

矿区重金属的形态分布特征与风险评价

吴佳咪¹, 陈佳进¹, 杨成方^{1*}, 金典¹, 许佳璐¹, 姚帆²

¹徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州

²江苏通标环保科技发展有限公司, 江苏 徐州

收稿日期: 2024年9月2日; 录用日期: 2024年10月5日; 发布日期: 2024年10月31日

摘要

人为的采矿废水、废弃矿自然风化以及污水灌溉等, 导致大量的重金属被赋存到农田土壤中, 对人类健康和环境构成潜在风险。本研究旨在阐述矿区土壤中重金属的赋存形态, 影响因素和迁移转化途径, 并评价其相关风险。矿区土壤矿物组成和pH值是矿区土壤重金属赋存形态差异的主导因素, 土壤性质、土壤微生物、动植物、环境因素土地利用等也是影响重金属赋存的重要影响因素。矿区土壤重金属污染评价的方法(内梅罗综合污染指数法、污染负荷指数法)和模型(潜在生态风险评估法、地积累指数法)。此外, 我们还讨论了在矿区土壤中重金属赋存形态研究的新方法和思路, 新的环境影响风险评估以及未来的研究方向。为进一步有效地降低重金属对矿区土壤的危害奠定了理论基础。

关键词

矿区农田土壤, 重金属, 元素赋存形态

Characteristics of Heavy Metal Speciation Distribution and Risk Assessment in Mining Areas

Jiami Wu¹, Jiajin Chen¹, Chengfang Yang^{1*}, Dian Jin¹, Jialu Xu¹, Fan Yao²

¹School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

²Jiangsu Tongbiao Environmental Protection Technology Development Co. Ltd., Xuzhou Jiangsu

Received: Sep. 2nd, 2024; accepted: Oct. 5th, 2024; published: Oct. 31st, 2024

Abstract

Human activities such as mining wastewater, natural weathering of abandoned mines, and sewage

*通讯作者。

文章引用: 吴佳咪, 陈佳进, 杨成方, 金典, 许佳璐, 姚帆. 矿区重金属的形态分布特征与风险评价[J]. 土壤科学, 2024, 12(4): 225-235. DOI: 10.12677/hjss.2024.124025

irrigation have resulted in a large amount of heavy metals being deposited into farmland soils, posing potential risks to human health and the environment. This study aims to elucidate the occurrence state, influencing factors, and migration and transformation pathways of heavy metals in mining area soils, and to assess the associated risks. The mineral composition and pH of mining area soils are the dominant factors affecting the differences in heavy metal occurrence state, while soil properties, soil microorganisms, flora and fauna, environmental factors, and land use are also important influencing factors. Methods and models for evaluating heavy metal pollution in mining area soils include the single factor pollution index method, the Nemerow comprehensive pollution index method, and the pollution load index method. Additionally, we discuss new methods and approaches for studying the occurrence state of heavy metals in mining area soils, new environmental impact risk assessments, and future research directions. This lays a theoretical foundation for further effectively reducing the harm of heavy metals to mining area soils.

Keywords

Farmland Soil in Mining Areas, Heavy Metals, Element Occurrence State

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市化和工业化的发展,固体废弃物处理不善,农业自身污染的加剧,矿业开采过程中尾矿和废矿的修复不足等,导致部分耕地和近郊农田被严重污染,矿区周边农田主要的污染来自尾矿和废矿浸出的重金属[1]。矿业活动的进行,尤其是在开采、选矿和冶炼过程中,释放大量具有高度的毒性和持久性的重金属元素,不仅对土壤环境构成威胁,还可能影响水体、空气和生态系统,进而对人类健康产生潜在危害。

根据《全国土壤污染状况调查公报》显示:70个被调查矿区中主要污染物为镉、铅、砷。这是因为有色金属矿山选矿造成的水土流失、重金属氧化溶出等,导致矿区农田土壤被污染。因此,金属矿山开采过程中产生大量酸性矿山废水[2]-[4],是矿区周围土壤重金属(Cr、As、Sb、Pb)污染的主要来源[5]-[7]。土壤重金属污染由于残留期长、迁移小、隐蔽性、复杂性等特点成为土壤污染领域中最棘手的问题。另外,土壤中重金属来源复杂及其强空间变异性,它们的迁移和积累过程会受到环境中多因子的影响,这些环境因子又会直接影响重金属在土壤中的形态分布及迁移转化规律[4]。通过研究矿区污染农田土壤中重金属的分析,了解其在土壤中的稳定性、迁移转化及生态环境影响。并在此基础上,评估重金属对环境和人类健康的影响,对农区、矿区土壤重金属污染防治具有重要意义,具有科学依据。

