

钝化剂对土壤重金属镉含量及其在艾蒿中累积的影响

杨馨澜

湖南农业大学, 湖南 长沙 410000

摘要: 目的 系统评估汉白玉 (Ar)、秸秆生物炭 (Br)、粉煤灰 (Fh) 及菌渣 (Me) 对镉 (Cd) 污染土壤的钝化效果及其对艾蒿 *Artemisia argyi* Cd 吸收的影响。方法 以湖南省花垣县和岳阳市铅矿区 Cd 污染土壤为对象, 开展盆栽试验, 测定 4 种钝化材料对土壤总 Cd、有效态 Cd 含量及 1 年生艾蒿地上与地下部位 Cd 富集的影响, 分析其与土壤 pH 值、阳离子交换量 (cation exchange capacity, CEC) 的关联性。结果 艾蒿地上部分 Cd 富集量显著高于地下部分 ($P < 0.05$)。钝化材料施用显著提升土壤 pH 和 CEC, 并降低土壤总 Cd 及有效态 Cd 含量。材料效果排序为 $Ar > Br > Fh > Me$ 。结论 艾蒿对 Cd 的转运富集能力集中于地上部分, 可作为植物修复的靶向部位。钝化材料通过提升土壤 pH 和 CEC 显著抑制 Cd 生物有效性, 其中 Ar 对 Cd 的固定效果最优, 推荐为湖南铅矿区艾蒿种植土壤修复的首选材料。

关键词: 土壤; 钝化修复; 镉污染; 艾蒿; 汉白玉; 秸秆生物炭; 粉煤灰; 菌渣

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)13-4809-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.13.024

Effects of passivators on soil heavy metal cadmium content and its accumulation in *Artemisia argyi*

YANG Xinlan

Hunan Agricultural University, Changsha 410000, China

Abstract: Objective To systematically evaluate the passivation effects of white marble (Ar), straw biochar (Br), fly ash (Fh), and mushroom residue (Me) on cadmium (Cd)-contaminated soil and their impacts on Cd uptake in *Artemisia argyi*. **Methods** A pot experiment was conducted using Cd-contaminated soils from lead-mining areas in Huayuan County and Yueyang City, Hunan Province. The effects of the four passivators on total Cd content, available Cd content in soil, and Cd enrichment in aboveground and underground parts of one-year-old *A. argyi* were measured. The correlations with soil pH and cation exchange capacity (CEC) were analyzed. **Results** The Cd enrichment in the aboveground parts of *A. argyi* was significantly higher than that in the underground parts ($P < 0.05$). Application of passivators significantly increased soil pH and CEC while reducing total and available Cd content. The efficacy order of materials was $Ar > Br > Fh > Me$. **Conclusion** *A. argyi* exhibits stronger Cd translocation and enrichment capacity in aboveground tissues, making it a target site for phytoremediation. Passivators effectively inhibit Cd bioavailability by enhancing soil pH and CEC, with Ar demonstrating optimal Cd immobilization performance. Ar is recommended as the preferred material for soil remediation in *A. argyi* cultivation areas within lead-mining regions of Hunan Province.

Key words: soil; passivation remediation; cadmium pollution; *Artemisia argyi* H. Lév. & Vaniot; White Marble; straw biochar; fly ash; mushroom residue

随着工业化和城市化进程加快, 我国土壤镉 (Cd) 污染问题因采矿、冶炼等活动持续加剧, 通过水-土壤-生物循环系统威胁生态健康与农产品安全^[1]。湖南省作为典型重灾区, 其 414.88 万 hm^2 耕地中部分存在

重金属污染, 矿区周边土壤因长期不规范开采导致 Cd 活性居高不下, 亟需高效修复技术^[2]。同时, 因土壤固有基质的复杂性和多种重金属共存的复合污染特性, 使重金属之间、重金属与土壤界面间存在复

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 湖南省中药材产业技术体系种子种苗繁殖岗位专家项目 (HARS-11); 典型区域农业野生植物资源调查收集与监测项目 (xczx-2025345)

