地球化学

doi:10.12134/j.dzykt.2026.01.009

金属矿山尾矿库区土壤重金属元素释放迁移规律研究

郑 仲[1,3],李猛兴[2],张尚清[1,3]

(1.战略性矿产资源成矿作用与评价山西省重点实验室,山西太原 030006;2.中国地质调查局西安矿产资源调查中心,陕西西安 710100;3.山西省地质调查院有限公司,山西太原 030006)

[摘 要] 为揭示尾矿库周边土壤中重金属的赋存形态、释放机制及迁移路径，本文提出金属矿山尾矿库区土壤重金属元素释放迁移规律研究方法。该方法以某大型铜矿为研究区，将尾矿库划分为50 m×50 m网格，在每个网格中心及垂直剖面不同位置设采样点，采集表层20 cm土壤样本，经预处理后，利用等离子体原子发射光谱仪测定重金属含量。同时设计淋滤试验装置，以不同pH值（4.5、6.0、7.5）和淋滤强度（55 mm/h、110 mm/h、180 mm/h）的淋滤液对土柱进行淋滤，在土壤不同深度和不同淋滤条件下，使用原子吸收分光光度计测定淋出液中Pb、Zn的释放浓度，分析土壤重金属元素释放迁移规律。试验表明：土壤粒径影响重金属迁移，细颗粒吸附能力强，限制重金属迁移，粗颗粒利于迁移；酸性条件（pH=4.5）下，Pb、Zn释放浓度更高，更易从土柱上层向下层迁移；淋滤强度增大，Pb、Zn在各出水口释放浓度升高，迁移量增加；垂向上，随土壤深度增加，各土柱Pb、Zn释放浓度呈下降趋势，酸性条件加速重金属由上层向下层迁移，pH升高，重金属释放量减少，残留浓度相对较高。本研究阐明了尾矿库区土壤重金属在不同环境条件下的释放迁移行为与关键驱动因素，研究成果对科学评估尾矿库周边土壤污染风险、预测重金属长期迁移趋势具有重要理论价值，并为制定针对性的尾矿库区域生态修复与污染防控策略提供了可靠的数据支撑和科学依据。

[关键词] 金属矿山 尾矿库区 土壤重金属 元素释放 迁移规律 淋滤试验装置

[中图分类号] P618.51;X825 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2026)01-0134-09

Zheng Zhong, Li Mengxing, Zhang Shangqing. The release and migration regularity of heavy metal elements in soil of tailings pond area of metal mines[J]. Geology and Exploration, 2026, 62(1): 0134-0142.

0 引言

当前,工业化与城市化进程持续加速,我国矿产资源需求将日益增高(赵立群等,2020;田郁溟等,2022)。金属矿山的开采规模不断扩大,尾矿库作为矿山开采活动的伴生产物,其数量与日俱增。尾矿库区土壤中富集了大量重金属元素,如铅、锌、镉、汞等(蒋旭升等,2023;陈佳等,2024)。过往研究虽对尾矿库区土壤重金属污染状况有所揭示,但对于重金属元素在不同环境介质中释放迁移的动态过程与内在机制,仍缺乏全面且深入的认知(韩善博等,2024)。深入探究金属矿山尾矿库区土壤重金属元素释放迁移规律,不仅有助于明晰尾矿库周边土壤环境演变过程,更可为制定科学有效的土壤重金属污染修复策略提供坚实的理论依据(于金鹏等,2024;叶文娟等,2024;许文等,2024),对维护区域生态平衡、保障居民健康和推动矿业高质量发展、建设美丽中国具有极为重要的现实意义(纪东如等,2024;贾汉森等,2024)。

目前在相关领域内有很多学者研究重金属迁移规律方法。刘金河等(2024)提出镉污染特征及其迁移规律方法,该方法是对土壤样品进行采集后,通过化学分析方法检测土壤中重金属含量,再使用数学模型对其迁移规律进行模拟。然而数学

[收稿日期] 2025-04-27;[改回日期] 2025-06-08;[责任编辑] 黄 华。

[基金项目] 中国地质调查局项目(编号:1212011120764)、山西省自然科学基金项目(编号:202403021222498)和山西省级公益性地勘项目(编号:2024-53)联合资助。

[第一作者] 郑 仲(1985年-),男,2009年毕业于太原理工大学,矿产普查与勘探专业,硕士学位,高级工程师,主要从事矿产地质、水工环地质工作。E-mail:330843696@qq.com。

模型在模拟重金属迁移时，通常会作出一些简化假设。例如，假设土壤介质是均匀的，忽略土壤中微观结构的复杂性，这些假设可能导致模型模拟结果与实际的重金属迁移情况存在偏差，在尾矿库区这种复杂的环境中，土壤性质和环境条件变化较大，模型的准确性可能受到更大影响。赵忠强等（2024）提出流域重金属元素迁移富集规律分析方法。该方法对尾矿库区不同位置、深度的土壤以及尾矿砂进行系统采样，使用X射线荧光光谱仪（XRF）、电感耦合等离子体质谱仪等设备测定土壤样本内重金属含量，通过室内模拟方式获得重金属迁移规律。室内模拟可以控制pH和淋滤强度，但自然环境中温度波动（如季节性冻融）会改变土壤孔隙结构，微生物代谢（如硫还原菌）可通过氧化还原反应转化重金属形态。此外，实际降雨存在间歇性，而连续淋滤可能高估迁移速率，且短期的室内实验和有限区域的现场研究难以全面涵盖尾矿库区长期的重金属释放和迁移过程，以及不同季节、年份间的变化规律。虽然短期淋滤结果可类比强降雨事件对迁移的贡献，但长期过程需考虑吸附饱和效应、次生矿物形成、植被作用等，过程复杂且影响因素多变。同时，研究区域的局限性也可能导致无法准确把握尾矿库区周边大范围环境对重金属迁移的综合影响。向超等（2024）提出土壤砷锑垂向迁移分布规律分析方法。该方法通过在冶炼渣堆周边不同位置和深度采集土壤样品，精确测定土壤样品中砷锑等重金属的含量，获得其迁移规律。该方法主要针对冶炼渣堆周边土壤中的砷锑元素进行研究，对于金属矿山尾矿库区而言，可能存在其他多种重金属元素，且尾矿库区的环境更为复杂，无法全面准确地反映所有重金属元素的释放迁移规律。张云等（2023）提出重金属离子"下行"迁移规律分析方法。该方法对采煤矸石充填区域进行长期的监测，定期采集不同深度的土壤样本，分析其中重金属离子的含量和分布变化，并运用数学模型和统计方法对监测数据进行分析，确定重金属离子迁移的主要影响因素。在研究采煤矸石充填材料重金属离子迁移规律时，可能对一些外部因素的考虑不够全面（姜枫等，2022），导致该方法应用效果不佳。

