

GIS在土壤重金属污染溯源中的应用现状、问题与挑战

祖金凡

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2025年12月7日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月22日

摘 要

土壤重金属污染日益严重, 找寻污染源已成当务之急。GIS技术为实现土壤重金属溯源提供了新手段。文章阐述GIS的应用方法与流程, 总结其在整合数据、识别传输通道、建立源-汇动态模型等方面的优势, 能直观反映污染过程与效果, 提高环境管理决策水平。但GIS应用也面临数据获取难、成本高等困难。文章也展望未来, 需加强数据建设, 提高模型与系统精度, 发挥GIS技术在土壤重金属溯源中的更大作用。

关键词

重金属, GIS, 溯源

In the Tracing of Soil Heavy Metal Pollution, GIS's Application Status, Problems and Challenges

Jinfan Zu

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: December 7, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 22, 2026

Abstract

Heavy metal pollution in soil is becoming more and more serious, and finding the source of pollution has become a top priority. GIS technology provides a new means to realize the traceability of heavy metals in soil. This paper expounds the application methods and processes of GIS, and summarizes its advantages in integrating data, identifying transmission channels, and establishing source-sink dynamic models, which can intuitively reflect the pollution process and effect and improve the level

of environmental management decision-making. However, GIS applications also face difficulties such as difficulty in obtaining data and high cost. Looking forward to the future, it is necessary to strengthen data construction, improve the accuracy of models and systems, and give full play to the greater role of GIS technology in the traceability of soil heavy metals.

Keywords

Heavy Metals, GIS, Traceability

Copyright © 2026 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

土壤重金属污染是当前环境领域的普遍问题，由于工业、农业和城市化进程中的人类活动，土壤中镉、铅、汞等重金属元素的积累呈上升趋势[1]。这种污染对生态系统和人类健康产生严重威胁。特别是在工业化程度高的地区，重金属污染已经成为一项紧迫需要解决的环境问题[2]。GIS (地理信息系统) 在环境研究中的应用越来越受到关注。GIS 利用地理信息和空间分析技术，能够整合、分析和可视化大量的地理数据，为环境问题的研究提供了强大的工具。在土壤重金属污染研究中，GIS 的应用有助于深入了解重金属分布的空间特征，为溯源和治理提供科学依据[3]。本研究的主要目的是通过 GIS 技术对土壤重金属污染进行溯源，明确其来源和传播过程，为科学有效地治理提供支持。具体而言，研究旨在揭示土壤中重金属的分布规律和空间异质性；追踪土壤重金属的潜在污染源，准确定位排放点；分析土壤重金属的时空变化趋势，为未来的环境管理提供预测依据。本研究的意义在于为土壤重金属污染的防治提供科学依据，推动环境保护和可持续发展。通过 GIS 技术的应用，研究将更全面、准确地理解土壤重金属的动态过程，有助于制定更有针对性的管理策略。

2. 土壤重金属污染的 GIS 分析

2.1. 土壤重金属的来源和特征

土壤重金属主要来自于人类活动和自然过程。常见的人类活动源包括工业排放、农药使用、废弃物处理以及交通运输等，自然过程源包括岩石风化、火山活动等[4]。这些源头会导致土壤中镉、铬、铜、铅等重金属元素的积聚。土壤重金属的特征在于其具有较高的密度和毒性，对环境和生态系统产生潜在危害。这些重金属在土壤中具有不同的迁移、转化和积累特性，其浓度分布呈现出空间异质性[5]-[7]。了解土壤中重金属的来源和特征对环境保护和土壤管理具有重要意义。

2.2. GIS 在土壤重金属空间分布中的应用

GIS 在土壤重金属分布分析中起到了关键作用，通过整合多源数据，包括遥感数据、地面观测数据和土壤采样数据，建立了综合性的数据库[8]。在 GIS 支持的土壤重金属污染溯源研究中，空间插值方法的选择构成了解析工作的核心环节，其精度与适用性直接决定了污染空间格局表征的可靠性和溯源推断的科学性[9]。反距离权重法(IDW)、普通克里金法(Ordinary Kriging)和指示克里金法(Indicator Kriging)作为三类代表性方法，各自基于不同的理论假设，在数据处理机制、输出结果和适用场景上呈现显著差异，共同塑造了当前空间插值技术体系的主体框架。IDW 方法以其计算简便、效率高的特点，长期被应用于

