

# 农业活动驱动的重金属面源污染与生态修复策略 ——以三峡库区消落带及缓坡耕地为例

王林, 李泽臣, 刘芝, 赵雄, 陈亦孜, 刘园园\*

长江师范学院, 重庆 408100

DOI: 10.61369/SSSD.2026010033

**摘 要 :** 三峡库区是我国重要的生态屏障与农业产区, 兼具显著的资源禀赋与生态脆弱性。近年来, 随着区域工农业活动加剧, 农业面源重金属污染问题日益凸显, 对库区生态环境及农产品安全构成潜在威胁。本文系统梳理了三峡库区农业面源重金属污染的来源与空间分布特征, 指出其受库区特有水文过程影响显著。在归纳现有重金属迁移机制与生态风险评价研究基础上, 本文进一步总结了物理、化学及生物修复技术的研究进展, 并结合典型案例和政策实践, 探讨了以植物修复、生态拦截等为核心的综合治理策略。本文在理论上有助于深化对库区消落带重金属生物地球化学行为的认识, 揭示人为活动与自然过程耦合下面源污染的形成机制, 也为三峡库区及类似生态脆弱区的重金属污染防治与土地安全利用提供了实践参考。

**关 键 词 :** 三峡库区; 农业面源污染; 重金属; 生态修复; 消落带

## Agricultural Activity-Driven Heavy Metal Non-Point Source Pollution and Ecological Remediation Strategies—A Case Study of the Riparian Zone and Gentle Slope Farmland in the Three Gorges Reservoir Area

Wang Lin, Li Zechen, Liu Zhi, Zhao Xiong, Chen Yizi, Liu Yuanyuan\*

Yangtze Normal University, Chongqing 408100

**Abstract :** The Three Gorges Reservoir Area serves as a crucial ecological barrier and agricultural production base in China, featuring significant resource endowments alongside ecological vulnerability. In recent years, with the intensification of regional industrial and agricultural activities, the problem of heavy metal non-point source pollution (NPSP) from agricultural practices has become increasingly prominent, posing potential threats to the ecological environment and agricultural product safety in the reservoir area. This study systematically summarizes the sources and spatial distribution characteristics of agricultural heavy metal NPSP in the Three Gorges Reservoir Area, highlighting its significant influence by the unique hydrological processes of the region. Based on a review of existing research on heavy metal migration mechanisms and ecological risk assessment, this paper further synthesizes the research progress of physical, chemical, and biological remediation technologies. Combined with typical cases and policy practices, it explores comprehensive management strategies centered on phytoremediation and ecological interception. Theoretically, this study contributes to a deeper understanding of the biogeochemical behaviors of heavy metals in the riparian zone of the reservoir area and reveals the formation mechanism of NPSP under the coupling of human activities and natural processes. Practically, it provides a reference for the prevention and control of heavy metal pollution and the safe utilization of land in the Three Gorges Reservoir Area and other ecologically fragile regions.

**Keywords :** Three Gorges Reservoir Area; agricultural non-point source pollution; heavy metals; ecological remediation; riparian zone

### 一、三峡库区农业面源重金属污染的来源与特征

#### (一) 三峡库区农业面源的重金属污染来源

##### 1. 农业投入品是三峡库区农业面源重金属来源之一

三峡库区水体最主要的污染源是农业面源污染, 在农业投入品中, 众多研究指出含重金属的磷肥、农药及有机肥施用是重要污染来源。2010年三峡库区162个乡镇农药施用总量为1638.81t, 其中

有机磷704.33t, 从农药施用构成来看, 有机磷占45.2%<sup>[1]</sup>。

磷肥中镉、铅等重金属杂质, 随着长期施肥不断在土壤中累积, 石雨佳等对库区多地农田土壤分析发现, 在三峡库区的菜地中, 土壤里的重金属主要为Cd(镉)、Cu(铜)、Pb(铅)、Zn(锌), 重金属污染水平遵循Cd>Pb>Cr>Zn>Cu的排名, 而这些重金属的来源与农业活动密切相关<sup>[2]</sup>。其中, 磷肥施用量与土壤镉含量之间存在显著的正相关关系。大量施用有机肥很可能