针对上述方法在应用中存在的缺陷，本文采用淋滤试验，尝试模拟降雨对金属矿山尾矿库区土壤的作用过程，探究其中重金属元素释放及迁移情况，旨在为尾矿库区周边土壤污染风险控制及生态修复提供基础依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

以我国某大型铜矿作为试验对象，该铜矿面积约660 km^2，区域内涵盖2个大型、5个中型及数十个小型铜矿床组。铜矿体赋存于中元古界昆阳群浅变质岩系（唐骥等，2023），白云岩为主要含矿层位，其次为因民组硅质岩、凝灰质白云岩及黑山组碳质板岩。含矿层位稳定，呈层状、似层状分布，与层理产状一致，属典型的层控-变质热液型矿床。该铜矿受南北向和东西向断层影响，形成断陷盆地构造，有利于岩浆活动和成矿元素富集。目前累计探明铜金属储量391.4万吨，预测总储量超500万吨，属超大型铜矿规模。该铜矿开采历史较长，长期高强度开发导致山体破碎、水土流失，矿区及周边土壤、水体受铜、铅、锌等重金属污染，生态环境破坏严重。

1.2　土壤样本采集与预处理方法

1.2.1　土壤样本采集

采集金属矿山尾矿库区土壤样本步骤如下（蒋梦娇等，2023）：

Step1：准备采样工具

不锈钢铲（避免铁制工具，防止重金属污染干扰）、聚乙烯材质塑料采样桶/袋、土钻（用于深层采样，不锈钢或塑料材质）、竹片（用于刮取土样）。

Step2：采样点布设

将尾矿库划分为50 m×50 m的网格，每个网格中心设采样点。其中沿坝长方向每50 m设1个垂直剖面，每个剖面在坝顶、坝坡（上、中、下）、坝底各设1个采样点。

Step3：采样

去除地表杂物（如石块、植物残体），用不锈钢铲呈“△”形挖取表层土壤（贾振江等，2024），深度20 cm，取约1 kg装入塑料采样桶内。

Step4：土壤样本保存

去除样品中的较大石块、植物根系等杂物，轻轻混匀，装入聚乙烯袋内，避免过度挤压。

经过上述步骤，金属矿山尾矿库区土壤样本采集完成。

1.2.2　土壤样本预处理

将采集到的金属矿山尾矿库区土壤样本置于

实验室室温环境下(宋乔,2022),使用筛子筛除土壤内较小石子、植物根茎等杂物后(谢佩玲等,2024),使用研钵对土壤样本进行研磨处理,然后使用20目尼龙筛对土壤样本进行过筛,将该土壤样本装入聚乙烯袋内,用于测定其理化性质(王烨等,2024)。继续对土壤样本进行研磨后,使用100目尼龙筛对其进行过筛处理,将土壤样本装入聚乙烯袋内,用于测定重金属含量和重金属赋存形态。将剩余的土壤样本保存在冰箱内备用。

1.3 金属矿山尾矿库区土壤重金属元素测定方法

使用电子天平称取0.1 g金属矿山尾矿库区土壤样本,将其放入聚四氟乙烯塑料坩埚内,再分别向坩埚内加入NHO_3、HF、$HClO_4$,容量分别为4.5 mL、8 mL、10 mL,然后设置坩埚温度为50 ℃。当土壤样本内白烟散尽,坩埚停止加热使土壤样本自然冷却后(李佳怿等,2024),将12 mL HCl溶液倒入土壤样本内。待HCl溶液充分溶解后,将土壤样本装入容量瓶内,使用等离子体原子发射光谱仪测定金属矿山尾矿库区土壤样本内重金属元素和含量(张静等,2024)。

1.4 重金属元素释放迁移规律分析方法

1.4.1 淋滤试验装置设计

金属矿山尾矿库区土壤内的重金属受pH值、土壤质地和降水与径流影响,土壤内金属离子交换(詹凤琪等,2023)、土壤质地吸附以及土壤颗粒冲刷等导致土壤内重金属元素发生释放和迁移(袁珊欣等,2023;曾欢等,2023)。为充分分析金属矿山尾矿库区土壤重金属元素释放迁移规律,本文采用淋滤试验方式进行分析(康得军等,2023)。设计淋滤试验装置结构如图1所示。

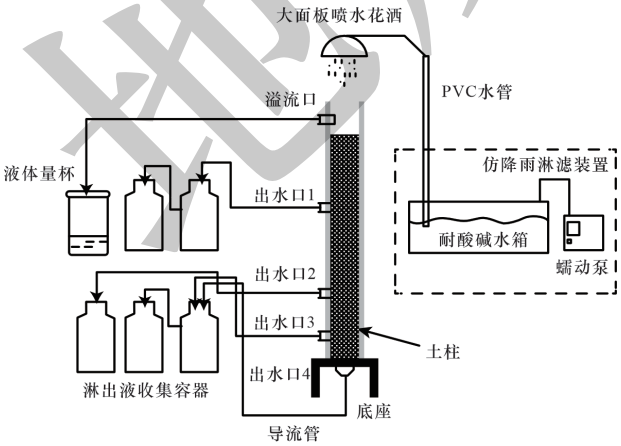

图1 淋滤试验装置结构

Fig. 1 Structure of leaching test apparatus

图1展示的是淋滤试验装置的主要构成部分。仿降雨淋滤装置是核心部分,其中耐酸碱水箱用于储存淋滤液体,通过蠕动泵将液体抽出,经PVC水管输送至大面板喷水花洒,模拟降雨过程对下方土壤进行淋滤(陶玲等,2023)。土壤被置于特定土柱内,其底部设有底座和导流管。装置侧面设有多个出水口,可在不同高度采集淋滤过程中的水样(张丽等,2024)。当淋滤水量较多时,多余的水可通过溢流口排出,防止装置内水位过高。淋出液通过导流管和出水口流出后,被收集到多个淋出液收集容器中,便于对不同阶段、不同位置的淋出液进行分别收集和分析。同时,还设有液体量杯,可用于测量和记录淋出液的体积等参数。