初步探索性分析, 尤其适用于数据分布相对均匀、空间自相关性不强的区域; 其数学原理依赖于地理学第一定律, 通过距离反比加权实现局部估计, 然而该方法缺乏误差估计能力, 且对极端值敏感, 容易平滑化污染热点, 在精准溯源中存在一定局限。相比之下, 基于地统计学的普通克里金法, 通过引入变异函数量化空间自相关性, 不仅实现了无偏最优估计, 还能提供插值误差面, 极大增强了结果的可解释性与不确定性评估能力, 使其成为当前土壤重金属空间建模的主流方法; 但其对数据平稳性和正态分布的要求较高, 计算过程也相对复杂。为进一步处理非正态分布数据或关注特定阈值风险的需求, 指示克里金法应运而生, 该方法将连续浓度数据转换为二进制指示变量, 重点输出污染超标概率, 极大便利了基于环境标准的风险区划与决策管理, 尤其适用于存在极端值或侧重风险概率评估的场景。

纵观其发展脉络, 空间插值方法呈现出从简单几何假设到复杂统计模型、从单一浓度预测到综合风险概率评估的演进趋势。方法的选择绝非孤立进行, 而需紧密结合研究区的数据特征、空间结构以及具体的溯源目标。例如, 在面向环境管理的实践中, 可形成“IDW 快速扫描-克里金精细刻画-指示克里金风险评估”的递进式分析链条, 实现多方法优势互补。值得注意的是, 当前研究前沿正致力于将这些经典插值方法与机器学习算法、多源遥感数据相融合[10], 以突破传统方法在处理非线性、高维数据时的瓶颈, 进一步提升 GIS 在复杂污染场景下溯源解析的精准性与鲁棒性。因此, 深刻理解不同插值方法的内在原理与适用边界, 是科学构建土壤重金属污染溯源技术体系的重要基础。

2.3. GIS 在土壤重金属溯源中的角色

GIS 在土壤重金属溯源中发挥了关键的作用, 通过分析土壤中不同重金属的空间分布, 可以追踪其可能的来源。通过 GIS 技术, 可以精确定位重金属的排放源, 有助于制定精准的治理措施。GIS 技术能够对土壤重金属的时空变化进行全面分析, 揭示其溯源过程中的时序变化规律。这有助于预测未来的变化趋势, 提前采取预防性的环境保护措施。GIS 通过空间数据的可视化, 将复杂的土壤重金属数据呈现为直观的地图和图表, 为决策者提供直观、科学的信息支持[11]。这对制定更有效的土壤治理策略、推动可持续发展有重要作用。GIS 土壤重金属溯源流程方法如图 1 所示。

3. 应用现状

在土壤重金属污染溯源研究领域, 随着 GIS 技术的深度融合与应用, 逐渐形成了特征鲜明、方法各异的三大技术流派。这些流派分别从空间关联、源解析贡献和多元数据融合等不同维度, 推动了溯源研究的精准化与深入化。国内外典型研究案例见表 1。

3.1. 基于空间统计学的溯源

基于空间统计学的溯源流派是该领域的经典范式, 其核心在于利用 GIS 的空间分析功能, 结合地统计方法揭示重金属含量的空间分布格局与聚集特性。该方法不直接识别污染源类型, 而是通过分析污染物的空间自相关性、异质性以及热点区域的分布, 间接推断污染来源的方位与影响范围。例如, 通过全局莫兰指数(Global Moran's I)可判断区域内重金属整体上呈现聚集、离散还是随机分布模式; 而局部热点分析(Getis-Ord Gi*)或局部莫兰指数(LISA)则能精准定位统计意义上显著的高值聚集区(热点)和低值聚集区(冷点), 这些热点区域往往是潜在污染源的重点排放区或污染物迁移的汇集区[12][13]。国内学者郭志娟[14]等对雄安新区的研究便体现了这一思路, 通过空间自相关分析揭示了特定重金属元素的聚集性分布规律。韩存亮[10]等人在区域农业土壤重金属污染成因分析中, 也借助空间统计方法识别出与工业区或交通干线空间位置高度吻合的污染热点。该流派的优势在于能够直观、定量地展示污染的空间结构, 但其局限性在于通常只能进行“源区位”的推测, 难以对“源类型”(如工业源、交通源、农业源)及其贡献率进行精确的定量解析。

