

# 矿区土壤重金属污染研究现状及赋存特性综述

张桓荣

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2024年7月26日; 录用日期: 2024年9月4日; 发布日期: 2024年9月13日

## 摘要

我国矿产资源丰富, 随着矿山的开发和利用, 矿山附近的土壤重金属污染日益加重。目前, 矿山土壤重金属污染问题是我国在环境治理方面的一个严峻考验, 这些重金属元素不仅对矿区周边的土壤、植物、水体以及农作物造成了严重的损害, 而且还破坏了土壤的结构。重金属离子能够在土壤中长期滞留, 且易通过食物链进入人体在体内聚积, 从而危害人体健康以及引起一些地方病。重金属元素在土壤中的赋存特性揭示了它们在土壤中的迁移、转化和生物可利用性, 因此, 了解土壤重金属的形态特征对于评价重金属污染的程度具有重要意义。本文综合概述了国内矿山土壤重金属污染相关的研究进展及污染来源, 深入探究了常用的重金属形态提取方法(Tessier五步提取法和BCR连续法)的优缺点, 并对土壤重金属污染的研究内容、研究方向以及形态提取方法的未来趋势做出展望。

## 关键词

土壤重金属, 来源, 赋存形态

# Overview of the Current Research Status and Occurrence Characteristics of Heavy Metal Pollution in Mining Soil

Huanrong Zhang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 4<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

China has abundant mineral resources, and with the development and utilization of mines, heavy metal pollution in the soil near mines is increasingly severe. At present, the problem of heavy metal pollution in mining soil is a severe test in China's environmental governance. These heavy metal

elements not only cause serious damage to the soil, plants, water bodies, and crops around the mining area, but also destroy the structure of the soil. Heavy metal ions can remain in soil for a long time and easily enter the human body through the food chain, accumulating in the body, thereby endangering human health and causing some endemic diseases. The occurrence characteristics of heavy metal elements in soil reveal their migration, transformation, and bioavailability. Therefore, understanding the morphological characteristics of heavy metals in soil is of great significance for evaluating the degree of metal pollution. This article provides a comprehensive overview of the research progress and pollution sources related to heavy metal pollution in domestic mining soils. It delves into the advantages and disadvantages of commonly used heavy metal form extraction methods (Tessier five-step extraction method and BCR continuous method) and makes prospects for the research content, research directions, and future trends of form extraction methods for soil heavy metal pollution.

## Keywords

Heavy Metals in Soil, Source, Form of Occurrence

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

矿产资源是我国经济发展的主要支柱[1]。金属矿山的开发往往伴生多种重金属元素(具有较高密度和毒性的金属元素,如铅、镉、汞、铬、砷等),在促进经济增长的同时也使得大量的重金属离子通过水体、植物以及大气沉降等途径进入到土壤后,在土壤中富集而造成了生态环境质量逐渐恶化并导致矿区周边土壤受到严重污染[2]。随着世界经济、工业化和城镇化的快速发展,大多数矿区的土壤受矿业活动等因素的影响,这些重金属离子通过粮食、蔬菜、农作物及饮用水等食物链进入人体,威胁着人类的健康[3]-[5]。由于重金属元素具有长期潜伏性、难迁移和易累积等特点[6]。因此,目前由重金属污染所引起的环境问题已成为环境地球化学研究的一个重要领域和攻坚任务。

## 2. 国内矿山土壤重金属污染研究进展

20世纪80年代以来,由采矿工业衍生出来的重金属污染问题日趋严重。近几十年来,世界各地频发由重金属造成的环境污染问题。中国矿产资源丰富,种类齐全,分布广泛,是世界主要矿业大国之一(图1),由于矿山开采过程中技术缺乏,管理不善以及对环境保护的意识不足,导致在开采过程中产生了大量的酸性废水、废气和尾矿渣等污染物,使得矿山及其周围环境受到了严重污染。目前,我国土壤重金属污染问题日益突出,全国铅锌矿产资源相对比较丰富的地区有云南、贵州、湖南及陕西等地[7][8]。因此,对土壤中重金属元素含量水平进行有效的监测,对保护人类生存环境和健康具有重要的意义[9]。林蕊等(2021)以潼关矿区周边的农田土壤为研究对象,分析Pb、Cu、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn和As八种元素的含量状况和空间分布,采用多种生态评价方法及人体健康风险模型,结果表明当地对儿童有明显非致癌风险[10]。陈瑞等(2023)选取湖南省冷水江市锑矿区土壤作为研究对象,分析土壤在不同深度(0~20 cm、20~60 cm)的4种重金属(As、Cd、Pb、Sb)在前后6年之间含量变化特征,进行不同时空土壤重金属污染评价,表明该矿区土壤存在明显的Sb、As、Cd污染,主要来源于采矿过程中的粉尘沉降[11]。史文芳(2023)以某有色金属矿区为研究区域,通过实测光谱数据、高光谱遥感影像并利用MATLAB软件对土