作者简介: 杨馨澜, 本科生, 研究方向为资源与环境科学。E-mail: 2644420358@qq.com

杂的相互作用,增加了土壤重金属治理难度^[3]。筛选易得、廉价且钝化效果显著和环境友好的钝化剂是重金属污染土壤修复最迫切的任务。土壤钝化修复主要通过添加生物炭、磷酸盐等材料,利用吸附固定(如生物炭孔隙吸附、黏土矿物表面络合)、共沉淀[磷酸盐与 Cd^{2+} 生成难溶 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$]、离子交换(黏土矿物层间阳离子置换 Cd^{2+})或有机螯合(有机肥中腐殖酸与 Cd 形成稳定络合物)等机制将活性 Cd 转化为稳定形态,降低其生物有效性。该方法具有成本低、易操作优势,但修复效果的长期稳定性及地域适用性仍需系统验证。

矿区周边土壤的重金属污染受采矿年限、海拔高度和土壤理化性质等因素影响^[4]。随着时间的推移,矿区重金属污染物会扩散到土壤中,海拔升高也会加重重金属污染^[5]。湖南花垣县采矿时间长、海拔较高,重金属污染较严重,尤其是 Cd 污染。相反,岳阳县采矿时间较短、海拔较低,重金属污染相对较轻,具备独有的高速效磷、低有机质的土壤理化特点。这种特殊的养分组合特点可通过磷酸盐沉淀和有机络合作用的协同效应,降低该矿区周边土壤重金属有效态含量(Cd 0.12 mg/kg, Pb 18.51 mg/kg),影响矿区土壤-植物系统中重金属迁移转化。

钝化剂种类繁多,依据主要成分与作用机制,可划分为无机矿物类(如汉白玉, Ar)、碳材料类(如秸秆生物炭, Br)、有机废弃物类(如菌渣, Me)及工业副产品类(如粉煤灰, Fh)。本研究聚焦湖南花垣县、岳阳铅矿区艾蒿种植区,采用为期1年的盆栽试验,从上述钝化剂类别中筛选出4种常见环境友好型材料(Ar、Br、Me、Fh),重点分析其对土

壤中 Cd 形态转化及植物积累的影响。本研究受限于时间尺度(未验证长期效应)与地域特性(碳酸盐岩母质发育土壤、 pH 5.8~6.5、年降水量 1 300~1 500 mm)。未来研究需拓展至其他新型钝化材料(如微生物制剂、合成材料)进行验证,以完善钝化技术参数体系,从而为 Cd 污染农田的“阻控-修复-安全利用”提供更坚实的理论与实践支撑。

1 材料

1.1 供试土壤和种苗

随机选取湖南省花垣县老王寨村(HYX, 东经 109.35°, 北纬 28.54°, 海拔 365 m)和岳阳市桃林镇(YYX, 东经 113.5°, 北纬 29.35°, 海拔 80 m) 2 个铅矿区长势一致、水肥管理安全一致的艾蒿种苗及其 5~20 cm 根际土壤,每株植物及其相应根际土壤均设置 3 个重复样本。从 2 个矿区试供土壤的基本性质来看, HYX 属高浓度 Cd 污染土壤, YYX 属低浓度 Cd 污染土壤,具体性质见表 1。

1.2 供试钝化材料

Ar、Br、Fh 和 Me 这 4 种钝化材料的基本性质详见表 2,发现其总 Cd 含量均在 GB18877-2009《有机-无机复混肥料国家标准》和 GB8173-1987《农用粉煤灰中污染物控制标准》允许值内。

1.3 供试试剂

百菌清杀菌(先正达(苏州)作物保护有限公司)、尿素(含 46% N, 湖北宜化化工股份有限公司)、磷酸二氢钾(含 52% P_2O_5 、34% K_2O , 武汉吉业升化工有限公司)、硫酸钾(含 54% K_2O , 湖北成海化工有限公司),均为农用级。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil

编号	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	阳离子交换量/(mol·kg ⁻¹)	总氮/(mg·kg ⁻¹)	总磷/(mg·kg ⁻¹)	总钾/(mg·kg ⁻¹)	全Cd/(mg·kg ⁻¹)	有效态Cd/(mg·kg ⁻¹)
YYX	5.81	18.84	12.62	24.83	11.26	14.15	1.45	0.47
HYX	5.47	18.75	12.16	22.72	10.79	14.98	2.74	0.92