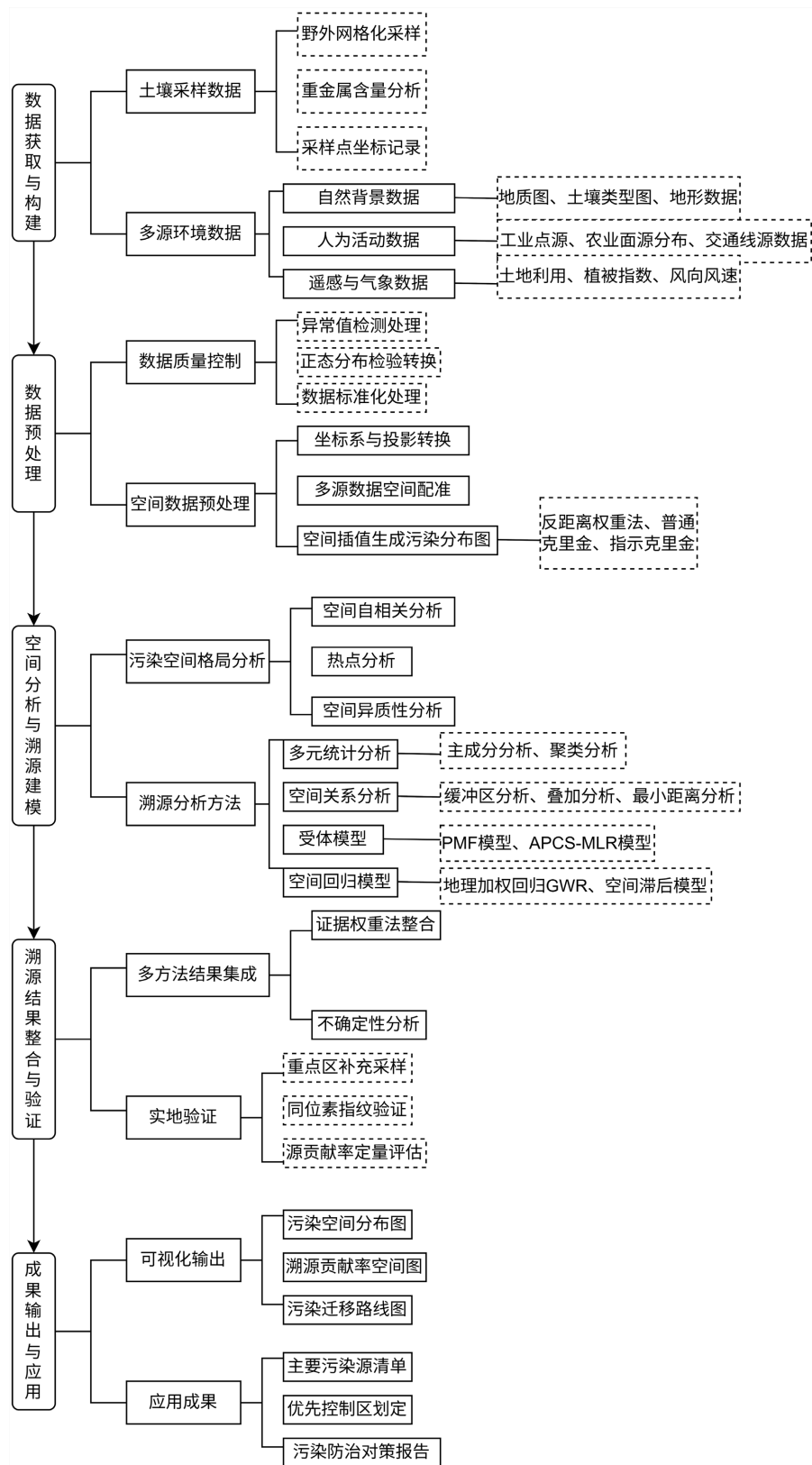


Figure 1. Technical roadmap for GIS-based source identification of soil heavy metals
图 1. GIS 土壤重金属溯源技术路线图

