DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509240080

边坡整形-植物联合作用对硫铁矿渣堆典型重金属迁移规律影响

王 杰[1]，陈 娜[1]，郝 喆[1,*]，钟 文[2]，张 颖[2]

（1. 辽宁大学环境学院，辽宁 沈阳 110036；2. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司，辽宁 沈阳 110013）

摘要：硫铁矿渣堆存在重金属污染及边坡失稳双重隐患。本文基于“边坡整形先行、植物修复并进”思路，开展硫铁矿渣堆治理研究，探究其对重金属迁移扩散的影响。研究首先运用极限平衡理论，借助GeoStudio的SLOPE/W模块分析原始渣堆边坡稳定性，优化整形方案以保障几何稳定；随后利用SEEP/W、VADOSE/W及CTRAN/W模块，模拟评估植物修复中蒸发蒸腾作用对稳定边坡平台上重金属迁移规律的影响。模拟结果表明通过边坡整形使渣堆安全系数提升至1. 292，为后续植物修复奠定安全基础。整形形成的缓坡促进植被覆盖，增强植物富集污染物与蒸腾作用，在渣体内形成水力控制效应，显著改变以Cu^{2+}为代表的重金属迁移规律。对比表明，整形与植被的协同效果优于单一措施，且二者结合能最大程度降低Cu^{2+}浓度与迁移距离。最终，联合治理显著减缓了污染物扩散速率与重金属环境风险。研究表明，工程稳定与生态水文稳定相结合可形成联合增效机制，为硫铁矿渣堆治理与风险管控提供了创新理论与方法。

关键词：硫铁矿渣堆；边坡整形；植物修复；重金属迁移；GeoStudio；数值模拟；蒸发蒸腾

中图分类号：P66；X523 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)04-1257-12

Influence of Slope Reshaping and Vegetation on Heavy Metal Migration in Pyrite Slag Heaps

WANG Jie[1], CHEN Na[1], HAO Zhe[1,*], ZHONG Wen[2], ZHANG Ying[2]

(1. *College of Environment Sciences, Liaoning University, Shenyang, Liaoning* 110036, *China*; 2. *Nonferrous Geological Exploration and Research Institute Co., LTD., Shenyang, Liaoning* 110013, *China*)

Abstract: Sulfur-iron mine waste dumps are subject to dual hazards of heavy metal contamination and slope instability. Based on the approach of “slope reshaping first, phytoremediation follow-up” this study investigates the remediation of such dumps and explores its impact on the migration and diffusion of heavy metals. Initially, the stability of the original dump slope was analyzed using the limit equilibrium theory with the SLOPE/W module of GeoStudio, and the reshaping scheme was optimized to ensure geometric stability. Subsequently, the SEEP/W, VADOSE/W, and CTRAN/W modules were employed to simulate and evaluate the influence of evapotranspiration during phytoremediation on the migration patterns of heavy metals in the stabilized slope platform. The simulation results indicate that slope shaping improves the safety factor of the waste dump to 1. 292. laying a safe foundation for subsequent phytoremediation. The gentle slopes formed by reshaping promoted vegetation

收稿日期：2025-09-24；**修回日期：**2026-02-03；**编辑：**李龚健。

基金项目：辽宁省科技计划项目（2020JH2/10300100）；辽宁省中央引导地方科技发展项目（2021JH6/10500015）；辽宁省揭榜挂帅（科技攻关专项）项目（2023JH110400012）。

作者简介：王杰，女，硕士研究生，2000年出生，主要从事场地污染防治领域的研究工作。Email：13591947561@163. com。

＊通信作者：郝喆，男，教授，1972年出生，主要从事场地污染防治领域研究工作。Email：626447443@qq. com。

引用格式：王杰，陈娜，郝喆，等. 边坡整形-植物联合作用对硫铁矿渣堆典型重金属迁移规律影响［J］. 现代地质，2026，40（4）：1257-1268. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509240080.

WANG Jie，CHEN Na，HAO Zhe，et al. Influence of Slope Reshaping and Vegetation on Heavy Metal Migration in Pyrite Slag Heaps［J］. GEOSCIENCE，2026，40（4）：1257-1268. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509240080.

coverage, enhanced pollutant enrichment and transpiration by plants, and created a hydraulic control effect within the dump, significantly altering the migration pattern of heavy metals represented by Cu^{2+}. Comparative analysis indicates that the synergistic effect of reshaping and vegetation outperforms either measure applied alone, with their combination most effectively reducing Cu^{2+} concentration and migration distance. Ultimately, the integrated treatment significantly slowed the diffusion rate of contaminants and reduced the environmental risk of heavy metals. This study reveals that combining engineering stability with ecohydrological stability can form a joint enhancement mechanism, providing innovative theoretical and methodological insights for the remediation and risk control of sulfur-iron mine waste dumps.

Key words: pyrite slag heap; slope shaping; phytoremediation; heavy metal migration; GeoStudio; numerical simulation; evapotranspiration

0 引 言

硫铁矿渣堆作为典型的矿业固体废弃物[1]，其环境问题具有双重性：一是边坡结构松散，存在滑坡、崩塌等地质灾害风险[2]；二是酸性强且富含多种重金属[3-6]，在降雨淋溶下持续污染周边环境[7-9]。传统的治理模式常将边坡工程稳定化与污染生态修复分离进行，忽视了二者之间的联合作用。边坡整形是提高堆体稳定性的核心工程措施，通过降低坡角、设置台阶平台等方式，大幅提升安全系数。植物修复则通过其富集和蒸腾作用，能从水文路径上改变重金属污染物的迁移规律[10-11]。

在边坡稳定性与整形设计方面，张涛等[12]采用FLAC^{3D}数值模拟软件，并基于摩尔-库伦强度准则、强度折减理论等多种分析方法，分别从位移、最大主应力、最小主应力、塑性区分布和剪切应变增量几个方面去探究某金属矿区境界范围内的边坡稳定性；何振华等[13]为了研究地下水与强降雨耦合作用下的边坡稳定性，利用专业瞬态渗流场分析软件GeoStudio中的Seep/W和Slope/W模块开展了边坡坡体内的总水头与孔隙水压力变化规律研究，并计算了瞬态渗流场下的边坡安全系数。Bala等[14]研究路基情况应用拟静力地震对边坡进行上下游稳定性分析和稳态、瞬态渗流条件下的渗流分析，采用GeoStudio中的SLOPE/W、SEEP/W、QUAKE/W工具分析边坡、渗流、地震等稳定性参数。Lin等[15]研究揭示了坡度是影响重金属迁移的关键因素之一，陡峭的坡度往往会导致更严重的重金属流失。这直接证实了边坡形态（如坡度）对重金属迁移的重要影响，为边坡整形的设计提供了数据支持。Wang等[16]采用有限元强度折减法探索边坡的危险滑动面，得到相应的稳定安全系数。李金辉等[17]深入剖析了构造蚀变带内金元素的富集机制及其与微量元素协同迁移的内在联系，并试图建立元素迁移与宏观过程。孙德亮等[18]基于随机森林与特征递归消除模型开展了滑坡易发性评价，为渣堆边坡稳定性预测引入了机器学习的新视角。朱鸿鹄[19]提出的耦合确定性与随机结构面的岩质边坡概率稳定性分析方法，从概率分析角度拓展了边坡稳定性评价的维度，为本研究中采用极限平衡理论与GeoStudio模块开展确定性边坡稳定性分析提供了有益的补充视角。常志璐等[20]在此基础上进一步系统开展了不同节理组合下的边坡稳定性模拟分析，该研究建立的临界失稳位移识别方法为边坡工程的安全预警提供了定量参考。陈永吉等[21]针对露天矿边坡稳定性评价，提出了一种基于无人机测绘、三维地质建模与离散元数值模拟的综合方法。侯圣山等[22]利用岩石CT扫描技术揭示了冻融作用对岩石细观结构及力学强度的影响，为深入研究渣堆介质的微观结构演化与宏观力学响应提供了可行方法。邱振华等[23]采用强度折减有限元法建立三维数值模型，对比分析了设计边坡与现状边坡的应力、位移及塑性区分布特征，为论文中边坡整形方案的设计提供参考。