本研究试图分析矿区土壤受到重金属污染后,重金属在土壤中的形态赋存状况及其赋存差异的主要影响因素,揭示土壤重金属的赋存形态和土壤性质之间的关系,阐释重金属在土壤中赋存形态的机制,并进一步对土壤重金属的污染情况评价的方法进行总结。重金属作为重要的有毒组分,其赋存形态可准确地评估环境健康效应,为土壤重金属污染防治和生态环境保护提供了重要的理论和实践支持,减少影响重金属对人体健康的影响。

2. 矿区土壤重金属赋存形态及其影响机制

我国有色金属矿产存在品位低、共生、伴生、利用率低、全部回收难等,在风化、降雨等自然条件

下,使得尾矿和废矿被氧化浸出大量酸和重金属,从而造成酸水——多种重金属协同/复合污染[8]。这些污染物通过下降进入水库的地下水系统,在矿区农田生态系统中不断扩散,造成难以修复的破坏。

土壤重金属污染效应与重金属的形态分布和活性密切相关,因此前人对矿区农田土壤中重金属赋存状态(富集及迁移机制)进行大量研究,主要表现在下述方面:① 借鉴土壤重金属连续提取法, Tessier 法[9]和 BCR 法,研究矿区土壤重金属的化学形态[10]、工业污染地重金属迁移性及毒性评估[11];② 研究在深层土壤或稻田土壤氧化还原条件下,土壤中金属的释放潜力[12];③ 研究矿区农田土壤酸化条件产生的次生矿物,如施氏矿物、石膏及黄钾铁矾等对重金属迁移的影响机制[13]。

由于矿区农田土壤中重金属污染的浓度高、种类多、危害严重等,以及当前研究结果中仍然存在很多需要解决的问题,有必要进一步对矿区耕地土壤中各种重金属的浓度、形态、富集、迁移机制以及污染指数和污染模型进行深入研究,为制定防控计划提供依据,并进一步指导“矿区采矿边采边修复”的处理技术、预防方法和控制技术。

2.1. 矿区农田土壤中矿物对重金属的富集作用

重金属在土壤中富集的机制之一是它们与土壤基质中存在的矿物相互作用。矿物可以作为重金属的库,将重金属吸附并保留在晶体结构或表面上[1] [14]。矿物对重金属的富集能力因其表面积和化学成分的不同而不同,铁氧化物或羟基氧化物是矿区农田土壤中重金属吸附和富集的主要矿物,尤其是针铁矿和赤铁矿[15]。这些矿物质具有高表面积和对重金属的强亲和力,使它们成为金属污染物的汇。其他矿物,如黏土和硫化物,也在重金属富集中发挥作用,尽管程度较小。重金属在不同矿物相中的分布还取决于土壤中重金属的类型和浓度,例如,铅和镉主要与氧化铁有关,而砷则分布在不同的矿物相中[16]。这表明土壤矿物对重金属的富集作用是复杂的,取决于多种因素,包括矿物特性、pH 值和有机质含量等。

由矿区农田土壤次生矿物在山地土壤中铺设和胶结形成的矿物层可以形成物理屏障,可以使金属固定,从而限制它们释放到环境中[17]。矿区农田土壤中矿物层的研究受到很多学者的重视并得到进一步发展。例如,矿区农田土壤中矿物层中矿物组成、结构、相变等对重金属扩散的影响[9],矿区农田土壤中胶结层形成演化的过程模拟研究[18],以及固体层微沉积结构的矿物解离分析[1],其次,研究了矿物变化过程中重金属的迁移和转化机理及其可能的影响环境因子,如次生石膏钙、重金属吸附、四方黄铁矿(FeS)和胶体 As 等[19]、黄铁矿氧化以及引起重金属浸出、分离、迁移[12]、方铅矿酸性条件下的溶解动力学特性[20] [21]。因此了解矿物在矿区农田土壤重金属富集中的作用机制,对于评估与重金属污染相关的环境风险和制定有效的修复策略至关重要。