Table 1. International comparative analysis of typical research cases
表 1. 国内外典型研究案例对比表

研究案例	研究区	主要污染物	GIS 方法	结合溯源模型和手段	主要结论
王大可(2025) [21]	哈尔滨市南岗区	Mn、Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Co 等	反距离权重法	PCA-MLR、PMF、Pb 同位素	工业生产是 Cu、Zn 和 Pb 的主要贡献者；交通排放贡献了 45% 的 Zn 和 32% 的 Cd；燃煤源贡献了 35% 的 Mn、35% 的 As 和 33% 的 Pb；而成土母质则是 Ni、Co、Cr 和 As 的主要自然来源。
张望(2025) [27]	赣州市某稀土冶炼厂区	As、Ni、Mn、Pb、Cd、Cu、Zn 等	克里金插值法	PMF、APCS-MLR	研究区土壤重金属污染主要源于三大来源：工业废渣源(贡献率 22.10%)、炉窑与机动车排放源(贡献率 33.98%)和成土母质源(贡献率 43.92%)。
Roshan Bhandari (2025) [28]	泰国大昭披耶河网络	Cr、Ni、Cu、Cd、Zn、Pb、Hg 等	反距离权重法	PCA	Cr、Ni 和 Cu 部分来自自然源；Cd、Zn、Pb 和 Cu 部分来自人为源；Hg 和 As 来自采矿和工业。
Abdikarim Moallim Mohamoud (2025) [29]	新西兰南岛	As、Pb、Cd、Cr 等	反距离权重法	——	IDW 插值有效识别了工业和农业热点区域。

3.2. 基于 GIS 与受体模型耦合的溯源

为了克服空间统计学在源解析定量化方面的不足，基于 GIS 与受体模型耦合的溯源流派应运而生，并成为当前主流的研究方向[15] [16]。该流派将 GIS 强大的空间数据集成、管理与可视化能力，与化学质量平衡模型、主成分分析(PCA)和正定矩阵因子分解(PMF)等受体模型强大的源成分识别与贡献率计算能力相结合。GIS 在此过程中扮演了至关重要的角色：首先，它负责整合土壤样品点位的重金属浓度数据、潜在污染源的空间分布数据(如工业园区的点位、道路网络的线位)以及辅助的地理环境数据(如风向、水流方向、土壤类型、土地利用)；其次，它将受体模型计算出的各污染源贡献率结果进行空间可视化表达，生成源贡献率空间分布图，从而清晰展示不同来源的污染影响范围与空间梯度变化。例如，朱晓丽[17]等应用 PMF 模型对宝鸡铅锌尾矿库周边农田土壤重金属进行了源解析，并结合 GIS 制图量化了尾矿源、农业活动源和自然源的贡献比例。国际研究中，Jiang [18]等人也通过将 PMF 与地理统计基线相结合，提高了源解析的可靠性。这种“模型定量计算 + GIS 空间展示”的范式，实现了从“何处来”到“何种源、贡献多少”的跨越，显著提升了溯源决策的科学性。

3.3. 基于 GIS 与同位素技术结合的溯源

随着同位素指纹技术、高精度传感与大数据分析方法的兴起，基于 GIS 与同位素/大数据结合的创新流派代表了土壤重金属溯源研究的前沿方向[19] [20]。该流派致力于通过引入更精准的溯源“指纹”和更强大的数据处理工具，解决复杂环境下多源混合污染的辨识难题。同位素技术(如铅、锶、镉同位素)具有稳定的化学性质和独特的源特征比值，被誉为污染溯源的“黄金标尺” [21]。将采样点土壤重金属的同位素比值与潜在污染源(如特定品牌的汽油、矿石、工业排放)的同位素指纹库进行比对，可以实现对污染源的直接“指纹识别”。GIS 则在此基础上，通过空间叠加分析，直观展示同位素比值相同的区域与特定污染源企业的空间关联性，构建起“化学成分指纹 - 地理空间位置”的直接证据链。另一方面，大数据