在植物修复与重金属迁移方面，陈红丹等[24]应用Geostudio软件，选择SEEP/W、VADOSE/W和CTRAN/W模块，模拟降雨和蒸发作用下的尾矿库地下水的渗流特性及重金属污染物的迁移规律，结果表明，降雨-蒸发作用对尾矿库表层土壤的孔隙水压力有影响，深层土壤基本无影响；孙召东等[25]通过建立降雨入渗及重金属污染物迁移数学模型进行污染物迁移的模拟分析；钱信禹等[26]揭

示了地质建造（岩性、地层等）作为基础控制因素，如何深刻影响土壤的物理化学属性及植被的生态空间分布，强调了地质体–土壤–植被之间的内在关联性。侯婷婷等[27]通过分析成矿过程中元素的活动规律与迁移机制，揭示了特定地质作用下元素的富集与贫化特征，为理解元素迁移的地球化学行为提供了重要参考。Lan等[28]研究系统采集了恢复矿区的农田土壤和草原土壤，以揭示作物栽培对土壤微生物群落组成的影响及其在重金属迁移中的潜在作用。Bai等[29]通过土柱实验对模型进行了验证，表征了从非饱和状态到饱和状态的演变过程，并进行了数值计算，模拟了恒浓度/变浓度条件下不同深度的水分、水蒸气的迁移过程。钟林健等[30]通过模拟不同地下水位条件，研究地下水位对尾矿中重金属释放及其在土壤中吸附行为的影响，结果表明，地下水位显著变化明显促使尾矿中Cd、Pb和Zn等重金属释放。Xian等[31]通过室内模拟降雨实验，评估了植物毯对尾矿中As、Pb、Cd淋滤行为的影响，结果显示植物毯能有效减少重金属淋滤，并改善尾矿的土壤理化性质。Szwalec等[32]通过种植植物将重金属固定在土壤中，减少其生物有效性和迁移性。Feng等[33]在西北干旱半干旱地区的固体废弃物堆场，通过覆土结合本地植物的生态修复，可以有效控制重金属的迁移。吴松等[34]揭示了地质背景如何从根源上影响重金属的含量和空间分布，是分析其迁移的基础。李楠等[35]系统对比了不同土地利用方式下土壤重金属的污染特征与生态风险，揭示了人类活动干扰对重金属空间分布与积累的关键控制作用，并为生态修复工程提供了科学依据。何宏平等[36]系统研究了风化壳型矿床中元素的活化与迁移机制，为理解硫铁矿渣堆中重金属的释放与扩散过程提供了重要的理论借鉴；杨志爽等[37]总结了中国铁矿床伴生关键金属的基本特征与分布规律，为本文分析渣堆中重金属的来源背景提供了区域地质依据。

本研究通过边坡稳定性分析确定最优整形方案，保障物理稳定；进而在此基础上，模拟植物修复的蒸发蒸腾作用对重金属迁移的抑制效果。研究基于现场检测基础数据，综合运用GeoStudio的SLOPE/W、SEEP/W、VADOSE/W和CTRAN/W模块，从工程稳定性到生态功能性进行模拟，揭示“工程–生态”对控制硫铁矿渣堆环境风险的联合作用效果。

1　材料和方法

1.1　区域地质和地理背景

某废弃硫化铁矿区位于辽宁省抚顺市新宾满族自治县新宾镇西40 km，库区占地面积为23209 m^2。所研究的硫铁矿渣堆是通过在原山体坡脚处进行分层堆积而形成，山体坡顶高程380 m，坡脚高程320 m。渣堆结构包括两个坡面和两个平台，其中第一坡面高度40 m，坡度40°～45°，第二坡面高度10 m，坡度28°～32°。据气象部门统计：年平均气温4.6 ℃，最高气温36 ℃，最低气温–40.5 ℃，年平均降水量780 mm。项目区域位于大伙房水库上游区，附近包括居民用地、耕地、农田，以及苏子河支流，最终注入浑河（图1和2）。

1.2　研究方法

综合运用Geostudio模拟软件的SEEP/W、SLOPE/W、VADOSE/W和CTRAN/W模块，进行稳态渗流、边坡稳定性分析、循环瞬态耦合、对流—弥散模拟。首先，基于GeoStudio软件的SEEP/W模块开展稳态渗流分析，并通过SLOPE/W模块计算边坡在整形前后的安全系数，进行对比。通过系统的边坡稳定性分析，确定既能保证工程安全又经济可行的最优整形方案，为后续生态修复提供物理稳定的基础。在此基础上，利用VADOSE/W模块耦合模拟植物修复过程中的蒸发蒸腾作用、水分运移及根系吸收等过程，进而采用CTRAN/W模块评价植物修复措施对重金属污染物迁移规律的抑制效果，从而全面揭示从工程稳定到生态功能恢复的联合作用机制。本研究设置三种模拟情形：情形1仅考虑硫铁矿渣堆原始状态，不涉及整形处理及植被覆盖；情形2在模拟中引入渣堆整形条件；情形3则同时考虑渣堆整形及植被覆盖因素。通过对上述三种情形下硫铁矿渣堆中Cu^{2+}迁移过程进行数值模拟，获取对应的重金属污染物Cu^{2+}扩散浓度分布图，进而探讨整形处理及植被覆盖对硫铁矿渣堆中重金属污染物浓度迁移扩散特征的影响。

1.3　计算模型

硫铁矿渣堆整形前概化计算模型及网格剖分见图3，模型参数基于现场采样数据校准，剖面底部高程和顶部高程分别为305 m和380 m，计算区域的水平距离为170 m，硫铁矿渣堆模型以三角形或四边形网格剖分。