表 2 供试钝化材料基本性质

Table 2 Basic properties of tested passivation material

材料	产地	pH 值	Cd/(mg·kg ⁻¹)	粒径/mm
Ar	湖南耒阳	8.86	0.07	0.14
Br	湖南常德	9.08	0.28	0.15
Fh	湖南耒阳	10.23	0.16	0.16
Me	湖南邵阳	7.24	0.31	2.00

2 方法

2.1 盆栽试验设计

采集矿区艾蒿根际土壤,风干后去除杂质,称取 2.5 kg 装入 3 L 培养盆中,拌入适量百菌清杀菌并静置 7 d。将 4 种钝化剂分别研细过 100 目筛,按 0.125 kg/盘的标准均匀混入土壤,对照组不添加钝化材料。试验分为低浓度(对照组、Ar1、Br1、

Fh1、Me1) 和高浓度 (对照组、Ar2、Br2、Fh2、Me2) 污染组, 共 10 组, 随机排列。按尿素 0.08 g/kg、磷酸二氢钾 2 g/kg、硫酸钾 15 g/kg 标准施底肥。每盆种植 3 株艾蒿种苗, 控制苗间距 10 cm。保持土壤含水量为田间持水量的 80% 左右, 定期除杂草。

2.2 样品采集与制备

艾蒿生长迅速, 春末首次采收, 之后每月 1 次, 年采收 4~5 次。每次采收时, 通过全盆混合采样方式采集 5~20 cm 土壤样本, 每处理设 3 个重复。收获的艾蒿地上部分和地下部分样品, 经自来水洗净、去离子水润洗后再用吸水纸擦干水分, 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 下烘干 48 h 至恒定质量, 称量、粉碎待测。土壤样品自然风干后, 剔除杂质, 研磨过 100 目筛, 备用。

2.3 测定项目及方法

土壤理化性质按《土壤农业化学分析方法》^[6] 方法进行测定; PHS-3E 型 pH 计 (上海仪电科学仪器有限公司) 测定; 全 Cd 采用王水-高氯酸消解法; ICAP 7200 型电感耦合等离子原子发射光谱法 (赛默飞世尔科技公司, 英国) 测定^[7]; 有机质 (OM) 用重铬酸钾法测定; 阳离子交换量 (cation exchange capacity, CEC) 参照 LY/T 1243-1999; 有效氮用碱解扩散法测定; 总氮 (TN) 用凯氏定氮法

测定; 有效钾 (AK) 用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定; 通过 NaOH 碱熔和火焰光度计计算总钾 (TK) 含量^[8]; 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷 (AP) 和总磷 (TP) 含量^[9]; 艾蒿地上部分和地下部分 Cd 含量, 采用硝酸-高氯酸消解-火焰原子吸收分光光度法测定。

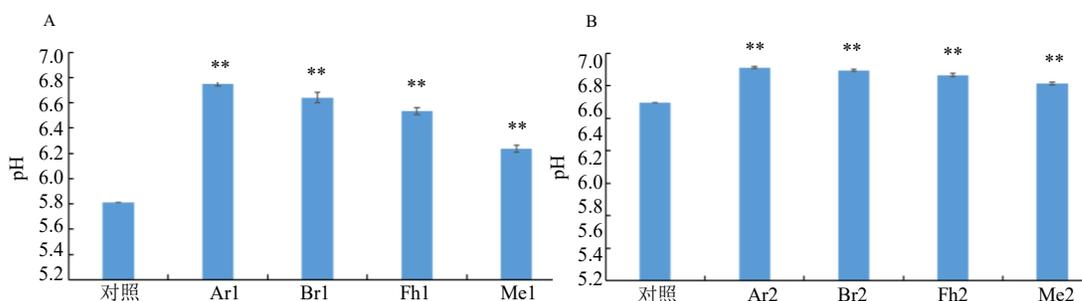
2.4 数据处理

数据用 Office 2019 整理, DPS 9.01 进行统计分析, 多重比较采用最小显著差异法 (LSD), 图表用 Excel 2019 和 GraphPad Prism 8 制作。

