

冯印成,赵康,田向勤,等.煤矸石回填料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.

煤矸石回填料区重金属淋溶迁移时空规律

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

摘要:以陕西省某市煤矸石回填料区协同生态治理示范试验项目为例,探讨煤矸石作为回填料对回填料区域环境污染风险,分析重金属淋溶迁移时空规律.利用 Hydrus-1D 模拟了回填料区域煤矸石淋溶后的重金属在土壤中的迁移时空变化规律及过程,并通过土柱实验实测值与模拟值进行对比验证,得到其在不同时间段的入渗距离和在不同土层的浓度平衡时间关系.结果表明,建立的模型可有效模拟该回填料区域重金属在土壤中的迁移变化规律;随着时间的推移,重金属淋溶浓度随着深度改变有所不同,为 $\text{Cr(VI)}=\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Hg}$,最大迁移距离分别为 21.60,21.60,20.70 和 16.20m.在不同土层深度下,重金属的淋溶浓度大小为 $\text{Pb}>\text{Cr(VI)}>\text{Ni}>\text{Hg}$,浓度趋势呈先快速升高后逐渐平缓的状态,均未超过限值,煤矸石回填料区基本无环境污染影响.

关键词:煤矸石; 重金属; 土壤污染; 溶质迁移; 生态环境

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1422-09

Research on spatiotemporal patterns of heavy metal leaching and migration in coal gangue backfill subsidence area. FENG Yin-cheng, ZHAO Kang*, TIAN Xiang-qin, MA Chao, NIE Jing-lei, HU Hua-long (Solids Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1422-1430

Abstract: The collaborative ecological governance demonstration test project in the coal gangue backfills subsidence area of a city in Shaanxi Province provided an example for this study. This research investigated the environmental pollution risks in the backfill area, where coal gangue was used as the backfill material. It analyzed the spatiotemporal laws of heavy metal leaching and migration. The variation and processes of heavy metals in the soil were simulated using Hydrus-1D. A comparison of measured values from the soil column experiment with the simulated values verified the model, and the analysis identified relationships between infiltration distances at different periods and concentration equilibrium times in various soil layers. The results demonstrated that the established model effectively simulated the migration and change patterns of heavy metals in the soil of the backfill area. Over time, the leaching concentrations of heavy metals varied with depth, ranked as $\text{Cr(VI)} = \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Hg}$, with maximum migration distances of 21.60, 21.60, 20.70 and 16.20m, respectively. At different soil layer depths, the leaching concentrations of heavy metals followed the order $\text{Pb} > \text{Cr(VI)} > \text{Ni} > \text{Hg}$. The concentration trends increased rapidly and stabilized, with none exceeding the limit values. The findings confirmed no significant environmental pollution impacts occurred in the coal gangue backfill subsidence area.

Key words: coal gangue; heavy metals; soil pollution; solute migration; ecological environment

我国富煤、贫油、少气的能源结构特点,决定了煤炭能源对国家及各地区的经济发展起着至关重要的作用^[1-3].煤炭高强度的开采和洗选,造成地表沉降,塌陷坑等塌陷地貌,这直接影响到土壤的各项理化性质和地形地貌等^[4-6].采煤造成的塌陷地占煤炭开采破坏土地的 91%,采煤还产生 10%~25%不等的煤矸石^[7-8].我国煤矸石综合利用率总体偏低,特别是煤炭资源集中区,利用率不足 30%^[9].成片采煤塌陷区和大量煤矸石堆存,不仅压占土地,污染周围土壤和地下水,还影响矿区居民的身体健康和财产安全^[10-11].为实现矿区的绿色可持续发展,采煤塌陷区的生态环境重建和减少矸石山的污染风险,研究煤

矸石综合利用“变废为宝”^[12],提高采煤塌陷区域生态修复能力具有重要生态意义.

Hydrus-1D 是由美国农业部国家盐分实验室开发的用于模拟一维水流,溶质等在饱和或非饱和介质中的迁移转化的软件^[13-14],可模拟不同领域污染物溶质在土壤渗滤系统中的迁移特征^[15-18].Talat 等^[19]使用系统模型来模拟土壤的含水量和基质势在两个坡度上的时间变化,而 Farshad 等^[20]则使用

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374138);国家重点研发计划资助项目(2024YFC3909301);黄河流域生态保护和高质量发展联合研究资助项目(2022-YRUC-01-0306)

* 责任作者, 教授, zhaok_666666@163.com

模型来评估农田地下水的盐分传输规律.目前国内外对土壤水与盐分动态相互作用过程已有较深入的研究,但有关重金属污染物运移的研究还不多,罗杰等^[21]通过构建重金属溶质的运移模型,探讨了化工厂中重金属污染在土壤里的分布和其在时空变化上的运移规律;焦独醒等^[22]利用 Hydrus-1D 对 Cr(VI)在负载针铁矿的石英砂(GCS)中的迁移规律进行研究.该模型在土壤学,环境学和水文地质学等多个学科中得到了广泛的应用^[23],由于包气带环境与土壤渗滤系统的内部环境具有一定的相似性,所以可将 Hydrus-1D 引入用来模拟土壤渗滤系统中水分及水溶性污染物质的运动及迁移转化.

本文中煤矸石回填塌陷区协同生态治理,可有效解决煤矸石资源化利用问题,但煤矸石作为填料回填后对土壤和水体的影响程度尚不清晰.以陕西省某市煤矸石回填塌陷区协同生态治理示范试验项目为例,通过 Hydrus-1D 构建数学模型,研究煤矸石经淋溶后可溶性重金属在土壤渗滤系统的运移变化规律,综合分析煤矸石中可溶性重金属随雨水迁移进入土壤和水体造成的环境影响.根据重金属溶质迁移动态规律,对其入渗到土壤中的浓度和持续时间进行了量化分析,旨在为土壤中重金属淋溶的时空迁移规律提供科学依据.