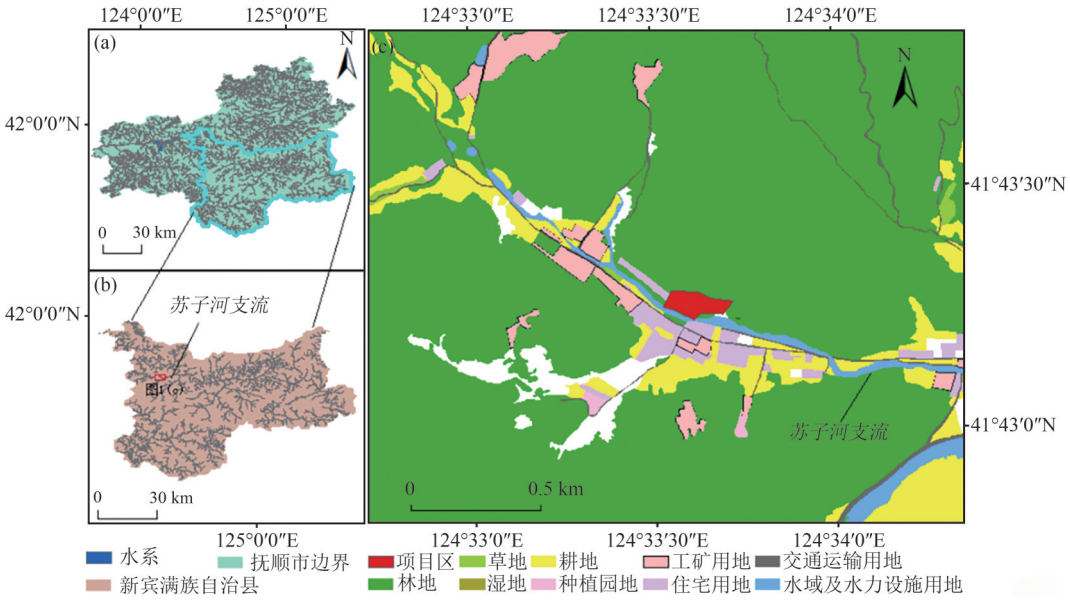

图1 抚顺市边界图（a）、新宾满族自治县（b）和附近土地利用图（c）

Fig. 1 Fushun City boundary map （a）, Xinbin Manchu Autonomous County （b） and land use map of the surrounding area （c）

图2 项目区现场情况图

Fig. 2 Site condition map of the project area

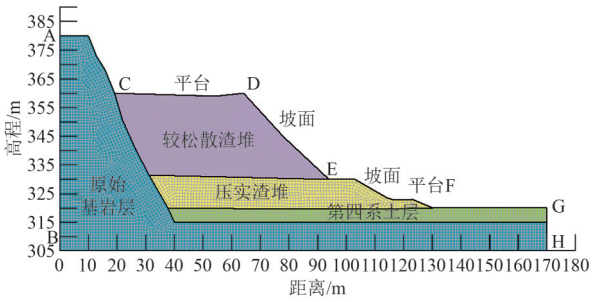

图3 硫铁矿渣堆概化模型及网格划分（整形前）

Fig. 3 Generalized model and mesh generation of the pyrite cinder dump （pre-conditioning）

硫铁矿渣堆整形后概化计算模型及网格剖分图见图4，对原坡面进行整形处理，形成5级台阶，各坡面坡度均为35 °。整形后的硫铁矿渣堆模型的网格以三角形或四边形进行剖分，取全局单元尺寸为1 m，共剖分6270个单元，6450个节点。

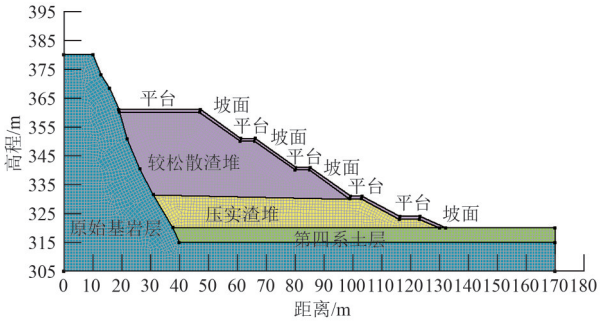

图4 硫铁矿渣堆概化模型及网格划分（整形后）

Fig. 4 Generalized model and mesh generation of the pyrite cinder dump （post-conditioning）

1.4 材料参数及边界条件

1.4.1 材料参数

硫铁矿渣堆模型由原始基岩层、第四系土层、较松散渣堆层、压实渣堆层这四种地层构成。研究采用Geostudio模拟软件中Van Genuchten拟合方程，对各土层的土水特征曲线与渗透系数函数进行估算。土水特征曲线以及渗透系数随基质吸力变化的曲线详见图5。各地层的岩土物理力学参数见表1所示。

1.4.2 边界条件

研究区域模型的边界条件设置情况详见表2。模型共设置4类边界条件，包括降雨边界、零流量边界、气候边界和污染物边界，其中A至H均为模型节点。在瞬态耦合计算过程中，气候边界条件依据辽宁省全年气候数据确定，温度、相对湿度、风速及降雨等气候参数随时间的变化规律，可参考课题组已发表的前期研究成果[38]。

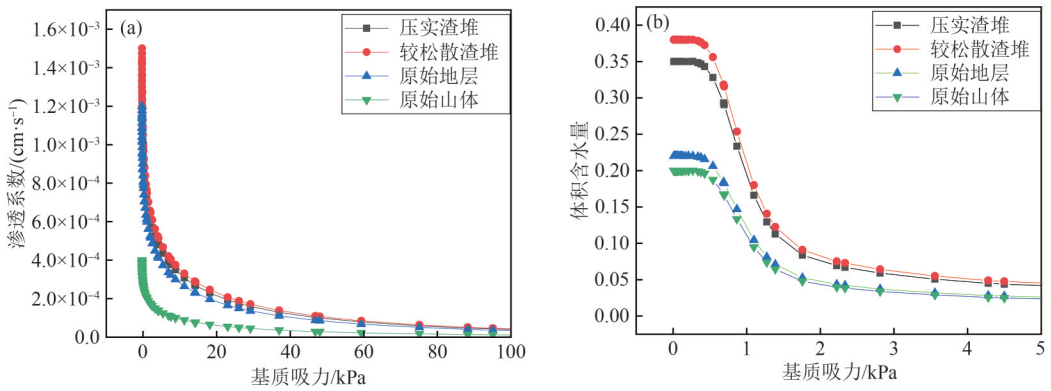

图5　渗透系数曲线（a）和土木特征曲线（b）

Fig. 5　Hydraulic conductivity curve （a） and soil-water characteristic curve （b）

表1　岩土体的物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical properties of geotechnical materials

土层名称	压缩模量 MPa	体积含水量	内摩擦角(°)	黏聚力(kPa)	天然容重(kN·m^{-3})	饱和渗透系数(cm·s^{-1})
较松散渣堆	2.3	0.38	20	23	18	1.5×10^{-3}
压实渣堆	4.5	0.35	22	30	19	1.2×10^{-3}
原始基岩层	6.8	0.20	30	420	26	4.0×10^{-5}
第四系土层	6.5	0.22	22	38	19	1.2×10^{-3}

表2　模型边界条件设置表

Table 2　Model boundary conditions setup table

模型边界条件	稳态渗流	瞬态耦合	对流-弥散
降雨边界	AG	–	–
零流量边界	AB、GH	AB、GH	AB、GH
气候边界	–	AG	–
污染物边界	–	–	CE、EF

注：上表明确了 GeoStudio 软件中三类核心分析模块的边界条件设置范围，其中 SEEP/W 稳态渗流、VADOSE/W 瞬态耦合、CTRAN/W 对流-弥散分析分别可得到土壤水分稳定运移情况、植物作用下对重金属影响及污染物迁移特征，为矿山生态修复中的水文环境评估等相关工程提供核心技术支撑。

在硫铁矿区生态修复中，植物蒸腾作用是影响土壤水分动态（如含水量、孔隙水压力）的关键因素，而叶面积指数则是衡量蒸腾作用强度的直观量化指标。通过构建植物湿度限界函数、叶面积指数函数和根深度函数，能够对植物蒸腾作用的强度及过程进行描述与分析，见图6。