2.2. 矿区农田土壤中 pH 值与重金属释放的相关性

土壤酸化是矿区常见的环境问题,它可能导致重金属释放到土壤溶液中,对环境和人类健康构成风险。土壤酸化可以改变土壤中重金属的化学形态,使得原本固定在土壤颗粒或矿物表面的重金属被释放到土壤溶液中,增加其毒性和生物有效性。Hayes 等(2009) [21]研究了矿区农田土壤中风化致酸作用对重金属(Pb、Zn、Ni 等)稳定性的影响;另外土壤酸化也可能改变土壤中重金属与土壤颗粒或有机质之间的相互作用,影响重金属的迁移和转化过程。

有机质含量、矿物质组成也能影响土壤酸化中重金属的形态变化及迁移。Liu 等人[18]研究了江西某铜矿区土壤中铅的形态分布情况发现该矿区土壤中铅的形态分布受 pH 值和有机质含量的影响较大。不同的重金属在不同的土壤酸度条件下释放的情况也有所不同,有些重金属对酸度的敏感性更高,而有些则相对稳定。土壤矿物随 pH 值的变化会产生相转化,进而影响重金属释放,如在酸性条件下,氧化铁和氢氧化物会变得不稳定从而转化为磁铁矿或者赤铁矿,赋存能力降低,重金属释放到土壤溶液中。因此

一般认为土壤酸化与重金属释放有较强的正相关性,酸化促进了重金属向土壤溶液中的释放。Wang 等人[22]:研究发现,在华南某矿区土壤中,重金属形态与土壤 pH 值呈显著相关。土壤酸化可以增强重金属的流动性和生物利用度,增加环境污染的风险,并对生态系统和人类健康产生不利影响。通过表征土壤酸化特征,量化土壤溶液中重金属浓度,研究影响重金属释放的主导因素,进而评估土壤酸化对重金属污染的环境风险的影响。

2.3. 矿区重金属赋存形态

国内外矿区重金属形态研究的发展趋势:从宏观的矿区农田土壤重金属的时空分布特征、土壤理化条件、重金属释放潜力及赋存形态影响因素研究,到微观的土壤中微观组构、矿物结构及矿物有机复合体的影响机制研究。此外,土壤中不同形式的重金属根据其化学形态的不同,具有不同程度的移动性和毒性。Li 等人[17]研究了陕西某矿区土壤中重金属形态的时空分布特征,不同时间和空间尺度下土壤中重金属形态的分布存在明显差异,受多种因素影响。

土壤中重金属的赋存形态决定了重金属的迁移能力、生物可利用性和其环境风险值,重金属赋存形态的研究方法多种多样。主要的方法有:(1)可以通过淋滤柱实验方法对矿区农田土壤中重金属(As、Cd、Zn)的化学形态、释放迁移进行模拟研究[3] [23],如采用毒性特征淋滤程序(TCLP)与长期淋滤技术相结合,研究微生物硫酸盐还原固定 As 的作用,以及有机碳对矿区农田土壤中重金属(Zn、Cu)淋滤作用的影响。(2)使用原子吸收光谱法(AAS)或电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等分析技术分析每个馏分中的重金属浓度。(3)使用地球化学模拟软件(如 PHREEQC 等)可以模拟不同环境条件下重金属形态的变化,从而推断矿区土壤中重金属的赋存形态及其受控制的因子[24];(4)SR-XRF 技术可分析土壤样品中不同形态重金属的含量和分布,并不破坏土壤性质组成有助于深入了解重金属的赋存形态[25]。

重金属的赋存形态受到土壤性质、土壤微生物、动植物、环境因素和土地利用及采矿活动的影响。土壤性质会影响重金属与土壤颗粒和有机质的结合;土壤生物会影响土壤的区域微环境如植物根际、动物和微生物作用等,不同形态重金属之间存在相互转化的过程,也影响着其在土壤中的迁移和生物有效性。不同研究可能得出不同的结论,认为不同的因素对重金属形态的影响程度不同。例如 Lei 等人研究某矿区土壤中铬的形态分布认为土壤 pH 值是主导因素[26],而 Zhang 等人研究发现土壤中汞的形态分布及其环境因素,认为有机质含量是主导因素,有机质结合态占总量的 15%,残渣态占总量的 60% [15]; Wang 等人研究矿区土壤中重金属形态的时空变化发现,重金属形态的变化受多种因素影响,受人类活动影响最大[5] [27]。

