

不同钝化材料对镉污染土壤修复效果研究

杨义^{1,2}, 刘春香³, 胡鹏³, 李剑灵³, 张晨光⁴, 廖继华⁵

¹江西洁地环境治理生态科技有限公司, 江西 鹰潭

²安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

³新余市渝水区农业科学研究中心, 江西 新余

⁴武汉奥恒胜科技有限公司, 湖北 武汉

⁵江西省新余市仙女湖风景名胜区农村工作局, 江西 新余

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月24日; 发布日期: 2026年9月28日

摘要

农田土壤镉(Cd)污染是制约耕地安全利用、威胁农产品质量安全的突出环境问题, 原位钝化技术因成本低廉、操作简便、适配大田生产等优势, 成为Cd污染农田修复的重要技术。为明确木本泥炭、微生物菌剂和石灰三种典型钝化材料对Cd污染农田的修复效果及应用差异, 本研究设置对照组(CK)、木本泥炭钝化处理(NT)、微生物菌剂处理(WSW)和石灰钝化处理(SH) 4组田间试验, 探究不同钝化材料对土壤理化性质和水稻生长的影响。结果表明: 相较于CK, SH处理可显著提升土壤pH值, 有效改善土壤酸化状况, 土壤有效态Cd含量降幅最优; NT与WSW处理对土壤pH调控作用较弱, 但均可有效降低土壤有效态Cd含量, 二者钝化效果无显著差异; 各钝化处理对水稻产量均无抑制作用, 有利于维持农田稳定生产力; 不同钝化材料对水稻籽粒Cd累积的影响存在明显差异, 其中NT处理水稻籽粒Cd含量最低, 对作物可食部位Cd富集的阻控效果最优, 而WSW处理未表现出明显抑制Cd向水稻籽粒转运累积的作用。综上, 石灰更适用于酸化Cd污染土壤的钝化修复, 木本泥炭在农产品Cd安全管控方面优势显著, 微生物菌剂单一修复效果有限, 建议实际生产中采用复配施用模式。

关键词

Cd污染, 土壤, 钝化修复, 水稻

Study on the Remediation Effects of Different Passivation Materials on Cadmium-Contaminated Soils

Yi Yang^{1,2}, Chunxiang Liu³, Peng Hu³, Jianling Li³, Chenguang Zhang⁴, Jihua Liao⁵

¹Jiangxi Jiedi Environmental Treatment Ecological Technology Co., Ltd., Yingtan Jiangxi

²School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

³Xinyu Yushui District Agricultural Science Research Center, Xinyu Jiangxi

⁴Wuhan Aohengsheng Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

文章引用: 杨义, 刘春香, 胡鹏, 李剑灵, 张晨光, 廖继华. 不同钝化材料对镉污染土壤修复效果研究[J]. 土壤科学, 2026, 14(4): 220-227. DOI: 10.12677/hjss.2026.144022

⁵Rural Work Bureau, Xiannühu Scenic Area, Xinyu City, Jiangxi Province, Xinyu Jiangxi

Received: July 15, 2026; accepted: August 24, 2026; published: September 28, 2026

Abstract

Cadmium (Cd) pollution in farmland soil is a major environmental challenge, endangering the safe use of agricultural land and food safety. *In-situ* passivation technology has become an important repair method because of its high cost efficiency, simple operation and suitability for large-scale field applications. To evaluate the remediation efficacy and application differences of three typical materials—woody peat, microbial inoculant, and lime—this study conducted four field experiments: a control group (CK), woody peat treatment (NT), microbial inoculants treatment (WSW), and lime treatment (SH). The study investigated their impacts on soil physicochemical properties and rice growth. Results demonstrated that the SH treatment significantly increased soil pH, effectively alleviating acidification, and achieved the most substantial reduction in available Cd content compared to CK. While NT and WSW treatments exhibited weaker pH-regulating effects, both effectively lowered available Cd levels, with no significant difference between them. None of the treatments inhibited rice yield, supporting stable agricultural productivity. The impact of different materials on Cd accumulation in rice grains varied markedly: NT treatment resulted in the lowest Cd levels in grains and the most effective control over Cd accumulation in edible parts, whereas WSW showed no significant inhibitory effect on Cd transport and accumulation. In conclusion, lime is most suitable for passivating acidic Cd-contaminated soils; Woody peat demonstrates distinct advantages in ensuring Cd safety in agricultural products; and microbial inoculant treatment has limited efficacy. A combined application strategy is recommended for practical implementation.