是造成该区域土壤中重金属快速累积的主要因素。研究表明,三峡库区稻田土壤 Cd、Hg、Pb、As、Cu、Ni 和 Zn 含量平均值均高于三峡库区土壤背景值,土壤 8 种重金属均存在污染累积情况,Cd 和 Hg 污染程度相对较高<sup>[3]</sup>。

## 2. 不合理的土地利用方式造成了库区农业面源的重金属污染

在柑橘、蔬菜等经济作物种植区,农民为了追求高产和品质,过量施用化肥和农药。这种高施肥强度导致土壤中的重金属不断累积,超过了土壤的自净能力。研究发现大棚菜地种植蔬菜重金属含量总体上均高于露地土壤,在库区柑橘主产区,相较于普通农田,该区域土壤中铜、锌等重金属含量显著偏高。长期以来,高强度的施肥操作打破了土壤对重金属原本的吸附解吸平衡状态。重金属由此在土壤里逐步沉淀聚集,进而对土壤的理化性质造成干扰,农作物的品质也因此受到不良影响<sup>[4]</sup>。

## 3. 三峡库区消落带的二次污染导致土壤重金属累积加剧

三峡库区因独特的水位涨落,形成了消落带。在这一区域,土壤一方面遭受水体涨落的侵蚀,另一方面在出露期会经受降水的冲刷和淋溶作用,因而成为二次污染的关键地带。水位的周期性变动,致使沉积物中的重金属出现再悬浮现象并释放出来,而土壤里的有机质,对重金属有着很强的吸附能力,沉积物中重金属(Cr 和 Ni)浓度显著高于土壤中。张雷等研究者研究支流库湾发现,消落带土壤重金属含量在水位下降期明显高于水位稳定期,不仅如此,重金属的形态也随之改变,可交换态重金属的占比上升。这种变化使得重金属更容易被生物体吸收利用,同时也加大了对周边环境构成的潜在风险<sup>[5]</sup>。

## (二) 三峡库区农业面源重金属污染的分布特征

缓坡耕地和消落带重金属富集是库区农业面源重金属污染较为明显的空间分布特征,其形成原因如下两点。

### 1. 水土流失使三峡库区缓坡耕地成为重金属迁移热点区域

缓坡耕地(坡度 $5^{\circ}$  -  $25^{\circ}$ )因水土流失成为重金属迁移热点区域。降雨径流作用下,土壤颗粒会携带重金属沿缓坡耕地面迁移,缓坡耕地的发生改变了土壤的物理结构和环境条件,破坏了土壤对重金属的吸附平衡,使得重金属更容易随着缓坡体的运动而扩散,从而扩大了重金属在土壤中的迁移范围,会影响周边区域的土壤环境质量。郭宜薇等研究显示,坡面径流所携带的泥沙中重金属含量是缓坡耕地原土壤的数倍,大量重金属如铅、镉随径流和侵蚀泥沙搬运到地势相对较平缓的地方沉积下来,进入下游水体和农田,加剧了区域污染扩散<sup>[6]</sup>。水土流失导致土壤颗粒的重新分布,细颗粒土壤更容易吸附重金属,在滑坡过程中,这些携带重金属的细颗粒土壤会随着滑坡体的移动而迁移,使得重金属在不同区域的土壤中重新分配。

### 2. 水位周期性变化导致消落带区域重金属的富集

在消落带中,由于水位的周期性变化和沉积物的沉积作用,重金属会富集在沉积物中。水文动态对重金属在消落带内的分布与迁移有着显著影响。与此同时,该流域内坡耕地数量众多,水土流失问题严峻。在缓坡耕地上施用的农药和化肥,有一部分会借助地表径流、地下潜流以及渗流等方式,转移至消落带区域。在香溪河等消落带研究表明,水位快速变化时水流扰动强,沉积物中重金属释放量增加,不同季节水文条件存在明显差异,这对重金属富集程度影响显著。丰水期时,地表水流量大,对重金属

有较强稀释作用,丰而且河水流速较为缓慢,为重金属沉降创造了有利条件,利于其在河底沉积下来。枯水期河水水位低、流量小,一旦出现过度降雨,大量地表污染物便会被快速冲入河流,导致重金属含量升高<sup>[7]</sup>。