如上图6，根深度函数反映了植物根系随生长时间向下延伸并最终趋于稳定的趋势，这决定了植物获取水分的土壤空间范围；在此基础上，植物湿度限界函数揭示了在特定根区范围内，植物蒸腾作用随土壤变干（基质吸力增大）而从不受限到被完全抑制的递减关系；与此同时，叶面积指数函数则刻画了植物地上部分生物量随时间推移先增后稳的单峰变化，它直接调控着蒸腾作用的潜在强度。综上所述，这三个函数共同构成了一个从根系扩展（决定吸水范围）、到土壤水分胁迫（决定吸水难度）、再到冠层发育（决定蒸腾需求）的完整框架，是精确模拟植被恢复中土壤水分动态的核心。

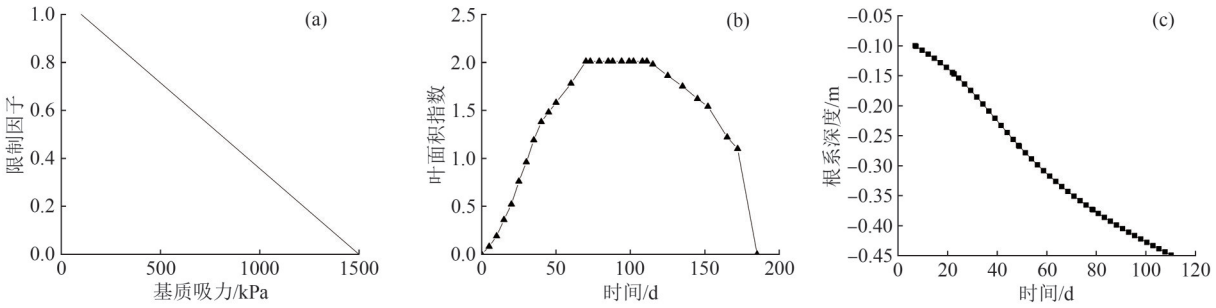

图6　植物湿度限界函数（a）、叶面积指数函数（b）和根深度函数（c）

Fig. 6　Plant moisture limitation function （a） leaf area index function （b） and root depth function （c）

2 结果分析

2.1 边坡稳定性

图7和图8分别展示了边坡在整形处理前后的稳定性，图9为考虑植物作用的分析结果。通过对比可以看到，整形工程后，边坡的安全系数有所提高，植物作用也影响边坡整体稳定性。经过整形不仅直接提升了边坡的安全水平，有效改善了渣堆力学性能，降低滑坡、塌陷等失稳风险，满足边坡稳定性要求。参考《冶金矿山排土场设计规范》[39]：排土场安全稳定性标准限值1.15～1.20。此边坡安全稳定性≥1.20，满足要求。

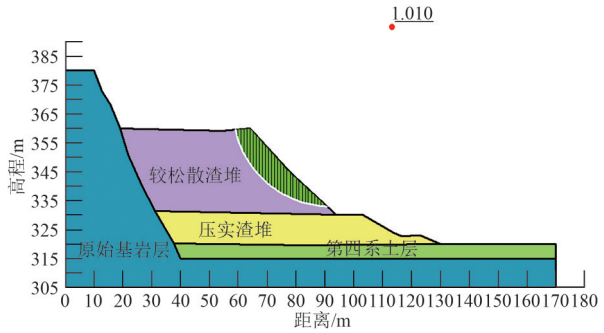

图7 新宾硫化铁矿区边坡安全系数（整形前）

Fig. 7 Slope safety factor of Xinbin pyrite mine (pre-conditioning)

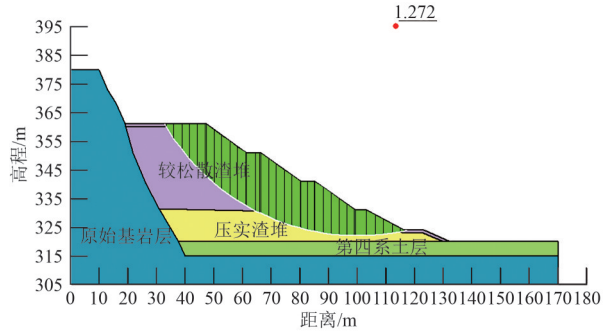

图8 新宾硫化铁矿区边坡安全系数（整形后）

Fig. 8 Slope safety factor of Xinbin pyrite mine (post-conditioning)

2.2 重金属迁移规律

2.2.1 三种情形下的重金属迁移规律

现场踏勘和重金属检测结果表明：渣堆坡面裸露、冲沟明显，且废渣呈重度至极重度酸化[40]，并伴有铅、砷、锌、铜超标（最大超标倍数分别为4.4、1.3、0.7和8.0倍），参考《土壤环境质量农用地土壤污染的风险管控标准》[41]；本研究依据超标倍数，选取污染最为严重的铜

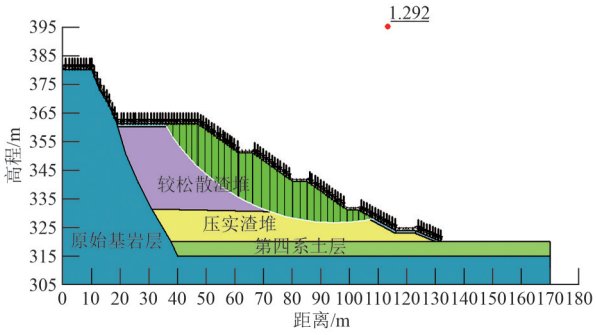

图9 考虑根加筋-锚固作用的边坡安全系数图

Fig. 9 Plot of slope safety factor considering root reinforcement and anchorage effects

（Cu^{2+}）作为代表性重金属污染物进行重点分析，见表3。硫铁矿渣堆研究区域采样照片，见图10。根据研究区域的检测结果，设重金属初始质量浓度为96 mg/kg。

表3 渣堆废渣或土壤中典型元素含量（mg/kg）

Table 3 Typical element content in waste slag or soil of the slag dump (mg/kg)

编号	Pb	As	Zn	Cu	pH
标准	70	40	200	50	≤5.5
Z01	375	59	93	89	2.56
Z02	321	32	95	95	2.57
Z03	76	ND	206	145	2.82
Z04	128	59	147	362	3.96
Z05	356	91	174	407	2.92
Z06	120	59	132	264	3.63
Z07	142	66	156	451	2.96
Z08	75	39	80	190	2.46
Z09	362	76	331	227	2.4
Z10	145	12	25	40	2.5
Z11	41	16	39	37	3.79
Z12	41	10	34	39	3.78

