

土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究

何赢, 杜平, 石静, 秦晓鹏, 徐刚, 吴明红

引用本文:

何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1734–1740.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1423>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

设施菜地土壤镉钝化剂筛选及应用效果研究

王云丽, 石耀鹏, 赵文浩, 李令仪, 乔建晨, 王雨薇, 梁淑轩, 刘微

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1503–1510 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0303>

不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究

袁兴超, 李博, 朱仁凤, 药栋, 湛方栋, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 807–817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0672>

钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

有机及无机肥料修复重金属污染水稻土效果差异研究

吴文成, 陈显斌, 刘晓文, 宋清梅, 李云标, 蔡信德

农业环境科学学报. 2015(10): 1928–1935 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.013>

新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究

武成辉, 李亮, 晏波, 雷畅, 陈涛, 肖贤明

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2007–2013 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0471>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1734–1740.

HE Ying, DU Ping, SHI Jing, et al. Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation—field experiment study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1734–1740.



开放科学 OSID

土壤重金属钝化效果评估 ——基于大田试验的研究

何赢^{1,2}, 杜平^{2*}, 石静^{1,2}, 秦晓鹏², 徐刚¹, 吴明红¹

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

摘要: 采用野外大田试验, 研究了钙镁磷肥(Calcium-magnesium phosphate fertilizer)、麦饭石(Medical stone)、氧化铁吸附剂(Ferric oxide adsorbent)、氧化铝复合材料(Alumina composite)、植物型有机肥(Plant-based organic fertilizer)、牛粪(Cow dung)、骨炭(Bone char)对某地重金属污染农田的钝化修复效果, 并利用动态加权评估方法评估了这几种钝化材料的综合适用性。试验结果表明: 几种材料对土壤 pH 影响均较小, 钙镁磷肥、麦饭石微量提高了土壤 pH, 与对照组相比分别增加 0.68 和 0.74 个单位; 施加植物型有机肥、牛粪和骨炭提高了土壤有机质含量, 与对照组相比分别增加了 3.19、2.64 g·kg⁻¹ 和 1.17 g·kg⁻¹ (10.04%、8.31% 和 3.68%)。几种材料在 0.6% 的投加量下, 除植物型有机肥外均有较好钝化效果, 土壤有效态镉降低 18% 以上, 且显著减少糙米中镉蓄积量 (0.062~0.087 mg·kg⁻¹), 低于国家食品安全标准限值。为综合评估几种材料的效果及适用性, 以土壤重金属有效态含量、糙米镉含量、修复成本和产量为指标构建动态加权函数综合评估模型, 评估结果表明, 钙镁磷肥的综合修复效果最好, 其次为骨炭和植物型有机肥。

关键词: 野外试验; 镉污染土壤; 钝化剂; 效果评估

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)08-1734-07 doi:10.11654/jaes.2019-1423

Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation—field experiment study

HE Ying^{1,2}, DU Ping^{2*}, SHI Jing^{1,2}, QIN Xiao-peng², XU Gang¹, WU Ming-hong¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Technical Center for Soil, Agricultural and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on field experiments, the remediation effect of several immobilization materials was studied, including calcium-magnesium phosphate fertilizer (CMP), medical stone (MS), ferric oxide adsorbent (FA), alumina composite (AC), plant-based organic fertilizer (POF), cow dung (CD) and bone char (BC). The dynamic weighted comprehensive model was established to assess the comprehensive remediation effects. The results demonstrated that the pH of the soil was slightly influenced by applying these materials, increasing by 0.68 and 0.74 units under CMP and MS treatments, respectively. The application of POF, CD and BC increased the soil organic matter content by 3.19, 2.64 g·kg⁻¹ and 1.17 g·kg⁻¹ (10.04%, 8.31% and 3.68%) compared with the control check, respectively. Under the dosage of 0.6%, almost all materials showed good immobilization effects, the immobilization efficiency of all materials except POF exceed 18%, and the cadmium content of brown rice was significantly reduced (0.062 to 0.087 mg·kg⁻¹), which was lower than the National Food Safety Standard of 0.2 mg·kg⁻¹. The calculation results of the dynamic weighted comprehensive evaluation method showed that CMP was the most applicable immobilization material in this study, BC and POF come second.