## 二、重金属迁移机制与生态风险

### (一) 重金属的迁移机制

重金属的迁移机制主要由地表径流与土壤淋溶两种迁移途径构成,这两种迁移途径均表明了土壤与水体在重金属的迁移中有着极大的推动作用。

1. 地表径流是在多雨地区降水强度大、频率高,导致土壤侵蚀和重金属随颗粒物冲刷而形成。在三峡库区多以紫色土为农业土,但紫色土孔隙度大、有机质含量低,持水性差,导致重金属更易吸附于细颗粒物,径流从而进入河流/湖泊<sup>[8]</sup>。

②土壤淋溶是在 pH 调控下,酸性环境促使重金属从固相(如铁锰氧化物、黏土矿物)释放为可溶性离子(如  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ ),迁移至深层土壤或地下水的过程。由于  $\text{H}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等阳离子与重金属竞争吸附位点,进一步增加活性态重金属比例<sup>[9]</sup>。

### (二) 重金属的生态风险表现

#### 1. 水体富营养化协同效应

重金属在低浓度下刺激藻类生长(如铜绿微囊藻),与氮磷耦合形成复合污染,相关研究证明,三峡库区支流中,Cd 与 TP 浓度呈正相关( $R^2=0.32$ ),水华暴发频率增加 30%~50%<sup>[10]</sup>。

#### 2. 生物累积与食物链放大

生物累积与食物链放大也存在生态风险。赵芳等研究显示,白鲟(濒危物种)肝脏中 Hg 含量超国标 2~3 倍,导致繁殖抑制<sup>[11]</sup>;胭脂鱼肌肉 Cd 积累量达 0.28 mg/kg (GB 2762-2022 限值 0.1 mg/kg)。朱慧敏等研究表明,紫色土区水稻籽粒 Cd 超标率可达 15%~20%,通过米-人途径威胁健康<sup>[12]</sup>。

## 三、生态修复技术体系与实践

### (一) 源头控制技术

#### 1. 农艺调控

农艺调控作为生态修复的重要手段,通过优化种植结构与施肥管理,从源头减少重金属向食物链的转移。桑树、油菜等重金属低积累作物的种植,结合品种改良与轮作制度,显著降低了农产品中重金属含量。例如:桑树单株对镉的富集量最高可达  $178.75 \mu\text{g}$ ,结合其生物量大、经济价值高的特点,适合用于中度镉污染土壤修复。其根系对重金属的吸附能力较弱,且叶片生物量大,可通过刈割移除部分重金属,同时兼具经济价值<sup>[13]</sup>。

#### 2. 钝化剂应用

针对土壤重金属活性问题,工业副产品与生物炭的资源化利用成为研究热点。纳米材料作为一种新型钝化剂,具有比表面积大、吸附性能强、表面活性高等优点,对环境污染物具有较强的吸附性能,被广泛应用于土壤重金属污染治理<sup>[14]</sup>。把钝化剂施加入土壤后,纳米材料能够改变土壤的 pH,降低重金属 Cd 在土壤中的有效性。

生物炭则通过其多孔结构与表面官能团,吸附固定重金属离

子,同时改善土壤微环境。生物炭还能微生物提供载体,强化土壤生态功能,加速重金属的生物固化过程。研究发现,土壤中不稳定态重金属通过生物炭的固化,达到稳定状态,其重金属含量大幅度减少<sup>[15]</sup>。两种钝化剂的复合使用,可实现物理吸附与化学沉淀的双重作用,显著提升修复效率。

## (二) 过程拦截技术

### 1. 构建消落带生态屏障

消落带作为水陆交错生态脆弱区,其生态屏障功能的恢复需结合耐淹植物筛选与工程措施优化。在三峡库区实践中,中山杉、狗牙根等耐淹物种被广泛应用,形成周期性淹没-出露条件下的稳定植被群落。狗牙根作为先锋物种,根系发达,能深入土壤吸收铅、镉等重金属,并通过地下茎形成致密地表覆盖,减少重金属迁移。例如狗牙根作为消落带的适生生物,研究表明,狗牙根主要通过根、茎富集重金属离子 Cr(VI),随着处理的 Cr(VI) 的质量浓度的增加,富集迁移的量逐渐增加,且能明显降低江水中的 Cr(VI) 质量浓度<sup>[16]</sup>。配合芦苇等挺水植物通过根系吸收水中的氮、磷及重金属(如铅、镉、锌),并将其富集于根部,减少向水体迁移。形成立体净化系统。

