

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.07.014

杨延瑞, 吴思怡, 陈方鑫, 等. 三峡库区农田土壤无机污染物污染特征及风险 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(7): 157-167.

三峡库区农田土壤无机污染物污染特征及风险

杨延瑞, 吴思怡, 陈方鑫, 陈展鹏

西南大学 资源环境学院/水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 无机污染物是农业生产活动和流域生态环境面临的严重威胁。评估农田土壤中无机污染物的污染特征及潜在生态风险, 对于提升农田质量和进行流域治理具有重要意义。以重庆市三峡库区王家沟流域为研究对象, 采用相关性分析和主成分分析法, 结合地累积指数、污染负荷指数和潜在生态风险指数, 对农田土壤中的无机污染物进行了风险评估。结果表明: 土壤受 Cd 和 Ni 等多种无机污染物污染, Cd 和 Ni 的质量分数呈现明显的空间分布特征, 西北方向为高值区, 东南方向为低值区。土壤 pH 值与 Cd、Ni 的质量分数呈现正相关关系, 而土壤黏粒与 Cd、Ni 的质量分数呈负相关关系, 这与土壤表面电荷等因素有关。地质成因、岩石风化、农药化肥施用以及人类活动是无机污染物的主要来源。库区普遍采用土壤钝化和生物修复技术对污染土壤进行治理。

关键词: 农业小流域; 土壤; 无机污染物; 风险评价; 分布特征

中图分类号: X825 **文献标识码:** A

文章编号: 1673-9868(2025)07-0157-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics and Risks of Inorganic Pollutants Pollution in Farmland in the Three Gorges Reservoir Area

YANG Yanrui, WU Siyi, CHEN Fangxin, CHEN Zhanpeng

College of Resources and Environment/Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Inorganic pollutants are a serious threat to agricultural production activities and the ecological environment of the river basin. It is of great significance to evaluate the pollution characteristics and potential ecological risks of inorganic pollutants in farmland soil for the improvement of farmland quality and

收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42477344); 重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2024TIAD-KPX0074)。

作者简介: 杨延瑞, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与面源污染治理研究。

通信作者: 陈展鹏, 博士, 讲师。

watershed management. In this study, we took the Wangjiagou watershed in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing as the object, and used correlation analysis and principal component analysis in combination with the land accumulation index, pollution load index and potential ecological risk index, to assess the risk of inorganic pollutants in farmland soil. The results showed that the soil was polluted by a variety of inorganic pollutants such as Cd and Ni, and the contents of Cd and Ni had strong spatial distribution characteristics, with the northwest being the high value area and the southeast being the low value area. There was a positive correlation between soil pH and the contents of Cd and Ni, and a negative correlation between soil clay and the contents of Cd and Ni, which were related to the soil surface charge. Geological genesis, rock weathering, pesticides, fertilizers and human activities were the main sources of inorganic pollutants. Soil passivation and bioremediation technologies are widely used in the reservoir area to treat the contaminated soil.

Key words: agricultural sub-watersheds; soil; inorganic pollutant; risk evaluation; distribution characteristics

随着大量杀虫剂、化肥以及畜禽养殖所产生粪肥的施用,农田土壤中的无机污染物污染已经成为全球性环境问题^[1-2]。相较于其他易分解的营养盐和有机物,无机污染物属于累积性污染物,具有环境持久性、毒性和生物蓄积等特点,能够在土壤、水体和大气中长期存在,并逐渐积累至危险阈值以上,对土壤生态系统产生持久的毒性影响^[3-7]。农田无机污染物污染现象广泛存在,中国受无机污染物污染的耕地面积达到了约 1×10^7 hm^2 ,经济损失超过 200 亿元^[8]。农药和化肥的长期施用,使得农田土壤成为无机污染物的长期汇聚地^[9]。高浓度的无机污染物是土壤质量退化的重要原因,不仅会导致土壤肥力下降、粮食产量降低,还会对食品安全和人类健康构成威胁^[10-14]。因此,科学认识并评估流域农田无机污染物引发的污染,对于流域土壤质量的提升和生态环境的治理具有重要意义。

为了采取有效的污染防治措施,确定土壤中无机污染物的来源至关重要。理论上,农田土壤中无机污染物的来源可以分为自然来源和人为来源两部分。自然来源包括地质成因和大气沉降等过程;人为来源归因于农药和化肥的施用等^[9, 15]。无机污染物并非孤立存在,而是与周围的环境因子相互作用,污染源释放的无机污染物通过环境因子的影响沉积到土壤中。因此,评估无机污染物与环境因子之间的关系,有助于综合分析无机污染物提升的原因^[16]。国内外针对农田污染已有大量研究,研究人员利用 Pearson 相关系数分析、聚类分析等方法,发现不同无机污染物质量分数之间存在相关性,将主成分分析法与 PMF 受体模型、自组织神经网络模型相结合,进一步明确了无机污染物的来源^[17-19]。部分学者还结合污染负荷指数、内梅罗综合污染指数、地累积指数和潜在生态风险指数等方法,评估了污染物的生态风险,取得了丰富的研究成果^[20-24]。

三峡库区水土流失风险较高且人地矛盾突出,化肥和农药的长期施用加剧了库区土壤无机污染物的污染风险。王家沟流域作为三峡库区的典型流域,评估其无机污染物的污染特征并解析其来源,对于污染防控和库区生态治理具有重要意义。鉴于此,本研究以王家沟流域为研究对象,基于相关性分析和主成分分析法,结合地累积指数、污染负荷指数和潜在生态风险指数综合评估无机污染物引起的生态风险。本研究的主要目标为评估流域农田土壤无机污染物的污染特征,描述环境因子与无机污染物的相关性,解析无机污染物的来源,以期能够为农田土壤无机污染物的风险评价和污染防控提供科学依据。