Keywords: field experiments; Cd contaminated soil; immobilization remediation; effect evaluation

收稿日期: 2019-12-25 录用日期: 2020-03-25

作者简介: 何赢 (1995—), 男, 湖北赤壁人, 硕士研究生, 从事重金属钝化研究。E-mail: shu071132@icloud.com

*通信作者: 杜平 E-mail: duping@craes.org.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41501350); 广西科学研究与技术开发计划—重大专项计划 (桂科重 1598014-4)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41501350); Scientific Research and Technology Development Program of Guangxi, China—Major Project Plan (GSM 1598014-4)

工业生产活动以及化肥、农药、污水灌溉等导致农田土壤重金属污染,造成土壤环境质量下降、农产品重金属超标,继而危害人体健康^[1-5]。针对农用地土壤重金属污染问题,农艺措施、植物修复、钝化修复、工程治理等技术广泛应用,并已在广西、广东、湖南、湖北、江西、云南等典型区域开展了重金属污染农田土壤修复示范工程。其中,土壤重金属钝化技术具有修复效果明显、施工工艺相对简单易行、修复费用合理、后期处置相对容易、对土壤类型的适应性较为广泛、既可原位也可异位实施等诸多特点,虽不能减少土壤重金属总量,但能直接减少重金属的浸出含量,有效降低环境风险,是一种适用于我国国情且行之有效的重金属污染土壤治理方法,可加快实现我国农用地的安全利用。

原位钝化修复技术的钝化机理主要是通过向土壤中添加钝化改良材料,利用钝化材料与土壤中重金属元素的沉淀、化学吸附、表面沉淀等作用,使重金属向低溶解、固定态等低毒形态转化,降低污染土壤中重金属的溶解性和生物有效性^[6-8],从而减少作物吸收,降低环境风险。常用的钝化材料主要分为有机(农业废弃物、有机肥、生物质炭等)和无机(金属氧化物、含磷矿物、无机肥、含硅类黏土矿物、工业副产品等)两大类。不同类型的钝化材料对镉、铅、锌、砷等均有不同程度的稳定化作用,促使重金属由活性态向非活性态和潜在活性态转化^[9-12],能有效降低植物对重金属的吸收,但目前的技术评估指标单一,有效态提取方法多样,对农田土壤本身基本性质的影响、作物生长的适宜性、修复效果的持久性等方面关注较少^[13-14],缺乏科学有效的评价方法。因此,建立以土壤钝化效率、农产品质量与产量、修复成本等为指标的评估体系,对推进钝化修复技术的应用具有重要

意义。

本研究以湖北省某地重金属污染农田为研究对象,选取7种具有代表性且在前期室内研究中证明效果较好的钝化剂^[15],进行钝化修复技术适用性及效果评估研究,旨在筛选出适合该地镉污染农田土壤的钝化剂及施工工艺,并利用动态加权函数综合评估模型尝试建立钝化修复技术综合评估方法。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

田间试验地点位于湖北省某地受到镉污染的农田。试验农田土壤为偏酸性土壤,pH值平均为5.78,有机质含量平均为31.77 g·kg⁻¹,氮、磷、钾含量分别为1.80、0.96 g·kg⁻¹和0.15 g·kg⁻¹。土壤中总镉含量为0.94 mg·kg⁻¹,超过国家土壤环境质量标准筛选值0.4 mg·kg⁻¹。种植的农作物为当地常见的晚稻品种。本研究用几种钝化剂的基本性质如表1所示。