综上所述,未来矿区重金属形态研究将综合考察矿区农田土壤总酸度(产酸量)、基本理化性质、矿物成土母质类型、新生次生矿物以及其他环境因子等多种因素。它结合了机器学习、模拟计算和实验模拟,以确定矿区农业土壤中重金属的化学形貌、稳定性和运动。有必要对重金属形状与土壤和植物微生物之间的相互作用机制深入研究。

2.4. 矿区土壤重金属迁移转化

矿区土壤重金属迁移转化是一个复杂的过程,涉及物理、化学和生物学的相互作用。在土壤中,重金属可以通过物理迁移、化学迁移和生物迁移等方式进行迁移。这些过程会直接影响重金属在土壤中的空间分布和浓度变化[19]。理化过程主要包括扩散与迁移、淋溶作用、氧化还原反应、络合与螯合,生物过程如微生物作用,动植物吸收与转运等。这些作用有时也是综合到一起影响重金属的赋存机制,如矿区的人类活动,如采矿、冶炼、尾矿处理等,会向土壤中引入大量的重金属,这时重金属主要是可交换态和弱酸可提取态,重金属进入土壤后,会与土壤中的物质发生反应,形成不同的形态(吸附态、铁锰氧

化物结合态、有机物结合态), 农业活动也可能改变土壤的理化性质, 进而改变重金属的赋存形态[28], 见图 1。此外, 环境因素如温度、湿度、降雨等也会影响重金属在土壤中的形态分布[29] [30]。例如, 降雨可以冲刷土壤表层的重金属, 使其进入地下水或河流; 温度的变化可以影响微生物的活性, 进而影响重金属的生物转化过程。

综上所述, 为了有效控制和治理矿区土壤重金属污染, 需要深入了解重金属的赋存机制, 并采取相应的措施来减少重金属的输入、促进重金属的稳定化和降低其对环境 and 生物体的风险。同时, 制定和实施有效的土壤重金属污染修复和预防措施也至关重要, 以保护土壤生态环境和人类健康。



Figure 1. The main factors affecting the distribution of heavy metals in mining areas
图 1. 影响矿区重金属分布的主要因素

3. 矿区土壤重金属污染情况的评价

3.1. 对评价预测

首先, 矿区农田土壤重金属污染的评估和预测主要基于矿区农用土壤重金属总含量, 以及《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的重金属指数评价标准和 Nemerlo 指数等相关评价指标的计算, 以及建立模型进行相关预测[21] [24]。仅根据重金属总浓度来评价其环境污染风险是比较困难的。由于重金属的总浓度(含量)不能完全反映其迁移率、生物利用度以及其生态风险。因此需要了解重金属在不同载体(土壤)物理化学阶段元素的结合形式、结合价态和其稳定性变得越来越重要[31]; 同时, 重金属在自然界中的生物毒性和生态环境危害性与其总浓度不完全正相关, 而是由其赋存形态、赋存价态、结合键等决定[32]。矿区农田土壤具有成土母质多样、次生矿物复杂、有机质容易形成矿物有机复合体等特点, 需要对现有评价方法的应用范围、结果、适合性等进行重新检查。

现有研究范围或者选择区域大多是针对选定的某一典型或小范围矿区的农田土壤, 缺乏对整个矿区生态环境, 也缺乏创新型研究, 如研究环境因子也是基于前人研究或者研究者既定的目标因子。此外, 由于使用了不同的形态研究方法, 提取或者计算的元素化学样品的结果之间具有较差的相关性[33]。总之, 通过已有的研究结果, 不足以全面了解整个金属矿区农用土壤中重金属的赋存形态、迁移转化、生态风险评价等。此外, 现有研究主要集中在矿区农田土壤中重金属化学形态、价态、浓度和迁移规律的

试验、分析、建模、评价等，对多种复杂因素对矿区农田土壤重金属生成状态的影响的研究还相对较少[34]。

3.2. 评价方法

研究区土壤重金属 Cu、Zn、As、Cd、Pb 评价，参考矿区土壤背景值[20]和 GB15618-2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(pH < 5.5)的风险筛选值、风险管制值为评价标准。