1 研究区概况与样品采集

1.1 研究区概况

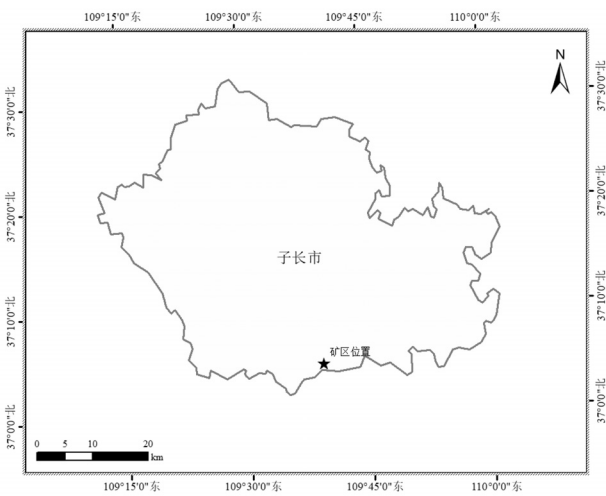


图1 项目区地理位置示意

Fig.1 Geographical location diagram of the project area

研究区位于陕西省子长市某煤矿区(图 1),项目

区总面积 29.89km²,地处陕北黄土高原丘陵沟壑区横山山脉,地势为西高东低,海拔 1356m.矿区地质构造位置处于鄂尔多斯盆地中部次级构造单元陕北斜坡南部,地层向西微倾伏,含煤的三叠系瓦窑堡组岩层呈简单层状叠置.年平均气温 9.1℃;降水量 514.7mm,主要集中在 7~9 月,占全年降水量的 70%;年平均蒸发量 1738mm,降水量较少,分配不均匀,属于中温带大陆性暖温带干旱-半干旱季风性气候.

研究区土壤主要类型以黄绵土为主,土层厚度大,土壤贫瘠,水土流失严重.采用煤矸石回填塌陷区协同生态治理,将煤矸石按照一定厚度进行分层回填,所回填煤矸石以粘土型煤矸石为主.

1.2 煤矸石回填设计

煤矸石以填压方式修复塌陷区,矸石回填厚度为 5m,上覆黄土隔离并压实,厚度为 0.5m,当回填达到设计标准高度平台后,进行覆盖压实和植被恢复.地表平台需覆黄土两层,第一层为阻隔层,为 0.5m,推平并压实,防止雨水渗入矸石层;第二层为覆盖层,为 0.5m,用于后续植被恢复.根据充填次序方法,设计填充模型(图 2),假设煤矸石经降雨长期淋溶后,可溶性元素随雨水迁移进入土壤和水体,可能对土壤,地表水及地下水产生一定的影响,影响程度主要取决于淋溶液中污染物的排放情况.采用数值模拟的方法,预测污染因子在连续入渗情况下对土壤及地下水环境的影响.

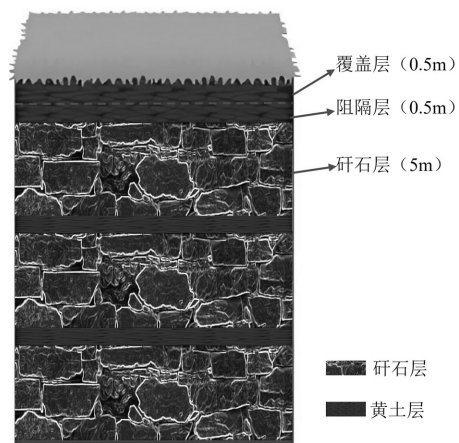


图2 土层数值模型

Fig.2 Numerical model of soil layers

1.3 煤矸石样品采集及土柱淋溶实验

按照《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T 20-1998)^[24]和《危险废物鉴别技术规范》(HJ298-

2019)^[25]标准,确定采样份样数.主要在矿区煤矸石胶带输送机上进行采样,连续 9 班次,每个班次采样份数为 10 份.对采集的煤矸石进行淋溶实验,得到样本 pH 值为 10.1,按照《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599-2020)^[26],本项目矸石为 I I 类一般工业固体废物.除 pH 值外,其他检测出的指标结果均满足《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准限值^[27],检出物与地表水质量对比由表 1 可知,与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)^[28]中 III 类水对标,Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)值略有超标,该标准值为集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值,煤矸石资源化利用及回填实施项目应远离集中式生活饮用水地表水源地.将重点关注 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)4 种重金属特征因子(表 1).

表 1 煤矸石浸出实验结果一览表(mg/L)

Table 1 Overview of leaching experiment results for coal gangue(mg/L)

| 检测指标 | 单位 | 煤矸石 | 标准限值 |
|--------|------|---------|--------|
| 砷 As | mg/L | 0.0111 | 0.05 |
| 汞 Hg | mg/L | 0.00022 | 0.0001 |
| 铜 Cu | mg/L | 0.04 | 1.0 |
| 铅 Pb | mg/L | 0.8 | 0.05 |
| 镍 Ni | mg/L | 0.06 | 0.02 |
| Cr(VI) | mg/L | 0.489 | 0.05 |
| 氟化物 | mg/L | 0.48 | 1.0 |

标准限值:《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)III类.