1.4.2 试验土柱工况布设

金属矿山尾矿库区土壤进行淋滤试验时,环境温度为实验室室温环境,淋溶介质pH值不同的淋滤液(王俊萍等,2022)。该淋滤液配置方法为:按照4∶1比例将硫酸与硝酸进行充分混合,将适量的$Ca(OH)_2$、$CaCl_2$等试剂加入其中,使用去离子水调整溶液的pH值,将溶液pH值调整为4.5、6.0和7.5,将该溶液作为淋滤液。金属矿山尾矿库区土壤内重金属元素释放迁移时,受降雨强度影响较大(艾晓军等,2024;Nisa et al, 2024),在此设计3种降雨强度,分别为55 mm/h、110 mm/h、180 mm/h。在上述试验条件下,试验土柱工况布设如表1所示。

表1 试验土柱工况布设

Table 1 Layout of test soil column operating conditions

试验组编码	土柱序号	淋滤pH值	淋滤强度(mm/h)
第1组	1	4.5	55
	2	6.0	
	3	7.5	
第2组	4	4.5	110
	5	6.0	
	6	7.5	
第3组	7	4.5	180
	8	6.0	
	9	7.5	

在上述试验过程中,以金属矿山尾矿库区土壤内典型的重金属元素Pb、Zn为释放迁移规律研究对象(余丽等,2024),在试验过程中,使用原子吸收分光光度计直接测定。

2 试验分析

给出金属矿山尾矿库区土壤粒径分布数据,对

金属矿山尾矿库区土壤的理化性质进行分析，结果如表2所示。

表2　金属矿山尾矿库区土壤理化性质

Table 2　Soil physical and chemical properties in the pond area of metal mines

粒径/mm	分布范围/%
<0.003	4.7~22.3
0.003~0.006	7.9~56.2
0.006~2	12.2~53.1

从金属矿山尾矿库区土壤理化性质看（表2），粒径<0.003 mm的颗粒占比4.7%~22.3%，此部分颗粒细小，比表面积大，吸附能力强，能吸附较多养分和离子，但通气透水性差；0.003~0.006 mm的颗粒占7.9%~56.2%，在土壤结构形成中起关键作用，一定程度上平衡通气性与保肥保水性；0.006~2 mm的颗粒占12.2%~53.1%，通气透水性好，但保水保肥能力弱。在粒径与重金属迁移关系上，细粒径颗粒因其表面积大、吸附位点多，强烈吸附重金属，使重金属富集其中，限制其迁移；而粗粒径颗粒吸附能力弱，孔隙大，利于重金属解吸和随水流等迁移。降雨淋溶时，细颗粒阻碍水流，降低重金属迁移速率；粗颗粒则水流顺畅，加快迁移。总之，尾矿库区土壤粒径通过影响理化性质，进而深刻影响重金属的迁移行为。

以土柱1、2、3作为实验对象，在相同淋滤强度、不同淋滤pH值下，分析土柱的重金属元素Pb、Zn元素释放浓度与其迁移规律（图内出水口自上而下排列），结果如图2所示。

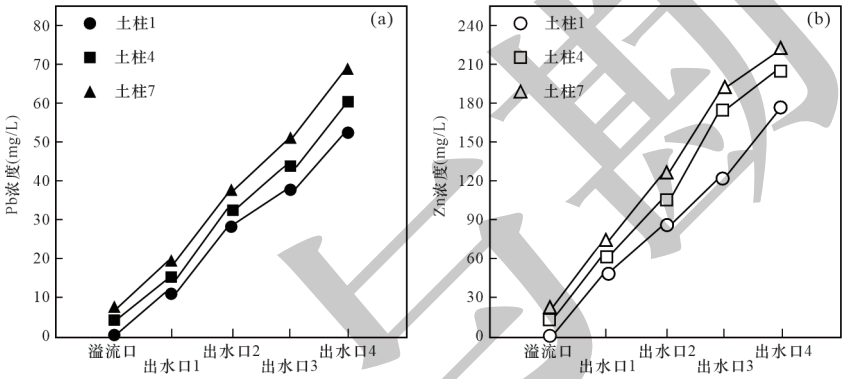

图2　相同淋滤强度、不同淋滤pH值下重金属元素Pb（a）、Zn（b）释放浓度

Fig. 2　Release concentration of heavy metal elements Pb（a）and Zn（b）under the same leaching intensity and different leaching pH values

综合分析图2，在相同淋滤强度、不同淋滤pH值条件下，对土柱中重金属元素Pb和Zn的研究发现其释放浓度与迁移规律颇具特点。对于Pb，从图中可知，土柱1（pH值4.5）、土柱2（pH值6.0）、土柱3（pH值7.5）的Pb释放浓度均随出水口位置下移而上升，且土柱1的浓度整体最高，说明酸性越强，Pb越易释放。其不断从土柱上层向下层迁移，酸性环境更利于这一过程。对于Zn，释放浓度也随出水口下移而增加，土柱1的Zn释放浓度在各出水口均高于其他土柱，前期增长迅猛，之后趋缓。Zn不断向下迁移，酸性条件下迁移释放更突出，且前期释放特性与Pb有别，或与其化学形态转化及吸附解吸特性相关。可见，淋滤pH值对Pb、Zn的释放与迁移影响重大，酸性条件更利于它们从土柱中迁出。