与机器学习技术的融合为处理海量、多源的环境数据提供了新方案。面对海量的高光谱遥感数据、实时传感器监测数据和社会经济数据,传统的统计方法往往力不从心。而机器学习算法(如随机森林、支持向量机、神经网络等)能够从这些高维数据中深度挖掘影响重金属空间分布的关键环境变量(如距污染源距离、人口密度、工业产值等),并建立非线性预测模型[22]-[24]。GIS 平台则负责为这些算法提供空间化、网格化的输入数据,并将预测结果(如污染风险空间分布)进行可视化。近年来,已有研究尝试利用随机森林模型筛选重要环境变量以优化克里金插值精度,或利用卷积神经网络(CNN)自动提取高光谱遥感影像中的重金属污染特征,并通过 GIS 进行动态溯源模拟[25][26]。这一流派虽处于快速发展阶段,但已展现出突破复杂溯源场景、实现精准化和预测性管理的巨大潜力。

4. 问题与挑战

4.1. 数据质量和获取难题

土壤重金属数据的质量直接影响着研究的可靠性和科学性。在 GIS 应用中,数据质量的不确定性可能导致分析结果的偏差。在土壤重金属数据的获取过程中,研究者可能面临多种困难。这包括采样不足导致空间分辨率不高、不同实验室分析方法的差异性、长时间序列数据的获取难度等[17]。

4.2. 空间尺度问题

土壤重金属污染具有明显的空间异质性,不同空间尺度下的 GIS 分析可能呈现出不同的结果。不同空间尺度下的 GIS 分析面临着一系列挑战,如数据集成难度、模型精度的变化等[18]。

4.3. 方法局限性

尽管 GIS 在土壤重金属污染溯源中发挥了重要作用,但其应用方法仍存在一定的局限性[24]。为了克服当前方法的局限性,研究者们可以探讨改进现有方法或引入新的技术手段。可能的方法改进措施包括整合新型数据源、优化空间模型、提高数据处理效率等,以提高土壤重金属溯源研究的可靠性和适用性。

5. 结论

GIS 技术为实现土壤重金属溯源提供了新手段。GIS 在整合数据、识别传输通道、建立源-汇动态模型等方面具有优势,能直观反映污染过程与效果,提高环境管理决策水平。但 GIS 应用也面临数据获取难、成本高等困难,需加强数据建设,提高模型与系统精度,发挥 GIS 技术在土壤重金属溯源中的更大作用。

参考文献

- [1] 王靖伟. 土壤重金属污染及其防治措施分析[J]. 清洗世界, 2023, 39(10): 172-174.
- [2] 侯德义, 张凯凯, 王刘炜, 等. 工业场地重金属污染土壤治理现状与展望[J]. 环境保护, 2021, 49(20): 223-228.
- [3] 谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价——以南京市江宁区某乡镇为例[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 563-569.
- [4] 白秀玲, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封城市土壤磷素组成特征及流失风险[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 909-915.
- [5] Ganugapenta, S., Nadimikeri, J., Chinnapolla, S.R.B., Ballari, L., Madiga, R., *et al.* (2018) Assessment of Heavy Metal Pollution from the Sediment of Tupilipalem Coast, Southeast Coast of India. *International Journal of Sediment Research*, 33, 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.02.004>
- [6] Zhang, P., Qin, C., Hong, X., Kang, G., Qin, M., Yang, D., *et al.* (2018) Risk Assessment and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution from Lower Reaches of Yellow River Irrigation in China. *Science of the Total Environment*, 633,