Keywords

Cadmium Pollution, Soil, Passivation Remediation, Rice

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

随着工业化、集约化农业生产的持续推进,农田土壤重金属污染问题日益突出,其中 Cd 因迁移性强、生物有效性高、易在作物体内富集、可通过食物链危害人体健康等特征,成为我国耕地污染管控的首要重金属污染物[1] [2]。《2021 中国生态环境状况公报》¹表明,我国耕地土壤 Cd 点位超标率位居重金属污染首位,中轻度 Cd 污染农田分布广泛,严重制约了耕地资源安全利用与粮油农产品质量安全。因此,开展 Cd 污染农田高效、绿色、适配大田的修复技术研究,对保障耕地生态安全、粮食安全具有重要现实意义。

目前,农田 Cd 污染修复技术主要包括物理修复、化学修复、生物修复及联合修复技术,其中原位化学钝化技术凭借修复周期短、成本低、不破坏土壤结构、适合大面积农田推广等优势,被广泛应用于中轻度 Cd 污染农田治理[3] [4]。现阶段常用的钝化材料主要分为无机钝化材料、有机钝化材料及微生物钝化材料三类,不同类型材料的修复机制、应用效果及适用场景存在显著差异。钝化材料可通过吸附、络合、沉淀、离子交换等物理化学过程,改变土壤中 Cd 的赋存形态,降低有效态 Cd 占比,抑制 Cd 向作

¹<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220608338202870777.pdf>

物迁移累积, 从而实现污染土壤安全利用[5]。

木本泥炭作为优质有机钝化材料, 富含腐殖酸、羧基、酚羟基等活性官能团, 可通过表面络合、物理吸附、孔隙截留等方式固定土壤重金属, 同时可改良土壤有机质结构、优化土壤理化性质, 兼具污染修复与土壤培肥双重作用[6]。微生物菌剂是重金属污染农田原位钝化修复的绿色高效修复材料, 依托功能微生物的生理代谢特性, 通过吸附固定、价态转化、络合沉淀、微环境调控等多重协同机制, 有效改变土壤中重金属的赋存形态, 降低重金属生物有效性及迁移能力, 抑制作物对重金属的吸收富集, 具有环境友好、无二次污染的优势[7]。石灰是典型的碱性无机钝化材料, 可通过提升土壤 pH 值, 促进土壤中 Cd 离子形成难溶性氢氧化物、碳酸盐沉淀, 同时改变土壤胶体电荷特性, 降低 Cd 的生物有效性, 在酸性 Cd 污染土壤修复中应用广泛[8]。三类材料各有优势, 但当前关于单一钝化材料对土壤理化性质和农作物安全生产的影响有待深入研究, 不同材料的修复短板与适配场景尚不明确。

基于此, 本研究以典型 Cd 污染农田为研究对象, 系统对比木本泥炭、微生物菌剂和石灰三种钝化材料对土壤 pH、有效态 Cd 含量、水稻产量及水稻籽粒 Cd 累积的影响, 明确不同钝化材料的修复机制差异与应用优劣, 旨在筛选适配大田生产的优质钝化材料, 为 Cd 污染农田原位钝化修复、农产品安全管控提供理论依据和技术参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验概况及供试材料

本研究在江西省新余市珠珊镇丁家村开展大田试验, 该地区位于赣江流域中游, 属于亚热带季风气候, 土壤为第四纪红壤。受上游工矿企业历史废水排放以及大气沉降等因素影响, 本次试验区域土壤存在 Cd 污染问题。试验区土壤总 Cd 含量 0.71 mg/kg, Cd 含量超出《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)²中的风险筛选值, 属于典型的南方中轻度 Cd 污染农田。

本研究选取水稻品种为“皖两优华占”, 购自湖北惠民农业科技有限公司, 为试验区所在地可以大规模使用的水稻品种。钝化材料包括木本泥炭、微生物菌剂(“内生菌根真菌”)和生石灰, 试验土壤和钝化材料基本理化性质如表 1 所示。

Table 1. Basic physicochemical properties of the test soil and passivation materials

表 1. 试验土壤和钝化材料基本理化性质

样品	pH	总 Cd/mg·kg ⁻¹	有效态 Cd/mg·kg ⁻¹
土壤	4.99	0.71	0.12
木本泥炭	8.83	-	-
微生物菌剂	7.17	-	-
生石灰	13.74	-	-