以土柱1、4、7作为实验对象，其中土柱1的pH值为4.5，喷淋强度为55 mm/h；土柱4的pH值为4.5，喷淋强度为110 mm/h；土柱7的pH值为4.5，喷淋强度为180 mm/h。在不同淋滤强度下分析土柱的重金属元素Pb、Zn元素释放浓度与其迁移规律（图内出水口自上而下排列），结果如图3所示。

分析图3认为，在相同淋滤pH值为4.5的条件下，对土柱1、4、7在不同淋滤强度下重金属元素Pb、Zn的释放浓度及迁移规律剖析如下：从元素存在形态看，Pb、Zn在土柱中以多种形态赋存。可交换态的Pb、Zn在淋滤时最易释放，且淋滤强度越大，水流对其冲刷及离子交换作用越强，释放越明显。碳酸盐结合态的Pb、Zn，在酸性条件下，因碳酸盐溶解而释放，淋滤强度变化会加速这一过程。铁锰氧化物结合态、有机结合态的Pb、Zn，在特定淋滤强度和pH条件下，其结合稳定性改变从而释放。残渣态通常稳定，但长期高强度淋滤也可能少量释放。就迁移规律而言，土壤颗粒对Pb、Zn的吸附-解吸至关重要。细粒径土壤吸附强，但淋滤强度增大及酸性pH值会破坏吸附平衡，促进解吸迁移。离子交换与络

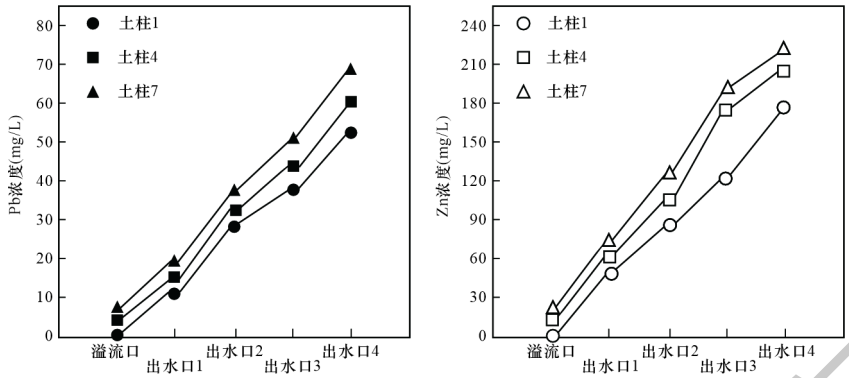

图3 相同淋滤pH值、不同淋滤强度下重金属元素Pb(a)、Zn(b)释放浓度

Fig. 3 Release concentration of heavy metal elements Pb(a) and Zn(b) under the same leaching pH values and different leaching intensity

合作用也影响迁移，淋滤液中离子和配体与Pb、Zn反应，改变其迁移性。此外，氧化还原电位影响重金属价态和形态，不同淋滤强度和pH下，氧化还原反应程度不同，影响迁移。从图中可见，随着淋滤强度从土柱1的55 mm/h增至土柱4的110 mm/h，再到土柱7的180 mm/h，Pb、Zn在各出水口释放浓度均升高，且在迁移过程中，高淋滤强度使更多Pb、Zn释放并迁移。

从垂向维度分析金属矿山尾矿库区土壤重金属元素释放迁移规律，以土柱7、8、9作为实验对象，其中土柱7淋滤pH值为4.5，土柱8淋滤pH值为6.0，土柱9淋滤pH值为7.8。三个土柱在淋滤强度为180 mm/h环境下，检测选择土柱不同土壤深度时的重金属元素Pb、Zn释放浓度，分析重金属元素垂向释放规律，结果如表3、表4所示。

表3 不同土壤深度时的重金属元素Pb释放浓度(mg/kg)

Table 3 Release concentration (mg/kg) of heavy metal element Pb at different soil depths

土壤深度（cm）	原始值	土柱7	土柱8	土柱9
20	196.5	99.3	135.8	155.9
30	211.4	98.9	133.1	153.2
40	225.7	96.5	129.7	150.8
50	236.9	92.1	126.6	148.3
60	251.5	90.9	123.2	145.7
70	262.8	88.5	119.4	142.6
80	281.1	85.7	113.8	138.1
90	301.9	83.2	109.8	133.5
100	311.3	81.5	103.2	129.2

注：测试单位：山西省地质调查院有限公司战略性矿产资源成矿作用与评价山西省重点实验室；测试时间：2024年。

综合表3、表4，从垂向维度分析，淋滤pH值与土壤深度对金属矿山尾矿库区土壤重金属元素Pb、Zn的释放迁移影响显著。对于金属矿山尾矿库区土壤内重金属Pb，在淋滤强度为180 mm/h时，土柱7(pH=4.5)各深度的Pb释放浓度随深度增加逐渐降低(如20 cm处99.3 mg/kg左右，100 cm处81.5 mg/kg左右)，且整体低于土柱8和土柱9。这表明酸性条件促进Pb释放，使其更易从上层土壤向下迁移，残留浓度随深度增加而递减。对于Zn(表4)，土柱7(pH4.5)的Zn释放浓度随深度增加显著下降(20 cm处315.3 mg/kg左右，100 cm处183.6 mg/kg左右)，降幅大于土柱8和土柱9。说明酸性条件下Zn释放更强烈，垂向迁移更明显，释放后随淋滤水向下迁移，导致深层残留浓度降低。综上结果，在垂向维度上，酸性条件能显著增强金属矿山尾矿库区土壤内重金属Pb、Zn的化学活性，使其更易脱离土壤颗粒。随着淋滤水从上层向下层迁移，各深度的残留浓度较低；随着pH升高，重金属释放量减少，残留浓度相对较高。同时，随土壤深度增加，各土柱的Pb、Zn

表4 不同土壤深度时的重金属元素Zn释放浓度(mg/kg)

