现场非稳态过程有关,从而使氟化物的实际迁移速率低于模型预测。

总体而言,动态评估方法能够较好地再现总磷浓度的变化趋势,而氟化物浓度较大的偏差提示应进一步加强对矿物反应动力学与水文地质时序变化的刻画。通过展示污染物浓度预测区间的上下界,该方法突破了传统依据单一确定性值的风险评估方式,更全面地揭示了污染物迁移过程中的不确定性,为磷石膏堆场的环境风险管理提供了更稳健的科学依据。

### 3.2 案例评估讨论

在本案例中,简化评估方法以渗滤液的单一浓度结合稀释衰减系数计算地下水中总磷和氟化物的预测浓度,结果分别为 0.085 和 0.074 mg/L,远低于相关标准限值。相比之下,动态评估方法充分考虑了降水入渗、时间等关键因素对污染物释放的影响,分析了实际水文地质参数对污染物迁移过程的影响。计算得到第 100 天时监测井中总磷和氟化物的模型预测平均值分别为 1.55 和 1.04 mg/L,与实际监测值偏差分别为 12.32% 和 48.57%。本案例结果表明,若继续采用简化评估方法,可能造成风险低估,从而削弱风险管控的科学性;而本研究提出的动态评估方法能够实现污染物释放与迁移转化过程的动态化表征,提供更符合实际的风险预测结果,为监管与管理提供更可靠的科学依据。

尽管本研究提出的动态评估方法较传统简化方法更能反映长期运行及环境变化下的真实风险,但仍存在一定不足:一是现有污染物释放与迁移数据多来源于室内试验或少量现场监测点,对于准确刻画实际场地在多尺度、多时空条件下的动态变化仍有差距;二是固废风化、界面反应及气候变化等关键因素对

污染物地球化学行为的影响仍需深入机理研究;三是在风险表征方面,尚需探索符合管理需求的预测预警措施。未来研究应加强现场长期监测与试验-模型耦合,完善本土数据库与参数体系;推动多学科集成,将地球化学反应、生态效应与人类暴露模型纳入评估链条;同时发展基于大数据和人工智能的动态预测与风险预警工具,为我国工业固废的全过程管理和环境风险防控提供更坚实的科学支撑。

## 4 结论

a) 环境风险的本质是随环境条件变化而呈现的概率分布,其风险认知应从“单一浓度判断”转向“动态分布与概率表征”,这一认识为开展科学评估提供了理论基础。

b) 本研究构建了由“危害识别、源强动态表征、迁移转化模拟和风险表征”组成的工业固废利用处置场景环境风险评估体系,明确了各环节的理论依据、关键控制因素与实现路径。该体系强调:在危害识别中准确界定固废属性、关键污染物、暴露途径以及环境边界;在源强表征中通过贴合实际环境条件的浸出试验及 Monte Carlo 方法构建源强的概率分布;在迁移转化模拟中依据水文地质结构与工程情景选取合适模型(如 EPACMTP、LandSim、MODFLOW 等),并结合不确定性分析表征受体浓度的分布区间;在风险表征中以置信区间、超标概率等分布型指标替代传统的确定性判断,实现环境风险评估的动态化与科学化。

c) 磷石膏堆场案例结果表明,传统简化方法使用固定源强,忽视环境条件动态变化,易造成风险低估或偏差。而基于本研究提出的动态评估体系,可合理反映关键环境因子驱动下的源强释放与迁移过程,模拟结果与监测井实测数据具有良好一致性,证明该方法体系在真实工程场景中的适用性与可靠性。

### 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2023 年中国生态环境统计年报 [EB/OL]. 北京:生态环境部,(2024-12-31)[2025-09-01]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthtjnb>.
- [2] YU X, YANG K, HE X, et al. Research progress on multi-source

