

# 钝化材料对 Cd 污染农田修复及其后效探究

王宗亚<sup>1</sup>, 杨梦丽<sup>2</sup>, PHONG Oudom-daove<sup>1</sup>, 杨庆波<sup>1</sup>, 李丁<sup>3</sup>, 马友华<sup>1\*</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036;

2. 新蔡县农业农村局, 河南 驻马店 463500;

3. 芜湖格丰环保科技有限公司, 安徽 芜湖 241080)

**摘要:**在田间试验条件下,考察不同钝化材料对农田 Cd 轻度污染水稻修复效果及稻麦轮作后第二年水稻修复后效。结果表明,在轻度 Cd 污染农田中,各钝化材料处理均能不同程度降低土壤有效态 Cd 含量和水稻籽粒中 Cd 含量。其中,在钝化材料施用当季和稻麦轮作后第二季水稻中修复效果最好的处理为中量纳米材料处理和石灰配施中量纳米材料处理,这两种处理对土壤有效态 Cd 含量降低率分别为 50.94% 和 47.15%,对水稻籽粒中 Cd 含量降低率分别为 73.74% 和 69.41%。

**关键词:** 镉轻度污染;钝化剂;水稻;农田修复

中图分类号: X53

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2021)02-0064-04

## Study on Effects and Aftereffects of Passivation Materials on Remediation of Cd Polluted Farmland Soil

WANG Zong-ya<sup>1</sup>, YANG Meng-li<sup>2</sup>, PHONG Oudom-daove<sup>1</sup>, YANG Qing-bo<sup>1</sup>, LI Ding<sup>3</sup>, MA You-hua<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;

2. Xincai County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Zhumadian, Henan 463500, China;

3. Wuhu Gefeng Environmental Protection Technology Research Institute Co. LTD,

Wuhu, Anhui 241080, China)

**Abstract:** Under field trial conditions, the remediation effects of different passivation materials on farmland soil which slightly polluted by Cd, and the aftereffects of rice restoration in the second year after the rice-wheat rotation were studied. The results showed that all the passivation materials had different removal effects on available Cd in the farmland soil which slightly polluted by Cd and the content of Cd in rice grain. Of all the materials, mid-level nano materials and mid-level nano materials with lime had the best remediation effects, the reduction rates of available Cd in the soil were 50.94% and 47.15%, respectively, and the reduction rates of Cd in rice grain were 73.74% and 69.41%, respectively.

**Key words:** Slightly polluted by cadmium; Passivation materials; Rice; Farmland remediation

为解决农田土壤重金属污染的难题,相关领域的专家学者开展了大量研究,探索了大量修复技术和修复材料,其中,钝化材料的施用是近年来试验研究最多的技术。Cu、Cd、Pb、Zn 复合污染的土培试验结果表明,石灰的添加可以有效提高土壤 pH 值和有机质含量,同时可以将上述 4 种重金属化学形态由活性态向非活性态转化,降低水稻的吸收量<sup>[1-4]</sup>。相关盆栽试验结果显示,多孔纳米改性材

料的施用可以有效降低土壤中重金属有效态含量及小白菜中重金属含量<sup>[5]</sup>。上述试验都是对修复材料施用当季或连续施用后的农田土壤及农作物

收稿日期:2020-02-27;修订日期:2021-02-17

基金项目:安徽省科技重大攻关基金资助项目(No. 17030701053)

作者简介:王宗亚(1997—),男,安徽六安人,在读研究生,研究方向为土壤生态环境与修复。

\* 通信作者:马友华 E-mail: yhma2020@qq.com

的研究,针对修复材料施用后效的研究较少。今通过在田间试验条件下,考察施用石灰、生物炭、生物有机肥及多孔陶瓷纳米材料等钝化材料对当季 Cd 轻度污染水稻修复效果及其稻麦轮作下第二年水稻修复后效的影响,探究农田 Cd 污染钝化剂修复的持久性,为评价和合理选择钝化材料提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验于安徽省铜陵市义安区某轻度 Cd 污染农田内进行。土壤类型为水稻土,亚类为潜育型水稻土,成土母质为砂质洪冲沉积物。供试土壤基本理化性质:阳离子交换量(CEC)19.54 cmol/kg,有机质为23.66 g/kg,碱解氮为120.27 mg/kg,有效磷为19.15 mg/kg,速效钾为125.56 mg/kg,pH 值为6.14,全量 Cd 为0.34 mg/kg。

