

Brief Discussion on Rural Domestic Waste Treatment Technologies in Hunan Province

Chunhua Ma

Chinalco Environmental Protection and Energy Conservation Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410011, China

Abstract

The ecological environment of the Xizang Plateau region is fragile, and copper mining and beneficiation activities pose a potential threat to the soil environment. Taking a typical copper mining and beneficiation project in Xizang as an example, this study constructs a one-dimensional unsaturated solute transport model using the HYDRUS-1D software in accordance with the Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment - Soil Environment (for Trial Implementation) (HJ964-2018). It simulates and predicts the vertical infiltration and migration process of heavy metals in the vadose zone triggered by the rupture of the wastewater collection tank under abnormal conditions. The prediction results indicate that under the conservative scenario without considering natural attenuation effects such as adsorption and degradation, the concentrations of copper and lead in the soil profile accumulate continuously over time. By the 40th year, the soil concentration between the leakage point and the groundwater level approximates that of the leakage source. This study verifies that the HYDRUS model can effectively simulate the migration pattern of pollutants in the vadose zone of plateau mining areas. The prediction results provide a critical scientific basis for the formulation of the project's zoned anti-seepage design, environmental risk control and management, as well as soil and groundwater tracking monitoring schemes.

Keywords

Xizang Plateau; copper mining and beneficiation; soil pollution prediction; HYDRUS-1D; vertical infiltration; heavy metal migration

HYDRUS 预测在采选项目土壤环境影响评价中的应用——以西藏高原地区铜矿采选项目为例

马春花

中铝环保节能科技(湖南)有限公司, 中国·湖南长沙 410011

摘要

西藏高原地区生态环境脆弱,铜矿采选活动对土壤环境构成潜在威胁。本文以西藏某典型铜矿采选项目为例,依据《环境影响评价技术导则-土壤环境(试行)》(HJ964-2018),采用HYDRUS-1D软件构建一维非饱和溶质运移模型,对非正常状况下废水收集池破裂导致重金属在包气带中的垂直入渗迁移过程进行模拟预测。预测结果表明:在未考虑吸附、降解等自然衰减作用的保守情景下,随着时间推移,土壤剖面中铜/铅的浓度不断累积,至第40年,从泄漏点到地下水位之间的土壤浓度接近泄漏源浓度。本研究证实,HYDRUS模型能够有效模拟高原矿区污染物在包气带中的迁移规律,预测结果为项目分区防渗设计、环境风险管控及土壤-地下水跟踪监测方案的制定提供了关键的科学依据。

关键词

西藏高原;铜矿采选;土壤污染预测;HYDRUS-1D;垂直入渗;重金属迁移

1 引言

西藏高原其独特的寒旱化气候、浅薄的土壤层以及活跃的水冻-融冻过程,使得区域生态系统极其敏感且恢复力弱。近年来,随着矿产资源勘查与开发力度加大,高原地区的铜矿采选项目日益增多。此类项目在建设及运行过程中,产生的尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液等均含有高浓度的重

金属(如Cu、Pb等),若因防渗系统失效发生“跑冒滴漏”,污染物将通过垂直入渗途径严重污染土壤及地下水。

传统的土壤环境影响评价多采用定性描述或简单指数法,难以定量刻画污染物在时空维度上的迁移转化过程。因此,引入数值模拟技术进行精准预测至关重要。美国盐土实验室开发的HYDRUS软件,基于Richards方程和对流-弥散方程,是国际上模拟包气带中水分、溶质运移的权威工具。本研究旨在探讨如何应用HYDRUS模型,对西藏高原典型铜矿采选项目可能引发的土壤重金属污染进行定量化、动态

【作者简介】马春花(1987-),女,中国河南信阳人,硕士,工程师,从事环境保护研究。

化预测与评估。

2 土壤污染途径

高原地区露天铜矿采选项目对土壤的污染途径主要包括粉尘大气沉降、地表径流、垂直入渗以及冻融驱动的二次迁移途径。

大气沉降来源于露天采场爆破/挖掘、排土场、尾矿库干滩、矿石破碎筛分、运输道路产生的含重金属粉尘，高原干旱、多大风，粉尘在风力作用下远距离扩散，通过干沉降、湿沉落到周边土壤。下雨时，沿地表径流漫流、扩散，进入周边草地、河滩、沟谷土壤。

垂直入渗主要来源于尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液在防渗层破损/老化情况下，高浓度重金属废水向下入渗进而污染包气带土壤。高原地区冻融循环反复胀缩，易造成防渗膜开裂、地基变形，形成渗漏通道，冻土融化层成为优先入渗路径。