2.2. 试验设计

2.2.1. 试验小区处理

本试验采用随机区组的试验设计, 共设置 4 组处理, 每种处理对应 3 个试验小区。单个小区面积为 25 m² (5 m × 5 m), 小区之间修筑高度田垄, 一垄种 24 行水稻, 一行种 3 株水稻, 行/株间距 0.2 m, 距垄边 0.1 m。铺设隔水薄膜对小区进行阻隔, 避免水分和养分发生侧向渗漏。试验区域修建统一的进水管与

²https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201807/t20180703_446029.shtml

排水沟，确保各小区水分管理条件保持一致。各试验组的具体处理方式详见表 2。

Table 2. Experimental treatment design

表 2. 试验处理设计

处理组	采取措施	添加时期	添加量
CK	-	-	-
NT	木本泥炭土壤改良剂	移栽前	180 kg/亩
WSW	微生物菌剂	分蘖期	5 kg/亩
SH	生石灰	移栽前	150 kg/亩

2.2.2. 田间管理

(1) 材料管理：在早稻移栽施用相应材料(木本泥炭和生石灰)后用旋耕机翻耕，使钝化剂与土壤充分混合；微生物菌剂在水稻分蘖期兑水稀释后灌根施用。

(2) 水分管理：各小区田间水分管控保持统一。插秧阶段维持浅水层；分蘖期持续浅水灌溉；停止分蘖生长后，进行短期晒田处理；灌浆阶段则采用干湿交替的灌溉方式。

2.2.3. 样品采集

(1) 土壤样品采集：分别于水稻移栽前和水稻成熟期采集土壤样本。试验采用 S 形五点取样法，采样深度控制在 0~20 cm，将五个采样点的土壤均匀混合为一份样品。土壤样品采集后置于通风处自然风干，剔除石块和植物残体等杂质后进行过筛处理。将处理好的土壤样品通过四分法进行留样，用于后续土壤指标测定(土壤 pH、全量 Cd 和有效态 Cd 含量)。

(2) 植物样品采集：水稻成熟后，在各个试验小区利用五点取样法选取具有代表性的水稻植株。将植株根系表面泥土清洗干净，再按照根、茎、叶和籽粒进行器官划分。稻谷经过脱壳处理，得到籽粒样品，用于后续 Cd 含量检测。

2.3. 测定方法

土壤 pH 值：采用《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962-2018)³中规定方法进行测定(土水比为 1:2.5)；土壤 Cd 含量：通过三酸消解法(浓硝酸、高氯酸和氢氟酸)进行消解处理，再利用原子吸收分光光度计(AAS)完成测定；土壤有效态 Cd 选用氯化钙溶液浸提，再使用 AAS 进行检测；水稻籽粒 Cd 含量检测严格参考食品安全国家标准方法进行检测；水稻亩产量经过对每个小区的水稻籽粒收获后称重所得。

2.4. 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据整理计算，使用 Origin 2024 软件绘图，使用 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行单因素方差分析($p < 0.05$)。

3. 结果与讨论

3.1. 不同钝化材料对土壤理化性质的影响

3.1.1. 土壤 pH

如图 1 所示，添加钝化材料有利于提升土壤 pH。相比于 CK，NT 和 WSW 对土壤 pH 值提升的贡献

³https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201808/t20180815_451430.shtml

度有限，而添加石灰使土壤 pH 显著提升了 0.70 个单位，这可能归因于石灰材料本身具有更高的碱度。石灰属于典型碱性改良物料，施入土壤后可提升氢氧根离子浓度，中和土壤酸度，从而提高土壤 pH 值[9][10]。已有研究表明，土壤 pH 是控制 Cd 离子吸附 - 解吸、沉淀 - 溶解平衡的关键因子，土壤 pH 升高能够促进土壤胶体对 Cd^{2+} 的吸附，有利于氢氧化镉、碳酸镉等稳定沉淀物的生成，从而降低 Cd 生物有效性[11]。因此，添加石灰导致土壤 pH 上升，为土壤 Cd 钝化创造了有利的酸碱环境。

