

土壤重金属形态提取方法研究现状及发展趋势

张 陆, 钱建平, 刘津瑞, 纽康康, 张桓荣

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年11月9日; 录用日期: 2024年1月8日; 发布日期: 2024年1月18日

摘 要

土壤重金属污染问题是我国目前在环境治理方面的一个重大难题, 它不仅影响土壤的肥力和功能, 还威胁到人类健康和生态安全。土壤重金属的赋存形态决定了它们在土壤中的迁移、转化和生物有效性, 因此, 了解和分析土壤重金属的形态分布对于评估其环境风险和制定合理的修复措施具有重要意义。本文综述了土壤重金属形态的国内外研究现状, 总结了近些年国内学者对不同形态提取方法的研究概论, 展望了土壤重金属形态提取方法的发展趋势, 并提出了一些改进和创新的建议。

关键词

土壤, 重金属形态, 连续提取, 预测模型

Research Status and Development Trend of Soil Heavy Metal Speciation Extraction Methods

Lu Zhang, Jianping Qian, Jinrui Liu, Kangkang Niu, Huanrong Zhang

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

Received: Nov. 9th, 2023; accepted: Jan. 8th, 2024; published: Jan. 18th, 2024

Abstract

The issue of soil heavy metal pollution is a significant challenge in China's current environmental management. It not only affects soil fertility and functionality, but also poses threats to human health and ecological safety. The speciation of heavy metals in soil determines their migration, transformation, and bioavailability. Therefore, understanding and analyzing the distribution of the speciation of heavy metals in soil is of great significance in assessing their environmental risks and devising reasonable remediation measures. This article reviews the current status of domestic and interna-

tional research on the speciation of heavy metals in soil, summarizes the introductory research by domestic scholars on different extraction methods for various speciation in recent years, anticipates the development trends of soil heavy metal speciation extraction methods, and proposes some improvement and innovative suggestions.

Keywords

Soil, The Speciation of Heavy Metals, Sequential Extraction, Predictive Models

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

土壤是地球表层的一个复杂的多相系统，它包含了无机矿物、有机质、水、空气和生物等组分，是自然界和人类活动的重要载体[1] [2] [3]。重金属元素是指具有较高密度和毒性的金属元素，如铅、镉、汞、铬、砷等[4]。重金属形态是指重金属的价态、化合态、结合态和结构态四个方面，是其在环境中以某种离子或分子赋存的实际形式，决定了其生物有效性、迁移性和毒性[5] [6]。重金属进入土壤后，通过溶解、沉淀、凝聚、络合吸附等各种作用，形成不同的化学形态，并表现出不同的活性[7]。

土壤重金属形态的分析方法主要有两类：一是实验室分析法，即利用不同的化学试剂按照一定的顺序和条件对土壤样品进行连续提取，然后用仪器分析提取液中的重金属含量，从而推断出土壤中不同形态的重金属含量[8] [9]；二是模型计算法，即利用数学模型和计算机软件模拟土壤中重金属与不同组分之间的平衡和动力学过程，通过这些新技术来模拟和预测土壤中重金属不同形态的含量比例[10]。

目前对于土壤重金属形态研究常用的是实验室分析法。实验室分析法的基本步骤包括：样品前处理、形态提取和形态检测[11]。样品前处理是指对样品进行干燥、粉碎、过筛、消解等操作，以便于形态提取和检测[12]。形态提取是指利用不同的物理或化学方法，将样品中不同形态的重金属元素分离出来[13]。形态检测是指利用不同的仪器或技术，测定不同形态的重金属元素的含量或比例[14]。

2. 形态提取方法研究现状

土壤重金属形态提取方法是研究土壤重金属污染的重要手段，不同的提取方法可以反映土壤中重金属的不同赋存状态和生物有效性，从而为土壤重金属的评价和修复提供科学依据[15]。目前，国内外对土壤重金属形态提取方法的研究主要有以下几种方法：