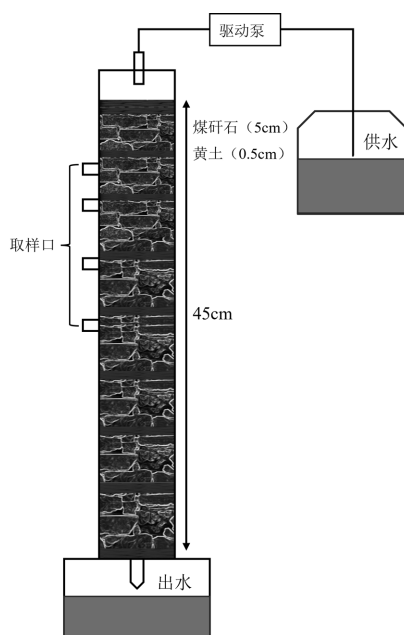


图 3 土柱实验装置实验示意

Fig.3 Schematic diagram of soil column experimental device

取研究区煤矸石样品和未污染的黄土,用分层装填法装填土柱(图 3),每次煤矸石层为 5cm,黄土层为 0.5cm,柱高 45cm,柱侧壁 6.5,10,16 和 22cm 处设置 4 个水样取样口,装置底部设置溢流口.选取其中一种污染物 Pb²⁺按照浸出浓度进行土柱淋溶实验.

2 数学模型的建立和参数的设置

Hydrus-1D 是一款溶质运移模拟软件,用于模拟一维饱和-非饱和和土壤水分,热量和溶质运移等^[29].运用 Hydrus-1D 建立土壤中的重金属溶质数值模拟模型,根据污染物在土壤中的迁移特征,选择水流入渗,溶质运移两个模块^[30].

2.1 水流入渗模型

水流入渗采用经典 Richards 方程,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^[31-32].Richards 方程为土壤水分特征曲线公式(1)和土壤导水率公式(2).

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

$$K(h,z) = K_s(z) K_r(h,z) \quad (2)$$

式中: θ 为土壤体积含水量, cm^3/cm^3 ; h 为压力水头, cm ,饱和带大于 0,非饱和带小于 0; z 为垂直方向坐标; t 为时间变量, d ; s ; k 为非饱和渗透系数函数, cm/d ; s 为作物根系吸水率, $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$,不考虑根系吸水时, $s=0$; α 为水流方向与垂直方向夹角($\alpha=0$ 为垂直流, $\alpha=90^\circ$ 表示水平流, $0<\alpha<90^\circ$ 表示倾斜流); K_r 为相对渗透系数,无量纲; K_s 为饱和渗透系数, cm/d .

土壤水分特征曲线和土壤导水率可以使用 Van Genuchten, Brooks-Corey 及 Kosugi 等模型在 Hydrus-1D 中拟合^[33].Van Genuchten 模型由于适用范围广,模拟精度高,已被广泛应用到不同土壤研究中^[34].忽略水流滞后现象,采用 van Genuchten 模型进行计算.Van Genuchten 模型见式(3).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h^n|]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_r 为残余含水量; θ_s 为饱和含水量; α 为进气吸力值的倒数; n 为孔径分布参数; $m=1-1/n$; h 为压力水头.

2.1.1 初始条件可用初始压力水头 h 和土壤含水

率 θ_0 表示,其控制方程式见公式(4)和公式(5).

$$h_m(z,0)=h_{m0}(z) \quad (4)$$

$$\theta(z,0)=\theta_0(z) \quad (5)$$

2.1.2 边界条件包括以下 3 种情况:第一类边界条件(Dirichlet),变量已知边界,主要适用于压力入渗地表存在薄层积水及强烈蒸发表土达到了风干含水率.第二类边界条件,水流通量已知边界,主要适用于降雨,蒸发强大已知的边界,灌水入渗,不透水边界及无蒸发入渗边界.第三类边界条件,水流通量随边界上的变量 θ 或 h_m 而变化的情况.

2.2 溶质运移模型

采用《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》(HJ964-2018)^[35]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: θ 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,m²/d; q 为渗流速率,m/d.

初始条件:

$$c(z,t)=0 \quad t=0, \quad L \leq z < 0 \quad (7)$$

边界条件:

第一类 Dirichlet 边界条件,如式(8)和式(9)所示:

$$c(z,t)=c_0(z,t) \quad t>0, \quad z=0 \quad (8)$$

该条件适用于连续点源.

$$C(z,t) = \begin{cases} C_0(z,t) & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (9)$$

该条件适用于非连续点源.

第二类 Neumann 零梯度边界,如公式(10)所示:

$$-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad t > 0, \quad z = L \quad (10)$$

2.3 模型参数的设置

2.3.1 土层厚度 按照上述模型进行建模,结合煤矸石回填特点,对包气带进行概化,模拟包气带中污染因子的运移情况.土壤质地为黄土与粘土型矸石两种,顶部为 1m 厚黄土层,下部为 5m 厚矸石层与 0.5m 黄土层交替,在 22m 处设防渗层,共 45m 深,并具有排水特点.模型如图 3 所示,由第一层矸石底部开始设立 4 个观测点,深度分别为 6.5、10、16 和 22m.

2.3.2 参数设定 基于 Hydrus-1D 对土壤中的

重金属污染物进行迁移研究须输入土壤特征参数和运移参数.土壤特征参数包括土壤的残余含水量,饱和含水量及土壤水力曲线参数等水分参数.运移参数包括渗透系数及弥散系数等.建立的模型忽略土壤对重金属的吸附及重金属在土壤中的物理,化学,生物反应,仅考虑对流及弥散作用.使用 Van Genuchten 方程进行溶质运移平衡计算.各参数采用软件中相应土壤的经验参数值,具体参数见表 2.

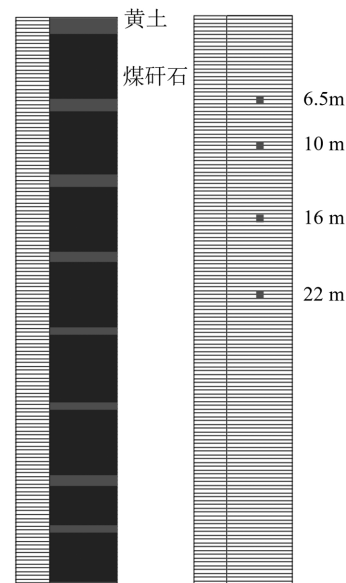


图 4 土层模型及观测点示意

Fig.4 Schematic diagram of the soil layer model and observation points

2.3.3 初始条件及边界条件 在初始阶段,不考虑土壤中污染物的背景值,即假定土壤中污染物的浓度为 0.水流入渗的上边界条件为大气自由降水边界,下边界条件为自由排水边界.溶质运移的上边界条件为浓度边界条件,下边界条件为零浓度梯度边界,污染物随降水入渗,设置浓度边界.污染物以连续点源形式垂直进入土壤环境,设定初始时间步长为 0.01d,最小步长和最大步长分别为 0.01 和 10d,输出时间点数量为 10 个.选出重金属预测因子 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI),由实验所得浓度分别为 0.00022,0.06 ,0.8 和 0.489mg/L.