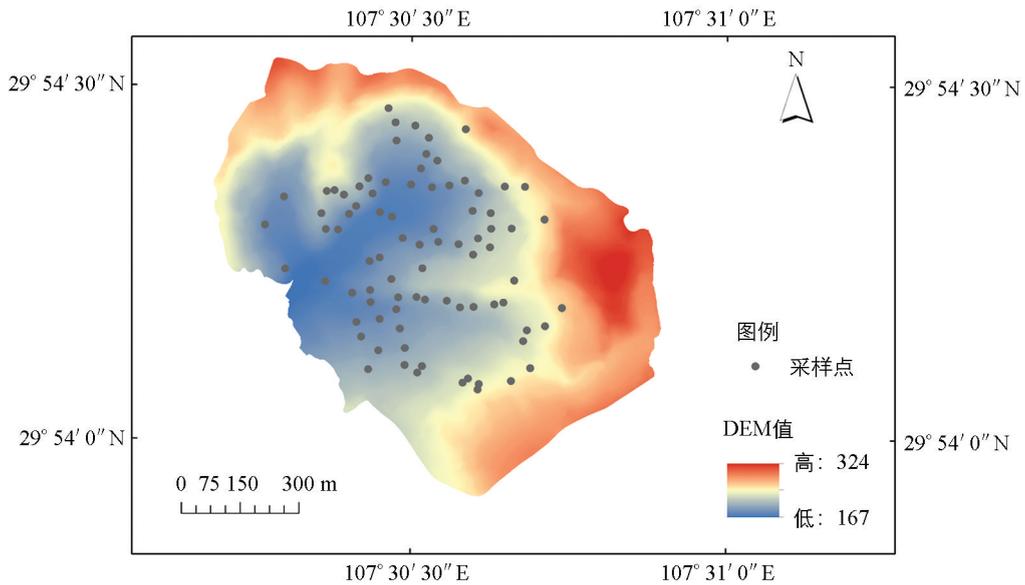
1 材料与方法

1.1 研究区域概况

王家沟流域(107°30'E, 29°54'N)位于三峡库区涪陵区珍溪镇附近。流域内的海拔为 186~317 m, 地形以丘陵为主, 平均坡度为 15.10°。流域属于典型的亚热带季风性湿润气候, 年平均降水量约为 1 011 mm, 年平均气温约为 22.10 °C, 降水主要集中在 6—10 月。研究区域土壤母岩为侏罗系遂宁组岩层发育而成的紫色土, 土壤结构较差, 保水能力较弱, pH 值介于中性至微碱性之间, 有机质质量分数较低, 抗冲刷和抗蚀能力较差。

1.2 样品采集与实验室分析

样品采集时, 避开新搬运的堆积土、垃圾堆以及明显的污染区域^[3]。采用五点混合采样法进行采集, 采样深度为 0~20 cm, 混合形成具有空间代表性的复合样品, 每个样品采集 2 kg, 并装入自封袋中, 共采集了 85 个土壤样品, 采样点分布如图 1 所示。样品经自然风干, 按照标准方法研磨, 过 100 目筛。采用重铬酸盐容量法测定有机质质量分数, 电位法测定土壤 pH 值, 激光粒度分析仪测定土壤粒径。样品用 3 mL 浓盐酸和 9 mL 浓硝酸进行消解, As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的质量分数通过电感耦合等离子体—光学发射光谱法(ICP-OES)测定。测试过程中, 采用国家一级标准物质(GBW07559)和空白样品进行质量控制, 实验误差保持在可接受范围内(±5%)。



审图号: GS(2024)0650 号

图 1 研究区域及采样点分布图

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数

地累积指数由德国科学家 Muller^[25]提出, 通过定量评价单项无机污染物的总量与所在地区背景值之间的相互关系, 来衡量无机污染物的累积程度。地累积指数充分考虑了人类活动和自然成岩等因素对背景值的影响, 因此广泛用于泥沙和土壤中无机污染物的研究^[25-26], 其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 \times B_i} \right) \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为无机污染物元素实际测量值(mg/kg); B_i 为所在地区背景值(mg/kg), 选择重庆市土壤元素背景值^[27], 污染分级标准如表 1 所示。

表 1 农田土壤无机污染物污染等级划分标准

地累积指数(I_{geo})		污染负荷指数(PLI)		生态风险指数(E_r^i)		综合生态风险指数(RI)	
数值范围	污染程度	数值范围	污染程度	数值范围	危害程度	数值范围	危害程度
$I_{geo} \leq 0$	未污染	$PLI \leq 1$	无	$E_r^i < 40$	轻微危害	$RI < 150$	轻微危害
$0 < I_{geo} \leq 1$	未污染至中度污染	$1 < PLI \leq 2$	轻度污染	$40 \leq E_r^i < 80$	中等危害	$150 \leq RI < 300$	中等危害
$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染	$2 < PLI \leq 3$	中度污染	$80 \leq E_r^i < 160$	强危害	$300 \leq RI < 600$	强危害
$2 < I_{geo} \leq 3$	中度至重度污染	$PLI > 3$	重度污染	$160 \leq E_r^i < 320$	很强危害	$RI \geq 600$	很强危害
$3 < I_{geo} \leq 4$	重度污染			$E_r^i \geq 320$	极强危害		
$4 < I_{geo} \leq 5$	重度至极度污染						
> 5	极度污染						