3 结果与分析

3.1 不同钝化材料对土壤 pH 值的影响

施用不同钝化材料 Ar、Br、Fh 和 Me 后, 土壤 pH 值较对照组均显著提升, YYX (低浓度 Cd 污染) 土壤 pH 值较对照组增加 0.43~0.94, HYG (高浓度 Cd 污染) 土壤 pH 值较对照组提高 0.59~1.08。YYX 土壤经 Ar、Br 和 Fh 处理后, pH 值极显著升高 ($P < 0.01$), 增幅分别为 16.21%、14.32% 和 12.47%; Me 处理组 pH 值显著升高, 增幅为 7.10%。HYX 土壤经 Ar、Br 和 Fh 处理后, pH 值极显著升高 ($P < 0.01$), 增幅分别为 19.83%、18.35% 和 15.73%; Me 处理组 pH 显著升高, 增幅为 10.87%。经上述钝化材料处理后, HYG 土壤 pH 增幅显著高于 YYX 土壤, 见图 1。



与对照组比较: ** $P < 0.01$; 下图同。

** $P < 0.01$ vs control group; same as below figures.

图 1 4 种钝化材料对 YYX (A) 和 HYG (B) 土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effects of four passivators on pH in YYX (A) and HYG (B) soils

3.2 不同钝化材料对土壤 CEC 的影响

施用钝化材料 Ar、Br、Fh 和 Me 后, 2 种 Cd 污染浓度土壤的 CEC 值均较对照组极显著提升。YYX (低浓度 Cd 污染) 土壤 CEC 值较对照组增加 2.35~4.48, HYG (高浓度 Cd 污染) 土壤 CEC 值较对照组增加 2.51~4.04。YYX 土壤经 Ar、

Br、Fh 和 Me 处理后, CEC 值均极显著高于对照组 ($P < 0.01$), 增幅分别是 35.46%、28.47%、19.83%、18.62%; HYG 土壤经 Ar、Br、Fh 和 Me 处理后, CEC 值亦极显著高于对照组 ($P < 0.01$), 增幅分别是 33.21%、27.68%、18.16%、20.63%。见图 2。

3.3 不同钝化材料对土壤总 Cd 含量的影响

与对照组相比,不同钝化材料(Ar、Br、Fh、Me)处理可显著降低土壤总 Cd 含量($P<0.01$),其中 YYX 土壤(低浓度 Cd 污染)总 Cd 含量降低 0.53~0.99 mg/kg,降幅达 36.45%~68.03%,不同钝化材料处理下使总 Cd 含量分别降低 68.03%、67.88%、61.93%和 36.45%;HYX 土壤(高浓度 Cd 污染)总 Cd 含量降

低 0.99~1.54 mg/kg,降幅为 35.83%~56.21%,不同钝化材料处理下使总 Cd 含量分别降低 56.21%、52.68%、50.16%和 35.83%。研究表明,这些材料对 Cd 具有强固定化能力,其中 Ar 处理效果最佳(在 YYX 和 HYX 土壤中分别降低 68.03%和 56.21%),显著优于其他材料($P<0.01$),该发现为 Cd 污染土壤修复提供了新的技术选择。见图 3。