2.3.4 模拟时间 模拟预测时间设定为煤矸石回填塌陷区,经降雨淋溶后,可溶性重金属随雨水迁移进入土壤和水体后 1~10a 的迁移情况变化.

表 2 模型主要参数

Table 2 Main parameters of the model

| 土壤类型 | 残余含水率 θ_r | 饱和含水率 θ_s | 土壤持水参数 $\alpha(1/cm)$ | 土壤持水指数 n | 土壤饱和水渗透系数 $Ks(cm-d)$ | 有效孔隙度 n | 土壤密度 $\rho(mg/cm^3)$ | 纵向弥散系数 $D_L(cm^2/d)$ |
|-------|------------------|------------------|-----------------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|----------------------|
| 黄土 | 0.034 | 0.46 | 0.016 | 1.37 | 6 | 0.5 | 1.5 | 10 |
| 粘土型矽石 | 0.068 | 0.38 | 0.008 | 1.09 | 4.8 | 0.5 | 1.2 | 8 |

2.4 模型验证

煤矽石样品经过浸出实验所得重金属 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)浓度分别为 0.00022,0.06,0.8 和 0.489mg/L, 通过 Hydrus-1D 模拟所得 4 种重金属浓度分别为 0.0003,0.0759,0.8378 和 0.5074mg/L.选取其中一种污染物 Pb²⁺浓度值的实测值与模型模拟值进行对比, 验证模型的可靠性.经过调参和验证,得到 Pb²⁺的实测值和模拟值(图 5).从图中可知,Pb²⁺实测值与模拟值较为一致,趋势线基本吻合,将两组数据进行拟合发现,实测值与模拟值差异性不显著,相关系数 R² 为 0.73,模拟相关度较高,说明,模拟结果可靠,设置参数比较准确,可用于预测重金属淋溶在土壤中的实际模拟应用.

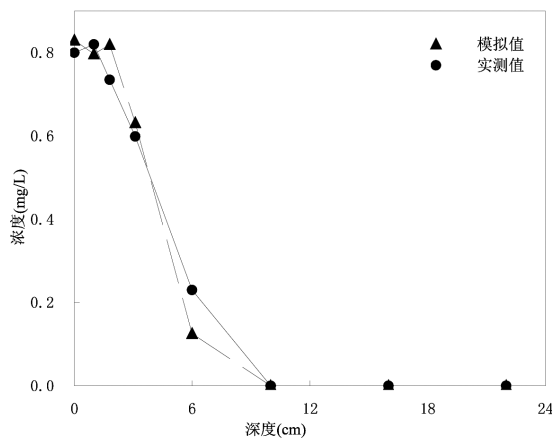


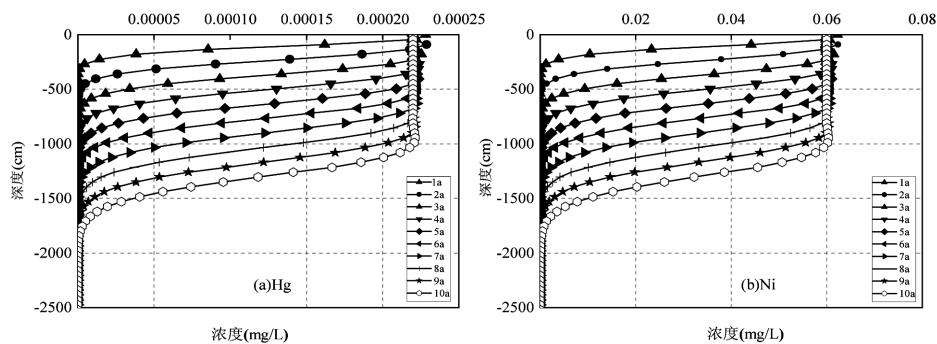
图 5 研究区土壤 Pb²⁺浓度模拟值与实测值对比
Fig.5 Comparison of simulated and measured soil Pb²⁺ concentrations in the study area

3 模拟结果与分析

本研究结果分为二个部分,一是为模拟煤矽石浸出液的重金属迁移浓度和深度变化,量化不同溶质的迁移距离和时间的关系;二是为模拟重金属溶质持续垂直入渗,在不同土层观测点上达到平衡稳定状态所需的时间.

3.1 不同时间各重金属溶质浓度随土壤深度变化规律

不同的污染物初始浓度以及土壤对各类重金属的独有吸附特性,导致土壤中重金属的积累和迁移范围各不相同^[36].煤矽石经淋溶后,重金属污染物持续渗入土壤并不断迁移,模拟在不同时段(1~10a)重金属沿土壤迁移结果(图 6),重金属持续以点源垂直入渗的形式进入土壤 1a 时,重金属 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)的最大迁移距离分别为 2.25,3.60,4.50 和 4.50m.此时重金属污染浓度出现最高值分别为 0.0003,0.0759,0.8378 和 0.5074mg/L.入渗 3a 时 Hg, Ni,Pb 和 Cr(VI)的最大迁移距离分别为 5.40,7.65, 8.55,9.00m.入渗 5a 时 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)的最大迁移距离分别为 8.55,12.15,12.60,13.05m.入渗 10a 时 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)的最大迁移距离分别为 16.20, 20.70,21.60 和 21.60m,以上浓度均未超过《土壤环境质量标准建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)^[37].至 25m 时,各重金属浓度值趋于 0.