1) 化学连续提取法

化学连续提取法是一种通过使用不同强度的化学试剂，按照一定的顺序和条件，连续提取土壤样品中的重金属，将其分为不同的赋存形态，如可交换态、碳酸盐结合态、氧化物结合态、有机物结合态和残渣态等[16]。这种方法的优点是：操作简单、成本低、适用范围广，缺点是：提取效果受土壤类型、有机质含量、pH值等因素的影响，提取结果的可比性和可重复性较差，提取过程中可能发生重金属的转化和迁移，影响形态的真实性[17]。目前，国外对这种方法的研究较深入，有多种提取方法被提出和应用，如 Tessier 法[18]、BCR 法、Dold 法[19]、Wenzel 法[20]、Forstner 法[21]等。这些方法在不同的环境条件和土壤类型下，对不同的重金属元素有不同的适用性和效果，因此需要根据具体的研究目的和对象选择合适的方法[22]。国内对这种方法的研究起步也较早，庞叔薇等(1981)使用化学连续提取法测定了底泥中

不同形态汞[23],是国内早期对于化学连续提取方法的应用和研究。近年来有了一些新进展,主要是在借鉴和引进国外方法的基础上进行了一些改进和发展,如冯素萍等(2009)对 Tessier 法和 BCR 法进行了对比分析[24],付志平等(2022)对 BCR 法、Tessier 法和 Dold 法进行了对比分析[25],余涛等(2021)对 Tessier 法、BCR 法和七步提取法进行了对比分析[26]等。这些研究分析了不同方法的优缺点、适用范围和局限性,为国内土壤重金属形态提取方法的选择提供了参考。此外,我国地质调查局制订了一种基于国内土壤特征的化学连续提取方法——七步提取法[27],该方法是我国生态地球化学调查的权威标准,具有经济实用性高、污染评价细明确等优点,为我国土壤重金属形态提取方法的研究和应用提供了新的思路。

化学连续提取法是目前最常用的土壤重金属形态提取方法,但也存在一些问题和挑战,如土壤样品的前处理和消解的标准化和规范化、土壤中重金属元素的形态分析的可比性和可重复性、土壤中重金属元素的生物有效性的评价和预测的确实等问题[28]。因此,需要在不断借鉴和引进国外先进的方法和技术的的基础上,结合国内土壤的特点和需求,发展和完善适合我国的土壤重金属形态提取方法,为土壤重金属污染的防治提供更有力的支撑。

2) 物理分析法

物理分析法是一种通过使用先进的物理仪器,如电子探针、扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射、同步辐射 X 射线吸收光谱等,对土壤样品中的重金属进行矿物形态分析,即分析重金属与土壤矿物的结合方式、微观形貌、微区分布、微量元素等[29]。这种方法的优点是分析精度高、形态真实、不受土壤类型和环境因素的影响,缺点是操作复杂、成本高、适用范围窄,需要专业的仪器和人员。目前,国外在这种方法的研究较为先进,有多种仪器和技术被应用,如 Holm (2021)使用扫描透射电子显微镜(STEM-in-SEM)对土壤中的铁氧化物纳米颗粒的形态和化学分析[30],Zimmerman 等(2010)使用同步辐射 X 射线吸收光谱(XAS)对土壤中的铅的矿物形态分析[31]等。Holm 和 Zimmerman 等的研究揭示了土壤中重金属的微观结构和化学环境,为土壤重金属的迁移、转化和生物有效性的机理研究提供了重要的信息。这些研究利用现有的物理仪器和技术,对土壤中重金属的矿物形态进行了初步的探索,为土壤重金属形态提取方法的发展和完善奠定了基础。

物理分析法是目前最先进的土壤重金属形态提取方法,但也存在一些问题和挑战,如仪器和技术的更新和发展、土壤中重金属元素的微观形态和化学环境的深入研究等问题[31]。因此,需要在不断引进和创新物理仪器和技术的基础上,结合实际土壤的特征和需求,发展和完善适合我国的土壤重金属形态提取方法,为土壤重金属污染的防治提供更有力的支撑。

3. 不同形态提取方法的探讨

3.1. 不同连续提取方法的特点

土壤重金属形态提取方法是指利用不同强度的化学试剂按照一定的顺序和条件对土壤样品进行连续提取,然后用仪器分析提取液中的重金属含量,从而推断出土壤中不同形态的重金属含量的方法[32] [33]。目前,土壤重金属形态提取方法的多级提取法有很多,通过对一些学者[24] [25] [26] [34] [35] [36] [37]的归纳总结(表 1),列举以下几种常用方法:

1) Tessier 法

Tessier 法是具有开创性的经典土壤重金属形态提取方法,它用五种提取试剂按照可交换态、碳酸盐络合态、铁锰氧化物结合态、有机态和残渣态的顺序对土壤样品进行提取。该方法的优点是:能够较全面地反映土壤重金属的赋存状态和生物有效性,适用于各种类型的土壤,但缺点是:提取试剂的选择和提取条件的确定具有一定的主观性和经验性,存在一些交叉污染和重金属转化的问题[38]。

Table 1. Comparative study of different sequential extraction methods by domestic scholars**表 1.** 国内学者对不同连续提取方法的对比研究

研究者	对比方法	研究结论
冯素萍等[24] (2009)	利用 BCR 改进法和 Tessier 修正法提取不同类型土壤中	Tessier 法铁锰氧化态提取效果不如 BCR 法, BCR 法提取步骤相对简单, 提取效果也较稳定。
陈东东等[34] (2014)	采用 Tessier 法和七步提取法对土壤中 Cr 形态提取效果的比较	Tessier 法提取效率和可信度比七步法更高; 七步法的形态分类丰富, 能更准确的反应形态的迁移特征。
董昊辰[35] (2017)	Tessier、BCR 和七步提取法这三种对汞的不同形态进行了对比评估	从回收率上看, BCR 法 > Tessier 法 > 七步法; 从汞生物可利用性识别上看, 七步法 > Tessier 法 = BCR 法。
张永利等[36] (2019)	Tessier 法和 BCR 改进法提取黄土中 Cd 的对比研究	BCR 法提取的 Cd 形态含量及分布较 Tessier 法更为显著, 生物有效性相关系数比 Tessier 法更高。
陈莉薇等[37] (2020)	利用 Tessier 法和 BCR 改进法分析铜尾矿中重金属元素赋存形态的对比研究	BCR 法回收率高于 Tessier 法, BCR 法可以满足形态评价的要求, 更适用于尾矿重金属赋存形态分析。
余涛等[26] (2021)	对比 BCR 法、Tessier 法、七步提取法的优劣势	环境指示性: 七步法 > Tessier 法 > BCR 法; 国际通用性: BCR 法 > Tessier 法 > 七步连续提法; 提取剂可靠性: 七步法 > Tessier 法 = BCR 法。
付志平等[25] (2022)	采用 BCR 法和 Tessier 法对土壤中 Pb 的赋存形态进行对比分析	BCR 法提取 Pb 不同形态的回收率略高于 Tessier 法。

2) BCR 法

BCR 法是欧洲共同体参考实验室推荐的土壤重金属形态提取方法, 它用四种提取试剂按照弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态的顺序对土壤样品进行提取。该方法的优点是: 提取步骤较少、操作简便、精密度较高, 对不同类型的土壤提取回收率最优, 适用于评价不同重金属污染来源的土壤。它的缺点是: 不能区分碳酸盐结合态和有机物结合态, 对于含有高含量有机质的土壤, 提取效果不佳。此外, 该方法的提取试剂中含有氯化物, 可能会造成重金属的转化和迁移[39] [40]。

3) 七步提取法

七步提取法是中国地质调查局制订的生态地球化学样品分析技术标准, 该方法以多种化学试剂作为提取剂, 提取水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态。该方法的优点是: 能够更细致地划分土壤重金属的形态, 反映土壤重金属的生物有效度, 适用于各种土壤类型; 同时在提取过程中利用超声波清洗器代替了振荡器, 大大缩短了连续提取实验的时间[41]。该方法的缺点是: 提取步骤最多、操作最复杂、耗时最长, 提取剂的选择和使用也可能影响重金属的形态转化[35]。此外, 该方法的提取试剂中含有硝酸, 可能会造成土壤中有机质的氧化和重金属的溶解。

3.2. 不同连续提取方法实践应用

通过对国内外学者大量研究的总结, 从提取稳定性、应用范围、环境指示性和回收率这四个方面来评价这三种连续提取方法, 见图 1。在选择土壤重金属形态的提取方法时, 应根据研究的目的和条件的不同, 综合考虑方法的科学性、准确性、可比性和可操作性。在实践应用中给出以下三个方面的应用建议:

1) 提取方法的适用范围和条件

不同的提取方法可能适用于不同类型的土壤和不同种类的重金属, 因此在选择提取方法时, 应考虑土壤的物理化学性质、重金属的来源和特性、提取试剂的性质和用量、提取时间和温度等因素, 以保证提取的有效性和准确性[42]。例如, Tessier 法和七步提取法适用于各种类型的土壤, 但 BCR 法对于含有