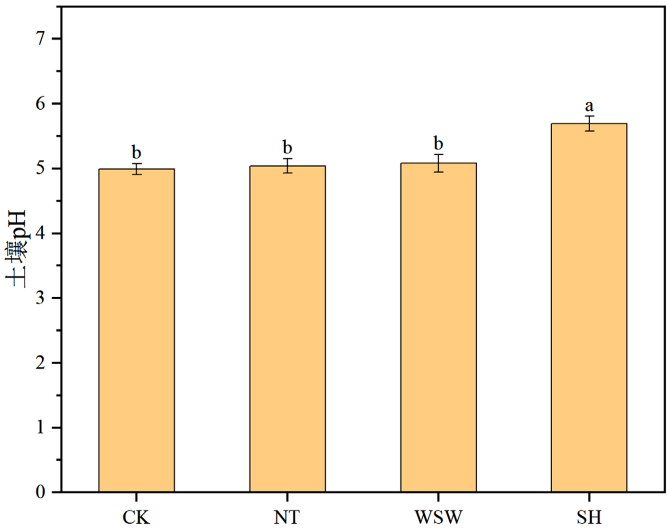


Figure 1. Soil pH at maturity
图 1. 成熟期土壤 pH

3.1.2. 土壤有效态 Cd 含量

由图 2 可知，不同处理土壤有效态 Cd 含量表现为：CK>NT>WSW>SH。与 CK 相比，NT、WSW 和 SH 处理组土壤有效态 Cd 含量分别显著降低了 14.20%、20.37%和 63.67%。因此，添加钝化材料可以有效降低土壤有效态 Cd 含量。添加石灰使得土壤有效态 Cd 含量降至最低，对土壤活性 Cd 的钝化效果最优。

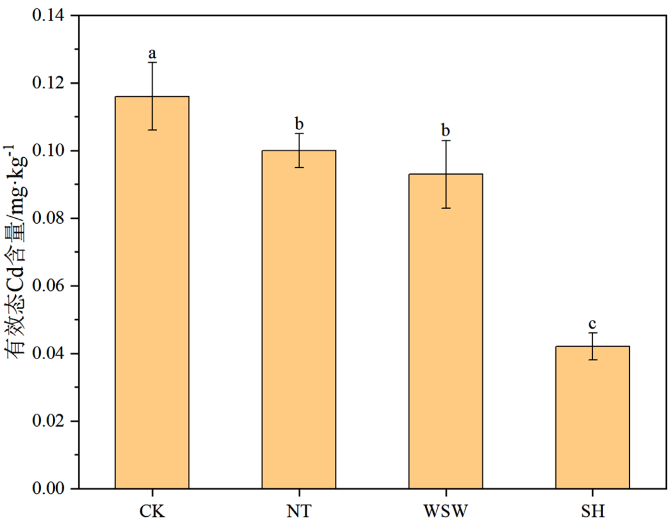


Figure 2. Content of available Cd in soil
图 2. 土壤有效态 Cd 含量

土壤有效态 Cd 是表征重金属生物有效性、评估土壤污染风险的核心指标,可直接反映 Cd 被作物根系吸收利用的潜在能力。木本泥炭富含大量活性有机官能团,可通过表面络合、物理吸附、离子交换等多重作用固定土壤中活性 Cd^{2+} , 将高活性的水溶态、交换态 Cd 转化为稳定的有机结合态 Cd, 从而降低 Cd 生物有效性[12] [13]。通过微生物胞外聚合物吸附、代谢产物络合、根际微环境调控等途径,微生物菌剂可固定土壤活性 Cd, 实现有效态 Cd 削减[14]。在本研究中,单一菌剂的修复能力有限,钝化效果弱于石灰处理。石灰处理存在不同的钝化机制,石灰类材料的高 pH 值和高 CO_3^{2-} 含量被认为是降低 Cd 迁移率的主要原因[3]。一方面,添加石灰后土壤 pH 的提升促进了 Cd^{2+} 形成惰性沉淀;另一方面,土壤中大量 Ca^{2+} 可竞争土壤胶体表面负电荷吸附位点,置换胶体吸附的活性 Cd, 促使活性 Cd 向稳定形态转化。因此,各种机制协同作用使其钝化效果更为优越。

3.2. 不同钝化材料对水稻生长的影响

3.2.1. 水稻产量

作物产量是评价钝化材料田间适用性、生态安全性的重要生产指标,是保障农田生产功能的基础。由图 3 可知,与 CK 相比,NT、WSW 和 SH 三种钝化处理下水稻产量均有小幅提升,说明钝化材料的添加有利于作物的增产。