1.3.2 污染负荷指数

污染负荷指数法是一种评价多种无机污染物对污染贡献程度的方法, 能够避免加和关系对评价结果的影响^[25, 28-29], 其计算公式为:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (2)$$

式中: PLI 为污染负荷指数; CF 为污染因子指数, 可由无机污染物与其背景值的比值计算得出; n 为无机污染物种类数(个); PLI 评价分级标准如表 1 所示。

1.3.3 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数由瑞典科学家 Hakanson^[30] 提出, 该方法基于无机污染物的理化性质与环境因子的相互作用, 综合考虑了无机污染物的毒性效应及沉积特征, 用于评价无机污染物的污染程度及其潜在生态风险^[25, 30], 其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{W_i}{B_i} \right) \quad (3)$$

式中: RI 为综合生态风险指数; E_r^i 为无机污染物 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为毒性响应系数; W_i 为元素实测值(mg/kg); B_i 为背景值(mg/kg); Zn、Cr、Cu、Ni、As、Cd 的毒性响应系数分别为 1、2、5、5、10、30^[1, 30]。

2 结果与分析

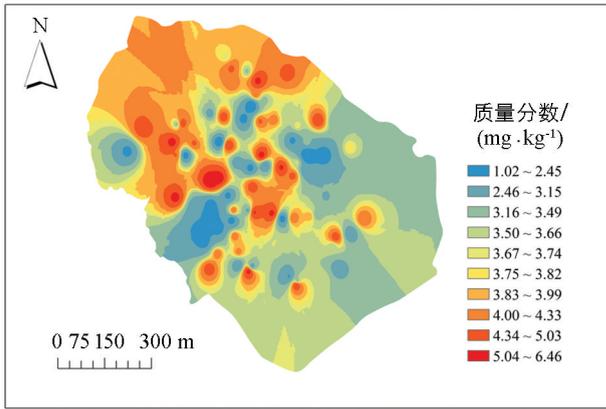
2.1 无机污染物描述性统计和空间分布特征

无机污染物的质量分数变化能够反映是否存在外部污染, 并有助于评估人类活动的影响。As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 质量分数的平均值分别为 3.61、0.35、24.21、7.16、107.36、42.81 mg/kg(表 2)。与土壤元素背景值相比, 除 Cd 和 Ni 外, As、Cu、Cr、Zn 质量分数的平均值均低于背景值。Cd 和 Ni 的质量分数分别为背景值的 3.18 倍和 3.36 倍, 表明受人类活动影响, 需要进一步分析其来源。

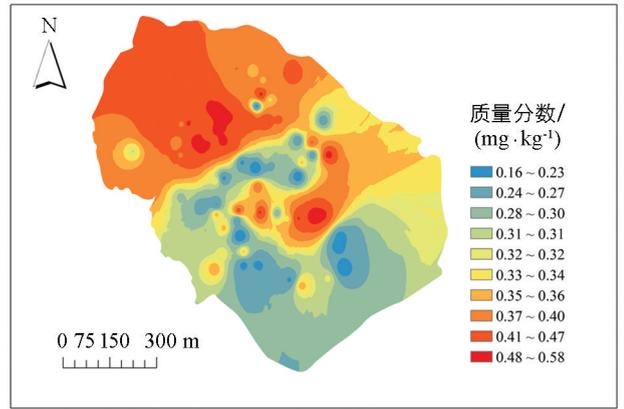
无机污染物的空间分布具有相似性与差异性。Cd 和 Ni 的空间分布高度相似, 主要表现为从西北方向到东南方向递减的趋势, 西北方向为高值区, 东南方向为低值区; Cr、Cu 和 Zn 显示出相似的空间分布特征, 西北和东南地区的质量分数均偏高; As 的高值区主要分布在西北和中部地区(图 2)。

表 2 流域表层土壤无机污染物描述性统计

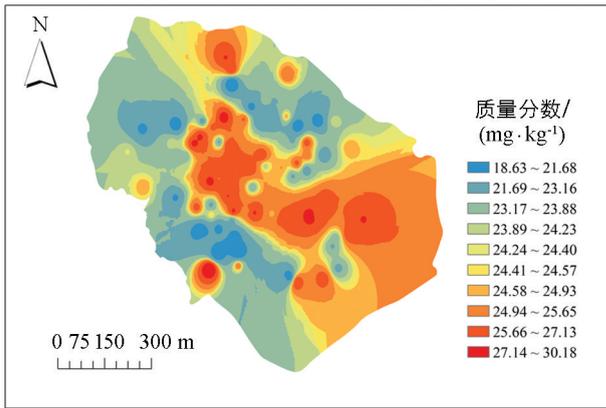
统计值	pH 值	As/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cd/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cr/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cu/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ni/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Zn/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
最大值	8.07	6.47	0.58	30.26	11.61	158.31	65.14
最小值	4.08	0.96	0.16	18.61	4.39	66.28	28.98
平均值	6.27	3.61	0.35	24.21	7.16	107.36	42.81
标准差	1.35	1.22	0.10	2.56	1.27	20.27	6.65
变异系数/%	21.53	33.77	28.71	10.57	17.79	18.88	15.53
背景值	—	5.00	0.11	80.00	26.00	32.00	80.00