壤中的 Hg、Ni、Cr、As、Cu、Pb、Zn 等重金属污染进行监测实验, 并与传统的实验检测进行对比, 结果显示基于土壤光谱的矿山土壤重金属污染情况监测方法具有较高的监测精度和较小的误差范围[12]。矿区内土壤重金属来源较为复杂, 治理困难, 因此研究土壤重金属污染来源和分布规律至关重要。程贤达等(2023)对栾川县钼矿区周边农田土壤重金属污染状况进行研究, 分析 Hg、Ni、Cr、As、Cu、Pb、Zn、Cd 含量及空间分布特征, 通过采用地累积指数法、潜在生态风险指数法、健康风险指数法开展重金属污染评价、生态风险及健康风险评估, 结果表明: 钼矿区周边农田土壤中 Cu、Pb、Zn、Cd 达到中污染至重污染水平[13]。冯娟等(2023)对秦岭某金属矿区土壤中重金属污染程度与空间分布特征作出研究, 结果表明: 研究区内 As、Cu、Cd、Hg 变异系数较大, 人为影响因素显著, As 与 Cd 的污染最为严重, 每个区域的检出结果均超出背景值。从空间含量分布来看, 尾矿库受重金属污染最为严重[14]。金新港(2023)以万山岩屋坪汞矿为研究区, 结合 Hg 同位素、主成分分析和正定矩阵因子(PMF), 结果表明汞矿活动是研究区稻田土壤汞的主要来源[15]。李雨晨等(2024)基于相关性分析和 PMF 模型对某矿区农田土壤重金属来源进行解析, 研究结果表明矿区内土壤重金属的主要污染来源分别为工业污染源、自然母质源、交通污染源和农业污染源[16]。周蓓蓓等(2024)通过采用正定矩阵因子分析法(PMF 模型)和 APCS-MLR 模型, 同时结合生态风险评价法, 对安徽矾山矿区土壤重金属研究结果表明: 土壤中 Cd 污染最严重, 潜在生态风险等级处于极高风险等级, 通过 PMF 模型解析出的污染源分别为: 燃煤源、自然-交通综合源、自然源和大气沉降源[17]。

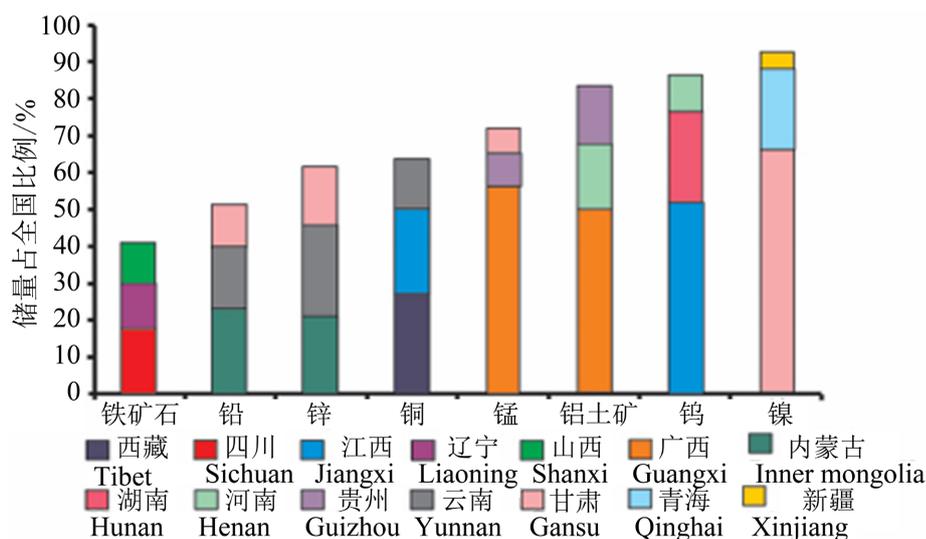


Figure 1. Distribution of major mineral reserves in China (revised according to China Mineral Resources Report (2021))