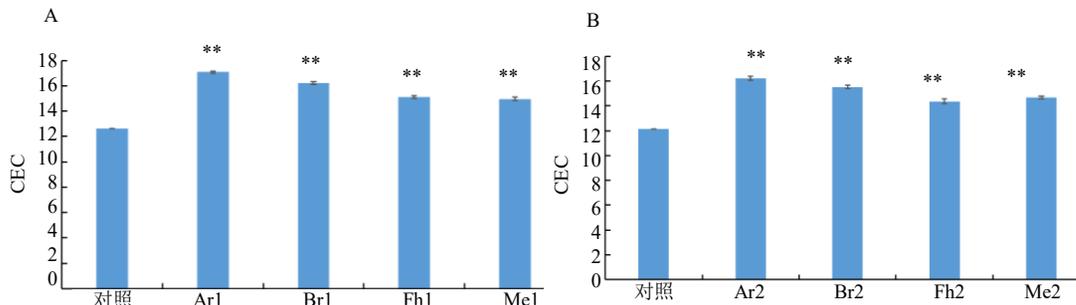


图 2 4 种钝化材料对 YYX (A) 和 HYX (B) 土壤 CEC 值的影响

Fig. 2 Effects of four passivators on CEC in YYX (A) and HYX (B) soils

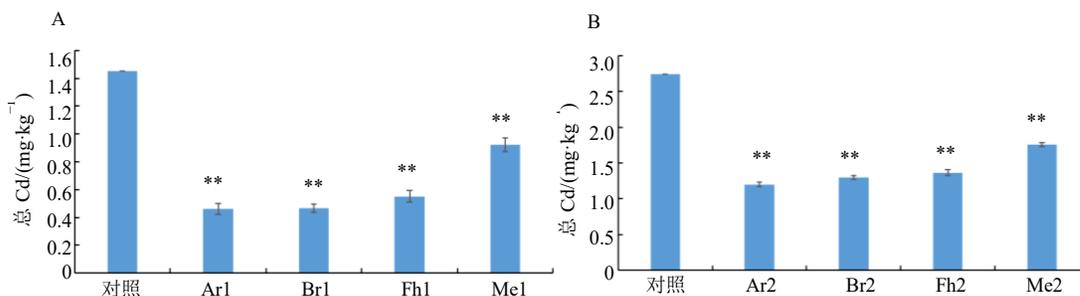


图 3 4 种钝化材料对 YYX (A) 和 HYX (B) 土壤总 Cd 含量的影响

Fig. 3 Effects of four passivators on total Cd content in YYX (A) and HYX (B) soils

3.4 不同钝化材料对土壤有效 Cd 含量的影响

与对照组相比,不同钝化材料(Ar、Br、Fh、Me)处理可显著降低土壤有效 Cd 含量($P<0.01$),其中 YYX 土壤(低浓度 Cd 污染)有效 Cd 质量分数降低 0.09~0.28 mg/kg,降幅达 18.67%~58.93%,不同钝化材料处理下有效 Cd 质量分数分别降低 58.93%、34.13%、29.78%和 18.67%;HYX 土壤(高浓度 Cd 污染)有效 Cd 质量分数降低 0.15~0.47 mg/kg,降幅为 16.68%~51.21%,不同钝化材料处理下有效 Cd 质量分数分别降低 51.21%、42.45%、39.55%和 16.68%。研究表明,所选材料能有效固定土壤 Cd 活性,尤其 Ar 在 2 种污染水平下均表现出最佳钝化性能,为 Cd 污染土壤修复提供重要参考。见图 4。

3.5 不同钝化材料对艾蒿各部位 Cd 吸收的影响

研究表明,艾蒿对 Cd 具有较强的转运能力,

对照组中地上部 Cd 含量显著高于地下部,转运系数(TF=地上部/地下部)高达 1.15~1.17,表明其根系分泌物(如柠檬酸、苹果酸)可能促进 Cd 的溶解及木质部运输^[10]。

与对照组相比,不同钝化材料(Ar、Br、Fh、Me)处理显著降低了艾蒿地上部和地下部 Cd 质量分数($P<0.01$)。在 YYX 土壤中,艾蒿地上部的 Cd 质量分数是 5.33 mg/kg,经 4 种钝化材料处理后 Cd 质量分数降至 2.15~3.40 mg/kg,分别降低 59.66%~36.21%;艾蒿地下部的 Cd 质量分数是 4.54 mg/kg,经 4 种钝化材料处理后 Cd 质量分数降至 1.65~3.05 mg/kg,分别降低 63.66%~32.82%。在 HYX 土壤中,艾蒿地上部的 Cd 质量分数是 5.27 mg/kg,经 4 种钝化材料处理后 Cd 质量分数降至 2.12~4.11 mg/kg,分别降低 59.77%~

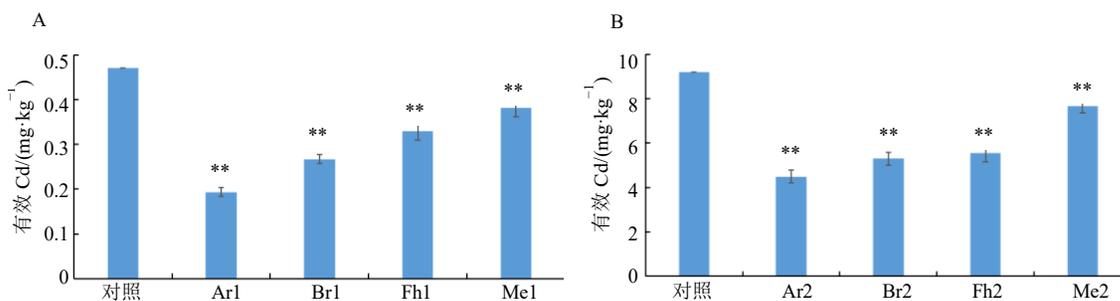


图4 4种钝化材料对YYX(A)和HYX(B)土壤有效Cd含量的影响

Fig. 4 Effects of four passivators on available Cd content in YYX (A) and HYG (B) soils