1.2 试验设计

在试验开始前用旋耕机将试验区农田土壤混合均匀,采集表层土壤(0~20 cm)并测定基本理化性质。将表层土壤混合均匀后的试验区划分为22个小区,每个试验小区约9 m²,小区之间铺设塑料薄膜并设置田埂防渗。将上述7种钝化剂分别按照0.3%、0.6%、0.9%的添加量施加入各试验小区中,并设定对照组,每个试验小区均分为3个小区作为平行。将钝化剂与土壤充分混和、加水养护且自然老化一周后插秧,按照当地种植习惯进行施肥灌溉等田间管理。水稻成熟后按照5点采样法采集表层土壤和水稻样品。水稻样品经砻谷机脱壳制作水稻糙米样品,烘干后保存。

1.3 样品分析

pH采用玻璃电极法(FE20/FG2, Mettler-Toledo,

表1 钝化剂基本情况

Table 1 The properties of immobilization materials

材料 Materials	主要成分 Major components	pH	镉含量/ (mg·kg ⁻¹)	比表面积 Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)	价格 Price/(yuan·t ⁻¹)
钙镁磷肥 CMP	Ca ₃ (PO ₄) ₂ 、CaSiO ₃ 、MgSiO ₃ 、18%有效磷	8.95	0.101	2.02	810
麦饭石 MS	69%SiO ₂ 、16%Al ₂ O ₃	7.95	ND	8.68	1 230
氧化铁吸附剂 FA	55%Fe ₂ O ₃ 、45%CaSO ₄	7.38	ND	23.95	1 700
氧化铝复合材料 AC	31%Al ₂ O ₃ 、12%MgCO ₃	7.53	ND	11.55	1 550
植物型有机肥 POF	53.8%有机质、氮、磷、钾	6.41	0.364	20.55	900
牛粪 CD	14.5%有机质、0.4%氮、0.21%磷、0.13%钾	6.91	0.215	3.36	750
骨炭 BC	11%无机碳、7%有机碳、56%Ca ₃ (PO ₄) ₂	8.61	0.09	45.26	1 050

注:ND表示未检出。

Note: ND means not detected.

瑞士)测定^[16],土壤有机碳采用TOC测量仪(Multi N/C 2100s, Analytik Jena AG, 德国)测定,土壤有效态镉含量用国标方法(HJ 804—2016)提取,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 7500c, Agilent, 美国)检测。将水稻籽粒用去离子水冲洗干净,70 ℃烘干至恒质量,粉碎后称取0.1 g,加入浓硝酸和高氯酸(体积比3:1),在用石墨消解仪于160 ℃消解完全后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 7500c, Agilent, 美国)检测。

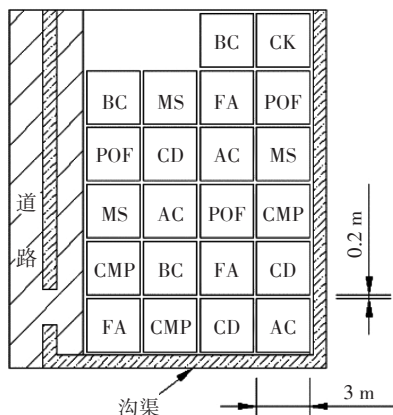


图1 试验小区示意图

Figure 1 Experimental plot

1.4 数据处理与分析

所有数据使用Excel 2016和SPSS 25进行处理分析,使用Origin 2018绘图。

1.5 钝化效果综合评估方法

动态加权综合评估法的原理是将每项评价指标量化,将指标的权重与其评估值关联,各指标的权值满足特定的函数关系,将定常权变为动权,淡化主观因素对评估结果的影响^[17-18]。首先按照评估指标的特性进行一致化和标准化处理,再根据指标和权重的变化确定权函数为偏大型正态分布,即:

$$W_i(x) = \begin{cases} 0, & x_i < \alpha_i \\ 1 - e^{-\left(\frac{x_i - \alpha_i}{\sigma_i}\right)^2}, & x_i \geq \alpha_i \end{cases} \quad (1)$$