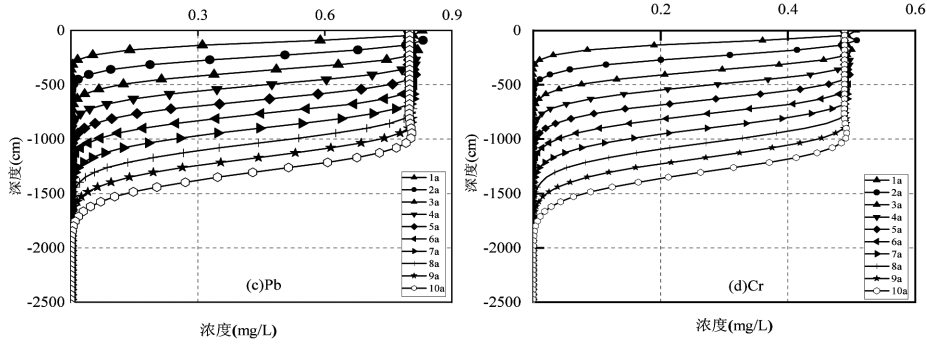


图 6 煤矸石淋溶后不同时间各重金属溶质浓度随深度变化曲线

Fig.6 Variation of solute concentrations of heavy metal with depth at different time intervals after leaching coal gangue

重金属 Hg 在土壤迁移较缓慢,说明表层土壤对重金属 Hg 的吸附系数较大,重金属在 0~15m 区域大量积累,重金属 Hg 和 Pb 积累量较小,重金属 Ni 和 Cr(VI)积累值较大,说明初始输入的淋溶浓度大小影响重金属在土壤中的积累量^[38].各污染物溶质浓度随深度变化趋势相似,是因回填区黄土层压实推平,土层渗透性降低,污染物整体运移情况较为缓慢导

致,埋深越大,污染物浓度变化越缓慢.在同一水平面深度,各污染物入渗时间越长,其浓度也就越高^[39].

3.2 不同土壤深度各重金属浓度随时间变化规律

随着重金属污染物在土壤中持续向下迁移,达到特定的深度时,污染物透过包气带到防渗膜,并在其上停留,这一过程使得土壤中的溶质流动和传输达到了稳定的状态(图 7).

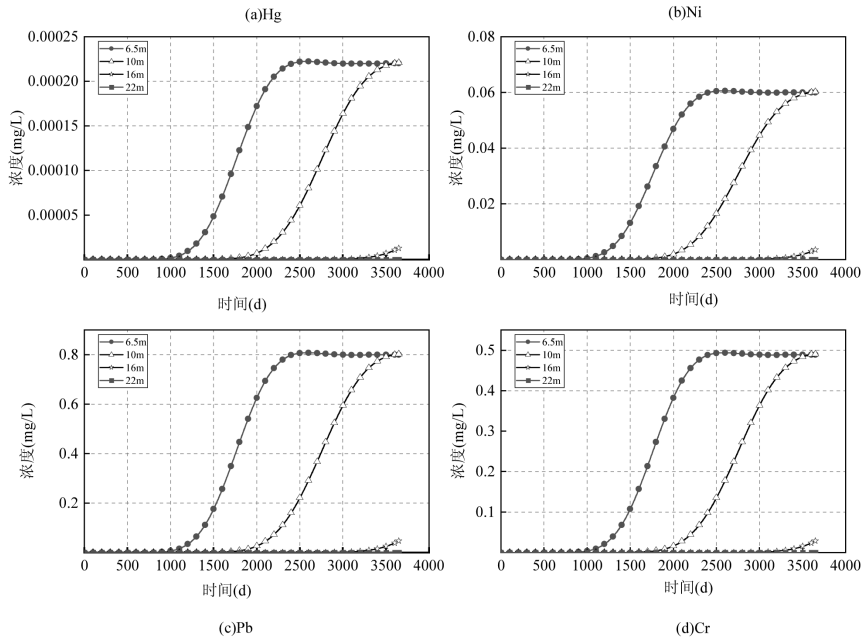


图 7 煤矸石淋溶后不同深度各重金属浓度随时间的变化曲线

Fig.7 Temporal variation of heavy metal concentrations at different depths after leaching of coal gangue

重金属 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)在不同土层时浓度随时间变化呈“S”型曲线,穿透时间较快,大约在 1500~2500d,曲线快速上升,超过一定距离和时间之后逐渐平缓,无拖尾现象.在 6.5m 深度时浓度最高,重金属 Hg,Ni,Pb 和 Cr(VI)达到最大浓度的时间分别是 2550,3190,2570 和 2560d,浓度分别为 0.0002222,0.06061,0.8081 和 0.4939mg/L,此深度的土壤对重金

属污染物的吸附达到饱和.当吸附系数增大时,迁移变得困难,而入渗的初始浓度也随之增大,这会导致土壤更易达到吸附饱和状态,进而促使重金属继续向下和向前迁移.随着时间迁移,当深度到 10m 时,重金属离子达到稳定的时间延长,根据曲线斜率趋势可以推测出 4 种重金属离子达到平衡时的时间分别大于 3640,3590,3650 和 3650d.在 16m 时,4 种重金属

溶质浓度较小,超出模型模拟预测的范围.污染物最深运移深度为 22m,此时污染浓度基本趋于 0 值.说明在 16m 左右煤矸石中的重金属淋溶迁移对回填区基本无环境影响.