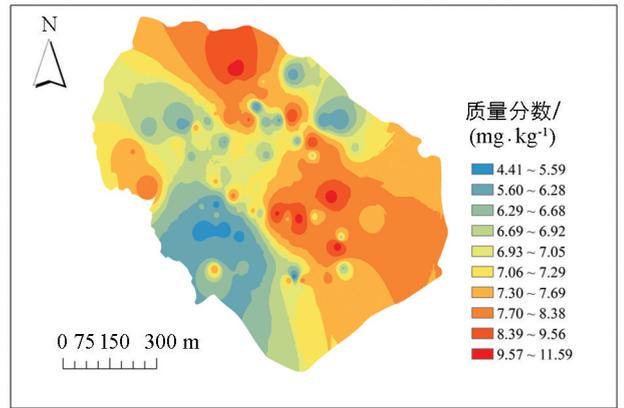
a. As



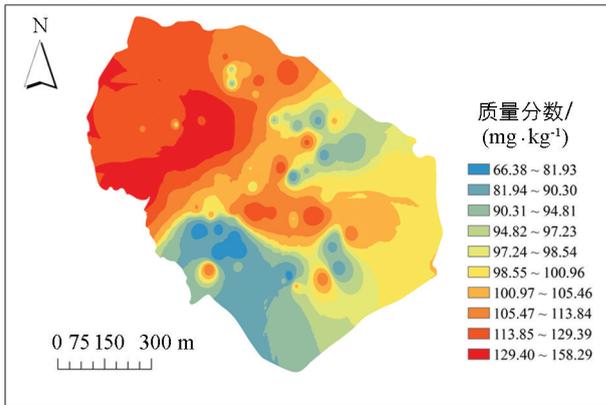
b. Cd



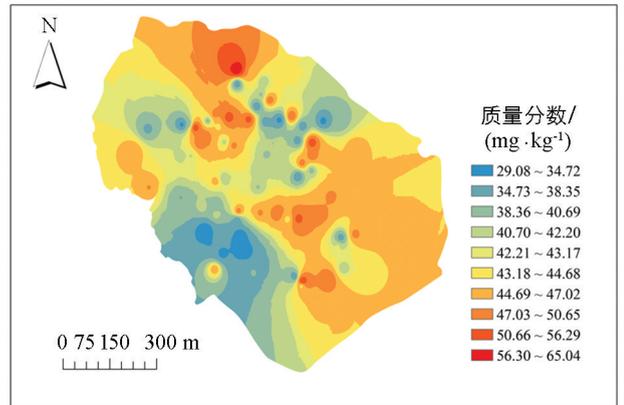
c. Cr



d. Cu



e. Ni



f. Zn

图 2 土壤无机污染物的空间分布特征图

2.2 土壤无机污染物污染评价

本研究采用了 3 种评价方法来评估农田土壤中无机污染物的污染状况。地累积指数(I_{geo})均值从大到小依次为 Zn(11.14)、Ni(11.14)、Cr(10.33)、Cu(6.93)、As(3.49)、Cd(-5.36)(图 3a)。Zn、Ni、Cr 和 Cu 处于极度污染水平,地累积指数超过了 6,且占比均为 100%。As 绝大部分处于中度至重度污染和重度污染水平,其占比分别为 18.82%和 63.53%。Cd 的地累积指数小于 0,表明 Cd 处于无污染水平。

污染负荷指数(PLI)均值从大到小依次为 Ni(3.36)、Cd(3.15)、As(0.72)、Zn(0.54)、Cr(0.30)、Cu(0.28)(图 3b)。Ni 处于重度污染和中度污染的占比分别为 70.59%和 29.41%。Cd 处于重度污染、中度污染和轻度污染的占比分别为 57.65%、30.59%和 11.76%。As、Zn、Cr 和 Cu 则处于无污染水平。

潜在生态风险指数(E_r^i)均值从大到小依次为 Cd(94.40)、Ni(16.78)、As(7.22)、Cu(1.38)、Cr(0.61)、Zn(0.54)(图 3c)。Cd 处于中等危害和强危害的占比分别为 28.24%和 71.76%,Ni、As、Cu、Cr 和 Zn 均处于轻微危害水平。

综合生态风险指数(RI)值从大到小依次为 Cd(8 023.64)、Ni(1 425.92)、As(613.39)、Cu(117.04)、Cr(51.45)、Zn(45.49)。这一结果与单项生态风险指数的结果存在差异,Cd、Ni 和 As 的综合生态风险指数均超过了 600,表明它们具有很强危害,这可能是由于点位累积效应的影响,导致了不同的结果。