Table 4 Release concentration of heavy metal element Zn (mg/kg) at different soil depths

土壤深度	原始值	土柱7	土柱8	土柱9
20	403.1	315.3	398.1	439.4
30	411.5	303.3	375.4	428.5
40	450.3	281.2	351.1	409.7
50	482.5	246.4	331.9	389.4
60	523.2	262.1	309.7	351.1
70	559.6	247.5	281.2	325.7
80	599.3	225.7	263.5	300.2
90	647.5	201.7	250.7	281.8
100	729.2	183.6	226.2	259.7

注；测试单信；山西省地质调查院有限公司战略性矿产资源成矿作用与评价山西省重点实验室；测试时间：2024年。

释放浓度均呈下降趋势，进一步表明淋滤过程中重金属由上层向下层迁移，且酸性条件加速了这一迁移过程。

从吸附-解吸动力学角度分析，细颗粒土壤因比表面积大且富含铁锰氧化物及有机质，可通过化学吸附和物理吸附强烈固定 Pb、Zn。酸性条件（pH=4.5）下竞争吸附位点并溶解碳酸盐结合态重金属，促进解吸；淋滤强度增大则通过水力剪切力破坏吸附平衡，加速迁移。粗颗粒以物理吸附为主，结合能低，更易发生解吸。这一机制解释了为何酸性高淋滤强度下细颗粒区域仍能检测到较高残留浓度，而粗颗粒主导区域迁移更显著。

本研究相较于传统数学模型和短期实验方法具有以下创新优势：

（1）多维度动态模拟：传统数学模型（刘金河等，2024）通常假设土壤介质均质且忽略微观结构，导致模拟结果与实际迁移偏差显著。而本研究通过设计多深度出水口和连续淋滤监测，精准捕捉 Pb、Zn 在垂向非均质土壤中的动态迁移过程，解决了数学模型过度简化的问题。

（2）复合环境因子控制：现有短期实验（赵忠强等，2024）多聚焦单一因素（如仅 pH 或淋滤强度），难以反映实际环境中多因子耦合效应。本研究通过同步调控 pH 和淋滤强度，首次揭示酸性高降雨强度条件下重金属的协同释放机制，弥补了短期实验的片面性。

（3）土壤结构-功能关联分析：传统方法较少关联土壤粒径分布与重金属形态转化（向超等，2024）。本研究通过结合粒径吸附特性和化学形态分析（如碳酸盐结合态占比），阐明"吸附~解吸~迁移"的全链条机制，为靶向修复提供理论依据。

3　结论

（1）通过系统的土壤样本采集、预处理以及淋溶装置设计，模拟了不同酸性条件（pH=4.5、6.0、7.5）与淋滤强度（55 mm/h、110 mm/h、180 mm/h）对尾矿库区土壤重金属释放迁移的影响。试验结果表明，酸性环境与高淋滤强度均能显著提升 Pb、Zn 的释放浓度与迁移能力，揭示了其动态释放规律，为尾矿库区土壤重金属污染监测与治理提供了有效的技术支持和理论依据。

（2）实现了多维度动态模拟，揭示了更复杂的迁移行为。本研究通过设计垂向土柱淋滤实验，克服了传统短期批处理实验的局限，能够同步模拟重金属在垂向（不同土壤深度）和时间（不同淋滤时段）维度上的连续迁移过程。试验结果清晰地揭示了随土壤深度增加，Pb、Zn 释放浓度呈下降趋势的垂向分布规律，以及酸性条件加速重金属由上向下迁移的动态行为。

（3）引入了复合环境因子控制，明确了关键驱动机制。相较于单一变量控制的传统方法，本研究将淋滤液 pH 值与水力淋滤强度等多个关键环境因子进行耦合控制，更真实地模拟了矿区复杂的降雨与渗流环境。试验明确区分了酸度驱动（化学溶解）与水力驱动（物理搬运）对重金属释放迁移的相对贡献，证实酸性条件（pH=4.5）是促进 Pb、Zn 活化释放的主要因素，而淋滤强度增大则直接提升了其迁移通量。

（4）开展了土壤结构-功能关联分析，深化了释放机理认知。本研究将土壤的物理结构属性（如粒径分布）与其吸附重金属的“功能”进行关联分析。试验表明，细颗粒土壤因吸附能力强而限制了重金属迁移，粗颗粒土壤则更利于迁移。这一发现将宏观迁移现象与微观机理相联系，阐明土壤结构是影响重金属最终迁移路径与归宿的关键内在因素，超越了仅关注外部浓度的传统分析模式。

［References］

Ai Xiaojun, Chen Zhansheng, Hou Hongxing, Yuan Guoli, Xia Rui, Zhao Xiaofeng, Gong Cang, Li Ziqi, Huo Dong, Liu Jiufen. 2024. Distribution characteristics and source analysis of soil heavy metals in the Liaoyang-Dandong region [J]. Rock and Mineral Analysis, 43(5): 755-768(in Chinese with English abstract).

Chen Jia, Fan Pingping, Long Wentao, Tai Liang. 2024. Research progress in mechanism of impact of soil erosion on heavy metal migration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 31(1): 460-470(in Chinese with English abstract).

Han Shanbo, Chou Yaling, Cao Wei, Liu Changdong, Guo Huanming, Peng Erxing. 2023. A review of heavy metal migration transformation and remediation in cold region soils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 46(4): 1369-1385 (in Chinese with English abstract).

Ji Dongru, Qian Jianping, Zhang Xuan, He Jiali. 2024. Study on the release of heavy metals from soil by simulated rainfall leaching [J]. Environmental Pollution & Control, 46(7): 927-932, 940(in Chinese with English abstract).

Jia Hansen, Guo Dongyan, Sun Yingxiang. 2024. Spatial distribution characteristics and influencing factors of green mines in China[J]. Geology and Exploration, 60(4): 820-829 (in Chinese with English abstract).