图 1. 中国主要矿产储量地区分布(根据中国矿产资源报告(2021)修改)

目前国内学者关于土壤重金属方面的研究已经不再仅仅是停留在测定重金属含量方面, 更多的是关于重金属的空间分布和来源解析的研究。对土壤重金属污染及风险评价从单一的评价方法到现在的多种评价法共同联用, 结合当下较为流行的光学遥感和微波遥感影像等技术建立与重金属元素之间的相关关系, 并构建预测土壤重金属含量的回归模型, 采用多种污染评估方法对矿区土壤的重金属污染程度进行了评估。通过采用自动机器学习算法, 利用计算机软件建立受体模型(如 PMF [18]、APCS-MLR [19]以及 UNMIX [20]模型等)结合 ArcGis 等地学统计法对矿山土壤重金属污染进行了源解析, 为矿山修复和治理提供重要的指导作用。综上所述, 关于矿山土壤重金属污染的研究仍在不断进步, 矿山土壤污染成因复杂多变, 仅用一种模型、一种污染评价方法进行污染源贡献定量解析, 存在一定的局限性和不确定性。

因此, 通过加强跨学科的合作和研究, 探索更多实验方法, 是解决矿山土壤重金属污染的关键也是未来发展的趋势。

### 3. 土壤重金属污染来源

#### 3.1. 自然源

自然源主要指来自于成土母质或地质活动导致的重金属富集, 包括火山爆发, 大气沉降, 岩石风化等。在自然环境下土壤重金属主要来源于岩石的风化物, 岩石风化和成土过程都对土壤中的重金属含量产生了重要影响, 不同类型的岩石矿物中的重金属含量差异较大, 土壤母质中重金属的含量也有显著地差异。如成土母质为碳酸盐岩、玄武岩及泥岩等, 土壤中的重金属含量相较其他土壤普遍较高。除此之外, 不同的土壤类型由于土壤性质的不同而造成了土壤对重金属离子吸附能力的差异, 进而造成土壤重金属含量的差异, 如阳离子交换量、土壤酸碱度等。

#### 3.2. 人为源

人为源则主要是指能引起环境重金属含量增加的人为活动, 主要包括交通运输, 采矿和冶炼, 金属加工, 露天焚烧, 污水灌溉以及城市生活垃圾填埋等, 其中采矿和冶炼活动被认为是造成矿区土壤重金属污染的主要来源。采矿过程中会产生大量选矿废液和冶炼废水, 若未经分流处理直接排放则会造成矿区周边土壤和地下水的重金属含量超标, 这其中还会伴随大量的重金属粉尘, 这些颗粒物主要以气溶胶形式进入大气, 再以自然沉降和大气降水的形式进入土壤(图 2)。其次, 交通运输同样也是土壤重金属的重要来源, 尾气排放、轮胎及镀锌零件磨损等过程均会导致重金属微粒的释放[21]。此外, 采选过程产生的选矿尾砂在雨水淋溶作用下也会向周围环境释放大量重金属离子。我国作为农业大国, 化肥、农药及污水灌溉也是土壤重金属污染的来源之一, 农田耕地往往由于农药、化肥、家禽化肥的滥用, 导致 Cd、Cu、Zn 等重金属含量的超标。