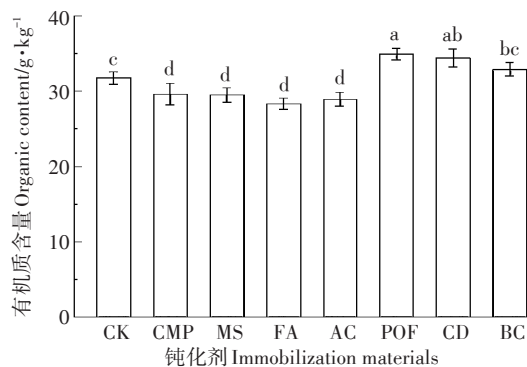
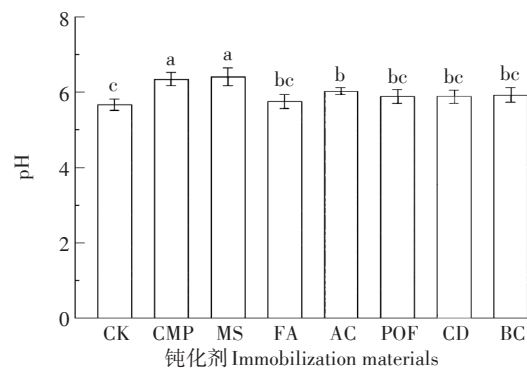
式中: $W_i(x)$ 为每个指标对应的权函数, x_i 为第 i 个评估指标的取值, α_i 取 x_i 的一类中间值, $\alpha_i = b_i^{(i)} - a_i^{(i)}$; σ_i 由 $W_i(a_i^{(i)}) = 0.9$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 确定, $a_i^{(i)}$ 为第 i 个评估指标第3区间值 $[a_3, b_3]$ 。最后根据标准化的评估指标值 x_i 及相对应的动态权函数 $W_i(x)$ 建立综合评价模型,评价结果 X 为各指标的动态加权和,即:

$$X = \sum_{i=1}^4 W_i(x_i) x_i \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 钝化剂对土壤基本性质的影响

几种钝化剂施加0.6%后土壤pH与有机质含量变化情况如图2所示。基于前期研究数据,本研究有倾向性地摒弃了通过提高土壤pH值达到钝化目的的钝化剂,而选择对pH影响较小、相对和缓型的钝化材料。图2所示,几种钝化剂对土壤pH影响较小, CMP与MS加入后土壤pH值分别增加0.68和0.74个单位,其他除AC外无明显变化。施加CMP对水稻土pH值影响较大,原因在于CMP呈碱性,且磷酸根能与土壤中的重金属形成磷酸盐,增加了表层土壤的pH^[19], MS含有大量的Si和Al,这些矿物溶出改变了土壤溶液中的pH^[20-21]。POF、CD和BC施加后提高了土壤有机质含量,与对照组相比分别增加了3.19、2.64 g·kg⁻¹和1.17 g·kg⁻¹,增加比例分别为10.04%、8.31%和3.68%,这是因为这3种材料本身的有机碳含量较高,分别达到53.8%、14.5%和7%。其他几种材料使土壤有机质略微降低。



不同小写字母表示不同钝化剂处理间差异显著 ($P < 0.05$)
The different lowercase letters indicate significant differences among different immobilization materials treatments ($P < 0.05$)

图2 0.6%投加量的钝化剂对土壤pH和有机质含量的影响
Figure 2 Effects of 0.6% addition of immobilization materials on soil pH and organic matter content

2.2 钝化效率

钝化效率是对照组和试验组土壤重金属有效态的差值与对照组重金属有效态的比值,用以评估材料的钝化效果。

$$\text{钝化效率} = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \times 100\%$$

式中: C_0 表示对照组土壤重金属有效态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_n 表示试验组土壤重金属有效态含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [22]。

钝化剂对土壤重金属的钝化效果不仅与钝化剂种类有关,也与钝化剂的添加量有关。添加量分别为0.3%、0.6%、0.9%时土壤中有效态镉含量变化情况与钝化效率如表2、图3所示。0.3%添加量下,有效态镉含量由施加前0.14~0.30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变为施加后0.13~0.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均由0.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变为0.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。0.6%施加量下,有效态镉含量由施加前0.23~0.36 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变为施加后0.19~0.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均由0.31 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变为0.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。0.9%施加量下,有效态镉含量由施加前0.25~0.36 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变为施加后0.17~0.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均由0.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变为0.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总体来看,随着钝化剂施加量的增加,土壤有效态镉减少量相应增加,施加量为0.6%和0.9%时效果更加明显。