注：“Z”表示废渣。

图10 硫铁矿渣堆采样照片

Fig. 10 Photo of pyrite slag heap sampling

2.2.2 有无整形对铜离子迁移规律的分析

图11为情形1和情形2的Cu^{2+}迁移模拟图，图12为情形1和情形2时污染物迁移1095 d硫铁矿

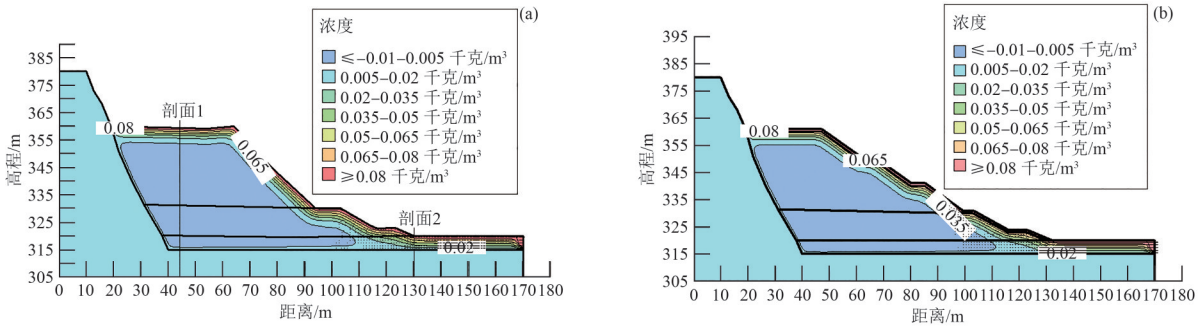

图 11　情形 1 和情形 2 下 Cu^{2+} 迁移模拟图

Fig. 11　Simulation results of Cu^{2+} transport under Scenario 1 and Scenario 2

(a)情形 1；(b)情形 2

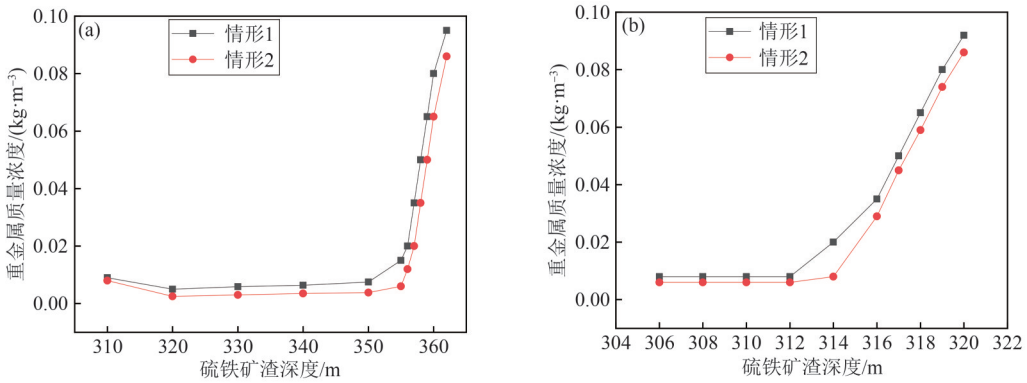

图 12　情形 1 和情形 2 下，硫铁矿渣中污染物迁移 1095d Cu^{2+} 浓度随渣堆深度的变化

Fig. 12　Variation of Cu^{2+} concentration with depth in the pyrite cinder after 1095 days of contaminant transport under Scenarios 1 and 2

(a)剖面 1；(b)剖面 2

渣 Cu^{2+} 浓度随硫铁矿渣深度的变化情况。经过边坡整形后，岩土体结构更趋合理，介质渗透性降低，有效阻碍了重金属离子的迁移速率，致使重金属在边坡介质中的迁移速率较整形前降低约 27%。从图 11 剖面 1 可见，情形 1 的重金属浓度在 355 m 处开始明显增大，而情形 2 的浓度增幅节点推迟至 356 m 处，且整体扩散距离缩小约 0.4 m；结合剖面 2 数据，情形 1 的浓度变化出现在 314 m 处，情形 2 则延后至 316 m 处。上述结果表明，边坡整形工程显著改变了重金属的迁移规律，有效延长了其浓度变化的起始距离，缩短了扩散范围。

2.2.3　整形与整形–植被作用的迁移规律分析

蒸腾作用是植物重要的生理活动，它不仅主导着植物对水分的吸收，还在矿质营养元素的摄取与运输过程中发挥着核心作用。图 13 为情形 2 和情形 3 Cu^{2+} 污染物迁移模拟图，图 14 为情形 2 和情形 3 污染物迁移 1095 d 硫铁矿渣 Cu^{2+} 浓度随硫铁矿渣深度的变化。相较于情形 2，植物蒸腾作用可改变硫铁矿渣中重金属 Cu^{2+} 的迁移规律，显著降低渣体及尾矿库土壤中 Cu^{2+} 的浓度，表现出良好的污染物去除效能。

2.2.4　有无整形–植被作用的迁移规律分析

图 15 为情形 1 和情形 3 的 Cu^{2+} 迁移模拟图，图 16 为情形 1 和情形 3 时污染物迁移 1095 d 硫铁矿渣 Cu^{2+} 浓度随硫铁矿渣深度的变化情况。

以剖面 1 为例，当深度小于 350 m 时，相较于情形 1，整形及植被条件能够影响硫铁矿渣中重金属污染物 Cu^{2+} 的迁移过程，但在 350 m 及以上深度时，情形 3 与情形 1 相比，情形 1 在 355 m 的重金属浓度变化幅度大，而情形 3 在 357 m 才有幅度变化，说明经过整形与植被的共同作用下对污染物 Cu^{2+} 的含量有所降低，扩散距离缩小，表明其对污染物 Cu^{2+} 的迁移有影响。同样，剖面 2 当深度小于 312 m 时，相较于情形 1，整形及植被条件能够影响硫铁矿渣中重金属污染物 Cu^{2+} 的迁移过程，但在 312 m 以上深度时，情形 3 与情形 1 相比，情形 1 在 314 m 的重金属浓度变化幅度大，而情形 3 在 317 m 才有幅度变化，说明经过渣堆整形与植被覆盖的联合作用下对污染物 Cu^{2+} 的含量及扩散距离有所影响。由此可知，与情形 1 相比，硫铁矿渣重