### 1.2 试验材料

供试复合肥(17-17-17)、尿素(总氮 $\geq$ 46.0%)及石灰、生物炭、生物有机肥等钝化材料均来源于当地农资市场。多孔陶瓷纳米材料(SMS)来自安徽某环保科技有限公司,主要成分是凹土、蒙脱土、改性助剂和石灰,Cd 质量比为1.8 mg/kg,pH 值为12.02,总氮(N)0.08%,磷( $P_2O_5$ )1.38%,钾( $K_2O$ )0.92%,钠(Na)0.02%,钙(Ca)14.22%,镁(Mg)2.38%,硅(Si)0.71%。

### 1.3 试验处理设置

修复材料试验共设置10个处理:①不施钝化剂处理(CK),不施用任何修复材料;②石灰处理(SH),每667 m<sup>2</sup>施用30 kg 修复材料;③生物炭处理(SWT);④石灰加生物炭(SH+SWT);⑤生物有机肥(SWYJ);⑥石灰加生物有机肥(SH+SWYJ);⑦低量 SMS 处理(LSMS);⑧低量 SMS 配施石灰处理(SH+LSMS);⑨中量 SMS 处理(MSMS),每667 m<sup>2</sup>施用400 kg 修复材料;⑩中量 SMS 配施石灰处理(SH+MSMS)。SWT、SWYJ、LSMS 处理每667 m<sup>2</sup>施用200 kg 修复材料;SH+SWT、SH+SWYJ、SH+LSMS 处理每667 m<sup>2</sup>先施用30 kg 石灰,一周后,每667 m<sup>2</sup>再施用200 kg 修复材料;SH+MSMS 处理每667 m<sup>2</sup>先施用30 kg 石灰,一周后,每667 m<sup>2</sup>再施用400 kg 修复材料。钝化剂于2017年水稻季与肥料一起施入试验小区,然后用旋耕机混匀,其中石灰在施加其他钝化剂前一周先施入。钝化剂施入后,2017—2018年小麦季及2018年水

稻季均不再施入钝化剂。

小区设计采用裂区设计,每个处理3个平行,随机区组排列,小区面积为20 m<sup>2</sup>,各小区用塑料薄膜覆盖的埂分开。栽培方式为秧苗移栽,栽培密度为13.33 cm $\times$ 30.00 cm,即行距30.00 cm,株距13.33 cm。SWYJ 和 SH+SWYJ 处理的小区每667 m<sup>2</sup>施纯 N 为2.2 kg, $P_2O_5$ 为3.64 kg, $K_2O$ 9.64 kg,其他处理每667 m<sup>2</sup>施用纯 N 14 kg, $P_2O_5$ 6 kg, $K_2O$ 12 kg。2017年季(当季)水稻于2017年5月种植,同年9月收获;2018年季(稻麦轮作后第二季)水稻于2018年5月种植,同年9月收获。水稻成熟期进行植株样品和土壤样品协同采样并检测,整理检测结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同钝化材料及其后效对土壤 pH 值的影响

不同钝化材料处理对土壤 pH 值的影响见图1,不同处理间差异显著, $P < 0.05$ 。由图1可见,2017年水稻季中,SH+MSMS 处理对 pH 值提升效果最好且显著,提高了1.74。2018年水稻季中,SH+MSMS 处理对 pH 值提升效果最好且显著,提高了0.85。

### 2.2 不同钝化材料及其后效对水稻籽粒 Cd 含量影响

不同钝化材料处理对水稻籽粒 Cd 含量的影响见图2,不同处理间差异显著, $P < 0.05$ 。由图2可见,2017年水稻季中,MSMS、LSMS、SH+LSMS 和 SH+MSMS 处理能使水稻籽粒 Cd 质量比降低至国家食品安全标准(0.2 mg/kg)以下,其中 MSMS 处理降低效果最好且显著,降低率达73.74%。2018年水稻季中,MSMS 和 SH+MSMS 处理能使水稻籽粒 Cd 质量比降低至国家食品安全标准(0.2 mg/kg)以下,其中 SH+MSMS 处理降低效果最好且显著,降低率达69.41%。