Jia Zhenjiang, Wu Yangyang, Li Wangcheng, Yao Xiaocui, Ma Dongxiang, Chen Jihong. 2024. Meta-analysis of effects of continuous

cropping on topsoil nutrients in gravel-sand mulched field in arid regions of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 44(15): 6597-6608(in Chinese with English abstract).

Jiang Feng, Feng Xianlu, Wang Pengfei, Jiang Xia. 2022. Research progress on in-situ adsorption of heavy metal ions in sediments with carbon-based adsorbents [J]. China Environmental Science, 42 (10) 4790-4797(in Chinese with English abstract).

Jiang Mengjiao, Wang Xiaodong, Fu Haonan, Chen Shupeng, Tong Xuelin. 2023. Research on the generating mechanism and treatment of fog in the return air wellhead of a metal mine [J]. Safety and Environmental Engineering, 30(2): 44-52, 60(in Chinese with English abstract).

Jiang Xusheng, Cheng Guanwen, Liu Jie, Yu Guo, Chen Shiqi, Han Qingkun, Wang Luyang. 2024. Migration characteristics of salts and heavy metals with rainwater leaching in the co-ecological disposal area consisting of red and dehydrated mineral mud [J]. Journal of Agro-Environment Science, 42 (4): 833-841 (in Chinese with English abstract).

Kang Dejun, Zhang Fang, Lv Jiangdu, Gong Yaping, Zhao Ying, Tuo Xiangyin. 2023. Research on release law and characteristics of heavy metals in coal gangue under soaking and leaching [J]. Research of Environmental Sciences, 36(1): 54-62(in Chinese with English abstract).

Li Jiayi, Zhang Yiteng, Zhou Baochuang, Weng Haiyong, Zhou Beibei, Ye Dapeng, Qu Fangfang. 2024. Inversing soil salinity in cotton fields using spectroscopy sample augmentation and moisture correction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 40(1): 171-181(in Chinese with English abstract).

Liu Jinhe, Zheng Yuna, Liu Peng, Lin Kuangfei, Huang Kai, Zhou Changrui. 2024. Simulation of pollution characteristics and migration law of cadmium in soil of a typical electronic waste dismantling area in Taizhou [J]. Environmental Engineering, 42(8): 150-158(in Chinese with English abstract).

Nisa F U, Umar R. 2024. Heavy metal pollution and health risk assessment using deterministic and monte carlo simulation approaches in the Himalayan spring and surface water systems of Kulgam District, Kashmir Valley, India[J]. Environmental earth sciences, 83(9), 27801-27822.

Song Qiao. 2022. Seismic design and safety evaluation of metal mines under dynamic load [J]. Nonferrous Metals Engineering, 12(4): 109-115(in Chinese with English abstract).

Tang Ji, Jiang Xiao, Jiang Xuelian, Bao Jinkun, Yao Lixiang, Xi Wanxin. 2023. Application of three-dimensional visualization modeling technology of ore bodies in metallogenic mode analysis [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 42(5): 273-284(in Chinese with English abstract).

Tao Ling, Han Xuexin, Ren Hanru, Wang Miao, Sun Xinni, Wang Ruo'an, Ren Jun. 2023. Effect of mineral modified sludge biochar on leaching of heavy metals in soil [J]. Environmental Science & Technology, 46 (9): 95-101(in Chinese with English abstract).

Tian Yuming, Ju Yitai, Zhou Shuangguo. 2022. Thinking on several problems of China's strategic mineral resources security guarantee[J]. Geology and Exploration, 58(1): 217-228 (in Chinese with English abstract).

Wang Junping, Qi Yueming, Ma Yipeng, Ma Chao, Shao Guangyu, Chi Yuhua, Lan Xuan. 2022. Study on the transport law of characteristic pollutants in red mud leachate in saturated sand [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 12(4): 1210-1216(in Chinese with English abstract).

Wang Ye, Liu Guijian, Xu Jingru, Liu Yan. 2024. Pollution and migration characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in waste circuit boards recycling process [J]. Environmental Chemistry, 43(7): 2325-2339(in Chinese with English abstract).

Xiang Chao, Wang Yuanyuan, Zeng Jiaqing, Jiang Pinghong, Zhu Feng, Zhu Xuanzhi, Jiang Jun, Xue Shengguo. 2024. Vertical distribution and influencing factors of arsenic-antimony pollution in soil around smelting slag area [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 34(8): 2773-2786(in Chinese with English abstract).

Xie Peiling, Tan Li, Li Hang, Liu Xinmin. 2024. Effects of soil electric field and mechanical composition on soil phosphorus migration [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 18(3): 886-896(in Chinese with English abstract).

Xu Wen, Zhou Xiaoyun, Zhang Yue, Zhou Jiefu, Sun Yuanyuan, Shi Huading, Bai Lu. 2024. Review on the status and progress of soil heavy metals emission inventory [J]. Journal of Agro-Environment Science, 43(11): 2472-2486(in Chinese with English abstract).

Ye Wenjuan, Qian Shiying, Wu Shiyi, Wang Hongben, Huang Botao. 2024. Contamination and migration characteristics of heavy metals at a typical electroplating site [J]. Environmental Chemistry, 43(4): 1353-1364(in Chinese with English abstract).

Yu Jinpeng, Chao Ying, Yan Xianghui, Luo Feng, Hang Zhongqiao, Chu Yamxu, Li Xu, Yang Quangang, Wang Hui, Pan Hong, Lou Yanhong, Zhuge Yuping. 2024. Research progress on passivation remediation of soil heavy metal pollution [J]. Ecological Science, 43(4): 226-233(in Chinese with English abstract).

Yu Li, Yu Xiaohong, Zhu Jiaxun, Yao Yu, Wang Li, Zhao Ying, Wei Huangzhao. 2024. Study on the risk of heavy metals in coking sludge carbon and its application in coking wastewater treatment [J]. China Environmental Science, 44(6): 3189-3196(in Chinese with English abstract).

Yuan Shanxin, Feng Jingpei, Zeng Jiaqing, Ji Zhihui, Li Mengxuan, Gao Wenyan, Jiang Jun, Xue Shengguo. 2023. Fine description of toxic element distribution in soils of deserted zinc smelter [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 33(7): 2356-2369(in Chinese with English abstract).