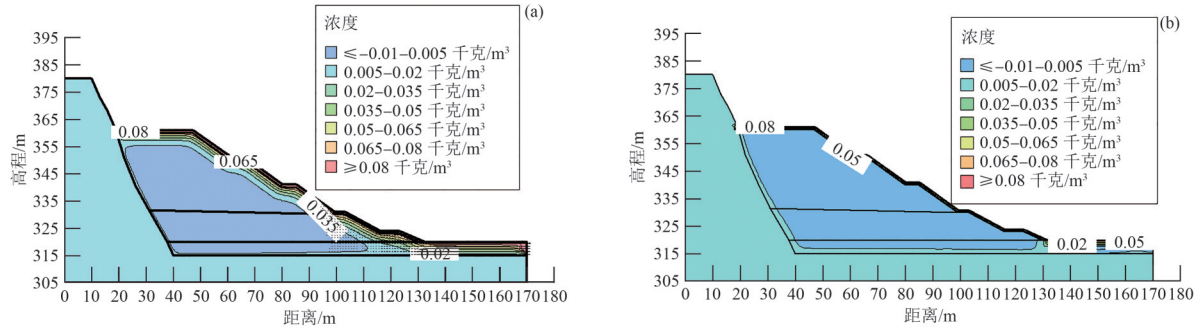

图 13 情形 2 和情形 3 下 Cu^{2+} 迁移模拟图

Fig. 13 Simulation results of Cu^{2+} transport under Scenario 2 and Scenario 3

(a)情形 2 ;(b)情形 3

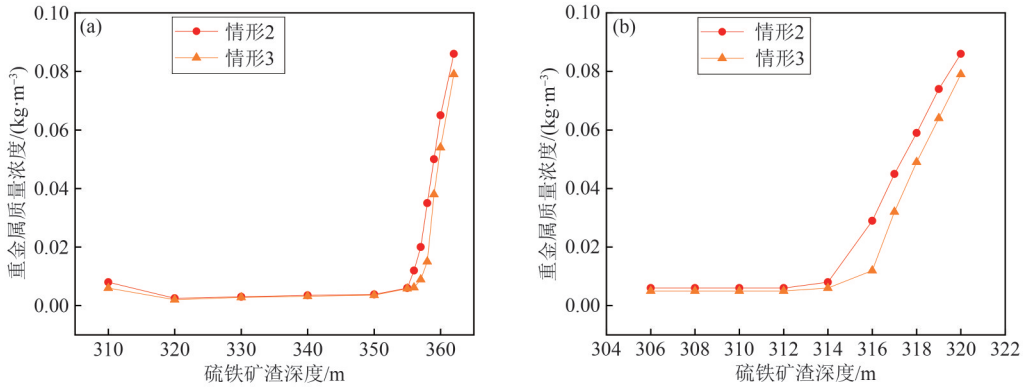

图 14 情形 2 和情形 3 下，硫铁矿渣中污染物迁移 1095d Cu^{2+} 浓度随渣堆深度的变化

Fig. 14 Variation of Cu^{2+} concentration with depth in the pyrite cinder after 1095 days of contaminant transport under Scenarios 2 and 3

(a)剖面 1 ;(b)剖面 2

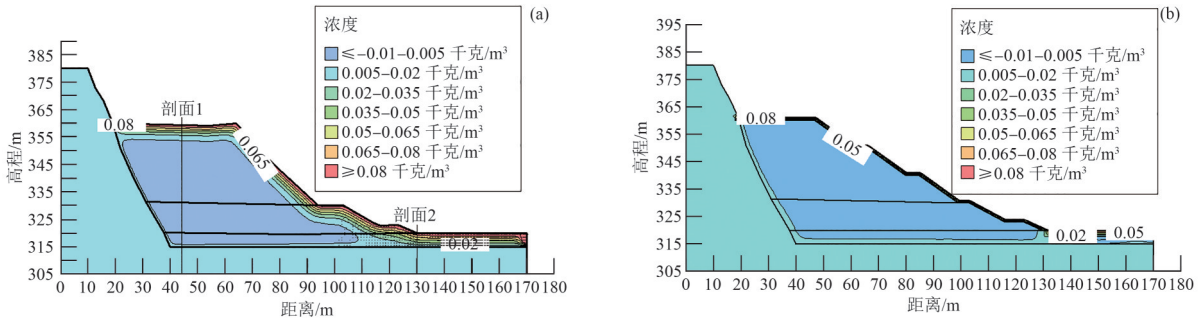

图 15 情形 1 和情形 3 下 Cu^{2+} 迁移模拟图

Fig. 15 Simulation results of Cu^{2+} transport under Scenario 1 and Scenario 3.

(a)情形 1 ;(b)情形 3

金属污染物 Cu^{2+} 的迁移会受到整形处理与植被状况的影响，二者改变了硫铁矿渣中重金属的迁移规律。

2.3 综合对比

由图 17 可知，整形及植被作用对硫铁矿渣重金属污染物 Cu^{2+} 浓度的影响程度排序为：有无整形-植被作用对比 > 有无整形对比 > 整形与整形-植被作用对比，即整形 + 植被条件 > 整形条件 > 植被条件。以剖面 1 为例，当处于 356 m 的地面高程条件下，情形 2 与情形 1 相比，重金属质量浓度的改变量达到 0.008 kg/m³；情形 3 相较于情形 1，重金属质量浓度的改变量为 0.0138 kg/m³；情形 3 和情形 2 之间，重金属质量浓度的改变量为 0.0058 kg/m³。根据图 18 呈现的数据可知，硫铁矿渣的扩散距离会随着时间的增加而逐渐增大。整形与植被条件共同作用下，对硫铁矿渣扩散距离

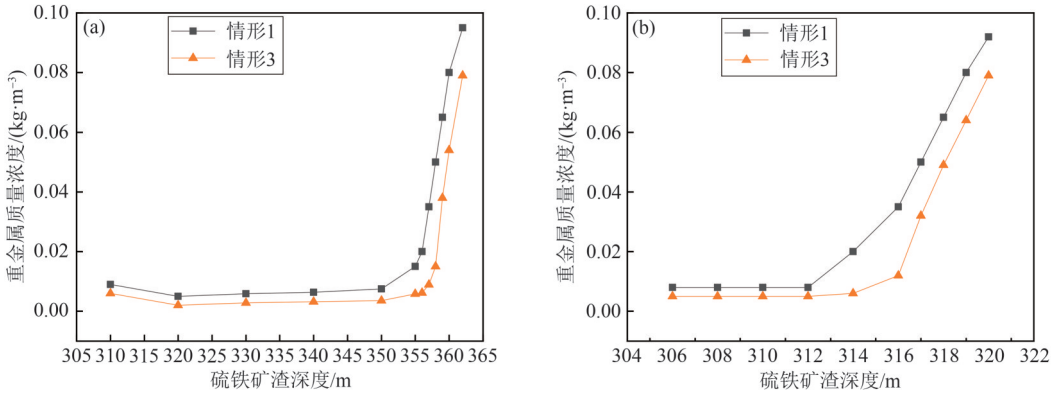

图 16　情形 1 和情形 3 下，硫铁矿渣中污染物迁移 1095d Cu^{2+}浓度随渣堆深度的变化

Fig. 16　Variation of Cu^{2+} concentration with depth in the pyrite cinder after 1095 days of contaminant transport under Scenarios 1 and 3

(a)剖面 1；(b)剖面 2

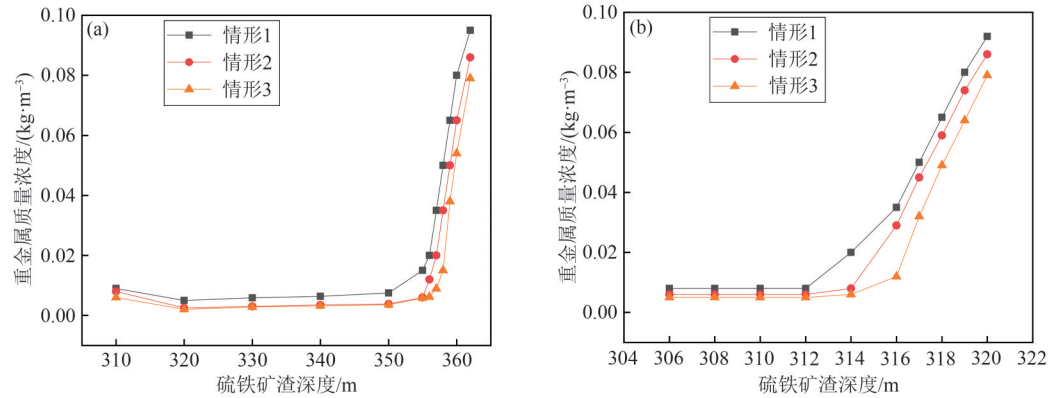

图 17　情形 1、情形 2 和情形 3 的污染物迁移 1095d 重金属浓度随硫铁矿渣深度的变化

Fig. 17　Variation of heavy metal concentration with depth in the pyrite cinder after 1095 days of contaminant transport for Scenarios 1， 2， and 3