本次主要分析尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液在渗漏时对土壤的垂直入渗影响。

3 预测模型与方法

3.1 模型概化

西藏高原矿区包气带地层岩性相对单一，以砂壤土、砾石为主，污染物在侧向上的弥散作用远小于垂向迁移。因此，根据 HJ964-2018 导则附录 E 的建议，将污染物在包气带中的迁移过程概化为一维垂向运移问题，符合活塞流模式。

3.2 控制方程

采用一维非饱和溶质运移模型，其控制方程可表达为：

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

式中：

c: 污染物介质中的浓度，mg/L;

D: 弥散系数，m²/d;

q: 渗流速率，m/d;

z: 沿 z 轴的距离，m;

t: 时间变量，d;

θ: 土壤含水率，%。

初始条件：

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

第一类 Dirichlet 边界条件：

连续点源：

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

非连续点源：

$$c(z,t) = \begin{cases} c_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases}$$

第二类 Neumann 零梯度边界：

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

3.3 软件与情景设定

模拟软件：采用 HYDRUS-1D。该软件专门用于求解一维变饱和和多孔介质中的水流、溶质和热运移，其算法成熟，在国内水土污染模拟研究中应用广泛。

污染源：选取对土壤环境影响最显著且隐蔽性强的尾矿库渗滤液、废石堆场淋滤液收集池作为预测对象。

特征污染物：废石堆场淋滤液泄漏源强铜 (Cu) 浓度为 84.2 mg/L，尾矿库渗滤液泄漏源强铅 (Pb) 浓度为 0.1 mg/L。

泄漏情景：非正常状况，防渗结构破裂，从风险最大化角度考虑，假设在矿山服务年限内持续泄漏，概化为连续点源。

模拟参数：

模拟深度：根据项目区水文地质勘察，地下水位埋深约 5.2m，设定模型深度为 5m。

土壤质地：参考高原地区土壤调查数据，概化为砂壤土。

边界条件：上边界为定水头污染物补给边界（收集池底部）；下边界为自由排泄边界（潜水面）。

模拟时间：36500 天（100 年）。输出时间点包括 1 年、5 年、10 年、20 年、40 年。

关键假设：为获得保守（最不利）预测结果，未考虑土壤对重金属的吸附、化学沉淀、生物降解等自然衰减作用。

4 预测结果与分析

通过 HYDRUS-1D 运行模拟，得到不同时间点（1a, 5a, 10a, 20a, 40a）铜 / 铅浓度随土壤剖面深度的变化曲线。

4.1 污染物迁移时空特征

根据预测结果图 1- 图 2，非正常状况下，收集池防渗结构破裂后，污染物锋面运移迅速。在连续泄漏条件下，第 1 年，高浓度铜 / 铅的运移深度已达约 4m；第 2 年，污染物锋面抵达地下水位。

随着泄漏持续，污染物在土壤中不断累积运移路径上的土壤铜 / 铅浓度随时间逐年升高。模拟至第 40 年时，从泄漏源（地表）至地下水位之间的整个包气带土壤剖面中的铜 / 铅浓度均接近泄漏源浓度，表明土壤已遭受全面、严重的污染。