3.2.1. 单因子污染指数法

$$P_i = w_i / S_i$$

其中 P_i 、 w_i 和 S_i 分别是元素 i 的：单因子指数、浓度(土壤重金属含量/土壤干重)和 GB15618-2018 (pH < 5.5)条件下的风险筛选值[35]。

3.2.2. 内梅罗综合污染指数法

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{i\text{ave}}^2 + P_{i\text{max}}^2}{2}}$$

其中 $P_{i\text{ave}}$ 、 $P_{i\text{max}}$ 和 $P_{\text{综}}$ 三个参数分别是每种重金属元素的：单组分污染指数(P_i)的平均值、最大值和内梅罗综合污染指数，其分级见表 1 [35]。

Table 1. Potential ecological risk index

表 1. 潜在生态风险指数

分级	单因子污染指数(P_i)	单因子污染程度	综合污染指数($P_{\text{综}}$)	综合污染程度
I	$P_i < 0.7$	清洁	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 \leq P_i < 1.0$	轻微污染	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)
III	$1.0 \leq P_i < 2.0$	轻度污染	$1 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 \leq P_i < 3.0$	中度污染	$2 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_i \geq 3.0$	重度污染	$P_{\text{综}} > 3$	重度污染

3.2.3. 潜在生态风险指数法

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出了重金属潜在生态风险指数，该指数旨在评价重金属污染[34]。重点还考虑了生物毒性，可反映多种污染物的综合作用，并对潜在生态风险程度进行定量划分，潜在生态风险指数计算公式如下[36]。

$$E_i = T_i P_i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i$$

其中， E_i 、 T_i 、 P_i 和 RI 分别是单个 i 元素的：潜在生态风险指数、毒性系数、污染指数和综合潜在生态风险指数。

3.3. 污染评价模型

3.3.1. 污染负荷指数法

Tomlinson 等人提出的污染负荷指数方法，主要想通过污染负荷指数反应研究区域的土壤综合污染程度，更加全面地反应该区域土壤污染整体程度[37]。其公式为：

$$PLI = \left(\prod_{i=1}^n CF_i \right)^{\frac{1}{n}}$$

式中参数的主要含义： PLI (重金属污染负荷指数)、 $CF_i = C_i/C_{ib}$ ，即重金属 i 的污染系数 = 监测分析 i 的浓度/ i 的参比值。一般 PLI 划分为 4 个等级：无污染(<1)、中等污染(1~2)、强污染(2~3)、极强污染(≥ 3)

某一区域土壤污染负荷程度计算公式为

$$P = \left(\prod_{i=1}^m PLI_i \right)^{\frac{1}{m}}$$

式中， P 和 m 分别为：区域土壤污染负荷指数和采样点数量。

3.3.2. 潜在生态风险评价法

潜在环境风险评价方法的重点是重金属的含量、半致死性及其在整个风险中的相对贡献，本方法在重金属污染土壤的生态环境风险评价中较多被应用。

$$RI = \sum_{i=1}^m T_r^i \times P_i$$

$$P_i = \frac{C_d^i}{C_r^i}$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i$$

其中， RI 、 E_r^i 、 T_r^i 、 P_i 、 C_r^i 和 C_d^i 分别为评价重金属 i 的：生态风险指数、风险因子、半致死性(毒性系数)、 i 金属污染系数、 i 金属背景值、 i 金属监测浓度[36]，其分级见表 2。

Table 2. Potential ecological risk index classification

表 2. 潜在生态风险指数分级

危害程度	E_r^i	RI
轻微生态危害	<40	<150
中等生态危害	40~80	150~300
强生态危害	80~160	300~600
很强生态危害	160~320	≥ 600
极强生态危害	≥ 320	

3.3.3. 地积累指数法

地质积累指数(I_{geo})的重点是考虑了自然地质过程特别是土壤的成土母质引起的基线值的影响，并在此基础上充分强调了人类活动对土壤造成的污染，特别是重金属污染程度的影响[34]。计算式为

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{KB_i} \right]$$

式中， I_{geo} 、 C_i 、 K 和 B_i 四个参数的含义分别是：地积累污染指数、元素 i 的监测值、修正指数(一般为 1.5)和元素 i 土母质引起的基线值(mg/kg)。