4 讨论

4.1 煤矸石回填塌陷区重金属淋溶迁移模型适用性

利用 Hydrus-1D 软件,模拟降水情况下,煤矸石回填后重金属污染物在土壤中迁移过程,将 Hydrus-1D 模拟值与实测值对比分析,讨论 Hydrus-1D 软件在黄土高原丘陵沟壑区煤矸石填充荒沟后,淋溶导致的重金属迁移的有效性和适用性^[40].从拟合结果来看,Hydrus-1D 软件模拟所得重金属溶质模拟值与实测值的拟合系数 R^2 为 0.73,这与郭爱科^[41]冯树娜^[42]的研究结论一致,说明模型模拟重金属溶质动态变化特征具有较高的精度,模型适应性强,模拟值较为准确,可信度较高.

4.2 煤矸石淋溶后模拟不同时间各重金属浓度随空间变化规律

模拟煤矸石浸出液重金属迁移浓度和深度变化,量化不同溶质的迁移空间与时间的关系,煤矸石淋溶液中不同重金属浓度差异,重金属浓度最大迁移深度在 25m 之内,迁移距离分别为 $\text{Cr(VI)}=\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Hg}$,其中降水强度会直接影响可溶元素的迁移距离和浓度,迁移距离越大,浓度越低^[43-44].唐莹等^[45]在探究堆积煤矸石所产生的重金属的污染问题中 Hg 淋溶浓度超过了土壤背景值,而本研究中重金属淋溶均未超过.这与不同地区煤矸石中重金属溶质浓度大小和压实回填层的渗透系数有关^[46,21-22].埋深越大,离子含量变化越缓慢,土壤中各重金属离子浓度大幅度降低^[47].在同一水平面深度,各重金属入渗时间越久,其浓度也就越高.由于迁移的重金属浓度本身较低,基本对土壤无环境影响,满足《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[48]的风险筛选值要求.综上,从土壤角度考虑,煤矸石回填施工后对当地周围环境的影响较小.

4.3 煤矸石淋溶后模拟不同土壤深度各重金属浓度随时间变化规律

在迁移过程中,不同重金属溶质持续入渗到土壤包气带的稳定时间不同,重金属淋溶浓度大小分

别为 $\text{Pb}>\text{Cr(VI)}>\text{Ni}>\text{Hg}$,都符合浓度先增再降到稳定的基本规律^[49].Hg 浓度最小,达到稳定状态所需要的时间最短,随着土层加深,重金属溶质达到稳定浓度时间延长.Ni 溶质达到稳定浓度略快于其他三种溶质,这与实测当地地下水中 Ni 元素背景值偏高有关.Pb 和 Cr(VI)达到稳定浓度所需时间基本一致,Hg 达到稳定浓度时间最长.浓度值主要集中在 10m 以内,16m 之外重金属溶质浓度趋于 0.说明这几种重金属离子均在浅土层.土层的性质决定了其不同的密度,渗透系数等参数,从而影响重金属溶质在土层中入渗时间^[50].重金属溶质迁移同样也受水量大小的控制,雨水量越多,重金属浓度越低.说明煤矸石堆场重金属淋溶液中重金属浓度受降雨量的影响较大,降水量越大,重金属浓度越低^[51].随着时间的变化迁移到一定深度后,重金属溶质迁移穿过包气带土层到防渗层,将以稳定的浓度存留在防渗层,此时土壤中的溶质的流动态势以及迁移过程均趋于稳定平衡状态.

5 结论

5.1 Hydrus-1D 软件的模拟值与实测值相似度较高,模型模拟重金属溶质动态变化特征具有较高的精度,较好地预测了重金属在土壤中迁移的最大距离及达到平衡所需的时间.

5.2 随着时间迁移,重金属淋溶入渗深度分别为 $\text{Cr(VI)}=\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Hg}$,不同浓度重金属淋溶最大距离分别为 21.60,21.60,20.70 和 16.20m.在不同深度下的重金属淋溶浓度分别为 $\text{Pb}>\text{Cr(VI)}>\text{Ni}>\text{Hg}$,Hg 先达到稳定状态,均未超过限值,煤矸石重金属淋溶对周围环境基本无影响.土壤重金属淋溶迁移距离及达到平衡时间受土壤的吸附能力及重金属淋溶初始浓度的影响.

5.3 使用 Hydrus-1D 软件对煤矸石的重金属淋溶迁移规律进行研究,预测了污染物垂直迁移对周边环境造成的影响,得出重金属在不同土壤层和降水条件下迁移的最大距离和稳定时间,为应急处理类似环境事故提供参考.

参考文献:

- [1] Zou C N, Ma F, Pan S Q, et al. Global energy transition revolution and the connotation and pathway of the green and intelligent energy