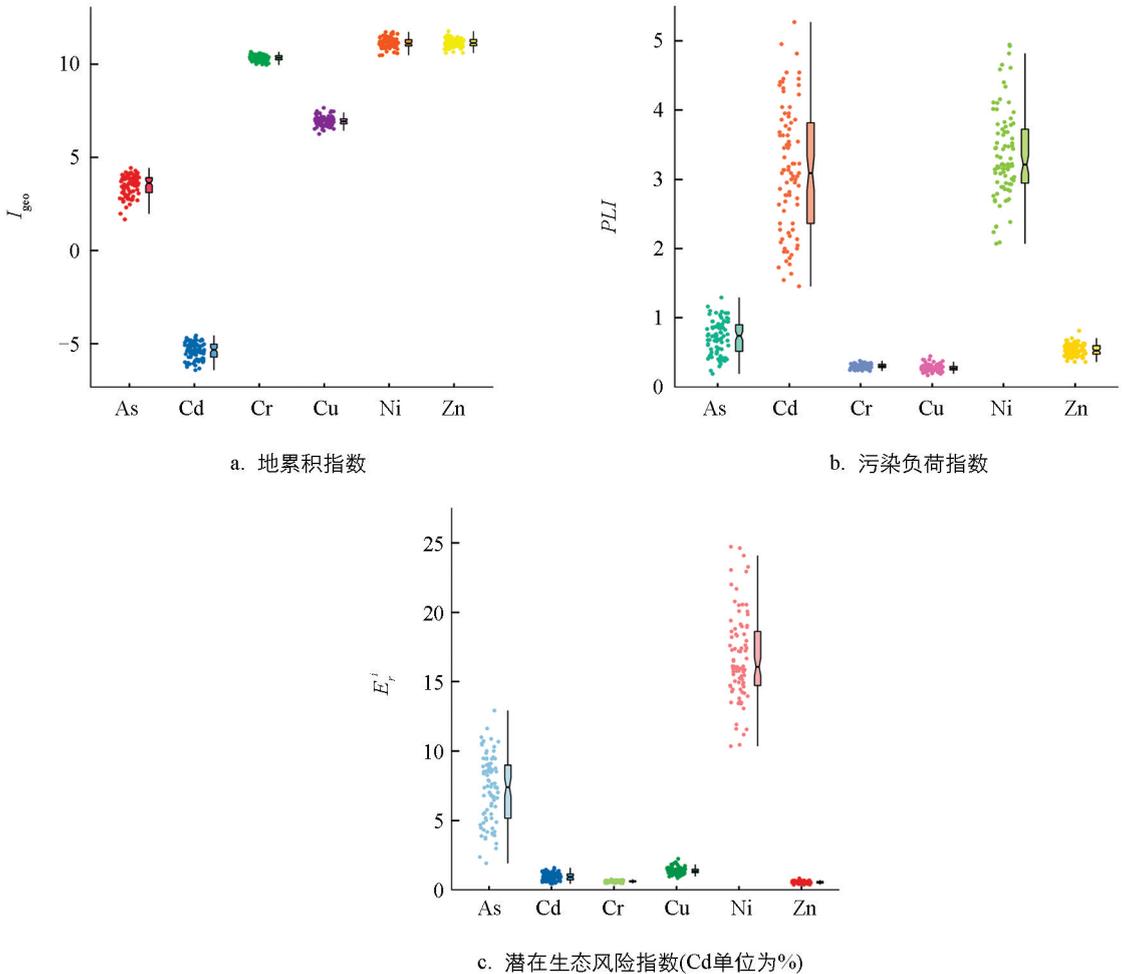
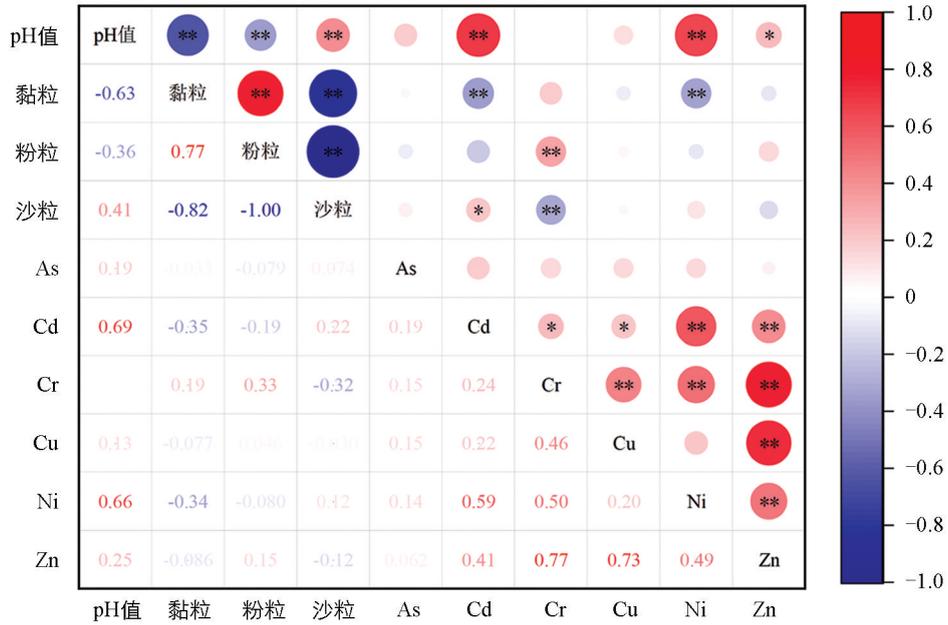


图 3 土壤无机污染物污染评价结果

2.3 土壤无机污染物的相关性分析与主成分分析

两种元素的关联越强,表明它们可能是同源或伴生的可能性越大,因此相关性分析可用于土壤无机污染物的溯源分析^[1]。通过环境因子与无机污染物之间的相关性,可揭示引起无机污染物质量分数变化的原因。根据分类标准,将土壤粒径分为黏粒、粉粒和沙粒 3 个等级。根据相关性分析结果可知,土壤 pH 值与

Cd、Ni 和 Zn 的质量分数呈正相关, 土壤黏粒与 Cd 和 Ni 的质量分数呈负相关, 土壤沙粒与 Cd 的质量分数呈正相关, 而与 Cr 的质量分数呈负相关, 土壤粉粒与 Cr 的质量分数则呈正相关(图 4)。



* 表示 $p \leq 0.05$; ** 表示 $p \leq 0.01$ 。

图 4 土壤表层无机污染物与环境因子的相关性分析

对 As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 进行了主成分分析, 结果表明, KMO 值为 0.594, Bartlett 球形检验显著性水平为 0.00 ($p < 0.001$), 这表明利用主成分分析解析无机污染物来源是可行的。主成分分析结果如表 3 所示。经 Kaiser 选择特征值大于 1 的因子, 提取了 2 个主成分, 共同解释了 67.32% 的总方差, 剩余的 32.68% 不能由这些因素解释。这 2 个主成分代表了影响土壤中无机污染物分布的两大因素, 由此可以推测研究区土壤无机污染物主要来源为 2 个。第一主成分(PC1)贡献率为 48.93%, 由 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 5 种元素组成, 载荷系数为强负荷, 分别为 0.614、0.809、0.702、0.721 和 0.909, 第二成分(PC2)贡献率为 67.32%, As 具有较大的载荷, 载荷为 0.474。