Zeng Huan, Zhang Hua, Ding Mingjun, Wang Peng, Huang Gaoxiang, Peng Xiang, Qin Yuan, Yang Yue, Zou Tian'e, Xu Huan, Huang Peng. 2023. Enrichments, migrations, and conversions of heavy metal in the soil/sediment-plant system towards the lake in typical Poyang lake wetland [J]. Environmental Science, 44(2): 781-795(in Chinese with English abstract).

Zhan Fengqi, Li Yanlong, Gai Anjun, Liu Bo, Zhang Junzhong, Li Rundong. 2023. Preparation and characterization of activated boron nitride and its heavy metal adsorption properties [J]. Research of

Environmental Sciences, 36(7): 1317-1328(in Chinese with English abstract).

Zhang Li, Liu Wei, Huang Lei, Ayiguli Maimaiti, Zhang Wenjinglin, Ma Xueqin. 2024. Study on characteristics of heavy metal pollutants leaching from coal gangue by simulation experiment [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 36(3): 68-72(in Chinese with English abstract).

Zhang Jing, Fan Zhanchun, Gong Yongqiang, Xu Xiuyan, Yang Wanying, Fan Xiaozhou, Xie Ming. 2024. Application of portable gas phase molecular absorption spectrometer in emergency monitoring of sulphide in water[J]. Environmental Monitoring in China, 40(6): 229-238(in Chinese with English abstract).

Zhang Yun, Liu Yongzi, Cao Shenggen, Song Tianqi, Zhang Leiming, Sun Haoqiang, Wan Peifeng, Zhan Rui. 2023. Study on the migration law and control of heavy metal ions "downward" in gangue backfill materials in short-wall block backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 40(2): 284-294(in Chinese with English abstract).

Zhao Liqun, Wang Chunnü, Zhang Min, Chen Tong, Mo Linchao, Wang Pinghu. 2020. Current exploration status and supply-demand situation of iron ore resources in China Mainland[J]. Geology and Exploration, 56(3): 635-643 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhongqiang, Xia Dinghong, Zhang Jialin, Li Zhenyang, Zeng Liyuan, Song Yinxian, He Hongming, Chen Zhong. 2024. The migration and enrichment of heavy metals in Tengchong watershed with volcanic rock distribution [J]. Acta Geoscientica Sinica, 45(4): 623-636(in Chinese with English abstract).

［附中文参考文献］

艾晓军，陈占生，侯红星，袁国礼，夏锐，赵晓峰，龚仓，李子奇，霍东，刘玖芬. 2024. 辽阳-丹东地区土壤重金属分布特征与源解析[J]. 岩矿测试，43(5)：755-768.

陈佳，范萍萍，龙文涛，邰良. 2024. 土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制研究进展[J]. 水土保持研究，31(1)：460-470.

韩善博，丑亚玲，曹伟，刘长东，郭焕明，彭尔兴. 2024. 寒区土壤重金属迁移转化与修复治理研究进展[J]. 冰川冻土，46(4)：1369-1385.

纪东如，钱建平，张璇，何家立. 2024. 模拟降雨淋洗对土壤重金属释放规律的研究[J]. 环境污染与防治，46(7)：927-932，940.

贾汉森，郭冬艳，孙映祥. 2024. 中国绿色矿山空间分布特征及其影响因素分析[J]. 地质与勘探，60(4)：820-829.

贾振江，吴洋洋，李王成，姚晓翠，马东祥，陈继虹. 2024. 中国西北旱区砂田表层土壤养分效应对连作响应的整合分析[J]. 生态学报，44(15)：6597-6608.

姜枫，冯显露，王鹏飞，姜霞. 2022. 碳基吸附剂原位吸附底泥重金属离子研究进展[J]. 中国环境科学，42(10)：4790-4797.

蒋梦娇，王孝东，符浩南，陈书鹏，童学林. 2023. 某金属矿山回风井口雾气产生机理及治理研究[J]. 安全与环境工程，30(2)：44-52，60.

蒋旭升，成官文，刘杰，俞果，陈诗奇，韩庆坤，王路洋. 2023. 赤泥和脱水矿泥协同生态处置区盐分和重金属随雨水淋溶的迁移特征[J]. 农业环境科学学报，42(4)：833-841.

康得军，张芳，吕茫芒，龚亚萍，赵颖，脱向银. 2023. 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，36(1)：54-62.

李佳怿，张翼腾，周宝闯，翁海勇，周蓓蓓，叶大鹏，瞿芳芳. 2024. 光谱技术结合水分校正与样本增广的棉田土壤盐分精准反演[J]. 农业工程学报，40(1)：171-181.

刘金河，郑宇娜，刘鹏，林匡飞，黄凯，周长瑞. 2024. 台州某典型电子废物拆解区土壤中镉污染特征及其迁移规律模拟[J]. 环境工程，42(8)：150-158.

宋乔. 2022. 动荷载作用下金属矿山防震减震设计及安全性评估[J]. 有色金属工程，12(4)：109-115.

唐骥，蒋潇，姜雪莲，包金坤，姚丽香，席万鑫. 2023. 矿体三维可视化建模技术在成矿模式分析中的应用[J]. 地质科技通报，42(5)：273-284.

陶玲，韩学鑫，任汉儒，汪淼，孙新妮，王若安，任珺. 2023. 矿物改性污泥生物炭对土壤重金属浸出的影响[J]. 环境科学与技术，46(9)：95-101.

田郁溟，琚宜太，周尚国. 2022. 我国战略矿产资源安全保障若干问题的思考[J]. 地质与勘探，58(1)：217-228.

王俊萍，齐跃明，马仪鹏，马超，邵光宇，池玉花，兰璇. 2022. 赤泥淋滤液特征污染物在饱和砂土中的运移规律研究[J]. 环境工程技术学报，12(4)：1210-1216.