### 2. 建造缓坡耕地工程措施

针对丘陵区耕地水土流失问题,梯田改造与植物篱技术的协同应用显著提升拦截效能。植物篱笆例如香根草,香根草能较好耐受 Cd 胁迫,实验发现低浓度 Cd 胁迫下能长期存活,因此具有修复含 Cd 污染土壤的潜力。在我国某些区域,集成智能节灌系统与生态沟渠,通过循环神经网络动态调控灌溉量,结合磁性生物炭复合填料,使农田排水中总氮、总磷浓度分别下降58%和62%。此外,梯田埂坡采用三维植被网喷播技术,形成生物-工程复合防护层,提升耕地有机质含量<sup>[15, 16]</sup>。

## (三) 末端治理技术

### 1. 使用微生物修复技术治理

微生物修复通过定向筛选功能菌株与优化代谢条件,实现重金属形态转化与毒性降低。微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)是目前重金属污染土壤治理修复领域的一项新兴技术。脲解型细菌具有稳定的环境适应性,能在富含重金属的极端环境下稳定增殖,确保 MICP 修复重金属的可行性。脲酶基因表达水平高,可使尿素快速分解为碳酸盐沉淀,确保 MICP 修复重金属的有效性<sup>[17]</sup>。

### 2. 构建人工湿地净化系统

人工湿地净化系统可以通过植物修复、物理吸附、化学沉淀与生物协同作用实现重金属去除。互花米草的防治中产生的大量生物质碎屑可以对修复重金属产生影响,添加互花米草碎屑将其置于土壤表面或者埋入土壤两种处理方式都能够促进人工湿地中重金属 Cu 向稳定态转化,降低其生物有效性。对于重金属 Fe 则需对互花米草碎屑埋入土壤处理,才能更好地向稳定态转化<sup>[18]</sup>。

## 四、三峡库区农业面源污染土壤重金属污染修复案例与政策扶持

### (一) “钝化剂+植物修复”联合技术进行土壤重金属治理案例

土壤重金属修复多采用化学钝化修复和植物修复,土壤污染

情况日益复杂,多品种钝化剂复配、化学技术和植物修复技术联用是土壤污染修复领域的发展趋势。研究表明,在磁性生物炭的使用下,促进了黑麦草对 As 的富集和转运,并且磁性生物炭的添加还增加了土壤有机碳的稳定性,抑制了黑麦草挥发性有机化合物的排放速率。有研究结果显示,在生物炭存在情况下,植物修复 60 天后,生物炭导致 Cd 去除率从 11 % 增加到 15 % 到 23-35 %,苔藓衍生的生物炭有力地帮助过度积累的植物去除稻田中的 Cd 污染物<sup>[19]</sup>。由此可见,在钝化剂生物炭的作用下,植物修复重金属污染土壤的效率大大提高,同时也增加了土壤的肥力与稳定性。

## (二) 国家政策支持

在国家重点支持下,三峡库区消落带构建“源头控制-过程阻断-末端削减”治理模式。源头控制通过少耕种植、绿篱缓冲带等技术减少农业面源污染输入,相关措施在坡度较高农田的应用效果被研究证实;过程阻断依托生态护坡构建、适生植物筛选及植被过滤带配置,有效拦截污染物迁移扩散,万州示范区实践验证了此技术路径的阻断作用;末端削减采用人工湿地与生物处理技术净化水体,进一步削减入库污染物负荷。综合技术体系显著降低重金属等污染物入水体量,切实保护库区水生态安全。这些政策支持为三峡库区消落带的生态修复提供了坚实的理论依据和实践指导,有力推动了长江大保护战略的实施,促进了三峡库区水生态环境的持续改善和可持续发展。