高含量有机质的土壤，提取效果不佳；Tessier法和BCR法适用于分析多种重金属，但七步提取法只适用于分析铅、镉、铬、锌、铜、镍等六种重金属。

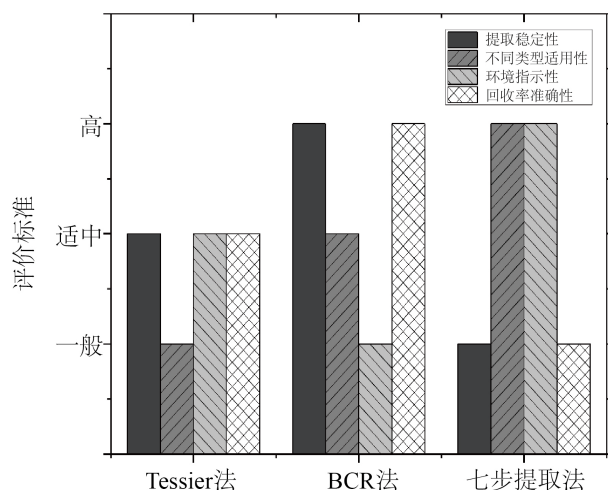


Figure 1. Comparison of three methods for extracting heavy metal speciation from soil

图 1. 三种土壤重金属形态提取方法对比

2) 提取方法的可比性和一致性

不同的提取方法可能导致不同的重金属形态分布和生物有效性，因此在比较不同提取方法的结果时，应注意方法之间的差异和联系，以避免出现误解和混淆[43]。例如，Tessier法和七步提取法的可交换态和水溶态是相对应的，但BCR法的弱酸提取态包含了可交换态和水溶态，以及部分碳酸盐结合态；Tessier法和BCR法的残渣态是相对应的，但七步提取法的残渣态包含了部分强有机结合态。

3) 提取方法的改进和优化

不同的提取方法都有一定的局限性和不足，因此在应用不同的提取方法时，应根据实际情况和研究需求，对提取方法进行改进和优化，以提高提取的效率和准确性[38]。例如，Tessier法和BCR法可以通过改变提取试剂的种类和浓度，或者采用微波消解、超声波辅助等技术，来提高提取的速度和回收率；七步提取法可以通过减少提取步骤和提取剂的用量，或者采用单一提取剂代替多种提取剂，来简化提取的操作和降低提取的成本。

以上三种土壤重金属形态提取方法都是基于经验性的假设和归纳而建立的，它们没有考虑土壤中重金属与土壤组分之间的真实的结合方式和结合强度，也没有考虑土壤中重金属的动态变化和平衡状态[17]。因此，它们的科学性和准确性都有待提高。

4. 土壤重金属形态提取方法的发展趋势

土壤重金属形态提取的发展趋势是从经验性的实验室分析法向机理性的模型计算法转变，从静态的、单一的形态区分向动态的、多维的形态预测转变，从简单的总量和生物有效性评价向复杂的迁移和转化机制揭示转变[28]。对于研究土壤重金属污染方面的学者，已经很成功地把计算机领域新技术和传统的分析手段相结合；隋红建等(2006)提出了将数学模拟与土壤重金属信息系统及地理信息系统GIS的结合，利用数学模型及计算机模拟研究了土壤重金属迁移特征[44]；何云山(2021)将机器学习算法引入到土壤重金属污染预测中，构建了区域土壤重金属污染预测模型[45]。在土壤重金属形态分析领域却少有学者把计

算机模型模拟方法和土壤重金属形态研究相结合。因此，与数学模型及计算机模拟领域的转变是现在土壤重金属形态研究的未来方向。

土壤重金属形态提取方法的发展难题是如何建立一个科学的、准确的、可操作的、可比较的、可重复的土壤重金属形态分析体系，以适应不同的土壤类型、不同的重金属元素、不同的研究目的和不同的应用场景[46]。所以，改进和创新的建议是建立一个基于土壤重金属与土壤组分之间的真实的结合方式和结合强度的机理性的模型，利用数学模型和计算机软件模拟土壤中重金属的平衡和动力学过程，从而预测土壤中重金属的形态分布[10]。这种方法的优点是能够反映土壤中重金属的真实的化学性质和物理状态，也能够考虑土壤中重金属的动态变化和平衡状态，但缺点是需要用到复杂的仪器和技术，也需要用到标准的提取试剂和条件，也需要有足够的数据和参数支持。为了实现这种方法，具体需要做以下几方面的工作：