### 2.3 不同钝化材料处理及其后效对土壤有效态 Cd 含量影响

不同钝化材料处理对土壤有效态 Cd 含量的影响见图3,不同处理间差异显著, $P < 0.05$ 。由图3可见,2017年水稻季中,MSMS 处理对土壤有效态 Cd 含量降低效果最好且显著,降低率达50.94%。2018年水稻季中,SH+MSMS 处理对土壤有效态 Cd 含量降低效果最好且显著,降低率达47.15%。

2.4 不同钝化材料处理及其后效对水稻产量影响

两季水稻不同钝化材料处理及其后效对水稻产量的影响见表 1, 不同处理间差异显著,  $P < 0.05$ 。由表 1 可知, 2017 年水稻季中, 各处理对水稻产量均无明显影响; 2018 年水稻季中, SWYJ、SH + SWYJ、LSMS 和 SH + LSMS 处理能使水稻产量有较明显提升, 提升率为 12.23% ~ 15.64%。

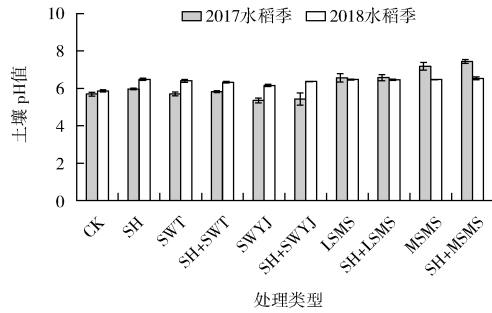


图 1 不同钝化材料及其后效对土壤 pH 值的影响  
Fig. 1 Effects and aftereffects of different passivation materials on pH value in the soil

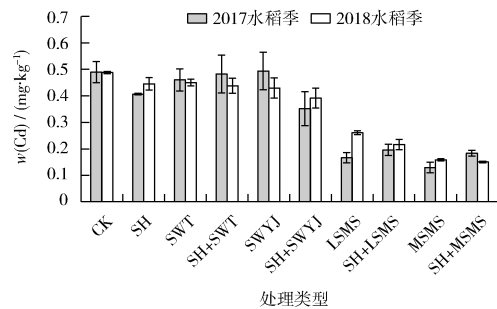


图 2 不同钝化材料及其后效对水稻籽粒 Cd 含量影响  
Fig. 2 Effects and aftereffects of different passivation materials on Cd content in rice grains

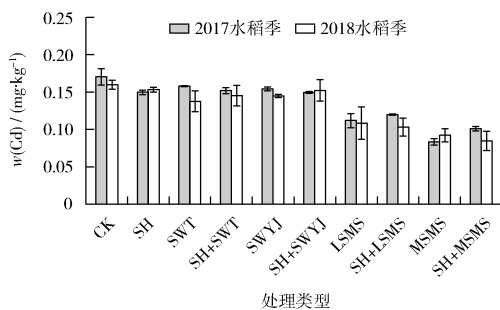


图 3 不同钝化材料处理及其后效对土壤有效态 Cd 含量影响

Fig. 3 Effects and aftereffects of different passivation materials on available Cd in the soil

表 1 不同钝化材料处理及其后效对水稻产量影响

处理类型	2017 年水稻产量	2018 年水稻产量
CK	6 867 ± 685	7 478 ± 271
SH	5 600 ± 1 179	7 581 ± 251
SWT	5 720 ± 431	6 957 ± 290
SH + SWT	5 237 ± 152	7 361 ± 399
SWYJ	7 921 ± 535	8 648 ± 239
SH + SWYJ	7 504 ± 477	8 645 ± 308
LSMS	6 400 ± 1 156	8 551 ± 102
SH + LSMS	7 333 ± 1 620	8 392 ± 332
MSMS	7 500 ± 765	7 711 ± 177
SH + MSMS	6 517 ± 1 153	7 377 ± 32

2.5 不同钝化材料处理及其后效对土壤养分含量影响

不同处理对土壤养分含量的影响见表 2, 不同处理间差异显著,  $P < 0.05$ 。由表 2 可知, 仅部分处理能显著性提升土壤养分含量, 2017 年水稻季的 SWYJ 和 SH + SWYJ 处理能明显提高土壤碱解氮含量, 提升率分别为 27.07% 和 27.4%; 2017 年、2018 年水稻季的 SH + SWT 处理均能明显提高土壤速效钾含量, 提升率分别为 40.89% 和 55.76%。