## (三) 流域协同治理政策的强化与政策保障

《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》明确提出要加强污染跨界协同治理,统一环保标准、推进跨界水体环境治理、深化大气污染联防联控等,为成渝地区流域协同治理提供了顶层设计和方向指引。通过联合制定和实施污染防治计划,共同应对跨区域的重金属面源污染问题,提高治理效率和效果,促进三峡库区及周边地区生态环境质量整体提升。

《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025年)》中提出源头减量、减污降碳的要求,为库区生态修复提供了政策依据。成渝双城经济圈生态共建与这一行动方案形成协同效应,推动库区生态修复工作与区域经济发展相协调。

## (四) 生态补偿机制的政策驱动与实践创新

国家政策为三峡库区生态补偿机制提供了制度保障。《2025年中央一号文件》明确提出支持秸秆综合利用与受污染耕地安全利用的政策导向,与生态补偿机制形成联动。通过财政补贴激励农民采用有机肥料、绿肥种植等生态耕作模式,既降低了农业面源污染风险,符合《农业农村污染治理攻坚战行动计划》的要求,又促进了农民增收,增强了其参与生态修复的积极性和主动性。

## 五、挑战与未来展望

### (一) 技术瓶颈

三峡库区所面临的很多问题,其中以消落带水位波动带来的影响,库区中紫色土的酸化所带来重金属活性的提高问题最为突出。

①消落带水位波动对修复植物存活率的制约。三峡库区消落带水位变动特征为周期性淹没与干旱交替。三峡库区水位年变幅约30米(145米至175米),消落带区域每年经历长达数月的淹没



期（夏季低水位至冬季高水位）和暴露期（冬季高水位至夏季低水位）。在这样的极端环境压力下，植物需适应长期淹水缺氧（淹没期）和干旱胁迫（暴露期），部分区域还会因水位快速升降导致土壤侵蚀。因不同植物物种对水淹的耐受性有差异，导致植被组成及其空间分布受到水文胁迫的严格控制。水库消落区已成为世界上退化最为严重的生态系统之一。

②紫色土酸化与重金属活性的长效控制难题。紫色土是我国西南地区特有且重要的农业土壤资源。紫色土是一种特殊的土壤类型，通常富含碳酸钙等物质。养分丰富，且养分循环速度快，具有较高的生产力。但随着过量施用化肥且不平衡配施及酸沉降，导致土壤酸化形式日益严峻。因紫色土中往往含有一定量的重金属元素，土壤酸化使阳离子交换量和盐基饱和度降低，土壤贫瘠化，有毒重金属元素活化。紫色土酸化是导致重金属活性增加的重要因素之一，而重金属活性的变化又会反过来影响土壤的性质和生态功能。因此，需要同时对紫色土酸化和重金属活性进行控制，才能实现紫色土地区土壤质量的保护和生态环境的可持续发展。但由于涉及到多个学科领域的知识和复杂的环境因素，要实现长效控制并非易事，存在诸多困难和挑战。

（二）创新方向

使用多种技术相结合、技术与本土产业园区相结合打造出生态－经济相协调模式。

①智能监测技术。数字经济的崛起与繁荣，赋予了经济社会发展的“新领域、新赛道”，也为企业带来高质量发展的“新动能、新优势”。通过结合 GIS、物联网等数字化手段搭建智能监测重金属污染动态平台，可以更直观，更清晰的监测重金属污染的状况。从而达到能够实时监测与快速响应，多源数据整合与分析，精准污染溯源，实现动态预警与智能决策。

②多技术协同。基因编辑培育耐重金属作物与纳米材料钝化剂的联合应用。在早期就有使用钝化剂对土壤重金属污染进行修复。钝化剂作为化学修复的一种，成本低、高效省时。有研究表明，复合钝化剂施用同时使用间作模式种植作物，可以有效提升土壤中重金属污染的修复效果。使用水稻秸秆生物炭对土壤中重金属 Cd 进行钝化，研究结果显示改善了土壤理化性质，提高了土壤肥力，降低了 Cd 的生物有效性。由此看出，耐重金属作物与钝化剂的联合使用可以提高对重金属污染的修复力度，也使农作物对重金属有一定的防御。