1) 收集和整理不同类型的土壤和重金属的相关数据，包括土壤的理化性质、重金属的含量和形态、重金属与土壤组分的结合方式和结合强度等，建立一个完善的数据库和知识库，为模型的建立和验证提供数据支持[46]。

2) 基于化学平衡和动力学的原理，建立一个能够描述土壤中重金属的形态分布和转化的数学模型，考虑土壤的异质性和非线性，以及重金属的多元素和多形态的特点，使模型能够适应不同的土壤和重金属的情况，同时也能够反映土壤中重金属的迁移和生物有效性[47]。

3) 利用计算机软件，如 MATLAB、COMSOL、PHREEQC 等，实现模型的编程和求解，设计合适的输入和输出界面，使模型能够方便地运行和应用，同时也能够进行灵敏度分析和误差分析，评估模型的可靠性和适用性。

4) 利用实验数据和实际案例，对模型进行验证和优化，检验模型的预测能力和准确性，分析模型的优缺点和局限性，提出改进和完善的建议，使模型能够更好地适应实际的土壤重金属形态分析的需求。

参考文献

- [1] 侯明, 钱建平, 殷辉安. 桂林市土壤汞存在形态的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 398-401.
- [2] 林晓峰, 蔡兆亮, 胡恭任. 土壤重金属污染生态风险评估方法研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 749-751.
- [3] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- [4] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.
- [5] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1551-1556.
- [6] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350, 272.
- [7] 孙文博, 莫创荣, 安鸿雪, 等. 施用蔗渣对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1793-1799.
- [8] Tazisong, I.A., Senwo, Z.N. and Williams, M.I. (2012) Mercury Speciation and Effects on Soil Microbial Activities. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **47**, 854-862. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.665000>
- [9] Park, C.M., Katz, L.E. and Liljestrang, H.M. (2015) Mercury Speciation during *in Situ* Thermal Desorption in Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **300**, 624-632. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.076>
- [10] 张思爱. 优化 SVM 模型反演耕地土壤重金属汞和铬含量研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [11] 章海波, 骆永明, 赵其国, 等. 香港土壤研究 VII. BCR 提取法研究重金属的形态及其潜在环境风险[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 865-871.
- [12] 周卫红, 张静静, 邹萌萌, 等. 土壤重金属有效态含量检测与监测现状、问题及展望[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 605-615.
- [13] Kim, B. and McBride, M.B. (2006) A Test of Sequential Extractions for Determining Metal Speciation in Sewage