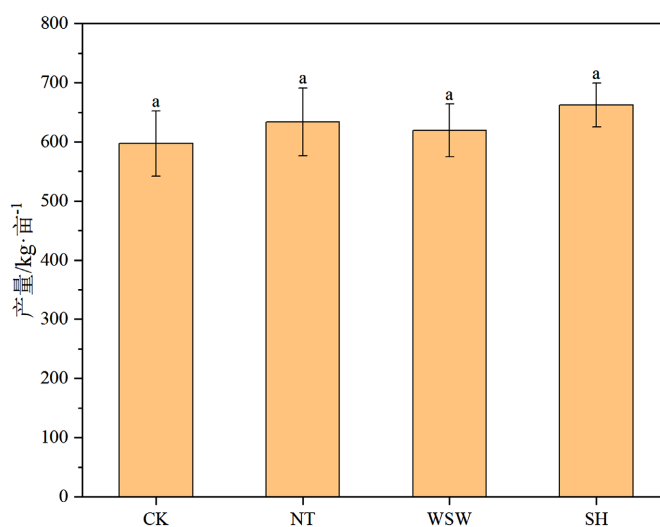


Figure 3. Rice yields in different treatment groups

图 3. 不同处理组水稻产量

研究结果表明,本试验选用的三类钝化材料在规定施用剂量下,均无作物毒性,不会抑制作物生长发育,具备良好的田间应用安全性。木本泥炭、微生物菌剂和石灰均为安全的农田修复材料,合理施用不会破坏土壤结构、抑制作物根系生长及养分吸收[15]。已有研究表明,优质钝化材料可通过改良土壤理化性质、优化根际微生态环境、降低重金属毒害等途径实现小幅增产,但增产效果受土壤基础肥力、污染程度、气候条件、耕作管理等多重因素调控[16] [17]。另外,本研究中各钝化处理的增产效应未充分凸显,这可能与水稻品种以及钝化材料的添加量等因素也有一定的关系[18]。

3.2.2. 水稻籽粒 Cd 含量

如图 4 所示,不同处理水稻籽粒 Cd 含量由高到低为 $\text{CK} > \text{WSW} > \text{SH} > \text{NT}$ 。添加木本泥炭和石灰使水稻籽粒 Cd 含量较 CK 显著降低了 35.31% 和 15.77%,而微生物菌剂对水稻籽粒 Cd 富集的抑制效果并不明显。因此,添加钝化材料有利于降低水稻重金属富集的风险,但不同钝化材料表现出不同程度的作用。

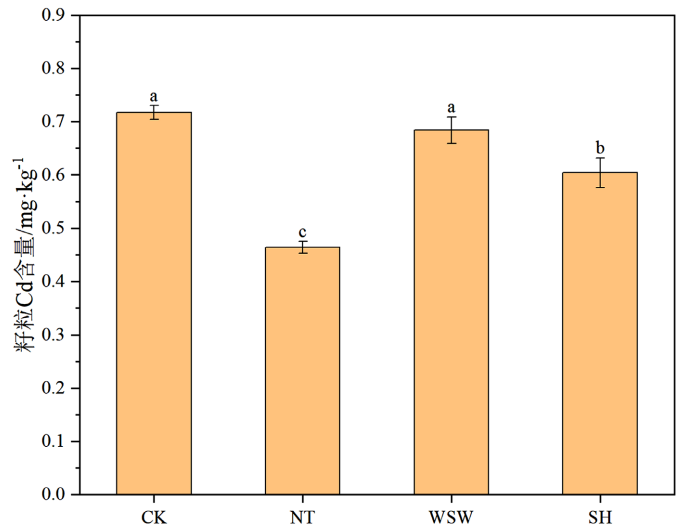


Figure 4. Cd content in rice grains
图 4. 水稻籽粒 Cd 含量

作物籽粒作为主要可食部位，其 Cd 含量直接决定农产品质量安全水平，是农田污染修复的核心评价指标。木本泥炭除固定土壤活性 Cd 外，其富含的腐殖质组分可调控作物根系细胞膜通透性，减少根系对 Cd 的吸收，同时可抑制 Cd 在作物体内的长距离转运，从土壤钝化、作物吸收转运双重路径阻控 Cd 累积，因此籽粒 Cd 管控效果显著优于其他处理[19]。石灰的钝化机制以土壤化学沉淀为主，添加石灰可通过钝化土壤活性 Cd 来降低水稻籽粒 Cd 含量[20]。值得关注的是，添加微生物菌剂可显著降低土壤有效态 Cd 含量，但未对籽粒 Cd 富集产生显著抑制作用，说明土壤有效态 Cd 含量降低并不等同于作物 Cd 累积减少，单一依托土壤原位钝化，无法完全阻断 Cd 从土壤经根系再到籽粒的迁移转运过程[21]。微生物菌剂能在土壤固相实现 Cd 固定，但对水稻体内 Cd 转运、富集的调控作用较弱，可能难以抑制根系吸收 Cd 并向地上可食部位迁移。