③生态－经济协同模式。生态－经济协同模式是一种旨在实现生态保护与经济发展良性互动的发展路径，将生态资源转化为经济价值，同时以经济收益反哺生态治理，最终形成“生态保护促进经济发展、经济发展支撑生态保护”的闭环。多个地区使用此模式进行生态治理和经济发展，如黄河流域的生态治理，云南普洱茶生产链实行的“茶＋旅游＋文化”模式等。基于此可以大力发展“修复＋产业”的生态－经济协同模式，促进当地经济，提升可持续性。从而达到污染修复的同时，地区经济也稳定增加。

六、结论

三峡库区农业面源污染控制是一大难题，因其人口众多，地理位置的特殊性，三峡库区农业面源重金属污染治理需兼顾“自然－社会”系统复杂性，强调技术适配性与政策落地性。在未来生态修复研究中应聚焦消落带与缓坡耕地的生态修复技术集成，并融入长江经济带绿色发展框架。

参考文献

[1] 李杰，徐征，朱道静. 三峡库区农药污染对马铃薯晚疫病相关生态因子影响研究初报 [J]. 南方农业, 2011, 5(S1): 15-19.

[2] 石雨佳，方林发，方标，叶苹苹，范晓霞，高坤鹏，陈征，肖然. 三峡库区（重庆段）菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 [J]. 环境科学, 2023, 44(03): 1611-1619.

[3] 刘娅君，李彩霞，梅楠，张美平，张成，王定勇. 三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 [J]. 环境科学, 2023, 44(06): 3520-3530.

[4] 王甜. 三峡库区柑橘园和茶园土壤氮磷流失过程研究 [D]. 中国林业科学研究院, 2022.

[5] 张雷，秦延文，郑丙辉，曹伟. 三峡水库入库河流大宁河土壤重金属分布特征 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(04): 81-85+139.

[6] 郭宜薇，丁文峰，朱秀迪，崔威. 三峡库区重金属含量空间分布及污染状况 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(06): 105-112.

[7] 江梦含. 香溪河消落带溶解性有机质对重金属迁移影响研究 [D]. 三峡大学, 2023.

[8] 王永华，陈志强，吴晓芳，等. 紫色土孔隙结构特征及其对水分保持能力的影响 [J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 589-598.

[9] 陈晓阳，刘建国，黄婷，等. 土壤酸化对 Cd 和 Cu 释放的影响：基于动力学模型的模拟 [J]. 生态毒理学报, 2017, 12(4): 112-123.

[10] 周淑雅，董亮，吴一凡，等. 微量金属 (Cu、Zn) 与营养盐对铜绿微囊藻生长的协同作用 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(7): 1205-1214.

[11] 赵芳，徐海洋，李佳，等. 长江溯危鱼类 Hg 和 Cd 的生物富集特征及健康风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 345-356.

[12] 朱慧敏，郑伟，林晨，等. 紫色土区水稻镉富集特征及膳食暴露评估 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 932-941.

[13] Cai C, Zhao M, Yu Z, et al. Utilization of nanomaterials for in-situ remediation of heavy metal (loid) contaminated sediments: a review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 205-217.

[14] Zhang L, Van Gestel CAM. Effect of ageing and chemical form on the bioavailability and toxicity of Pb to the survival and reproduction of the soil invertebrate Enchytraeus crypticus[J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 975-983.

[15] 杨秀彪，吴珂，欧朝蓉，等. 香根草对镉－扑草净复合污染胁迫的生理响应 [J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(7): 964-974.DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0053

[16] 董名扬. 不同生态型香根草对镉耐受和积累特性的研究 [D]. 吉首大学, 2022.

[17] 韦文玉，张文，韦秘. 微生物固化重金属修复机制及其在稻田土壤修复中的潜在应用 [J]. 工业微生物, 2025, 55 (01): 87-89.

[18] 李俊明，肖蓉，胡艳萍，等. 添加互花米草碎屑的人工湿地对阿特拉津和重金属的净化效果 [J]. 湿地科学, 2024, 22 (03): 405-417.

[19] Wang H, Shi C, Zhang Q, et al. Biochar assists phytoremediation of cadmium by regulation of rhizosphere microbiome in paddy fields[J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 36: 103757.