- coal-based solid waste (MCSW) resource utilization and backfill mining basic theory:a systematic literature review[J].Process Safety and Environmental Protection,2025,195:106670.
- [ 3 ] WANG S Y,LIU B,ZHANG Q,et al.Application of geopolymers for treatment of industrial solid waste containing heavy metals: state-of-the-art review[J].Journal of Cleaner Production,2023,390:136053.
- [ 4 ] HAN Z Y,MA H N,SHI G Z,et al.A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China [J].Science of the Total Environment,2016,569:1255-1264.
- [ 5 ] 赵海霞,蒋晓威,崔建鑫.泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 [J].环境科学,2014,35(11):4387-4394.
- ZHAO H X,JIANG X W,CUI J X.Shifting path of industrial pollution gravity centers and its driving mechanism in pan-Yangtze River Delta[J].Environmental Science,2014,35(11):4387-4394.
- [ 6 ] 生态环境部.中华人民共和国固体废物污染环境防治法 [EB/OL].北京:生态环境部,(2020-04-30)[2025-09-01].https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/202004/t20200430\_777580.shtml.
- [ 7 ] SPREADBURY C J,CLAVIER K A,LIN A M,et al.A critical analysis of leaching and environmental risk assessment for reclaimed asphalt pavement management[J].Science of the Total Environment,2021,775:145741.
- [ 8 ] US Environmental Protection Agency.EPA's composite model for leachate migration with transformation products (EPACMTP): parameters/databackground document[R].Washington DC:US Environmental Protection Agency of Solid Waste Office,2003.
- [ 9 ] 陈林.焚烧飞灰用于沥青路面中面层污染物溶出规律及风险评估 [D].重庆:重庆交通大学,2016:60-62.
- [ 10 ] 季文佳,杨子良,王琪,等.危险废物填埋处置的地下水环境健康风险评估 [J].中国环境科学,2010,30(4):548-552.
- JI W J,YANG Z L,WANG Q,et al.Health risk assessment of groundwater in hazardous waste landfill disposal[J].China Environmental Science,2010,30(4):548-552.
- [ 11 ] 刘博,梁宇廷,孟棒棒,等.电解锰渣-赤泥路面砖中锰的浸出行为研究及长期释放预测 [J].环境科学研究,2023,36(10):2000-2010.
- LIU B,LIANG Y T,MENG B B,et al.Study on leaching behavior of manganese in electrolytic manganese residue and red mud paving bricks and long-term release prediction[J].Research of Environmental Sciences,2023,36(10):2000-2010.
- [ 12 ] 刘恒博,姚勤英,郭卫广,等.一般工业固体废物回填环境风险评估方法研究:以某矿坑磷石膏回填埋为例 [J].环境工程学报,2025,19(5):1202-1216.
- LIU H B,YAO Q Y,GUO W G,et al.Risk assessment for non-hazardous industrial solid waste backfilling:a case study of phosphogypsum backfilling in a mine pit[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2025,19(5):1202-1216.
- [ 13 ] 徐亚,能昌信,刘峰,等.填埋场长期渗漏的环境风险评估方法与案例研究 [J].环境科学研究,2015,28(4):605-612.
- XU Y,NAI C X,LIU F,et al.Method and case study to evaluate long-term environmental risks from landfill leakage[J].Research of Environmental Sciences,2015,28(4):605-612.
- [ 14 ] SLACK R J,GRONOW J R,HALL D H,et al.Household hazardous waste disposal to landfill:using LandSim to model leachate migration[J].Environmental Pollution,2007,146(2):501-509.
- [ 15 ] ZHANG L Y,NAI C X,XU Y,et al.Risk assessment for hazardous waste storage site material aging and groundwater contamination [J].E3S Web of Conferences,2023,369:01010.
- [ 16 ] 刘勤琦,邬梦成,徐东,等.典型历史遗留氰化尾渣堆场周边土-水系统中重金属源解析及风险评估 [J].环境科学学报,2025,45(5):401-413.
- LIU M Q,WU M C,XU D,et al.Source analysis and risk assessment of heavy metals in the soil-water system surrounding a typical historical cyanide tailings landfill site[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2025,45(5):401-413.
- [ 17 ] US Environmental Protection Agency.Guide for industrial waste management[R].Washington DC:US Environmental Protection Agency of Solid Waste Office,2025.
- [ 18 ] LIU S Y,WANG H Q,LI Y L.Current progress of environmental risk assessment research[J].Procedia Environmental Sciences,2012,13:1477-1483.
- [ 19 ] 方文,黄玉洁,刘苗苗,等.固体废物全过程精细化环境风险评估框架研究 [J].环境科学研究,2022,35(5):1288-1296.
- FANG W,HUANG Y J,LIU M M,et al.A refined framework on assessing whole-process environmental risk of solid waste in China [J].Research of Environmental Sciences,2022,35(5):1288-1296.
- [ 20 ] KE H,ZHENG S N,ZHANG P Z,et al.Leaching behavior and release mechanism of pollutants from different depths in a phosphogypsum stockpile[J].Waste Management,2024,189:230-242.
- [ 21 ] SOULTANIDIS V,VOUDRIAS E A.Leaching and geochemical modeling of asbestos-cement waste and mine asbestos[J].Journal of Hazardous Materials,2024,480:135988.
- [ 22 ] WEILER L,PFINGSTEN J,EICKHOFF H,et al.Improving consistency at testing cementitious materials in the Dynamic Surface Leaching Test on the basis of the European technical specification CEN/TS 16637-2-Results of a round robin test[J].Journal of Environmental Management,2022,314:114959.
- [ 23 ] LUO Y,WANG Z,WANG C X,et al.Simulation and prediction of vertical migration of Cd<sup>2+</sup> in heavy metal-contaminated soils amended with different passivators via Hydrus-1D[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2025,13(5):118587.
- [ 24 ] FUJII K,OCHI K,OHBUCHI A,et al.Evaluation of physicochemical properties of radioactive cesium in municipal solid waste incineration fly ash by particle size classification and leaching tests[J].Journal of Environmental Management,2018,217:

- 157-163.
- [ 25 ] LI T K,LIU Y,BJERG P L.Prioritization of potentially contaminated sites:a comparison between the application of a solute transport model and a risk-screening method in China[J]. *Journal of Environmental Management*,2021,281:111765.
- [ 26 ] SPREADBURY C J,MAGNUSON J K,CLAVIER K A,et al. Effect of waste-derived soil amendments on mitigating leaching impacts from municipal solid waste incineration (MSWI) ash[J]. *Waste Management*,2023,169:186-195.
- [ 27 ] SUN X C,XU Y,LIU Y Q,et al.Evolution of geomembrane degradation and defects in a landfill:Impacts on long-term leachate leakage and groundwater quality[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,224:335-345.
- [ 28 ] WEINBERG N,HENNING M,KLADIAS M,et al.Technical critique of the multimedia,multipathway,multireceptor risk assessment model[J]. *Human and Ecological Risk Assessment:an International Journal*,2003,9(7):1679-1700.
- [ 29 ] OHWOGHERE-ASUMA O,CHINYEM F I,ATITI P,et al. Contaminant transport modelling of the vulnerability of aquifer to cyanide from cassava processing mill in the western Niger Delta [J]. *HydroResearch*,2024,7:154-163.
- [ 30 ] RAMASAMY M,POWER C,MKANDAWIRE M.Numerical prediction of the long-term evolution of acid mine drainage at a waste rock pile site remediated with an HDPE-lined cover system [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*,2018,216:10-26.
- [ 31 ] TRAMM K S,MINTER J T,SEATON C A.Importance of background threshold value development within risk-based corrective action programs[J]. *Vadose Zone Journal*,2024,23(1): e20294.
- [ 32 ] YANG J Z,YANG Y F,TIAN L,et al.Risk and pollutant protective concentration levels of drilling waste used to pave oil and gas field well sites[J]. *Water*,2024,17(1):30.

(责任编辑:周巧富)