2.6 讨论

钝化剂的施用可以使土壤中移动性较大的重金属形态向不易被植物利用的形态转化, 从而达到使作物中重金属积累量降低的效果<sup>[6-10]</sup>。这与上述试验中各处理降低土壤有效态 Cd, 从而降低水稻籽粒 Cd 含量的结果一致。两季水稻及其土壤中 Cd 含量表明, SMS 的钝化修复效果要远高于其他材料, 这可能与 SMS 的成分有关。SMS 的主要成分为凹凸土和蒙脱土, 大量试验证实这两种材料均为土壤重金属修复中效果很好的钝化材料<sup>[11-14]</sup>。除此之外, SMS 中还含有部分硅元素, 大量硅肥修复水稻 Cd 污染的试验结果显示, 水稻是一种喜硅植物, 适当的硅吸收可以加速植株生长, 间接克服非生物和生物胁迫<sup>[15-17]</sup>。试验结果显示, 钝化剂用量也会一定程度影响修复效果, 这与王玉婷等<sup>[18]</sup>和郇慧慧等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。在上述研究中, SH + MSMS 处理 2018 年水稻季的土壤有效态 Cd 和水稻籽粒中 Cd 含量均低于 2017 年水稻季, 这与吴玉俊等<sup>[20]</sup>的研究结果一致, 说明钝化材料除了当季的修复效果外, 同时还具有一定的持久修复效果。

表 2 不同钝化材料处理及其后效对土壤养分含量影响

Table 2 Effects and aftereffects of different passivation materials on soil nutrient

处理类型	有机质 $w/(g \cdot kg^{-1})$		碱解氮 $w/(mg \cdot kg^{-1})$		有效磷 $w/(mg \cdot kg^{-1})$		速效钾 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	
	2017 年 水稻季	2018 年 水稻季	2017 年 水稻季	2018 年 水稻季	2017 年 水稻季	2018 年 水稻季	2017 年 水稻季	2018 年 水稻季
CK	28.53 ± 2.51	29.76 ± 0.94	196.28 ± 38.01	180.16 ± 15.04	22.77 ± 4.45	21.19 ± 2.04	97 ± 7	107 ± 6
SH	25.62 ± 2.24	26.25 ± 2.64	221.57 ± 20.79	163.19 ± 25.50	19.43 ± 2.82	18.13 ± 0.62	100 ± 15	113 ± 6
SWT	31.70 ± 1.48	31.62 ± 2.00	213.63 ± 9.63	161.72 ± 1.19	20.17 ± 1.21	18.99 ± 1.07	110 ± 10	160 ± 20
SH + SWT	28.50 ± 5.04	29.64 ± 1.42	228.55 ± 1.10	163.19 ± 28.53	19.42 ± 1.24	17.89 ± 0.84	137 ± 23	167 ± 29
SWYJ	26.58 ± 4.17	26.76 ± 0.88	249.42 ± 38.43	172.92 ± 10.89	18.63 ± 5.98	18.34 ± 3.95	143 ± 15	127 ± 6
SH + SWYJ	24.01 ± 9.98	24.69 ± 0.89	250.06 ± 21.18	178.24 ± 13.84	17.45 ± 3.20	17.24 ± 1.84	110 ± 10	127 ± 15
LSMS	23.89 ± 2.66	23.96 ± 1.15	147.00 ± 29.36	172.47 ± 4.85	17.65 ± 1.44	17.53 ± 1.36	117 ± 9	120 ± 10
SH + LSMS	21.57 ± 5.09	26.96 ± 0.76	110.88 ± 4.89	173.82 ± 4.24	20.28 ± 4.33	18.61 ± 0.47	107 ± 9	120 ± 17
MSMS	25.05 ± 1.23	25.53 ± 0.45	165.77 ± 30.03	178.35 ± 21.43	25.10 ± 0.01	18.59 ± 1.07	100 ± 6	130 ± 17
SH + MSMS	22.27 ± 1.56	24.74 ± 0.86	120.33 ± 10.89	190.57 ± 23.72	25.93 ± 0.92	19.27 ± 2.08	110 ± 6	130 ± 17