由图3所示,添加量为0.3%时,除POF外,钝化率为5.98%~13.83%,添加量为0.6%和0.9%时钝化率分别为7.84%~34.10%和26.06%~40.53%,3个添加量条件下,土壤中镉的钝化率平均为7.62%、23.07%和30.49%,表明添加量由0.3%增加到0.9%,钝化效果明显提高。在0.6%的钝化剂添加量下,CMP、MS、FA、AC的钝化率较高,其中,MS钝化率最高,其次是钝化剂AC,钝化率分别为34.1%和31.04%。POF、

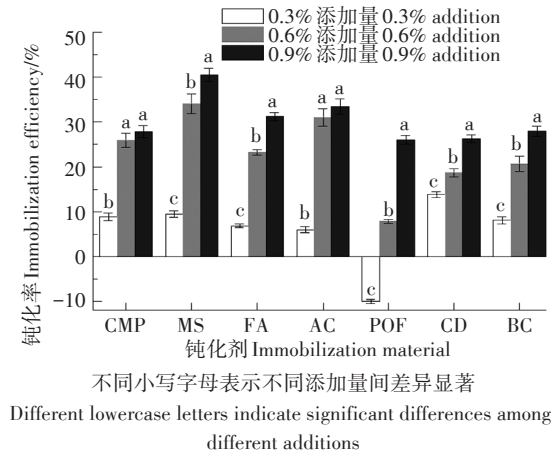


图3 钝化剂添加量对Cd钝化率的影响
Figure 3 Effect of material additions on Cd immobilization efficiency

CD、BC钝化率相对较低,POF处理效果最差,钝化效率仅为7.84%。POF在0.3%添加量下,出现了有效态镉含量反而增加的情况,这可能是由于POF施加后,在分解过程中产生少量酸,促进土壤中镉的释放造成的。CMP、MS的添加提高了土壤pH,有利于土壤中重金属形成氢氧化物沉淀[23],并使得土壤表面负电荷增加,促进土壤对重金属的吸附[24]。另外,CMP的磷酸根与 Cd^{2+} 形成沉淀,能降低 Cd^{2+} 的迁移能力,是土壤中 Cd^{2+} 被固定的主要机制[25]。MS的碱性以及特有的结构和吸附性可以有效提高土壤pH、诱导重金属吸附或发生重金属沉淀反应,降低重金属的生物活性[26]。FA的主要成分为 Fe_2O_3 ,比表面积达 $23.95 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,吸附能力较强,可有效降低土壤有效态镉含量。

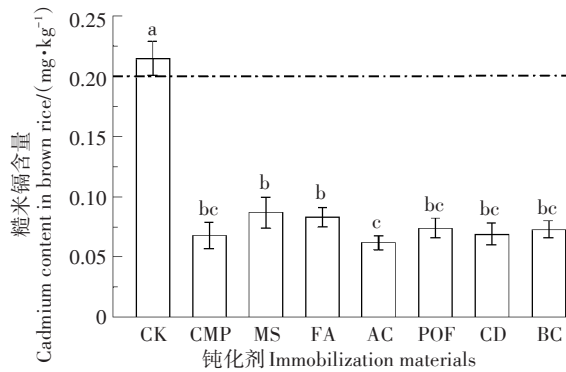
研究表明,钝化剂施加量的增加可提高镉钝化率,综合考虑钝化效果、经济效益等因素,在该区域实施钝化修复工程,最佳钝化剂施加量为0.6%。