3.4. 未来评价方法

目前国内外研究所使用的土壤环境质量评价方法已经有很多，主要集中在三个方面：(1) 应用多尺度

综合评价方法对研究区域污染状况进行评价,即将微观尺度(如单个颗粒)、中尺度(如样地)和宏观尺度(如区域)的评价方法结合起来,实现对矿区土壤重金属污染的全面评价(见图2)。(2)对现有的评价方法进行智能化和自动化,寻求更科学合理的评价方法;(3)从生物标志物角度对土壤进行监测评价,如利用蚯蚓生态功能来指示土壤污染状况。

近年来,土壤重金属的污染的评价方法也在快速发展如多元统计分析和模型构建评价、智能化和自动化评价、污染过程模拟评价等[2]。多元统计分析和模型构建方法能够在多个对象和多个指标互相关联的情况下分析它们的统计规律,深入研究土壤重金属污染的影响机制和评价方法[3]。

未来评价方法可能会更加智能化和自动化,利用人工智能、机器学习等技术处理大量数据,并提供更准确、快速的评价结果。例如遥感技术在土壤重金属污染评价中的应用也在逐渐增加,为快速获取大范围土壤重金属污染信息提供了新途径。污染过程模拟结合研究区域的地理环境信息以及气候因素,对传统的土壤重金属污染扩散模型进行改进;对影响土壤重金属污染的水平扩散的因素和污染扩散过程进行模拟,将土壤重金属元素的扩散过程可视化,将理论模型的模拟结果具象化。

综合上述,未来在实际应用过程中,需根据实际情况选择合适的方法,需要对土壤生态环境健康监测技术进行标准化和量化;利用多尺度综合评价进行土壤监测;结合遥感和物联网技术扩大土壤时空监测尺度,形成完整的土壤生态环境监测体系。并结合多种评价指标进行综合评价,以确保评价结果的准确性和可靠性,从而为环境保护和土壤管理提供科学依据。



Figure 2. Transformation and migration of heavy metals in mining area

图2. 矿区重金属赋存形态转化及其迁移过程

4. 未来的研究趋势和关键问题

矿区农田土壤中重金属赋存状态的研究一直为国内外所重视。矿区土壤的组成特别是矿物、有机质、pH值等会随着重金属的持续性输入发生变化,这种变化进而影响到重金属在土壤中分布、价态、结合形式及赋存形态。探究土壤组成和环境因子变化对重金属分布及其形态变化的生物地球化学机制,将有助于我们更准确地预测矿区土壤的时空变化特性以及重金属的迁移转化行为。目前,对于矿区农田土壤中重金属的赋存状态已有一定的研究,但未来可以重点关注以下几个方面。

1、重金属形态分布特征的研究。研究不同形态(可交换态、残渣态、有机质结合态等)重金属在农田

土壤中的含量及其分布规律, (1) 揭示其在不同形态下的变化趋势, 并深入研究重金属在土壤中的迁移转化机理, (2) 揭示其在不同环境条件下的变化机理; (3) 机器学习、模拟计算和实验模拟等方法在重金属形态分布方面的研究。

2、来源识别与迁移规律的研究。新型检测手段在土壤重金属形态分布应用以及未来利用多尺度综合评价进行土壤监测; 结合遥感和物联网技术扩大土壤时空监测尺度, 形成完整的土壤生态环境监测体系, 给出一个更加综合的评价结果。

3、重金属形态与土地类型关系及其生物影响的研究。首先未来需要更加清楚重金属形态在不同土地利用类型下的差异及其对土壤环境的影响, 其次重金属形态与土壤微生物群落结构的关系, 以及重金属形态对作物生长的影响及其对生态系统功能的影响, 最后可深入研究重金属形态与土壤有机质的相互作用机制, 以及不同形态重金属对农作物品质和安全的影响。