(a)剖面 1；(b)剖面 2

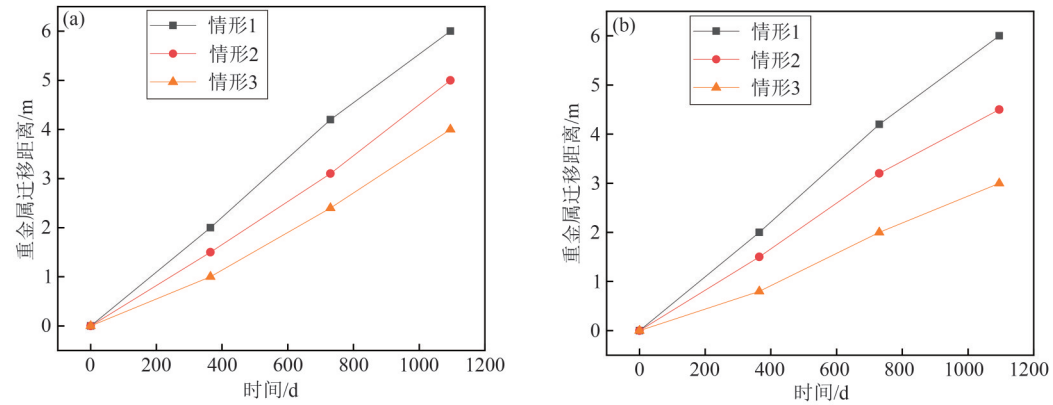

图 18　情形 1、情形 2 和情形 3 的污染物迁移 1095d 重金属迁移距离随时间的变化

Fig. 18　Variation of heavy metal migration distance over time after 1095 days of contaminant transport for Scenarios 1， 2， and 3

(a)剖面 1；(b)剖面 2

的影响程度存在差异，由大到小依次为情形 1 > 情形 2 > 情形 3，具体表现为不考虑整形及植被条件的影响最大，其次是考虑整形条件，影响最小的是考虑植被条件。当时间达到 1095 天时，情形 2 与情形 1 相比，硫铁矿渣的扩散距离变化幅度为 16.67%；情形 3 与情形 1 相比，扩散距离变化幅

度为23.5%；情形3与情形2相比，扩散距离变化幅度为15.5%。

3 讨 论

3.1 与单一因素研究的对比

前人研究多聚焦于单一环境因素或工程措施对重金属迁移的影响。例如，陈红丹等[24]重点探讨了降雨、蒸发与地下水耦合作用对尾矿库中Cu^{2+}迁移的影响，而本研究进一步纳入了“边坡整形”的工程干预与“植物修复”的生物调控作用。对比发现，相较于自然蒸发过程，整形与植被的联合作用对抑制Cu^{2+}迁移的效果更为显著。苏丹辉等[42]系统探讨了边坡生态修复基材的配比参数及其对边坡防护性能的影响，研究表明合理的基材配比不仅能改善坡面植被生长条件，还能增强坡面的抗冲刷能力和稳定性，与本研究中整形后缓坡地形有利于植被均匀覆盖的模拟结果相互印证。与上述研究相比，本工作的创新之处在于首次将边坡整形与植物修复置于同一模拟框架内进行系统性对比，实现了从单一工程措施向“工程-生态”联合治理的理论升级。

3.2 多过程耦合模拟的方法创新

与张涛等[12]采用FLAC3D进行应力-应变分析不同，本研究创新性地运用GeoStudio平台，实现了边坡稳定分析、非饱和渗流模拟、植被蒸腾计算与溶质运移模拟的多过程耦合。这一方法突破了传统单一分析的局限，将研究拓展至“力学-水文-生态”系统模拟的整合层面，推动了矿山修复领域协同方法的发展。该技术路径打破了传统矿山修复中“先工程后生态”的割裂式评价思维，构建了“工程治理—生态恢复—污染控制”一体化的数值模拟框架，为类似矿山废弃地的综合治理效果预评估提供了可复用的方法论模板。该方法尤其适用于地质条件复杂、水文过程活跃的硫化物矿区，可在有限的现场监测数据基础上，通过参数校准实现多情景模拟比选，为治理方案的优化提供定量化决策支撑。

3.3 工程-生态联合作用的增效机制

近期田秀敏等[43]通过野外试验验证了微地形重构对半干旱区矿渣场土壤抗蚀性与植被恢复的促进作用，但未量化水文过程与污染物迁移响应。崔志强等[44]进一步揭示植被恢复可有效抑制排土场细沟发育，强调植物根系固土功能，然而缺乏对重金属如Cu^{2+}迁移路径的模拟分析。相比之下，本研究通过GeoStudio多模块耦合，从模拟层面揭示蒸腾驱动的水力控制效应如何显著改变Cu^{2+}的浓度分布与迁移距离，并系统模拟了从边坡几何稳定到植被水文调控的全过程，揭示了“整形+植被”联合措施对重金属迁移的抑制效果优于单一措施，为硫铁矿渣堆风险管控提供了兼具工程可靠性与生态可持续性的创新框架。

本研究实现了渣堆稳定化与污染防控的联合增效，增效机制重点体现在：工程整形显著提升边坡安全系数，消除地质灾害隐患，为植被定居创造必要的物理基础；而植被蒸腾作用则进一步调控渣体内水分及污染物迁移，形成生态水文稳定屏障。两者结合不仅强化了边坡的几何与水力稳定性，更通过工程-生态耦合机制有效抑制了重金属的扩散迁移，呈现出“稳定加固-生态控污”的协同增强效果。

4 结 论

（1）边坡整形工程显著提升了渣堆稳定性，安全系数由1.010提高至1.292以上，降低了滑坡风险，并为后续生态修复提供了安全基础。整形与植被恢复相结合，进一步抑制了污染物迁移，二者协同作用显著减缓了重金属的扩散趋势。

（2）重金属Cu^{2+}的迁移受降雨、蒸发及植物蒸腾等多因素影响。模拟表明，整形后的缓坡地形有利于植被均匀覆盖，增强蒸腾作用，形成水力控制效应，使Cu^{2+}富集于根系区，从而减小其迁移范围。

（3）不同治理措施对Cu^{2+}迁移的影响程度依次为：整形 + 植被 > 仅整形 > 仅植被。整形与植被的联合作用最优，能有效控制污染物浓度与迁移距离，为矿区重金属污染治理提供科学依据。

参考文献：

[1] 刘旭，戢兴忠，陈强，等. 贵州普克金矿区黄铁矿和方解石地球化学特征及地质意义[J]. 现代地质，2024，38(4)：977－990.

[2] 李晨嘉，孙立娟，赵一韩，等. 基于GeoStudio的降雨入渗边坡稳定性分析的数值模拟研究[J]. 吉林建筑大学学报，2024，41(5)：44－52.

[3] 成晓梦，孙彬彬，吴超，等. 浙中典型硫铁矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. 环境科学，2022，43(1)：442－453.