2.3 钝化剂对糙米镉含量的影响

农产品重金属蓄积量是否超过国家食品安全标准限值是评价钝化剂效果的重要指标之一,糙米中镉的安全限值为0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图4所示,未进行钝化处理前糙米中镉含量为0.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过安全限值,加入钝化剂后,糙米镉含量显著降低为0.06~0.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,都低于国家安全限值,表明几种钝化剂都能达到较好钝化效果。CMP和AC施加后糙米镉含量最低,分别为0.068、0.062 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明这两种钝化剂处理效果相对较好。总体来看,施加钝化剂后可提高水稻产量,随着钝化剂施加量的增加增产率增大(表3)。0.6%施加量条件下,CMP、AC、MS增产率分别为16.19%、16.39%和14.58%。CD施加0.3%和0.6%条

表2 不同添加量下土壤有效态镉含量变化($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 2 Effect of material additions on available Cd content($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

材料 Materials	0.3% 添加量		0.6% 添加量		0.9% 添加量	
	前	后	前	后	前	后
CMP	0.27	0.25	0.30	0.22	0.25	0.18
MS	0.25	0.23	0.34	0.22	0.28	0.17
FA	0.23	0.22	0.35	0.27	0.27	0.19
AC	0.30	0.28	0.36	0.25	0.36	0.24
POF	0.18	0.20	0.31	0.28	0.34	0.25
CD	0.30	0.26	0.36	0.28	0.28	0.20
BC	0.14	0.13	0.23	0.19	0.33	0.24
平均	0.22	0.21	0.31	0.25	0.29	0.20



虚线为《食品安全国家标准 食品中污染物的限量》
(GB 2762—2017)规定的镉限量指标
The dashed line is the cadmium limit indicator specified by
the national standard (GB 2762—2017)

图4 钝化剂0.6%的投加量对水稻糙米镉含量的影响
Figure 4 Effect of 0.6% addition on Cd content in brown rice

表3 不同施加量处理下水稻产量提高率(%)
Table 3 Yield-increasing rate under different
material additions(%)

处理Treatments	CMP	MS	FA	AC	POF	CD	BC
0.3%添加量	-5.56	19.88	6.06	7.19	4.08	-2.98	6.65
0.6%添加量	16.19	14.58	3.28	16.39	7.66	-7.06	14.01
0.9%添加量	19.78	23.24	4.27	18.03	15.60	4.57	23.05

注:原产量为5.03 t·hm⁻².
Note: The yield of CK was 5.03 t·hm⁻².

件下均导致水稻减产,减产原因需进一步研究讨论。

2.4 综合效果评估

本研究从土壤镉污染水平指标、水稻生长指标、粮食安全指标、经济指标4个方面中考量,引入动态加权综合函数建立综合评价模型,评估几种钝化剂的适用性。

动态加权综合评价模型考虑了同一指标间的数量差异,根据前期研究数据与国家标准限值等资料,对土壤有效态镉含量、糙米镉含量、修复成本、产量四个指标进行分级^[27-28]。根据研究中物种敏感性分析法得到的不同危险值(HC)将有效态镉含量划分为4个等级^[29];根据食品安全国家标准中糙米镉含量限值的20%和50%将糙米中镉含量分为4个等级;修复成本以每公顷30 000元材料成本^[30]的50%、75%划分等级;水稻产量按照5.25 t·hm⁻²为基准,对产量的影响在10%以内划分等级;各指标等级分类见表4。

表4 钝化效果评估指标分级

Table 4 The classification of evaluation indexes of immobilization effect

项目 Items	优秀	良好	一般	较差
有效态含量/(mg·kg ⁻¹)	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	>0.3
糙米镉含量/(mg·kg ⁻¹)	0~0.04	0.04~0.1	0.1~0.2	>0.2
每公顷修复成本/万元	0~1.50	1.50~2.25	2.25~3.00	>3.00
每公顷产量/t	>6.82	5.77~6.82	4.72~5.77	0~4.72

将有效态含量 x_1 、糙米镉含量 x_2 、修复成本 x_3 作极差处理并且标准化,对应的分区变为:[0,0.333 3)、[0.333 3,0.666 7)、[0.666 7,1)、[1,∞);[0,0.2)、[0.2,0.5)、[0.5,1)、[1,∞)、[0,0.5)、[0.5,0.75)、[0.75,1)、[1,∞);将产量 x_4 极小化,再通过极差变换和数据标准化,对应的分区为[0,0.692 3)、[0.692 3,0.818 2)、[0.818 2,1)、[1,∞)。根据指标类别的增加对评估效果的影响,按照实际情况取动态加权函数为偏大型正态分布函数,见公式(1)。