22.01%；艾蒿地下部的Cd质量分数是4.58 mg/kg，经4种钝化材料处理后Cd质量分数降至1.55~3.28 mg/kg，分别降低66.16%~28.38%。

YYX土壤属低浓度Cd污染土壤，经4种钝化材料Ar、Br、Fh和Me处理后的艾蒿地上部Cd质量分数分别降低59.66%、48.97%、42.59%和36.21%；艾蒿地下部Cd质量分数分别降低63.66%、56.39%、54.63%和32.82%。HYX土壤属高浓度Cd污染土壤，经4种钝化材料Ar、Br、Fh和Me处理后的艾蒿地上部Cd质量分数分别

降低59.77%、50.66%、44.21%和22.01%；艾蒿地下部Cd质量分数分别降低66.16%、59.39%、56.77%和28.38%。

钝化效果整体表现为Ar>Br>Fh>Me，其中Ar处理在2种污染土壤中均表现最优，地上部分降幅达59.66%（YYX）和59.77%（HYX），地下部分降幅分别为63.66%和66.16%。该结果证实钝化材料可有效抑制Cd向艾蒿迁移，尤其Ar在降低植物Cd富集方面具有显著优势，为Cd污染土壤的植物修复提供了理论依据，见图5。

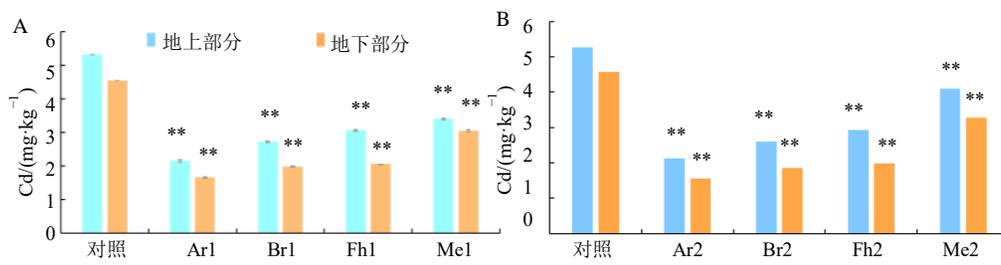


图5 4种钝化材料对YYX(A)和HYX(B)土壤中艾蒿不同部位Cd含量的影响

Fig. 5 Effects of four passivators on Cd content in different parts of *Artemisia argyi* grown in YYX (A) and HYG (B) soils

4 讨论

中药材作为我国传统医药瑰宝，其国际竞争力正面临镉Cd污染的严峻挑战。研究显示中药材中Cd超标率高达28.5%，出口贸易因国际重金属限量标准频繁受阻，造成重大经济损失^[11-12]。系统研究中药材Cd污染来源、迁移转化机制及修复技术，对提升中药材质量与安全及增强国际竞争力具有重要价值。

艾蒿是一种菊科蒿属多年生直立草本植物，少数为灌木或者小灌木，叶面有绒毛并且伴随着强烈的挥发性香味。明代著名医药学家李时珍编著的《本草纲目》中有记载，艾蒿具有“艾以叶入药，性温、纯阳之性、通十二经、具回阳、理气血、逐湿

寒、止血安胎”等功效。艾蒿挥发油类成分还具有较好的抗菌、消炎、抗病毒等功效，可有效抑制细菌或真菌类物质，在治疗支气管炎、过敏性皮炎、中风等方面疗效显著。同时，艾蒿具有较大的生物量积累和对Cd的较强富集与转运能力（BCF=1.2~2.1），是修复轻中度Cd污染土壤的理想载体。

钝化修复主要通过离子交换、化学沉淀、吸附、植物提取或微生物降解等降低Cd的生物有效性和迁移性。根据污染特征、土壤性质、成本预算、材料可及性等因素来选择单一或复配钝化剂。Ar的主要成分是碳酸钙，通过提升土壤pH促使Cd沉淀，速效低价但可能会活化砷；Br是秸秆热解多孔碳，依靠吸附+络合+碱性钝化Cd，效果持久但成本较