表 3 土壤无机污染物元素主成分分析与初始因子载荷矩阵

成分	初始特征值			提取平方与载入			主成分	
	总计	方差/%	累计/%	总计	方差/%	累计/%	1	2
As	2.94	48.93	48.93	2.94	48.93	48.93	0.257	0.474
Cd	1.10	18.39	67.32	1.10	18.36	67.32	0.614	0.578
Cr	0.94	15.64	82.95	—	—	—	0.809	-0.225
Cu	0.61	10.12	93.07	—	—	—	0.702	-0.461
Ni	0.30	5.04	98.11	—	—	—	0.721	0.431
Zn	0.11	1.89	100.00	—	—	—	0.909	-0.310

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 农田土壤无机污染物的污染特征

Cd 和 Ni 的质量分数在 85 个点位上超出了背景值, 超标率达到了 100%。Cd 和 Ni 的质量分数为背景值的 3.18 倍和 3.36 倍, 这表明人类活动可能对 Cd 和 Ni 的质量分数产生了影响, Cd 和 Ni 存在明显的富集现象。土壤中无机污染物的空间分布至关重要, 尤其在环境管理和修复领域^[11]。总体来看, 无机污染物

的空间分布存在差异性,As、Cd 和 Ni 的高值区出现在西北部,Cr、Cu 和 Zn 在西北和东南均出现了高值区域,这可能是因为它们具有相同的来源。变异系数被用于揭示环境中无机污染物的来源,As、Cd、Cu、Ni 和 Zn 的变异系数属于中等空间变化范围,这表明无机污染物具有相当大的可变性,并且其空间分布不均匀。土壤中的无机污染物可能来源于地质因素和人为活动的混合影响^[31-32]。

3.1.2 农田土壤无机污染物的来源

由相关性分析的结果可知,Cd 和 Ni 受 pH 值的影响。pH 值是土壤最重要的理化性质之一,其变化会导致无机污染物的吸附点位、吸附表面稳定性和存在形态等发生变化,从而影响无机污染物的形态和活性^[33]。土壤的 pH 值还会影响土壤表面电荷,进而影响无机污染物与特定吸附位点的亲和力,改变其溶解度^[34]。从微观角度看,pH 值的变化可以通过系统性地改变有机官能团,从而显著影响土壤中离子的吸附强度^[35-36]。农业管理模式、地表植被以及根系渗出物造成的土壤微生物环境变化,也会影响农田土壤中无机污染物的活性和迁移特性,进而影响无机污染物的存在形式和性质^[37-39]。土壤粒径是另一个重要因素,可显著影响土壤中无机污染物的质量分数,因为它决定了土壤颗粒的迁移率^[40-41]。黏粒土壤能够提高土壤 pH 值,降低土壤中可化学提取部分和重金属的生物利用度,并降低无机污染物的质量分数^[42]。土壤中的沙粒与 Cr 的质量分数呈现负相关关系,与 Cd 的质量分数呈现正相关关系。一般来说,随着土壤粒径的减小,由于比表面积和有效成分的增加,细小土壤颗粒中会积累更多的无机污染物^[43]。

As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的来源途径是多样的。作为地壳的组成部分,As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 天然存在于环境中,受地层岩性和成土母质等多种因素的影响,通过水土流失和大气沉降等过程进入土壤,从而导致元素的富集^[11,44-45]。由于周围环境的变化,Cd 和 Ni 可能会通过植被或地表径流迁移^[11,46-47]。Cd 和 Ni 的污染最为严重,除了成土母质的影响外,它们的来源更可能与农业活动有关。王家沟流域是典型的农业流域,杀虫剂和农药中含有 Cd 和 Ni,长期使用势必导致 Cd 和 Ni 的富集。Cd 在磷肥中通常以杂质的形式存在,肥料已被确定为土壤中 Cd 的主要来源之一^[48]。研究发现,在土壤中施用肥料和粪肥 4 年后,Cd 的平均质量分数相比初始值增加了 17.27%^[39,49]。此外,由生活和畜禽饲养产生的污泥、污水中也可能携带 Ni,这些污泥、污水可能在之后农业生产过程中被用作灌溉水及肥料施用在土壤中,导致 Ni 的累积^[50]。

3.1.3 农田无机污染物防控的管理

农田土壤无机污染物的防控和修复主要包含 3 个方面:去除无机污染物总量、降低无机污染物活性以及控制无机污染物在生物体之间的转移^[36]。对受无机污染物污染的农田进行治理修复,不仅能够提升耕地和农产品质量,增加粮食产量,还能有助于维护区域民众的健康^[51]。然而,农药、化肥的施用和频繁的人类活动加剧了农田无机污染物的污染。因此,应考虑采取可持续的农业实践措施,减少无机污染物的来源,例如,提高肥料利用率、选择非金属杀虫剂、使用生物炭和土壤钝化等^[52]。