- 1136-1147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.228>
- [7] Pons-Branchu, E., Ayrault, S., Roy-Barman, M., Bordier, L., Borst, W., Branchu, P., *et al.* (2015) Three Centuries of Heavy Metal Pollution in Paris (France) Recorded by Urban Speleothems. *Science of the Total Environment*, **518**, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.071>
 - [8] 童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 689-707.
 - [9] 陆敬刚. 基于 GIS 技术的土地生态环境污染信息监测研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(5): 24-33.
 - [10] 韩存亮, 罗炳圣, 常春英, 等. 基于多种方法的区域农业土壤重金属污染成因分析研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(2): 176-183.
 - [11] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4670-4683.
 - [12] 朱文博, 张国平, 汪纯云, 等. 基于无线 WIFI 的实时环境监测系统设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(1): 140-143, 148.
 - [13] 邓杨琼. 基于 3S 的土地利用动态监测技术与应用研究[J]. 价值工程, 2020, 39(20): 203-204.
 - [14] 郭志娟, 周亚龙, 杨峥, 等. 雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4169-4179.
 - [15] 揭文辉, 张策, 程思思, 等. 近年来石河子市土地利用与生态环境遥感监测[J]. 地理空间信息, 2020, 18(1): 54-57, 72.
 - [16] 于堃, 单捷, 王志明, 等. 无人机遥感技术在小尺度土地利用现状动态监测中的应用[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 853-859.
 - [17] 朱晓丽, 薛博倩, 李雪, 等. 基于 PMF 模型的宝鸡铅锌尾矿库周边农田土壤重金属源解析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 43-53.
 - [18] Jiang, H., Cai, L., Wen, H. and Luo, J. (2020) Characterizing Pollution and Source Identification of Heavy Metals in Soils Using Geochemical Baseline and PMF Approach. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 6460. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63604-5>
 - [19] 张又文, 韩建华, 涂棋, 等. 天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(11): 1445-1452.
 - [20] 贾佳瑜, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 132-137.
 - [21] 王大可, 徐立明, 郑吉林, 等. 基于 PMF 模型和 Pb 同位素示踪的土壤重金属污染现状分析及源解析[J/OL]. 地质通报: 1-17. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.p.20250911.1014.002>, 2025-10-19.
 - [22] Chen, D., Wang, X., Luo, X., Huang, G., Tian, Z., Li, W., *et al.* (2023) Delineating and Identifying Risk Zones of Soil Heavy Metal Pollution in an Industrialized Region Using Machine Learning. *Environmental Pollution*, **318**, Article ID: 120932. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120932>
 - [23] Guo, G., Li, K., Zhang, D. and Lei, M. (2022) Quantitative Source Apportionment and Associated Driving Factor Identification for Soil Potential Toxicity Elements via Combining Receptor Models, SOM, and Geo-Detector Method. *Science of the Total Environment*, **830**, Article ID: 154721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154721>
 - [24] Zhang, X., Tian, C., Sun, Z., Yin, X., Sun, R. and Wang, J. (2024) Temporal and Spatial Distribution of DIN and DIP Concentrations and Source Apportionment along the Bohai Sea of China during 2015-2022. *Chinese Geographical Science*, **34**, 1004-1016. <https://doi.org/10.1007/s11769-024-1464-3>
 - [25] Ghosh, S., Banerjee, S., Prajapati, J., Mandal, J., Mukherjee, A. and Bhattacharyya, P. (2023) Pollution and Health Risk Assessment of Mine Tailings Contaminated Soils in India from Toxic Elements with Statistical Approaches. *Chemosphere*, **324**, Article ID: 138267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138267>
 - [26] Yi, W., Liu, L., Wang, D., Zhang, X. and Yu, G. (2025) Potential of Biochar Derived from Sewage Sludge and Calcium Sulfate as an Amendment for Acidic Soils: Milk Chinese Cabbage Cultivation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 115641. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115641>
 - [27] 张望, 杨唐仪, 刘媛媛, 等. 赣南某稀土冶炼场地土壤重金属分布特征与源解析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(10): 197-208.
 - [28] Bhandari, R. and Xue, W. (2025) Integrating Multivariate Statistical Analysis and Geospatial Approaches for Sediment Contamination: A Case Study in the Great Chao Phraya River Network, Thailand. *Journal of Soils and Sediments*, **25**, 2032-2046. <https://doi.org/10.1007/s11368-025-04051-5>
 - [29] Mohamoud, A.M., Halder, B., Shakir, H.S. and Yaseen, Z.M. (2025) Soil Heavy Metal Contamination Analysis: A Representative Case Study in New Zealand. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 116808. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116808>