王烨，刘桂建，许经茹，刘严. 2024. 废线路板利用过程重金属污染特征、迁移及风险评估[J]. 环境化学，43(7)：2325-2339.

向超，王媛媛，曾嘉庆，姜苹红，朱锋，朱轩郅，江钧，薛生国. 2024. 冶炼渣堆周边土壤砷锑垂向迁移分布及影响因素[J]. 中国有色金属学报，34(8)：2773-2786.

谢佩玲，谭立，李航，刘新敏. 2024. 土壤电场和机械组成对土壤磷迁移的影响[J]. 环境工程学报，18(3)：886-896.

许文，周潇云，张玥，周杰甫，孙园园，师华定，白璐. 2024. 土壤重金属污染源清单研究现状及进展[J]. 农业环境科学学报，43(11)：2472-2486.

叶文娟，钱诗颖，吴诗怡，王鸿犇，黄波涛. 2024. 典型电镀场地重金属污染及迁移特征[J]. 环境化学，43(4)：1353-1364.

于金鹏，晁赢，阎祥慧，罗锋，杭中桥，褚衍旭，李旭，杨全刚，王会，潘红，娄燕宏，诸葛玉平. 2024. 土壤重金属污染钝化修复研究进展[J]. 生态科学，43(4)：226-233.

余丽，宇晓虹，朱嘉讯，药钰，王莉，赵颖，卫皇曌. 2024. 焦化污泥炭重金属风险及其处理焦化废水研究[J]. 中国环境科学，44(6)：3189-3196.

袁珊欣，冯静培，曾嘉庆，纪智慧，李楚璇，高文艳，江钧，薛生国. 2023. 某废弃锌冶炼场地土壤重金属污染的精细刻画[J]. 中国有色金属学报，33(7)：2356-2369.

曾欢，张华，丁明军，王鹏，黄高翔，彭翔，秦瑗，杨越，邹天娥，徐欢，黄鹏. 2023. 鄱阳湖典型湿地土壤-植物系统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析[J]. 环境科学，44(2)：781-795.

詹凤琪，李彦龙，盖安俊，刘博，张峻中，李润东. 2023. 活性氮化硼的制备、表征及其对重金属离子的吸附特性研究[J]. 环境科学研究，36(7)：1317-1328.

张丽，刘伟，黄蕾，阿依古丽•买买提，张雯靖林，马雪琴. 2024. 煤矸石模拟淋滤实验中重金属污染物的释放特征分析[J]. 环境监测管理与技术，36(3)：68-72.

张静，樊占春，弓永强，许秀艳，杨婉莹，范晓周，谢明. 2024. 便携式气相分子吸收光谱仪在水质硫化物应急监测中的应用[J]. 中国环境监测，40(6)：229-238.

地质与勘探

张云，刘永孜，曹胜根，宋天奇，张雷铭，孙浩强，万培烽，詹睿. 2023. 短壁块段式充填采煤矸石充填材料重金属离子"下行"迁移规律及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报，40(2)：284-294.
赵立群，王春女，张敏，陈彤，莫凌超，王平户. 2020. 中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析[J]. 地质与勘探，56(3)：635-643.
赵忠强，夏顶洪，张佳琳，李振阳，曾丽源，宋垠先，何洪鸣，陈忠. 2024. 腾冲火成岩分布地区流域重金属元素迁移富集规律[J]. 地球学报，45(4)：623-636.

The Release and Migration Regularity of Heavy Metal Elements in Soil of Tailings Pond Area of Metal Mines

ZHENG Zhong[1,3], LI Mengxing[2], ZHANG Shangqing[1,3]
(1. *Shanxi Province Key Laboratory of Metallogeny and Assessment of Strategic Mineral Resources*, *Taiyuan*, *Shanxi* 030006; 2. *Xi'an Center of Mineral Resources Survey*, *China Geological Survey*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710100; 3. *Shanxi Institute of Geological Survey Co.*, *Ltd.*, *Taiyuan*, *Shanxi* 030006)

Abstract: To reveal the occurrence forms, release mechanisms, and migration pathways of heavy metals in the soil surrounding tailings ponds, this work proposes a research method for the release and migration regularity of heavy metal elements in soil of tailings ponds area of metal mine. This method takes a large copper mine as the study area, divides the tailings pond into 50 m × 50 m grids. Sampling points were set at the center of each grid and at different positions along vertical sections. Surface soil samples from the top 20 cm were collected, pretreated, and analyzed for heavy metal content using an inductively coupled plasma atomic emission spectrometer. Simultaneously, a leaching test apparatus was designed to leach the soil column with leachate of different pH values (4.5, 6.0, 7.5) and leaching intensities (55 mm/h, 110 mm/h, 180 mm/h). The release concentrations of Pb and Zn in the leachate were measured using an atomic absorption spectrophotometer at different depths of soil and under different leaching conditions to analyze the release and migration patterns of heavy metal elements in the soil. Experiments have shown that soil particle size affects the migration of heavy metals. Fine particles have strong adsorption capacity, limiting the migration of heavy metals, while coarse particles facilitate migration. Under acidic conditions (pH 4.5), the release concentration of Pb and Zn is higher, making it easier to migrate from the upper layer to the lower layer of the soil column. As the leaching intensity increases, the release concentration of Pb and Zn at each outlet increases, and the migration amount increases. Vertically, with increasing soil depth, the release concentrations of Pb and Zn in each soil column show a decreasing trend. Acidic conditions accelerate the migration of heavy metals from the upper layer to the lower layer, increase pH, reduce heavy metal release, and result in relatively high residual concentrations. This study clarifies the release and migration behaviors of heavy metals in the soil of tailings ponds under different environmental conditions and the key driving factors. The research results have significant theoretical value for scientifically assessing the soil pollution risks around tailings ponds and predicting the long-term migration trends of heavy metals. They also provide reliable data support and scientific basis for formulating targeted ecological restoration and pollution prevention and control strategies in the tailings pond area.

Key words: metal mines, tailings pond area, soil heavy metals, element release, migration regularity, leaching test apparatus

地质与勘探