- Sludge-Amended Soils. *Environmental Pollution*, **144**, 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.034>
- [14] Bakircioglu, D., Kurtulus, Y.B. and Ibar, H. (2011) Investigation of Trace Elements in Agricultural Soils by BCR Sequential Extraction Method and Its Transfer to Wheat Plants. *Environmental Monitoring and Assessment*, **175**, 303-314. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1513-5>
- [15] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266-1273.
- [16] Tokalioglu, S., Kartal, S. and Birol, G. (2003) Application of a Three-Stage Sequential Extraction Procedure for the Determination of Extractable Metal Contents in Highway Soils. *Turkish Journal of Chemistry*, **27**, 333-346.
- [17] Gabarron, M., Zornoza, R., Martinez-Martinez, S., et al. (2019) Effect of Land Use and Soil Properties in the Feasibility of Two Sequential Extraction Procedures for Metals Fractionation. *Chemosphere*, **218**, 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.114>
- [18] Tessier, A., Campbell, P.G. 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>
- [19] 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)
- [20] Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., et al. (2001) Arsenic Fractionation in Soils Using an Improved Sequential Extraction Procedure. *Analytica Chimica Acta*, **436**, 309-323. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)00924-2](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)00924-2)
- [21] Förstner, U. and Wittmann, G.T.W. (1981) *Pollution in the Aquatic Environment*. Springer, Berlin.
- [22] Sungur, A., Soylak, M., Yilmaz, E., Yilmaz, S. and Ozcan, H. (2015) Characterization of Heavy Metal Fractions in Agricultural Soils by Sequential Extraction Procedure: The Relationship between Soil Properties and Heavy Metal Fractions. *Soil & Sediment Contamination*, **24**, 1-15. <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.907238>
- [23] 庞叔薇, 邱光葵, 孙景芳. 连续化学浸提法测定底泥中不同形态汞的探讨[J]. 环境科学学报, 1981(3): 234-241.
- [24] 冯素萍, 刘慎坦, 杜伟, 等. 利用 BCR 改进法和 Tessier 修正法提取不同类型土壤中 Cu、Zn、Fe、Mn 的对比研究[J]. 分析测试学报, 2009, 28(3): 297-300.
- [25] 付志平, 洗子良, 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.
- [26] 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.
- [27] 中国地质调查局. DD 2005-03 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行) [S]. 2005.
- [28] Vollprecht, D., Riegler, C., Ahr, F., Stuhlpfarrer, S. and Wellacher, M. (2020) Sequential Chemical Extraction and Mineralogical Bonding of Metals from Styrian Soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **17**, 3663-3676. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02694-0>
- [29] Isen, H., Altundag, H. and Keskin, C.S. (2013) Determination of Heavy Metal Contamination in Roadside Surface Soil by Sequential Extraction. *Polish Journal of Environmental Studies*, **22**, 1381-1385.
- [30] Holm, J. (2021) A Brief Overview of Scanning Transmission Electron Microscopy in a Scanning Electron Microscope (STEM-in-SEM). *EDFA Technical Articles*, **23**, 18-26. <https://doi.org/10.31399/asm.edfa.2021-4.p018>
- [31] Zimmerman, A.J. and Weindorf, D.C. (2010) Heavy Metal and Trace Metal Analysis in Soil by Sequential Extraction: A Review of Procedure. *International Journal of Analytical Chemistry*, **2010**, Article ID: 387803. <https://doi.org/10.1155/2010/387803>
- [32] Choleva, T.G., Tsogas, G.Z., Vlessidis, A.G. and Giokas, D.L. (2020) Development of a Sequential Extraction and Speciation Procedure for Assessing the Mobility and Fractionation of Metal Nanoparticles in Soils. *Environmental Pollution*, **263**, Article ID: 114407. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114407>
- [33] Paukpol, A., Hartwell, S.K. and Jakmunee, J. (2020) Anodic Stripping Voltammetry with a Dynamic Flow-through Sequential Extraction Method for Fractionation Study of Cadmium and Lead in Soil. *Soil & Sediment Contamination*, **29**, 650-664. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1761288>
- [34] 陈东东, 童士唐. 2 种分步浸提方法对土壤中 Cr 形态提取效果的比较[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 4022-4026.
- [35] 董昊辰. 土壤中不同形态汞提取方法的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [36] 张永利, 刘晓文, 陈启敏, 等. Tessier 法和改进 BCR 法提取施加熟污泥后黄土中 Cd 的对比研究[J]. 环境工程, 2019, 37(5): 34-38, 81.
- [37] 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.
- [38] 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[C]//中国环境科学学会 2021

- 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集. 天津: 环境工程, 2021: 376-380.
- [39] Rumah, H.T., Salihu, L. and Alhaji, B.B. (2017) Evaluation of Heavy Metals in Soil Using Modified BCR Sequential Extraction. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **2**, 79-82.
<https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20170205.13>
- [40] Shehu, A., Lazo, L. and Pjeshkazini, L. (2009) Evaluation of Metal Species in Sediments Using the BCR Sequential and Single Extraction Procedure. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, **10**, 386-393.
- [41] 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.
- [42] 雷国龙, 付全凯, 姜林, 等. 基于土壤汞形态归趋的健康风险评估方法[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3): 728-735.
- [43] Ahn, Y., Yun, H.S., Pandi, K., *et al.* (2020) 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>
- [44] 隋红建, 吴璇, 崔岩山. 土壤重金属迁移模拟研究的现状与展望[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 197-200.
- [45] 何云山. 区域土壤重金属污染预测模型研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京信息科技大学, 2021.
- [46] 郭旻欣. 基于 GIS 的淮南矿区土壤 Cu、Ni、As、Zn 和 Cr 元素空间分布特征及来源分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [47] 刘湃宇. 场地污染土壤重金属释放动力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.