- system [J]. *Petroleum Exploration and Development Online*, 2023, 50(3):722-740.
- [2] 李辉, 庞博, 朱法华, 等. 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 [J]. *环境科学*, 2022, 43(11):5294-5304.
- Li H, Pang B, Zhu F H, et al. Comparative energy consumption structure and mode between china and major energy-consuming countries under the background of carbon emission reduction [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11):5294-5304.
- [3] 葛建华, 丁雨薇, 李 佳, 等. 高潜水位采煤沉陷区微塑料赋存特征及风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(4):2327-2335.
- Ge J H, Ding Y W, Li J, et al. Characteristics and risk assessment of microplastics in coal mining subsidence area with high groundwater level [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(4):2327-2335.
- [4] 据成远, 浮耀坤, 陈 超, 等. 神南矿区采煤沉陷裂缝对土壤表层含水量的影响 [J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4):309-316.
- Ju C Y, Fu Y K, Chen C, et al. Influence of coal mining subsidence cracks on soil surface water content in Shennan Mining Area [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4):309-316.
- [5] 郭家新, 胡振琪, 袁冬竹, 等. 黄河流域下游煤矿采煤塌陷区耕地破碎化动态演变——以山东济宁市为例 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9):3039-3055.
- Guo J X, Hu Z Q, Yuan D Z, et al. Dynamic evolution of cultivated land fragmentation in coal mining subsidence area of the Lower Yellow River Basin: A case study of Jining city, Shandong Province [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9):3039-3055.
- [6] 吴喜军, 李怀恩, 董 颖, 等. 陕北地区煤炭开采等人类活动对河道径流影响的定量识别 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3):772-780.
- Wu X J, Li H E, Dong Y, et al. Quantitative identification of coal mining and other human activities on river runoff in northern Shaanxi region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 46(9):3039-3055.
- [7] 张 彪, 李岱青, 高吉喜, 等. 我国煤炭资源开采与转运的生态环境问题及对策 [J]. *环境科学研究*, 2004, (6):35-38.
- Zhang B, Li D Q, Gao X J, et al. The eco-environment problems and countermeasures to be taken for coal development and transfer in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, (6):35-38.
- [8] 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, et al. Study on heavy metals in soil contaminated by coal waste rock pile [J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, (6):808-812.
- [9] 赵昂然, 任强强, 佟会玲. 垃圾焚烧飞灰添加工业固废的玻璃化研究 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(2):686-693.
- Zhao A R, Ren Q Q, Dong H L. Study on vitrification of MSWI fly ash with industrial solid waste [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2):686-693.
- [10] 尚 誉, 桑 楠. 煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 [J]. *环境科学*, 2022, 43(7):3773-3780.
- Shang Y, Sang N. Pollution Characteristics and phytotoxicity of heavy metals in the soil around coal gangue accumulation area [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7):3773-3780.
- [11] 程 博, 何 环, 谭 添, 等. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌淋溶煤矸石过程中铁锰铬形态的释放特征 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(7):4404-4410.
- Cheng B, He H, Tian T, et al. Migration and enrichment of arsenic during coal washing Liberation characteristics of iron manganese and chromium fraction in coal gangue during *Acidithiobacillus ferrooxidans* bioleaching process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(7):4404-4410.
- [12] 马 超, 冯印成, 赵 康, 等. 我国矿产资源型城市“无废城市”建设路径探索 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(9):5077-5084.
- Ma C, Feng Y C, Zhao K, et al. Exploring the construction path of "Zero-waste City" in mineral resource-based cities in China [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(9):5077-5084.
- [13] 邵托妮, 郑跃军, 王金生. 应用 HYDRUS-1D 模型模拟分析 PFCs 在土壤中的迁移特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10):2175-2182.
- Tai T Y, Zheng Y J, Wang J S, et al. Simulation and analysis of PFCs migration in the soil column using the Hydrus-1D model [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10):2175-2182.
- [14] 杨 洋, 李 娟, 李鸣晓, 等. HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(12):5293-5298.
- Yang Y, Li J, Li M X, et al. Chinese journal of environmental engineering [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 37(10):2175-2182.
- [15] 张 帅, 李 冰, 王向华, 等. 基于 Hydrus-1D 预测模型的包气带溶质运移研究 [J]. *干旱环境监测*, 2021, 35(3):97-102.
- Zhang S, Li B, Wang X H, et al. Study on solute transport in vadose zone based on Hydrus-1D model [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2021, 35(3):97-102.
- [16] Aram A, John M B, A. J. Andrew B A, et al. Assessing the hydraulic reduction performance of HYDRUS-1D for application of alkaline irrigation in variably-saturated soils: Validation of pH driven hydraulic reduction scaling factors [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256.
- [17] Farhad M, Yasser A, Teymour S, et al. Investigation of heavy metalloid pollutants in the south of Tehran using kriging method and HYDRUS model [J]. *Geoscience Letters*, 2022, 9(1):57-68.
- [18] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的荒漠绿洲水盐运移模拟与评估 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8):87-98.
- Wang G S, Shi H B, Li X Y, et al. Simulation and assessment of water and salt transport in desert-oasis based on the HYDRUS-1D Model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(8):87-98.
- [19] Talat S, Reza M M, Majid A, et al. Modeling the effect of slope aspect on temporal variation of soil water content and matric potential using different approaches by HYDRUS-1D [J]. *Geoderma Regional*, 2023, 35:86-93.
- [20] Farshad K, Javad B, Vahid R, et al. Field evaluation and numerical simulation of water and nitrate transport in subsurface drip irrigation of corn using HYDRUS-2D [J]. *Irrigation Science*, 2023, 42(2):327-352.
- [21] 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 J, Liu B H, Xu J, 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.
- [22] 焦独醒, 李家斌, 李进花, 等. 应用 HYDRUS-1D 模型分析 Cr(VI) 在负载针铁矿的石英砂中的迁移特征 [J]. *环境工程*, 2023, 41(S2):1186-1189, 1195.
- Jiao D X, Li J B, Li J H, et al. Simulation of Cr(Vi) transport in goethite coated sand column by Hydrus-1d model [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S2):1186-1189, 1195.
- [23] 高震国, 钟瑞林, 杨 帅, 等. Hydrus 模型在中国的最新研究与应用进展 [J]. *土壤*, 2022, 54(2):219-231.
- Gao Z G, Zhong R L, Yang S, et al. Recent Progresses in Research and Applications of Hydrus Model in China [J]. *Soils*, 2022, 54(2):219-231.
- [24] HJ/T20-1998 工业固体废物采样制样技术规范 [S].
HJ/T20-1998 Technical specifications on sampling and sample preparation from industry solid waste [S].
- [25] HJ/T298-2007 危险废物鉴别技术规范 [S].
HJ/T298-2007 Technical specifications on identification for hazardous waste [S].
- [26] GB18599-2001 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准 [S].