[4] 郭学辉，黄仁亮，万建华. 冀北山区某有色多金属尾矿库周

边农用地重金属污染特征与生态健康风险评价[J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 77－92.
[5] 董鑫, 胡浩然, 张晓晴, 等. 基于Meta分析的矿区周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 93－102.
[6] ZHOU T. Simulation of the impacts of native vegetation and polyacrylamide on hydraulic properties and heavy metal concentrations at mine dumps[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(9): 2749－2761.
[7] 张一帆, 刘海燕, 董姝, 等. 相山铀矿尾矿区酸性矿山排水和沉积物稀土元素地球化学特征[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 412－429.
[8] 刘安, 于聪灵, 王立平, 等. 河北省典型铅锌矿区重金属来源解析及生态风险评价[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 307－317.
[9] 梁慧芝, 郭朝晖, 张云霞, 等. 含砷尾矿中砷铵矿相特征及其释放机制[J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 20－30.
[10] 周柳婷, 储薇, 黄小云, 等. 植物修复重金属污染土壤机制研究进展[J/OL]. 环境科学, 2025, 46(9): 1－21.
[11] HU Y, WANG J, YANG Y, et al. Revolutionizing soil heavy metal remediation: Cutting-edge innovations in plant disposal technology[J]. The Science of the total environment, 2024, 918: 170577.
[12] 张涛, 蒋玉青, 杨寿全, 等. 基于FLAC3D的某铜矿边坡稳定性数值模拟分析[J]. 矿业工程, 2025, 23(4): 85－91.
[13] 何振华, 王飞飞. 基于GeoStudio的大水露天矿山采场边坡瞬态渗流稳定性分析[J]. 采矿技术, 2023, 23(6): 161－164.
[14] JYOTHI K B, SINGH U K. Static and pseudo-static stability analysis of right earthen embankment of nagarjuna sagar dam by geostudio[J]. E3S Web of Conferences, 2023, 391: 01018.
[15] LIN K, JIAN J, ZHANG Y, et al. Study on Plant-blanket to reduce heavy metal migration caused by precipitation and to improve the soil environment of pyritic tailings[J]. The Science of the total environment, 2024, 939: 173376.
[16] WANG T, YUAN L Z, BI M I. Finite Element Analysis of Slope Stability of Fushun West Open-Pit Mine[J]. Tehnički Vjesnik, 2024, 31(6): 1968－1974.
[17] 李金辉, 张海东, 雷万杉. 胶东地区夏甸金矿床构造蚀变带中金富集作用与微量元素迁移关系分析[J]. 现代地质, 2025, 39(4): 981－994.
[18] 孙德亮, 陈丹璐, 密长林, 等. 基于随机森林-特征递归消除模型的可解释性缓丘岭谷地貌滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报, 2023, 29(2): 202－219.
[19] 朱鸿鹄. 评论:耦合确定性与随机结构面的岩质边坡概率稳定性分析方法[J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 1.
[20] 常志璐, 向晖, 余琦, 等. 耦合确定性与随机结构面的岩质边坡概率稳定性分析[J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 2－13.
[21] 陈永吉, 鄢廷可, 刘聪. 基于三维地质建模和DFN的露天矿边坡稳定性评价[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 181－191.
[22] 侯圣山, 何箫, 孟宪森, 等. 基于岩石CT扫描的冻融作用对花岗岩细观结构及力学强度影响研究[J]. 地质力学学报, 2024, 30(3): 462－472.
[23] 邱振华, 陈光木, 黄春福. 基于强度折减有限元法的排土场边坡稳定性数值模拟研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(01): 72－81.
[24] 陈红丹, 郝喆, 滕达, 等. 降雨-蒸发与地下水耦合作用下的大型尾矿库重金属Cu^{2+}迁移数值模拟分析[J]. 有色金属工程, 2021, 11(4): 133－142.
[25] 孙召东, 宋洪庆, 邢奕, 等. 海绵城市透水砖铺装系统雨水入渗及重金属污染物迁移模拟[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 46-52, 100.
[26] 钱信禹, 边小卫, 张亚峰, 等. 丹江源地区地质建造对土壤和植被生态空间格局的影响[J]. 现代地质, 2023, 37(4): 903－913.
[27] 侯婷婷, 姚玉增, 付建飞, 等. 辽宁弓长岭富铁矿成矿过程元素迁移特征研究[J]. 现代地质, 2024, 38(01): 56－67.
[28] LAN X L, LIAO X Y, XIAO J X, et al. Crop cultivation reshapes soil microbiomes to drive heavy metal mobilization in restored mining areas[J]. Agriculture, 2025, 15(8): 804.
[29] BAI B, WU H Y, WU N, et al. Granular thermodynamic ideology on the heavy metal migration in unsaturated soils driven by seepage-temperature[J]. Journal of Hydrology, 2025, 661: 133738.
[30] 钟林健, 郭朝晖, 谢慧民, 等. 地下水位对尾矿中重金属释放及其在土壤中吸附的影响研究[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 484－494.
[31] XIAN L H, LU D H, YANG Y T, et al. Effects of woodland slope on heavy metal migration via surface runoff, interflow, and sediments in sewage sludge application[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 13468.
[32] SZWALEC A, MUNDALA P. The Suitability of Selected Naturally Growing Plant Species for the Phytostabilization of Heavy Metals at Different Locations on the Slopes of a Zinc Smelting Waste Landfill: The Second Case Study[J]. Sustainability, 2025, 17(10): 4692.
[33] FENG F, SUN J, DING L, et al. Migration patterns of heavy metals from solid waste stockpile soils by native plants for ecological restoration in arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Environmental research, 2024, 251(Pt 1): 118607-118607.
[34] 吴松, 陈杰, 张有荣, 等. 滇东南不同成土母质区土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1730－1740.
[35] 李楠, 曹明杰, 郝喆, 等. 基于不同土地利用方式的土壤重金属污染与潜在风险评价:以辽河流域(浑太水系)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程为例[J]. 现代地质, 2023, 37(6): 1655－1664.
[36] 何宏平, 王珩, 李旭锐, 等. 风化壳型稀土矿床中稀土元素的活化与迁移[J]. 地质力学学报, 2024, 30(5): 707－722.
[37] 杨志爽, 黄小文, 孟郁苗, 等. 中国铁矿床伴生关键金属:基本特征、分布规律及资源潜力[J]. 矿床地质, 2024, 43(2): 319－338.
[38] 郝喆, 陈红丹, 张颖, 等. 降雨-蒸发-蒸腾耦合作用下的中

小型尾矿库重金属Cu^{2+}迁移规律研究[J]. 安全与环境学报，2022，22(1)：467－475.

[39] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冶金矿山排土场设计规范：GB 51119—2015[S]. 北京：中国计划出版社，2016.

[40] 魏总，姜昕，黄安，等. 云南曲靖典型煤矿区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 现代地质，2025，39(2)：495－503.

[41] 生态环境部，国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)：GB 15618—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018.

[42] 苏丹辉，颜阳，王永忠，等. 岩质边坡生态修复基材配比及性能研究[J]. 地质科技通报，2025，44(1)：251－261.

[43] TIAN X M，YIN R P，WANG J，et al. Microtopographic reconstruction improves soil erosion resistance and vegetation characteristics on the slopes of large dump sites in semi-arid areas[J]. Frontiers in Environmental Science，2022，10：930519.

[44] CUI Z Q，KANG H L，WANG W L，et al. Vegetation restoration restricts rill development on dump slopes in coalfields[J]. The Science of the total environment，2022，820：153203.