目前,针对农田 Cd 和 Ni 的污染问题,三峡库区广泛采用了土壤钝化技术进行治理。土壤钝化能够减少无机污染物在土壤中的累积,降低无机污染物的质量分数,从而实现安全生产和污染治理的目标^[50]。土壤钝化技术以土壤 pH 值为切入点,通过向受 Cd 污染的农田土壤中施入生物炭等碱性材料,能够有效降低土壤孔隙水中的 Cd 和有效态 Cd 的质量分数^[53]。此外,将沸石和磷酸钙镁肥料等钝化剂施入土壤中,能够降低 Cd 的生物利用度、改善土壤的化学性质。组合使用无机钝化剂可以实现高效的 Cd 钝化,进而降低 Cd 的质量分数^[54]。生物修复技术已被广泛地应用于被无机污染物污染的土壤,栽植狗牙根等植物也能减轻 Cd 的污染。这些植物对 Cd 和 Ni 等无机污染物具有很强的转运能力,在无机污染物修复方面具有潜力。螯合剂(如乙二胺四乙酸等)淋洗能够显著升高土壤内 Cd 和 Ni 的结合强度系数,降低迁移指数,从而减少土壤中重金属的潜在生态风险^[55]。

3.2 结论

1) 流域农田土壤中 Cd 和 Ni 质量分数的平均值高于背景值。Cd 和 Ni 具有明显的空间分布特征,西北

部为高值区,东南部为低值区。

2) 地累积指数的评价结果显示,Zn、Ni、Cr和Cu这4种元素处于极度污染状态,As也处于较高的污染水平,而Cd则处于无污染状态。污染负荷指数结果显示,Ni和Cd处于重度污染水平。综合生态风险指数结果显示,Cd、Ni和As在流域内具有很大的生态风险。结合土壤背景值分析,确定Cd和Ni具有很大的生态风险。

3) 相关性分析和主成分分析的结果显示,土壤pH值与Cd和Ni的质量分数呈现正相关关系,土壤黏粒与Cd和Ni的质量分数呈现负相关关系,这与土壤表面电荷等因素有关。地质成因、成土母质的岩石风化、农药化肥的施用以及人类活动是无机污染物的主要来源。通过控制无机污染物来源的输入,结合土壤钝化和生物修复等技术(如使用生物炭和栽植狗牙根等),可有效进行污染防控。

参考文献:

- [1] 刘海,潘茜,魏伟,等. 长江流域安庆市耕地土壤重金属污染特征、潜在生态风险及来源 [J]. 环境科学, 2025, 46(5): 3248-3260.
- [2] XIANG M T, LI Y, YANG J Y, et al. Heavy Metal Contamination Risk Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metal Contents in Soil and Crops [J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116911.
- [3] 贾中民,冯汉茹,鲍丽然,等. 渝西北土壤重金属分布特征及其风险评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(7): 106-114.
- [4] 李军,李旭,李开明,等. 黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2562-2573.
- [5] DU C, LI Z P. Contamination and Health Risks of Heavy Metals in the Soil of a Historical Landfill in Northern China [J]. Chemosphere, 2023, 313: 137349.
- [6] LI Z Y, MA Z W, VAN DER KUIJP T J, et al. A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Mines in China: Pollution and Health Risk Assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468: 843-853.
- [7] BI Z H, SUN J, XIE Y T, et al. Machine Learning-Driven Source Identification and Ecological Risk Prediction of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 476: 135109.
- [8] QU Z J, ZHANG J L, ZENG M, et al. Impact of Heavy Metal Hazard Perceptions on Pollution Control Intentions: Empirical Evidence from Rice Farmers in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 475: 143655.
- [9] HUANG Y, LI T Q, WU C X, et al. An Integrated Approach to Assess Heavy Metal Source Apportionment in Peri-Urban Agricultural Soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 299: 540-549.
- [10] 胡建美,游宇,宋忱馨,等. 沱江内江段支流底泥重金属污染及生态风险 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 132-141.
- [11] 吕留彦,陈祥娥,陈武,等. 黔西北土法炼锌集聚区重金属污染评价及范围界定 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 228-239.
- [12] MAO C P, SONG Y X, CHEN L X, et al. Human Health Risks of Heavy Metals in Paddy Rice Based on Transfer Characteristics of Heavy Metals from Soil to Rice [J]. Catena, 2019, 175: 339-348.
- [13] QIN G W, NIU Z D, YU J D, et al. Soil Heavy Metal Pollution and Food Safety in China: Effects, Sources and Removing Technology [J]. Chemosphere, 2021, 267: 129205.
- [14] 李导玉,王娥,李淑萍,等. 某矿周边典型重金属污染特征及管控对策研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(12): 180-188.
- [15] HOU D Y, CONNOR D, NATHANAIL P, et al. Integrated GIS and Multivariate Statistical Analysis for Regional Scale Assessment of Heavy Metal Soil Contamination: A Critical Review [J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 1188-1200.
- [16] FU J, ZHAO C P, LUO Y P, et al. Heavy Metals in Surface Sediments of the Jialu River, China: Their Relations to