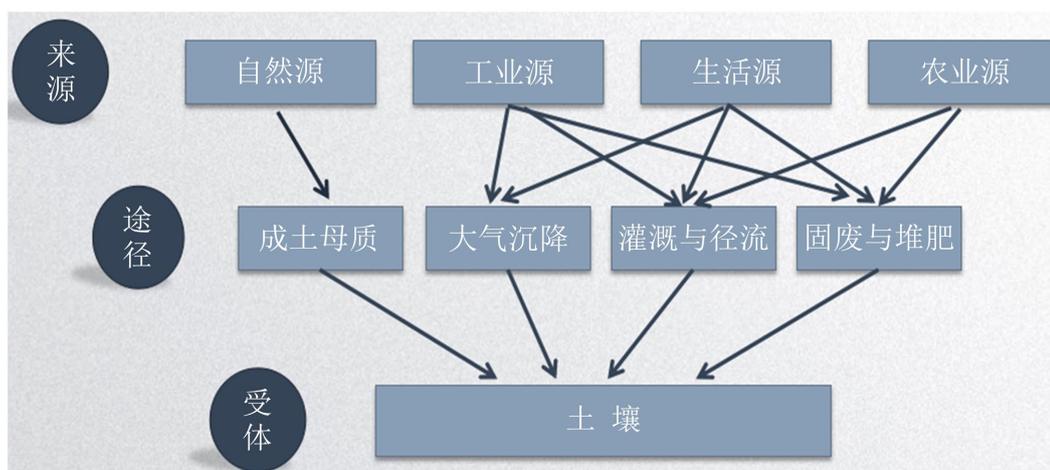


Figure 2. Sources and pathways of heavy metals in soil

图 2. 土壤重金属来源及途径

### 4. 土壤重金属赋存特性及分析方法

#### 4.1. 重金属形态分析方法和特点

前文已述我国的土壤重金属污染问题, 这主要依据重金属的总量进行土壤环境质量评价, 但重金属

元素对环境的影响不仅仅是与其含量有关，它能否通过食物链的方式威胁人体健康，主要取决于其赋存形态，重金属离子的迁移性越强对生态环境的危害性越大，且土壤中重金属形态也会随着土壤环境的变化而改变[22]。因此，重金属元素形态的迁移转化不仅是深入理解元素地球化学循环必要，更是改善土壤治理、修复的重要理论依据[23]。目前，关于土壤重金属形态常用的分析的方法有以下两种：

#### 4.1.1. Tessier 提取法

目前研究最彻底、应用最广泛的重金属形态分析方法当属是由 Tessier 等人开创的，该方法是将固相中的重金属连续提取转移到溶液中，通过五种提取试剂按照可交换态、碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态、有机质结合态和残渣态的顺序对土壤中重金属形态进行提取[24]。许多学者都采用 Tessier 五步提取法研究了土壤重金属元素的生物有效性和风险评价，如陈晨等(2024)采用 Tessier 连续提取法分析了内蒙古西部某铜尾矿周边表层土壤重金属形态特征，发现 Cd 污染的有效性和迁移性随着土壤层加深都变得严重，且生态风险最高[25]。李杰飞等(2024)通过采用 Tessier 连续提取法探究了豫西工业区周边农田土壤重金属赋存形态，研究发现 Pb 和 Cd 的有效态含量较高，其污染较高并且迁移转化的风险较大[26]。

#### 4.1.2. BCR 法

BCR 为欧洲共同体参考实验室，它将土壤重金属形态分为 4 种，分别为弱酸提取态、可还原态、可氧化态、残渣态，通过电感耦合等离子体发射光谱法分析提取液中的重金属含量。陈晓贤等(2024)利用 BCR 连续提取法对南京市某尾矿库区土壤重金属赋存形态进行分析，结果表明土壤中 Cd 的可利用态占比最高，平均值为 44%，具有较高的潜在风险，容易对生态环境和人体健康产生危害[27]。

#### 4.1.3. Tessier 五步提取法和 BCR 法的优劣

Tessier 连续提取法的最大优点就是能够从多角度、多层次、多方向对重金属形态进行把控，同时，能较为系统地研究重金属在土壤中的迁移、转化和释放，提供更为完整的重金属形态信息，并且可以依据土壤中不同重金属形态的含量，判断其对环境的影响和危害性，为土壤的合理使用提供科学依据[28]。BCR 连续提取法的最直观的优点是提取步骤较少，操作简便，适用于不同来源的土壤重金属污染。该方法能较为客观的反映出土壤中重金属的形态分布情况，而且配有标准样品，使得不同地区土壤重金属形态的研究结果具有横向对比性[29]。连续多级提取法虽比较适合对土壤内重金属形态的转化与迁移的分析研究，但这种方法所用的提取时间比较长，过程也比较复杂，在提取的过程中可能会发生在一些交叉污染。王国莉(2015)，通过 BCR 法和 Tessier 连续提取法对黄红壤中的重金属形态进行了对比分析研究，结果发现 BCR 提取法对于弱酸提取态和可氧化态重金属的分析效果较好，还原态重金属分析效果以 Tessier 连续提取法较好[30]。余涛(2021)在研究土壤重金属污染问题中对比了 Tessier 提取法和 BCR 法，其研究发现 Tessier 提取法应用最广，BCR 法国际通用性最好且经济实用性最高，符合我国生态地球化学对土壤样品测试的要求[31]。付志平(2022)采用 BCR 法和 Tessier 法对土壤和尾砂中 Pb 的赋存形态进行对比分析研究，研究表明 BCR 法和 Tessier 法都适合土壤 Pb 形态分析，但是都不适用于尾砂中 Pb 的形态分析[32]。因此，在今后的研究中，应根据研究目的和样本的实际情况，综合考虑实验方法的科学性、准确性，选择最合适的分析方法[33]。