4.2 对土壤及地下水的潜在影响

土壤环境：高浓度铜 / 铅在包气带中累积，将直接破坏土壤微生物群落结构，抑制植物根系生长，导致土壤生态功能丧失，且难以自然恢复。

地下水环境：污染物在较短时间内（2 年）进入地下水，将导致地下水水质超标，污染范围随地下水扩散，其治理修复成本极高，在高原地区几乎不可行。

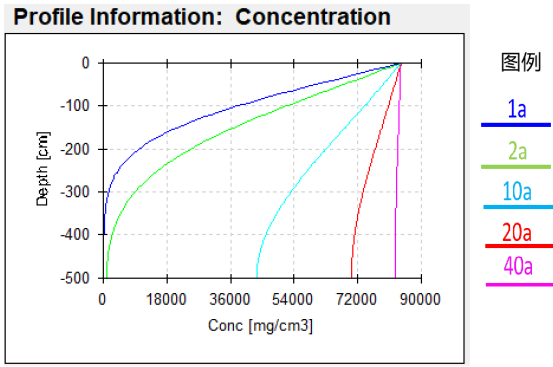


图 1 废石堆场淋滤液收集池泄漏不同时刻铜浓度 - 剖面深度变化曲线图

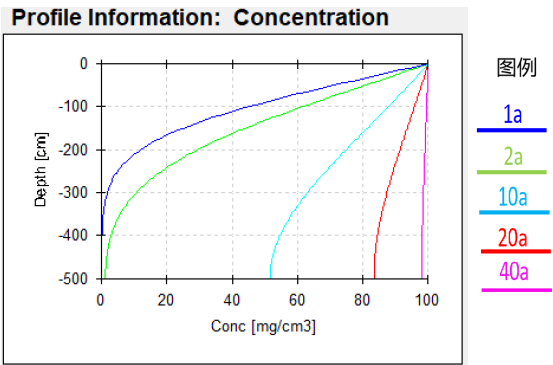


图 2 尾矿库渗滤液收集池泄漏不同时刻铅浓度 - 剖面深度变化曲线图

5 基于模拟结果的防控措施建议

预测结果凸显了非正常泄漏的极端环境风险，必须采取最严格的预防和应急措施。

5.1 源头控制与分区防渗

垂直入渗预防措施主要为分区防渗，根据《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610-2016)的要求对采场、选矿工业场地按点防渗区、一般防渗区和简单防渗区分别采取不同等级的防渗措施，有效防止地下水及土壤环境污染。

重点防渗区为防渗性能应不低于等效 6m 厚、防渗系数为 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 的粘土层。

一般防渗区需要进行地面的硬化、防渗处理，防渗性能应不低于等效 1.5m 厚、防渗系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 的粘土层，对于长期运行后可能产生的地面破裂、局部渗漏情况要及时检查并处理。简单防渗区需要进行地面硬化。

5.2 过程监控与跟踪监测

过程控制措施应根据建设项目所在地的地形特点优化地面布局，必要时设置地面硬化、围堰或围墙，以防止土壤环境污染。

选矿废水含有重金属、悬浮物、各种选矿药剂等污染物，直接外排将对矿区土壤环境造成严重污染。充分利用尾矿浓缩池、回水池、事故应急池，对其进行合理处置。切断污染途径，建设雨污分流工程，在原矿堆场及厂区外围修建截、

排水沟，减少上游汇水、地面径流进入厂区，同时保持厂区内进行硬化、防渗和绿化措施，减少污水漫流，不污染附近的土壤，控制影响范围。

5.3 跟踪监测

项目运行过程应加强对防渗结构防渗性能的检查，定期对排土场淋溶水收集池、选厂回水池、尾矿库下游收集池附近的地下水跟踪监测点和土壤跟踪监测点进行例行监测，发现污染时及时找到泄漏点并进行处理，保证防渗措施持续有效，不对底部土壤造成垂直入渗影响。

5.4 其他管理控制措施

委托专业的机构完成建立有关规章制度和岗位责任制。制定风险预警方案，设立应急设施减少环境污染影响。建立土壤和地下水污染隐患排查治理制度，定期对重点区域、重点设施开展隐患排查。发现污染隐患的，应当制定整改方案，及时采取技术、管理措施消除隐患。隐患排查、治理情况应当如实记录并建立档案。

6 模型应用的深化

本次预测只考虑了一维垂向运移问题。未来可考虑从 HYDRUS-1D 一维到 2D/3D 立体模拟，模拟废水池、尾矿库、渗滤液沟侧向扩散 + 垂向入渗，还原真实污染羽形态，而非只算垂向剖面。针对矿区土壤分层、碎石土、裂隙发育等特点，实现分层参数、优先流、大孔隙流模拟，大幅提升预测精度。也可尝试将 HYDRUS 与地下水模型进行耦合，模拟污染物进入地下水后的三维迁移，实现从“土壤”到“地下水”的全过程风险评价。

7 结语

本研究利用 HYDRUS-1D 模型对西藏高原铜矿采选项目非正常状况下的土壤铜 / 铅污染进行了数值模拟。结果表明，在持续泄漏的极端情景下，污染物铜 / 铅迁移迅速，可在短期内污染整个包气带并进入地下水，造成持久性的生态损害。

数值模拟定量化地揭示了土壤污染的过程与后果，有力地证明了在西藏高原此类生态敏感区实施极端严格环保措施的必要性和紧迫性。HYDRUS 模型的应用，为高原矿产资源开发项目的土壤环境影响评价、风险管控和精准治污提供了强有力的技术工具和决策支持。项目建设和运营中，必须坚持“预防为主、防控结合”的原则，确保防渗措施可行、可靠，从源头控制垂直入渗对土壤的污染影响。

参考文献

- [1] 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.土壤, 2022,54(2): 219-231.
- [2] 梅雪,刘鸿雁,吴龙华,等.基于HDXRF和ICP-MS的黔西北土壤重金属空间分布及影响因素研究.土壤, 2023, 55(2): 399-408.
- [3] 范严伟,黄宁,马孝义,等.应用HYDRUS-1D模拟砂质夹层土壤入渗特性.土壤.(Soils), 2016,48(1).