高; Fh 利用固废中碱性氧化物沉淀 Cd, 经济性强但需防范重金属二次污染; Me 是菌丝有机质, 依赖官能团螯合 Cd, 改良土壤却缓效且对重金属急性高污染效果有限。

盆栽试验表明, 4 种钝化材料 (Ar、Br、Fh、Me) 对土壤 Cd 活性及艾蒿 Cd 积累的抑制效果差异显著^[13], 钝化率排序为 Ar (62.3%) > Br (47.1%) > Fh (38.5%) > Me (21.8%)。碱性材料 Ar 效果最优, 其高 pH 特性 (9.2~10.5) 通过释放 Ca²⁺ 置换酸性离子 (H⁺、Al³⁺), 促进 Cd²⁺ 与 CO₃²⁻ 生成难溶 CdCO₃ 沉淀, 同时其微孔结构贡献 23% 的物理吸附^[14-15]; 矿物基材料 Br 与 Fh 次之, 依赖盐基离子 (K⁺、Ca²⁺) 中和酸性, 并通过高比表面积 (Br: 210 m²/g) 吸附及羟基络合固定 Cd; 有机肥 Me 效果较弱, 主要依赖腐殖酸螯合作用, 但其易受土壤初始有机质含量 (本实验仅 1.2%) 和微生物分解影响^[16]。

艾蒿对 Cd 的吸收转运, 主要依赖于金属转运蛋白和螯合物的形成。Quan 等^[17]发现, 土壤 Cd 污染程度与艾蒿各部 Cd 含量正相关, 也与艾蒿 Cd 富集特征对土壤 pH 的响应程度相关。在中性或近中性的土壤下, 轻微污染处理中艾蒿的生物量及地上部 Cd 含量最高, 对 Cd 的富集系数最大, 修复效率较强。中度污染土壤中艾蒿的生物量、Cd 含量以及富集系数在酸性条件下达到最高。因此, 根据土壤 Cd 污染程度的不同, 合理调整土壤 pH, 能有效提高艾蒿的修复效率。

环境因素显著影响钝化效果, 如土壤类型、气候条件、作物特性等, 实际应用时应注重区域适配性。有研究表明, 酸性红壤 (pH 5.8~6.5) 利于 Ar 发挥碱性优势, 而碱性土壤 (如黑钙土) 可能更适配磷酸盐类材料 (Br)。湖南多雨环境 (年降水 1 300~1 500 mm) 可能会加速 Me 中腐殖酸的淋失, 但 Ar 的钙基沉淀物稳定性较高。

尽管单一钝化剂已展现出显著效果, 但复合材料的协同作用可能更具应用潜力, 未来研究可探讨多种钝化材料的联合使用, 提高 Cd 污染土壤的修复效率。例如, 生物炭与沸石联合施用可使水稻籽粒 Cd 含量降低 56.9%; Br 与 Fh 联用可使土壤有效 Cd 进一步降低至 0.32 mg/kg (降幅达 52.4%); 无机-有机复合钝化剂可通过多重机制 (如 pH 调节、吸附、离子交换) 增强 Cd 固定^[18]。钝化剂的长期稳定性也是修复技术的关键考量。有研究表明, 通过四年田间试验证实, 石灰与有机肥联用可维持土

壤有效 Cd 含量低于风险阈值 (0.3 mg/kg), 且对土壤微生物多样性无显著负面影响^[19]。

综上所述, Ar、Br、Fh 和 Me 4 种钝化材料均能有效降低土壤总 Cd 含量、有效 Cd 含量以及艾蒿 Cd 含量, 促进艾蒿稳定增收。其中, Ar 对 Cd 的钝化效果最佳, 可作为湖南艾蒿种植区土壤钝化修复的首选材料, Br 和 Fh 次之, 可视情况选用。此外, 在使用钝化剂时需关注钝化剂潜在有害元素的二次污染风险 (如粉煤灰中的 As、Hg)、合理剂量控制 (如过量使用粉煤灰和生物炭会引起盐分积累或微量元素失衡^[20]) 及长期效应 (如钙基材料和生物炭的 pH 改良效果较持久, 而菌渣需依赖持续有机质的输入来维持微生物活性) 等问题。