近年来，土壤中重金属形态研究已然成为土壤环境地球化学研究发展中极为重要的一项内容。国内对于重金属形态分析的研究起步较晚，虽然 Tessier 连续提取法和 BCR 提取法是国内外都较为流行的研究方法，但这些方法自身都存在一定缺陷，缺乏统一、系统的管理，具有局限性。因此，不断探索更有针对性的提取试剂和提取方法，建立更加系统、更加全面的土壤重金属形态分析体系，简化提取过程以

及提高准确率是未来研究的趋势。

## 4.2. 重金属形态研究方法进展

目前国内科研人员在土壤重金属形态的提取方法中较为广泛应用的还是 Tessier 法和 BCR 法, 尽管这些方法在一定程度上提供了重金属的形态信息, 但每种方法均有一定的局限性。随着现代科学技术的快速发展, 研究人员对土壤重金属形态准确度的要求也在不断提高, 在传统的重金属形态提取方法的基础上, 通过将计算机与数学模型的结合, 使得很多与环境地球化学相关领域的新知识、新技术得以应用。蔡琼瑶(2019)通过回归分析构建了土壤 Pb 生物有效性的预测模型, 并基于该模型反推出土壤 Pb 安全临界值, 可为我国土壤 Pb 风险评价及土壤标准制定提供理论参考依据[34]。程诺(2022)在以 BCR 提取法所测得的重金属有效态含量的基础上构建了土壤-人体预测模型, 能很好地预测重金属对人体的健康风险状况, 为今后开展风险评价提供了新的思路[35]。陈晨(2023)采用 Tessier 连续提取法对内蒙古西部某矿区土壤重金属赋存形态分析, 利用多元线性回归模型分析不同土壤 pH 条件下对重金属赋存形态的影响, 结果表明: 土壤 pH 为 8 和 9 时, 重金属在土壤介质中以稳定的形态存在, 为矿区土壤重金属污染修复和风险防范提供数据支撑和理论依据[36]。近年来, 我国在分析金属元素的原位形态方法技术上有了明显进步, 其中, 较为常用的一种方法是显微技术, 运用电子显微镜技术对不同重金属元素的形态进行鉴别与分析。国外学者 Holm, J. (2021)在传统的化学连续提取法的基础上使用物理提取法(扫描透射电子显微镜), 对土壤重金属进行矿物形态分析, 研究了土壤中的铁氧化物纳米颗粒的形态[37]。赵建业(2022)采用超声波提取法分析了土壤样中 Cr、Mo、Mn、Co、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cd 元素的化学形态, 通过与国内较常用的五步提取法进行对比, 发现采用超声波 1.0 h 对土壤金属形态进行提取时, 不仅操作过程简单, 操作条件易于控制, 且大幅提高效率, 具较高的准确度[38]。陈玉(2023)以安徽省贵池区典型金属矿区为研究区域, 通过 X 射线荧光光谱(XRF)、X 射线衍射法(XRD)和扫描电镜-能谱联用(SEM-EDS)等多种分析技术手段, 揭示了矿区特征污染元素迁移转化机理, 发现: As、Zn、Cu 和 Pb 在土壤中, 迁移活性较低[39]。相较于传统的化学测定方法, 地球化学形态模型通过热力学计算的方式来获得平衡条件下重金属元素的形态信息, 可以更好的预测不同环境条件下的重金属形态变化。杨阳(2021)采用提取法和表面络合模型结合的方法, 建立了 Cd 的表面络合模型, 研究发现基于热力学平衡的表面络合模型, 可以进一步提高 Cd 的有效性预测[40]。赵晓鹏等(2023)以贵州晴隆锑矿区土壤为对象研究了锑的形态分布特征, 构建了土壤中锑地球化学多表面形态模型(MSM), 结果发现: 该模型可很好地预测不同性质和污染程度的土壤中锑的溶出效应[41]。综上所述, 关于土壤重金属形态分析的发展趋势从经典的连续提取法测定单一重金属元素含量的分析方法向计算机数学模型计算法的转变, 从单一重金属元素形态的区分向动态的、多维的形态预测模型转变(表 1), 从对重金属元素的总量和生物有效性评价向更为复杂的迁移和转化机制转变。建立土壤重金属形态与环境因素、生物因素、健康风险等的数学模型, 为土壤重金属污染的评估和管理提供理论支持。