基金项目

国家自然科学基金项目(41807368), 江苏省徐州市政策引导类计划(重点研发)项目(KC23376), 江苏省产学研合作项目(BY2021156)。

参考文献

- [1] Widerlund, A., Shcherbakova, E., Carlsson, E., Holmström, H. and Öhlander, B. (2005) Laboratory Study of Calcite-Gypsum Sludge-Water Interactions in a Flooded Tailings Impoundment at the Kristineberg Zn-Cu Mine, Northern Sweden. *Applied Geochemistry*, **20**, 973-987. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.12.003>
- [2] 党志, 姚谦, 陈锴, 等. 粤北大宝山矿区污染成因与源头控制技术应用进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1377-1386.
- [3] 蔡永兵, 孙延康, 孟凡德, 等. 典型金矿区入湾河流重金属的时空分布特征及风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1167-1178.
- [4] Zhang, W., Xin, C. and Yu, S. (2023) A Review of Heavy Metal Migration and Its Influencing Factors in Karst Groundwater, Northern and Southern China. *Water*, **15**, Article No. 3690. <https://doi.org/10.3390/w15203690>
- [5] Demir, A. (2020) Speciation, Risk Assessment and Bioavailability of Metals in the Agricultural Soils of the Göksu Delta, Turkey. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **30**, 292-313. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1839740>
- [6] Din, I.U., Muhammad, S. and Rehman, I.U. (2022) Heavy Metal(loid)s Contaminations in Soils of Pakistan: A Review for the Evaluation of Human and Ecological Risks Assessment and Spatial Distribution. *Environmental Geochemistry and Health*, **45**, 1991-2012. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01312-x>
- [7] Zhang, J., Tian, S., Zeng, J. and Liu, Z. (2023) Analysis of the Sources and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil of an Ion-Type Rare Earth Mining Area in Southern Jiangxi. *Eurasian Soil Science*, **56**, 1522-1531. <https://doi.org/10.1134/s106422932360077x>
- [8] Favas, P.J.C., Pratas, J., Gomes, M.E.P. and Cala, V. (2011) Selective Chemical Extraction of Heavy Metals in Tailings and Soils Contaminated by Mining Activity: Environmental Implications. *Journal of Geochemical Exploration*, **111**, 160-171. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.04.009>
- [9] Meima, J.A., Graupner, T. and Rammlair, D. (2012) Modeling the Effect of Stratification on Cemented Layer Formation in Sulfide-Bearing Mine Tailings. *Applied Geochemistry*, **27**, 124-137. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.024>
- [10] Davidson, C.M., Duncan, A.L., Littlejohn, D., Ure, A.M. and Garden, L.M. (1998) A Critical Evaluation of the Three-Stage BCR Sequential Extraction Procedure to Assess the Potential Mobility and Toxicity of Heavy Metals in Industrially-Contaminated Land. *Analytica Chimica Acta*, **363**, 45-55. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(98\)00057-9](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(98)00057-9)
- [11] Ribeta, I., Ptacek, C.J., Blowes, D.W. and Jambor, J.L. (1995) The Potential for Metal Release by Reductive Dissolution of Weathered Mine Tailings. *Journal of Contaminant Hydrology*, **17**, 239-273. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(94\)00010-f](https://doi.org/10.1016/0169-7722(94)00010-f)
- [12] Baba, A.A. and Adekola, F.A. (2011) Comparative Analysis of the Dissolution Kinetics of Galena in Binary Solutions of HCl/FeCl₃ and HCl/H₂O₂. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **18**, 9-17. <https://doi.org/10.1007/s12613-011-0393-1>