4. 结论

- (1) 不同钝化材料对土壤理化性质及 Cd 有效性的调控效果差异显著，石灰可显著提升酸性污染土壤 pH 值，有效改良土壤酸化状况，对土壤有效态 Cd 的钝化效果最优；木本泥炭与微生物菌剂对土壤 pH 无显著影响，但均可有效降低土壤有效态 Cd 含量，且二者土壤钝化效果相近。
- (2) 三种钝化材料田间应用安全性良好，单一施用均不会造成水稻减产，可稳定维持 Cd 污染农田的农业生产功能，具备大田推广的基础条件。
- (3) 不同钝化材料对作物籽粒 Cd 累积的阻控能力差异明显，整体表现为木本泥炭 > 石灰 > 微生物菌剂。微生物菌剂仅能钝化土壤活性 Cd，无法有效阻断 Cd 向籽粒转运；木本泥炭可从土壤钝化和作物转运调控双重路径阻控 Cd 累积，籽粒 Cd 管控效果最优，更适配农产品安全利用修复场景。
- (4) 单一钝化材料存在修复短板，石灰适配酸性土壤活性 Cd 修复，木本泥炭优势在于农产品安全管控，微生物菌剂单一修复效果有限。实际生产中可根据修复目标单一选材或复配施用，实现 Cd 污染农田土壤高效修复与农产品安全生产的协同提升。

基金项目

鹰潭市科技计划项目(202412-48928)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
- [3] 冯敬云, 聂新星, 刘波, 等. 镉污染农田原位钝化修复效果及其机理研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 764-777.
- [4] 吴霄霄, 曹榕彬, 米长虹, 等. 重金属污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 253-263.
- [5] 谢元, 杨春, 路润峰, 等. 镉污染土壤(农田)原位钝化修复材料研究进展[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4657-4673.
- [6] 崔雪丹, 段桂兰, 王向琴, 等. 基于两地长期定位试验的铁改性木本泥炭修复中轻度镉砷污染稻田效果与土壤健康效应评价[J]. 生态环境学报, 2025, 34(4): 608-620.
- [7] 杜志敏, 赵晶玉, 丁娅, 等. 生物炭基微生物菌剂修复重金属污染土壤研究[J]. 应用化工, 2024, 53(5): 1160-1165.
- [8] 方艳玲, 段毅, 周书葵, 等. 钝化材料修复土壤重金属污染研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(3): 123-131.
- [9] 易琼, 唐拴虎, 黄旭, 等. 碱性材料对修复与改良酸性硫酸盐土壤障碍因子的研究[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1277-1282.
- [10] 刘捷. 土壤改良联合低累积水稻修复镉污染农田的试验研究[J]. 绿色科技, 2025, 27(4): 173-179.
- [11] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3): 439-444.
- [12] 杜衍红, 王向琴, 刘传平, 等. 铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 311-320.
- [13] 吴小令, 杜衍红, 窦飞, 等. 生物炭和腐殖质治理重金属污染菜地的定位试验研究[J]. 生态环境学报, 2025, 34(12): 1952-1961.
- [14] 刘欣雨, 刘爽, 刘勇, 等. 微生物菌剂添加对农田土壤重金属污染的修复作用[J]. 山西大学学报(自然科学版): 1-15. <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2026005>, 2026-07-12.
- [15] 张丽娜, 刘鑫, 王俊, 等. 单次有机肥或石灰施用阻控镉污染酸紫泥田早晚稻镉累积的效应[J]. 土壤与作物, 2025, 14(1): 15-24.
- [16] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3409-3417.
- [17] 赵轶, 张锦, 高翔, 等. 复配钝化剂对镉污染稻田修复效果研究[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(9): 79-84.
- [18] 李翔, 杨驰浩, 刘晔, 等. 钝化剂对农田土壤 Cd 有效性及不同水稻品种吸收 Cd 的研究[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 211-216.
- [19] 马志伟, 张丛志, 赵占辉, 等. 基于木本泥炭的土壤健康培育研究进展[J]. 生态环境学报, 2024, 33(12): 1964-1977.
- [20] 程通, 王小兵, 董君能, 等. 原位钝化对稻田镉污染土壤修复效果及土壤酶活性的影响[J]. 中国稻米, 2023, 29(2): 28-33.
- [21] 张子叶, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻对镉和砷的吸收转运规律研究[J]. 杂交水稻, 2020, 35(6): 68-74.