**Table 1.** Analysis methods for heavy metal forms

**表 1.** 重金属形态分析方法

方法分类	具体方法
传统化学提取法	以 Tessier 五步提取法、BCR 连续提取法和七步提取法为主
直接计算法	显微技术法、超声波提取法、电化学法、X 射线衍射法和扫描电镜等, 多种分析技术手段共同联用
模拟计算法	以热力学和化学平衡为基础, 构建相应的地球化学形态模型

## 5. 结论

我国矿区土壤重金属污染的主要特点是：多元素复合且赋存形式较为复杂，常常由自然因素和人为因素共同叠加所造成的。重金属污染具有毒性、累积性以及不可逆性，其通过参与土壤-水体-大气的生态系统循环，通过食物链等途径进入人体后，从而对人体健康造成不可逆的损伤。虽然国内的相关研究起步较晚但近些年也取得了很大的成就，对于矿山土壤重金属污染的研究内容从单一对含量的研究发展到对重金属空间分布以及对污染来源的追根溯源，从传统的 ICP-MS 和原子荧光光谱法分析重金属的方法到通过遥感技术手段与计算机构建回归模型来提高监测精度和减小误差，从过去一种污染评价方法到现在多元化的研究方向的转变，通过对污染源解析技术与 GIS 的结合，定量识别污染源。通过建立矿山周边土壤重金属污染信息系统，对矿区周边的土壤重金属状况进行长期监控，进行多时段的数据比较，从而有效地为土壤质量控制和环境监控提供依据，对解决矿区重金属污染具有重要意义。重金属离子对环境的影响不仅仅取决于含量，更取决于其形态。虽然传统的重金属形态提取法都存在一定的局限性，但在未来利用先进的仪器和技术，结合地学、化学和计算机科学等多个学科领域的交叉互动，建立一个科学的、准确的、简便的土壤重金属形态分析体系是未来关于土壤重金属污染的一个主要发展趋势，同时能够为矿山土壤重金属污染评价和修复提供理论支持。

## 参考文献

- [1] 万胜. 凡口铅锌矿地质环境综合治理方法[J]. 现代业, 2014, 30(12): 145-146.
- [2] 钟雪梅, 夏德尚, 宋波, 等. 广西土壤镉含量状况与风险评估研究进展[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1256-1270.
- [3] 周耀渝, 杨胜香, 袁志忠, 等. 湘西铅锌矿区重金属污染评价及优势植物重金属累积特征[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 361-365.
- [4] 徐玉霞, 薛雷, 汪庆华, 等. 关中西部某铅锌冶炼区周边土壤重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境保护科学, 2014, 40(2): 110-126.
- [5] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79-84.
- [6] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 16-18.
- [7] 杨牧青, 康宏宇, 刘源, 等. 云南会泽某铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征与评价[J]. 山东农业科学, 2017, 49(4): 72-77.
- [8] 刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 等. 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 221-229.
- [9] 王榕, 赵永超, 刘凯, 等. 山东省某镇土壤重金属污染现状评价与防治对策研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(21): 189-190, 193.
- [10] 林蕊, 梁文静, 焦旸, 等. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 749-763.
- [11] 陈瑞, 李贵, 吴敏, 等. 冷水江市锑矿区土壤重金属污染时空演变初探[J]. 湖南林业科技, 2023, 50(6): 20-24, 29.
- [12] 史文芳. 基于土壤光谱的矿山土壤重金属污染情况监测方法研究[J]. 中国金属通报, 2023(11): 168-170.
- [13] 程贤达, 孙建伟, 贾煦, 等. 河南栾川县钼矿区周边农田土壤重金属污染特征与健康风险评价[J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1871-1886.
- [14] 冯娟, 艾昊, 陈清敏, 等. 秦岭山区某金属矿区土壤重金属污染评价及迁移路径解析[J]. 岩矿测试, 2023, 42(6): 1189-1202.
- [15] 金新港. 汞矿遗留场地汞污染及对周边生态环境的影响[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2023.
- [16] 李雨晨, 郑刘根, 陈星, 等. 基于 PMF 模型的矿区土壤重金属来源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36(1): 17-22.
- [17] 周蓓蓓, 李文倩, 郭江, 等. 安徽矾矿土壤重金属污染源解析模型对比与优选[J]. 农业工程报, 2024, 40(3): 321-327.