- GB18599-2001 Standard for pollution control on the non-hazardous industrial solid waste storage and landfill [S].
- [27] GB8978-1996 污水综合排放标准 [S].
GB8978-1996 Integrated wastewater discharge Standard [S].
- [28] GB 3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [29] 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 T, Luo F, Zhu Y, 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.
- [30] 李玮, 何江涛, 刘丽雅, 等. Hydrus-1D 软件在地下水污染风险评价中的应用 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 639-647.
Li W, He J T, Liu L Y, et al. Application of Hydrus-1D software in groundwater contamination risk assessment [J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 639-647.
- [31] 曾季才, 查元源, 杨金忠. 基于 Richards 方程切换的土壤水流及溶质运移数值模拟 [J]. 水利学报, 2018, 49(7): 840-848.
Zeng J C, Zha Y Y, Yang J Z. Numerical modeling of soil water flow and solute transport based on Richards' Equation switching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7): 840-848.
- [32] 张炜, 王浩远, 赵玉华, 等. 基于 HYDRUS-1D 生物滞留设施雨水径流水文调控模拟 [J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 102-108.
Zhang W, Wang H Y, Zhang Y H, et al. Hydrological regulation simulation of rainwater runoff of bioretention based on HYDRUS-1D, 2022, 38(3): 102-108.
- [33] Babaeian E, Homaee M, Vereecken H, et al. A comparative Study of multiple approaches for predicting the soil-water retention curve: Hyperspectral information vs. basic soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4): 1043.
- [34] 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 B, Zhao X N, Gao X D, 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, 2022, 38(2): 76-86.
- [35] HJ964-2018 环境影响评价技术导则 土壤环境(试行) [S].
HJ964-2018 Technical guidelines for environmental impact assessment soil environment [S].
- [36] 康得军, 张芳, 吕苙苙, 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 D J, Zhang F, Lv J T, 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.
- [37] GB36600-2018 土壤环境质量标准建设用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
GB36600-2018 Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of development land [S].
- [38] 彭丽成, 黄占斌, 石宇, 等. 不同环境材料对 Pb, Cd 污染土壤的淋溶效应 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 1033-1038.
Peng L C, Huan Z B, Shi Y, et al. Leaching effects of different environmental materials on soils polluted by Pb and Cd [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(5): 1033-1038.
- [39] 周鹏飞, 张世文, 罗明, 等. 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 [J]. 环境科学, 2022, 43(2): 985-994.
Zhou P F, Zhang S W, Lu M, et al. Characteristics of plant diversity and heavy metal enrichment and migration under different ecological restoration modes in abandoned mining areas [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 985-994.
- [40] 王晓彤, 胡振琪, 梁宇生. 基于 Hydrus-1D 的黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构优化 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 76-86.
Wang X T, Hu Z Q, Liang Y S et al. Structural optimization of reclaimed subsidence land interlayers filling with the Yellow River sediments using a Hydrus-1D model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 76-86.
- [41] 郭爱科. 煤矸石混合土壤水分入渗与蒸发特性试验及模拟研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
Guo A K. Experimental and simulation study on water infiltration and evaporation characteristics of coal gangue mixed soil [D]. Handan: Hebei university of engineering, 2022.
- [42] 冯树娜. 冻融与淋洗协同驱动土壤中汞的迁移过程及 HYDRUS 数值模拟研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
Feng S N. Experimental and numerical simulation of transfer process of mercury in soil driven by freezing-thawing and soil leaching technology [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [43] 王念秦, 贺磊, 汤康超, 等. 陕北矿区煤矸石淋滤试验研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 110-113.
Wang N Q, He L, Tang L C, et al. Coal gangue leaching experiment of mining area in Northern Shaanxi [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 110-113.
- [44] 蔡云, 朱琦, 胡振琪. 某硫酸盐还原菌株的分离及其在煤矸石山酸化污染修复中的应用 [J]. 金属矿山, 2023, (7): 254-260.
Cai Y, Zhu Q, Hu Z Q, et al. Isolation of an SRB Strain and Its Application in Remediation of Coal Gangue Acidification Pollution [J]. Metal Mine, 2023, (7): 254-260.
- [45] 唐莹, 武相林, 孙敏, 等. 北京市门头沟风化煤矸石中汞的赋存形态与溶出特征分析 [J]. 环境化学, 2022, 41(3): 962-976.
Tang Y, Wu X L, Sun M, et al. Analysis on the occurrence and dissolution characteristics of mercury in weathered coal gangue in Mentougou, Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(3): 962-976.
- [46] 赵丽, 张攀群, 刘婷, 等. 煤矸石中无机和有机氮的溶出规律研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 130-135.
Zhao L, Zhang P Q, Liu T, et al. Study on the dissolution law of inorganic and organic nitrogen in coal gangue [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 130-135.
- [47] 方堃, 陈效民, 沃飞, 等. 典型水稻土中硝态氮垂直穿透状况及模拟 [J]. 安全与环境学报, 2007, (5): 16-20.
Fang K, Chen X M, Wo F, et al. Study on the situation of the nitrate-N's vertical breaking-through of the soil in the typical rice fields and simulation by Hydrus-1D model [J]. Journal of Safety and Environment, 2007, (5): 16-20.
- [48] GB15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
GB15618-2018 Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].
- [49] Le C S, Moura P, Barraud S, et al. Temporal evolution and spatial distribution of heavy metals in a stormwater infiltration basin-estimation of the mass of trapped pollutants [J]. Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research, 2007, 56(12): 93-100.
- [50] Honar M R, Shamsnia S A, Gholami A. Evaluation of water flow and infiltration using HYDRUS model in sprinkler irrigation system [C]. Proceedings of International Conference on Environmental Engineering and Applications (ICEEA 2011). 2011.
- [51] Liu K, Li C, Tang S, et al. Heavy metal concentration, potential ecological risk assessment and enzyme activity in soils affected by a lead-zinc tailing spill in Guangxi, China [J]. Chemosphere, 2020, 251(C): 12641.

作者简介: 冯印成(1996-), 男, 河北人, 助理工程师, 硕士, 主要从事矿山固废资源化利用研究及生态修复. 发表论文 6 篇. fengyincheng@qq.com.