### 3 结语

通过提高土壤 pH 值,降低土壤中有效态 Cd 含量,最终达到对钝化材料施用当季和稻麦轮作后第二季水稻籽粒中 Cd 含量的降低,降低效果最好的处理为 MSMS 处理和 SH + MSMS 处理,两种处理对土壤有效态 Cd 含量降低率达 50.94% 和 47.15%,对水稻籽粒中 Cd 含量降低率达 73.74% 和 69.41%。各处理中仅生物有机肥相关处理对两季水稻季的水稻产量达到提升效果。两季各处理虽然对土壤有机质、氮磷钾等养分含量有一定程度提升,但提升幅度不明显。上述试验仅对钝化材料之间的修复效果进行对比,以后的相关试验可以对不同钝化材料、低积累品种、农田农艺措施相结合的方向进行研究。

#### [参考文献]

- [1] 刘勇,刘燕,朱光旭,等. 石灰对 Cu、Cd、Pb、Zn 复合污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. 环境工程,2019,37(2):158-164.
- [2] 李明遥,张妍,杜立宇,等. 生物炭与沸石混施对土壤 Cd 形态转化的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(3):248-252.
- [3] ZHENG R L, CHEN Z, CAI C, et al. Mitigating heavy metal accumulation into rice (*Oryza sativa* L.) using biochar amendment—a field experiment in Hunan, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14):11097-11108.
- [4] 周艳,钟积东,吴晓燕,等. 生物有机肥对水稻产量及重金属含量的影响[J]. 湖南农业科学,2018(3):39-41.
- [5] 李鹏飞. 多孔纳米改性材料对土壤 Cd、Pb 的修复效应研究[D]. 武汉:华中农业大学,2018.
- [6] 刘晶晶,杨兴,陆扣萍,等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(11):3679-3687.
- [7] WANG Y, LI F, SONG J, et al. Stabilization of Cd-, Pb-, Cu- and

Zn- contaminated calcareous agricultural soil using red mud: a field experiment [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, 40(5):2143-2153.

- [8] 周江明,姜正孝,吴慧平. 撒施石灰对稻田及水稻重金属积累的影响[J]. 浙江农业科学,2019,60(6):991-997.
- [9] 邹紫今,周航,吴玉俊,等. 羟基磷灰石 + 沸石对稻田土壤中铅镉有效性及糙米中铅镉累积的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(1):45-52.
- [10] 杨庆波,鲍广灵,张宁,等. 硅肥对农田镉轻度污染水稻修复效果的研究[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(1):54-56,60.
- [11] 任静华,廖启林,范健,等. 凹凸棒黏土对镉污染农田的原位钝化修复效果研究[J]. 生态环境学报,2017,26(12):2161-2168.
- [12] 周守勇,薛爱莲,张艳,等. 聚丙烯酸改性凹凸土对  $Pb^{2+}$ 、 $Ni^{2+}$  和  $Cr^{3+}$  的选择性吸附[J]. 化工学报,2015,66(2):618-625.
- [13] 臧运波. 蒙脱土对重金属离子吸附的研究进展[J]. 安徽农业科学,2008(29):12884-12886.
- [14] 梁亚琴,张淑萍,李慧,等. 改性蒙脱土去除水中重金属离子研究新进展[J]. 化工进展,2018,37(8):3179-3187.
- [15] 高子翔,周航,杨文弢,等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J]. 环境科学,2017,38(12):5299-5307.
- [16] 李造煌,杨文弢,邹佳玲,等. 钙镁磷肥对土壤 Cd 生物有效性和糙米 Cd 含量的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(6):2322-2330.
- [17] 吴昌华,徐昌旭,池泽新. 江西省耕地重金属污染防治问题及治理策略[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(4):1-3,37.
- [18] 王玉婷,徐文波,沈银,等. 不同改良剂对镉铅污染土壤修复效果研究[J]. 广州化工,2018,46(19):103-104.
- [19] 邸慧慧,吴文昊,蔡章春,等. 改良剂施用量对 Cd 污染土壤修复及烤烟 Cd 积累的影响[J]. 中国烟草科学,2015,36(4):70-74.
- [20] 吴玉俊,周航,杨文弢,等. 组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较[J]. 环境科学,2016,37(7):2791-2798.