本研究为 Cd 污染中药材种植区提供了针对性修复方案, 但长期效应 (如材料老化导致的 Cd 再活化) 及跨区域适用性仍需持续验证, 未来可通过多气候带田间试验与多材料组合优化, 推动技术从实验室向规模化应用转化, 为中药材质量安全和国际竞争力提升提供双重保障。

志谢:

湖南农业大学博士生导师杨华教授在论文选题、方法设计和修改过程中给予悉心指导。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Zheng F, Guo X, Tang M Y, *et al.* Variation in pollution status, sources, and risks of soil heavy metals in regions with different levels of urbanization [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 866: 161355.
- [2] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China [J]. *J Hazard Mater*, 2020, 400: 123289.
- [3] 王萍. 不同钝化剂对重金属污染土壤长期稳定化效果研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [4] Kaur J, Bhat S A, Singh N, *et al.* Assessment of the heavy metal contamination of roadside soils alongside Buddha nullah, Ludhiana, (punjab) India [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(3): 1596.
- [5] Ding Q, Cheng G, Wang Y, *et al.* Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 578: 577-585.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 25.
- [7] Thabit T M A M, Elgeddawy D I H, Shokr S A.

- Determination of some common heavy metals and radionuclides in some medicinal herbs using ICP-MS/MS [J]. *JAOAC Int*, 2020, 103(5): 1282-1287.
- [8] Zhao Y Q, Liu T B, Wu S L, *et al.* Insight into the soil bacterial community succession of *Nicotiana benthamiana* in response to *Tobacco mosaic virus* [J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1341296.
- [9] Ding Z Q, Mou Z J, Li Y P, *et al.* Spatial variation and controls of soil microbial necromass carbon in a tropical montane rainforest [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 921: 170986.
- [10] Zheng J, Yue Y K, Zhu Y T, *et al.* Zinc enhances cadmium accumulation in shoots of hyperaccumulator *Solanum nigrum* by improving ATP-dependent transport and alleviating toxicity [J]. *Plants*, 2024, 13(17): 2528.
- [11] 蒋攀, 王钰茜, 赵钰婷, 等. 钝化剂对土壤重金属镉含量及其在川麦冬中累积的影响 [J]. *中草药*, 2021, 52(24): 7638-7644.
- [12] 玄静, 赵振华, 李哲, 等. 中药材中镉含量研究现状 [J]. *辽宁中医药大学学报*, 2019, 21(8): 138-141.
- [13] 孙约兵, 王永昕, 李焯, 等. Cd-Pb 复合污染土壤钝化修复效率与生物标记物识别 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 951-958.
- [14] Kramer B K, Ryan P B. Soxhlet and microwave extraction determining the bioaccessibility of pesticides from soil and mode solids [J]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34(2): 424-430.
- [15] Cheng L P, Lian J P, Wang X, *et al.* Evaluating a soil amendment for cadmium mitigation and enhanced nutritional quality in faba bean genotypes: Implications for food safety [J]. *Plants*, 2025, 14(1): 141.
- [16] 张泽. 艾蒿对镉污染稻田土壤的减量修复潜力研究 [D]. 银川: 北方民族大学, 2023.
- [17] Quan L T, Sun M N, Qin C, *et al.* Rice husk biochar is more effective in blocking the cadmium and lead accumulation in two *Brassica* vegetables grown on a contaminated field than sugarcane bagasse biochar [J]. *Environ Geochem Health*, 2024, 46(11): 471.
- [18] Li S S, Wang M, Zhao Z Q, *et al.* Alleviation of cadmium phytotoxicity to wheat is associated with Cd re-distribution in soil aggregates as affected by amendments [J]. *RSC Adv*, 2018, 8(31): 17426-17434.
- [19] Shi L, Guo Z H, Peng C, *et al.* Immobilization of cadmium and improvement of bacterial community in contaminated soil following a continuous amendment with lime mixed with fertilizers: A four-season field experiment [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 171: 425-434.
- [20] Horvatinec J, Buczny J, Ondrasek G. Fly ash application impacts master physicochemical pedovariables: A multilevel meta-analysis [J]. *J Environ Manage*, 2024, 368: 122066.

[责任编辑 时圣明]