- Environmental Factors [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 270: 102-109.
- [17] ANAMAN R, PENG C, JIANG Z C, et al. Identifying Sources and Transport Routes of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses around a Smelting Site by GIS Based PCA and PMF [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153759.
- [18] LI W W, ZHANG S K, GAO F, et al. Spatial Distribution, Sources Apportionment and Risk Assessment of Heavy Metals in the Changchun Black Soil Area, China [J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2024, 13: 100402.
- [19] SUN L, GUO D K, LIU K, et al. Levels, Sources and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils from a Typical Coal Industrial City of Tangshan, China [J]. *Catena*, 2019, 175: 101-109.
- [20] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 348-354.
- [21] 李清芳, 姚靖, 黄晓容, 等. 黔江区污水处理厂污泥中重金属生态风险评价与健康风险评估 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(3): 120-129.
- [22] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 [J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 260-265.
- [23] XU D, WANG Z J, TAN X Y, et al. Integrated Assessment of the Pollution and Risk of Heavy Metals in Soils near Chemical Industry Parks along the Middle Yangtze River [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170431.
- [24] ZOU H, REN B Z. Analyzing Topsoil Heavy Metal Pollution Sources and Ecological Risks around Antimony Mine Waste Sites by a Joint Methodology [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110761.
- [25] MULLER G. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River [J]. *Geo Journal Library*, 1969, 2(3): 108-118.
- [26] 李军, 脱新颖, 马利邦, 等. 黄河流域渭河支流泾河(崆峒段)河流表层沉积物重金属溯源解析 [J]. *湖泊科学*, 2024, 36(6): 1782-1795.
- [27] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值 [J]. *地学前缘*, 2014, 21(3): 265-306.
- [28] MAURYA P, KUMARI R. Toxic Metals Distribution, Seasonal Variations and Environmental Risk Assessment in Surficial Sediment and Mangrove Plants (*A. Marina*), Gulf of Kachchh (India) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 413: 125345.
- [29] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuaries and the Formation of a Pollution Index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1): 566-575.
- [30] HAKANSON L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [31] OYEBAMIJI A O, OLAOLORUN O A, POPOOLA O J, et al. Assessment of Heavy Metal Pollution in Soils of Jebba Area, Nigeria: Concentrations, Source Analysis and Implications for Ecological and Human Health Risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 945: 173860.
- [32] ZHANG X W, WEI S, SUN Q Q, et al. Source Identification and Spatial Distribution of Arsenic and Heavy Metals in Agricultural Soil around Hunan Industrial Estate by Positive Matrix Factorization Model, Principle Components Analysis and Geo Statistical Analysis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 159: 354-362.
- [33] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 721-728.
- [34] YANG D X, FANG W, ZHANG H, et al. Migration and Availability of Ni and Cd in Industrial Soils under Different Leaching Conditions: Insights from DGT and DIFS Models [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 480: 135863.
- [35] MORENO J E, PLAZA C, SAIZ H, et al. Aridity and Reduced Soil Micronutrient Availability in Global Drylands [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(5): 371-377.
- [36] SUN Y S, CHEN S S, JIANG H, et al. Towards Interpretable Machine Learning for Observational Quantification of Soil Heavy Metal Concentrations under Environmental Constraints [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 926: 171931.
- [37] DAI L J, WANG L Q, LIANG T, et al. Geostatistical Analyses and Co-Occurrence Correlations of Heavy Metals Distribution with Various Types of Land Use within a Watershed in Eastern QingHai-Tibet Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 849-859.

- [38] GUTZLER C, HELMING K, BALLA D, et al. Agricultural Land Use Changes-a Scenario-Based Sustainability Impact Assessment for Brandenburg, Germany [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 505-517.
- [39] WANG Z, XIAO J, WANG L Q, et al. Elucidating the Differentiation of Soil Heavy Metals under Different Land Uses with Geographically Weighted Regression and Self-Organizing Map [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114065.
- [40] 代豫杰, 郭建英, 董智, 等. 不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4809-4818.
- [41] ZHAO H T, LI X Y, WANG X M, et al. Grain Size Distribution of Road-Deposited Sediment and Its Contribution to Heavy Metal Pollution in Urban Runoff in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183(1/3): 203-210.
- [42] XU Y, LIANG X F, XU Y M, et al. Remediation of Heavy Metal-Polluted Agricultural Soils Using Clay Minerals: A Review [J]. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 193-204.
- [43] LIU G N, WANG J, LIU X, et al. Partitioning and Geochemical Fractions of Heavy Metals from Geogenic and Anthropogenic Sources in Various Soil Particle Size Fractions [J]. *Geoderma*, 2018, 312: 104-113.
- [44] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 1069-1074.
- [45] HU Y A, HE K L, SUN Z H, et al. Quantitative Source Apportionment of Heavy Metal(Loid)s in the Agricultural Soils of an Industrializing Region and Associated Model Uncertainty [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 391: 122244.
- [46] ZHANG H H, LI X, XU Z S, et al. Toxic Effects of Heavy Metals Pb and Cd on Mulberry (*Morus alba* L.) Seedling Leaves: Photosynthetic Function and Reactive Oxygen Species (ROS) Metabolism Responses [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 195: 110469.
- [47] LIN H, WANG Z W, LIU C J, et al. Technologies for Removing Heavy Metal from Contaminated Soils on Farmland: A Review [J]. *Chemosphere*, 2022, 305: 135457.
- [48] JIA J, BAI J H, XIAO R, et al. Fractionation, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Cropland Soils across a 100-Year Reclamation Chronosequence in an Estuary, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151725.
- [49] ZHAO S C, QIU S J, HE P. Changes of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain under Long-Term Environmental Impact and Fertilization Practices in North China [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(15): 1970-1979.
- [50] 王丙烁, 黄益宗, 王农, 等. 镍污染土壤修复技术研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2392-2402.
- [51] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策 [J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 261-272.
- [52] ZHANG Y, ZHANG X, BI Z L, et al. The Impact of Land Use Changes and Erosion Process on Heavy Metal Distribution in the Hilly Area of the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137305.
- [53] 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 等. 生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 [J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 450-458.
- [54] JIANG W, LI D, YANG J L, et al. A Combined Passivator of Zeolite and Calcium Magnesium Phosphate Fertilizer: Passivation Behavior and Mechanism for Cd (II) in Composting [J]. *Environmental Research*, 2023, 231: 116306.
- [55] 高一丹, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 不同螯合剂对两类 Cd 和 Ni 污染土壤的淋洗修复对比 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 250-257.

责任编辑 苏荣艳

包颖