$\alpha_1=0.166\ 7, \alpha_2=0.1, \alpha_3=0.25, \alpha_4=0.346\ 2$;经计算可得 $\sigma_1=0.329\ 5, \sigma_2=0.263\ 6, \sigma_3=0.329\ 5, \sigma_4=0.311\ 1$ 。根据公式(2)计算综合评价指标函数, X 的值越小,表示评价效果越好。从计算的结果(表5)可以得出,CMP的综合效果最好,其次为BC和POF。

3 结论

(1)钝化剂施加量的增加可提高镉钝化率,综合考虑钝化效果、经济效益等因素,在该区域实施钝化修复工程,最佳钝化剂施加量为0.6%。在0.6%的钝化剂添加量下,钙镁磷肥、麦饭石、氧化铁吸附剂、氧化铝复合材料钝化效果较好,植物型肥料、牛粪和骨炭3种有机材料的钝化率相对较低。几种钝化药剂对土壤pH影响较小,主要通过吸附、络合等机制抑制土壤中镉活性,不会对土壤酸碱环境造成破坏,在一定程度上适于长期应用。施加植物型有机肥、牛粪和骨炭可明显提高土壤有机质含量,控制施加条件可在达到土壤镉钝化效果的同时,提高土壤肥力。

(2)几种钝化剂在施加0.6%情况下,均可使糙米镉含量降低至国家安全限值以下(0.06~0.08 mg·kg⁻¹),表明本研究中所选取钝化剂都具有较好的抑制

表5 钝化剂综合评价指标函数计算值

Table 5 Calculated value of comprehensive evaluation index function of immobilization materials

钝化剂 Immobilization materials	CMP	MS	FA	AC	POF	CD	BC
评估值 X	1.686 1	2.216 6	2.902 8	2.395 3	2.130 2	2.178 5	1.788 7

土壤镉活性的作用。钙镁磷肥、氧化铝复合材料、植物型有机肥和骨炭不但可达到钝化修复效果,且明显增加水稻产量。

(3)以土壤有效态镉含量、糙米镉含量、修复成本、水稻产量为评价指标,利用动态加权综合评价模型构建了钝化技术综合评估方法,钙镁磷肥、骨炭、植物型有机肥综合评估为最适用钝化材料,在一定程度上可指导当地的农用地土壤安全利用工作。

参考文献:

- [1] Nicholson F A, Meiciwen S R S, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311(1/2/3):205-219.
- [2] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad NW China using multivariate statistical methods[J]. *Catena*, 2012, 98:73-78.
- [3] Cui L Q, Pan G X, Li L Q, et al. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: A five-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 93:1-8.
- [4] Du P, Xie Y F, Wang S J, et al. Potential sources of and ecological risks from heavy metals in agricultural soils, Daye City, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(5):3498-3507.
- [5] Ye B X, Tang H M, Tang X M, et al. Status and prevention measurements of farmland pollution in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(7):295-298.
- [6] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils: To mobilize or to immobilize[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 266:141-166.
- [7] 曹心德,魏晓欣,代革联,等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(7):1441-1453.
CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, DAI Ge-lian, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soil: A review[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(7):1441-1453.
- [8] Udeigwe T K, Eze P N, Teboh J M, et al. Application, chemistry, and environmental implications of contaminant-immobilization amendments on agricultural soil and water quality[J]. *Environment International*, 2011, 37(1):258-267.
- [9] Jiang J, Xu R K. Application of crop straw derived biochars to Cu(II) contaminated Ultisol: Evaluating role of alkali and organic functional groups in Cu(II) immobilization[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 133:537-545.
- [10] Nejad D Z, Jung M C, Kim K H. Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 40:927-953.
- [11] Liu L W, Li W, Song W P, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633:206-219.
- [12] Pardo T, Bernal M P, Clemente R. Efficiency of soil organic and inorganic amendments on the remediation of a contaminated mine soil: Effects on trace elements and nutrients solubility and leaching risk[J]. *Chemosphere*, 2014, 107:121-128.
- [13] 徐应明. 污染土壤修复、诊断与标准体系建立的探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2007(2):413-418.
XU Ying-ming. Issues concerned with remediation technology, diagnosis methods and standards for contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007(2):413-418.
- [14] 李昂,侯红,苏本营,等. 基于CNKI文献分析的镉污染土壤钝化技术概况及效果评估研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8):1677-1684.
LI Ang, HOU Hong, SU Ben-ying, et al. Assessment of heavy metal passivation technology and evaluation of cadmium-contaminated soil based on CNKI literature analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1677-1684.
- [15] 韩雷,陈娟,杜平,等. 不同钝化剂对Cd污染农田土壤生态安全的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(7):1289-1295.
HAN Lei, CHEN Juan, DU Ping, et al. Assessing the ecological security of the cadmium contaminated farmland treated with different amendments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(7):1289-1295.
- [16] Ren J, Liu J, Chen J, et al. Effect of ferrous sulfate and nitrohumic acid neutralization on the leaching of metals from a combined bauxite residue[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10):9325-9336.
- [17] 韩中庚,杜剑平. 淮河水质污染的综合评价模型[J]. *大学数学*, 2007(4):133-136.
HAN Zhong-geng, DU Jian-ping. Integrated evaluation on water pollution of Huaihe[J]. *College Mathematic*, 2007(4):133-136.
- [18] Fan F, Liu L, Li Y F, et al. A dynamic water quality index model based on functional data analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57:249-258.
- [19] Cui H B, Zhang W, Zhou J, et al. Availability and vertical distribution of Cu, Cd, Ca, and P in soil as influenced by lime and apatite with different dosages: A 7-year field study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(35):35143-35153.
- [20] Li P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4):449-455.
- [21] 冯光化. 中国麦饭石资源与开发研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(2):131-135.
FENG Guang-hua. China's maifanshi resources and their development and research[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(2):131-135.
- [22] Ren J, Zhang Z, Wang M, et al. Phosphate-induced differences in stabilization efficiency for soils contaminated with lead, zinc, and cadmium[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, 12(2):93-101.
- [23] Hale B, Evans L, Lambert R. Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199-200:119-127.

- [24] Lombi E, Zhao F J, Fuhrmann M, et al. Arsenic distribution and speciation in the fronds of the hyperaccumulator *Pteris vittata*[J]. *New Phytologist*, 2002, 156(2):195-203.
- [25] 黄荣, 徐应明, 黄青青, 等. 施用不同磷肥对海泡石钝化修复镉污染土壤影响的研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6):1499-1505.
- HUANG Rong, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, et al. Effect of different phosphate fertilizers on the immobilization remediation of cadmium contaminated soil by sepiolite[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6):1499-1505.
- [26] 丁园, 张宝林, 吴余金. 麦饭石对复合污染土壤 Cu、Cd 的固持阻控[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(1):52-56.
- DING Yuan, ZHANG Bao-lin, WU Yu-jin. Immobilization of Cu and Cd in contaminated soil by use of maifanite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(1):52-56.
- [27] Garau G, Castaldi P, Santona L, et al. Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil[J]. *Geoderma*, 2007, 142(1/2):47-57.
- [28] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, et al. Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166(15):204-210.
- [29] 张云慧, 杜平, 何赢, 等. 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法[J]. 环境科学, 2019, 40(9):4262-4269.
- ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, et al. Derivation of the thresholds of available concentrations of heavy metals in soil based on agricultural product safety[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9):4262-4269.
- [30] 吴霄霄. 典型酸性水稻土镉污染钝化修复效果评估体系建立[D]. 北京:中国农业科学院, 2019:27-31.
- WU Xiao-xiao. Establishment of an evaluation system to evaluate the passivation remediation effect of cadmium pollution in typical acid paddy soils[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019:27-31.