- [13] Blowes, D.W., Reardon, E.J., Jambor, J.L. and Cherry, J.A. (1991) The Formation and Potential Importance of Cemented Layers in Inactive Sulfide Mine Tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 965-978. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90155-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90155-x)
- [14] Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L. and Bi, J. (2018) A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Industrial and Agricultural Regions in China: Pollution and Risk Assessment. *Science of The Total Environment*, **642**, 690-700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068>
- [15] Cui, X., Geng, Y., Sun, R., Xie, M., Feng, X., Li, X., *et al.* (2021) Distribution, Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Jinan Iron & Steel Group Soils from China. *Journal of Cleaner Production*, **295**, Article ID: 126504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126504>
- [16] Zhong, X., Chen, Z., Li, Y., Ding, K., Liu, W., Liu, Y., *et al.* (2020) Factors Influencing Heavy Metal Availability and Risk Assessment of Soils at Typical Metal Mines in Eastern China. *Journal of Hazardous Materials*, **400**, Article ID: 123289. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123289>
- [17] Li, H. and Ji, H. (2017) Chemical Speciation, Vertical Profile and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Coal-Mine Brownfield, Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **183**, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.09.012>
- [18] Liu, G., Wang, J., Zhang, E., Hou, J. and Liu, X. (2016) Heavy Metal Speciation and Risk Assessment in Dry Land and Paddy Soils near Mining Areas at Southern China. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 8709-8720. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6114-6>
- [19] Anju, M. and Banerjee, D.K. (2010) Comparison of Two Sequential Extraction Procedures for Heavy Metal Partitioning in Mine Tailings. *Chemosphere*, **78**, 1393-1402. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.064>
- [20] Conesa, H.M., Robinson, B.H., Schulin, R. and Nowack, B. (2008) Metal Extractability in Acidic and Neutral Mine Tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Applied Geochemistry*, **23**, 1232-1240. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.11.013>
- [21] Hayes, S.M., White, S.A., Thompson, T.L., Maier, R.M. and Chorover, J. (2009) Changes in Lead and Zinc Lability during Weathering-Induced Acidification of Desert Mine Tailings: Coupling Chemical and Micro-Scale Analyses. *Applied Geochemistry*, **24**, 2234-2245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.010>
- [22] Li, F., Wichmann, K. and Otterpohl, R. (2009) Review of the Technological Approaches for Grey Water Treatment and Reuses. *Science of The Total Environment*, **407**, 3439-3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- [23] 崔丽蓉, 叶丽丽, 陈永山, 等. 广西露天铝土矿区复垦地土壤重金属空间分布特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2232-2243.
- [24] 郭世鸿, 侯晓龙, 邱海源, 等. 基于形态学分析铅锌矿不同功能区土壤重金属元素的分布特征及污染评价[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2047-2053.
- [25] Ghasemi, M., Bayat, M. and Ghasemi, M. (2023) Experimental Study on Mechanical Behavior of Sand Improved by Polyurethane Foam. *Experimental Techniques*, **47**, 1201-1211. <https://doi.org/10.1007/s40799-023-00633-5>
- [26] Lei, L., Song, C., Xie, X., Li, Y. and Wang, F. (2010) Acid Mine Drainage and Heavy Metal Contamination in Groundwater of Metal Sulfide Mine at Arid Territory (BS Mine, Western Australia). *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **20**, 1488-1493. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(09\)60326-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(09)60326-5)
- [27] 罗谦, 李英菊, 秦樊鑫, 等. 铅锌矿区周边耕地土壤团聚体重金属污染状况及风险评估[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 605-614.
- [28] Ahn, Y., Yun, H., Pandi, K., Park, S., Ji, M. and Choi, J. (2019) Heavy Metal Speciation with Prediction Model for Heavy Metal Mobility and Risk Assessment in Mine-Affected Soils. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 3213-3223. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06922-0>
- [29] Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Singh Sidhu, G.P., Bali, A.S., Bhardwaj, R., *et al.* (2019) Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of India and Ecological Risk Assessment: A State-of-the-Art. *Chemosphere*, **216**, 449-462. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.066>
- [30] 余国营, 吴燕玉. 土壤环境中重金属元素的相互作用及其对吸持特性的影响[J]. 环境化学, 1997(1): 30-36.
- [31] 蔡美芳, 党志. 磁黄铁矿氧化机理及酸性矿山废水防治的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2006(1): 58-61.
- [32] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 风险评价代码法对农田土壤重金属生态风险的评价[J]. 环境化学, 2014, 33(11): 1857-1863.
- [33] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [34] Dold, B. (2003) Speciation of the Most Soluble Phases in a Sequential Extraction Procedure Adapted for Geochemical Studies of Copper Sulfide Mine Waste. *Journal of Geochemical Exploration*, **80**, 55-68. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00182-1](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00182-1)

-
- [35] Zhang, Y., Wang, Z., Zhang, Z., Sun, Q., Luo, Y., Jia, W., *et al.* (2022) Pollution Characteristics, Spatial Distribution, and Health Risk Assessment of Soil Heavy Metal(loid)s in Panxi District, Southwest China: A Typical Industrial City. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **32**, 518-537.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2022.2105812>
- [36] 何东明, 王晓飞, 陈丽君, 等. 基于地积累指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(2): 126-131
- [37] Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R. and Jeffrey, D.W. (1980) Problems in the Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuaries and the Formation of a Pollution Index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, **33**, 566-575.
<https://doi.org/10.1007/bf02414780>