- [18] Paatero, P. and Tapper, U. (1994) Positive Matrix Factorization: A Non-Negative Factor Model with Optimal Utilization of Error Estimates of Data Values. *Environmetrics*, **5**, 111-126. <https://doi.org/10.1002/env.3170050203>
- [19] Zhang, W., Yan, Y., Yu, R. and Hu, G. (2021) The Sources-Specific Health Risk Assessment Combined with APCS/MLR Model for Heavy Metals in Tea Garden Soils from South Fujian Province, China. *CATENA*, **203**, Article 105306. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105306>
- [20] 曹佳艺. 基于 UNMIX 模型的农田土壤重金属源解析及污染损失评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [21] Li, Z., Liang, Y., Hu, H., Shaheen, S.M., Zhong, H., Tack, F.M.G., *et al.* (2021) Speciation, Transportation, and Pathways of Cadmium in Soil-Rice Systems: A Review on the Environmental Implications and Remediation Approaches for Food Safety. *Environment International*, **156**, Article 106749. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106749>
- [22] Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z.A., Ashraf, S. and Asghar, H.N. (2019) Phytoremediation: Environmentally Sustainable Way for Reclamation of Heavy Metal Polluted Soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **174**, 714-727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- [23] 陈莉薇, 陈海英, 武君, 等. 利用 Tessier 五步法和改进 BCR 法分析铜尾矿中 Cu、Pb、Zn 赋存形态的对比研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 735-740.
- [24] Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
- [25] 陈晨, 红梅, 施和平, 等. 内蒙古西部某铜尾矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 土壤通报, 2024, 55(3): 840-851.
- [26] 李杰飞, 王棣, 徐宇鹏, 等. 豫西典型工业区周边农田土壤重金属污染特征、生态风险与来源解析[J]. 河南农业科学, 2024, 53(4): 76-91.
- [27] 陈晓贤, 崔霞霞, 彭欣, 等. 南京市某闭库尾矿区土壤重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境生态学, 2024, 6(5): 7-13.
- [28] 张功领, 刘长风, 张晓宇, 等. 土壤中重金属形态研究[J]. 吉林农业, 2018(23): 87-88.
- [29] 陆金龙. 土壤中重金属形态的化学研究[J]. 化工管理, 2017(24): 42, 44.
- [30] 王国莉, 陈孟君, 范红英, 等. 四种土壤重金属形态分析方法的对比研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(11): 1977-1983.
- [31] 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 460-476.
- [32] 付志平, 冼子良, 雷畅, 等. 三种连续提取法对矿区土壤和尾砂中 Pb 形态分析研究[J]. 广东化工, 2022, 49(6): 80-83.
- [33] 贺丽洁, 盛培培, 胡思扬, 等. Tessier 五步提取法对土壤铬结合态分析适用性研究[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2368-2378.
- [34] 蔡琼瑶. 土壤-小麦系统铅的生物有效性及预测模型初探[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [35] 程诺. 镉在土壤-水稻-人体系统中的迁移预测模型及健康风险评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [36] 陈晨. 内蒙古西部某矿区土壤重金属污染风险评价及腐殖酸调控研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [37] Holm, J. (2021) A Brief Overview of Scanning Transmission Electron Microscopy in a Scanning Electron Microscope. *EDFA Technical Articles*, **23**, 18-26. <https://doi.org/10.31399/asm.edfa.2021-4.p018>
- [38] 赵建业, 张桐, 王雅婷, 等. 超声波提取土壤重金属形态试验的对比分析[J]. 城市地质, 2022, 17(4): 501-505.
- [39] 陈玉. 典型金属矿区环境敏感性元素赋存、迁移及转化研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [40] 赵晓鹏, 杨博一, 李超, 等. 贵州晴隆镉矿区土壤中镉的形态分布和地球化学模型[J]. 环境化学, 2024, 43(3): 911-919.
- [41] 杨阳. 稻田土壤生物地球化学驱动的镉形态转化机制与模型[D]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2021.