

徐丽萍,梁乐缤,李 兵,等. 不同修复技术对土壤有效态镉含量及作物镉吸收的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(1):207-211.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.01.037

# 不同修复技术对土壤有效态镉含量及作物镉吸收的影响

徐丽萍<sup>1</sup>, 梁乐缤<sup>2</sup>, 李 兵<sup>3</sup>, 李信冬<sup>3</sup>

(1. 南京市六合区农业技术推广中心耕地质量保护站, 江苏南京 211500; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225127;  
3. 南京宁粮生物工程有限公司, 江苏南京 210014)

**摘要:**针对镉超标的土壤,在大豆—小麦轮作系统下研究了不同钝化剂、不同作物对土壤有效态镉钝化及作物吸收镉的影响。结果表明:调理剂 LC-L01、宁粮矿物质+有机质+微生物钝化剂、宁粮矿物质钝化剂和钙镁磷肥可有效降低土壤有效态镉含量;在小麦季试验中,不同钝化剂处理小麦对镉累积量的差异较大,生物有机肥处理下小麦镉累积量最低;在 2019 年大豆季试验中,宁粮矿物质+有机质钝化剂处理大豆籽粒镉累积量最低,为 0.047 mg/kg。大豆品种苏豆 13、小麦品种扬麦 20 和扬麦 27 可作为镉低累积品种在镉轻度污染土壤中进行种植生产,研究形成了一套适用于该地区轻度镉污染的土壤调理剂耦合农艺措施修复技术模式。

**关键词:**镉;土壤修复;钝化剂;品种筛选;轮作;作物

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2022)01-0207-05

镉具有很强的毒性和生物迁移性,且难以降解,因此易被作物吸收富集,并随作物进入食物链,进而对人类健康产生危害。据报道,近年来重金属镉在土壤中积累现象普遍发生;我国镉污染土壤的面积已达 20 万  $\text{hm}^2$ ,且部分地区镉污染非常严重<sup>[1]</sup>。目前,土壤重金属镉污染的修复技术研究已成为热点,研究及应用较多的土壤镉污染修复技术主要有物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术。其中,化学修复方法具有操作简便和价格低廉的优点,因此被广泛研究与应用。化学修复方法主要通过向污染土壤中添加无机改良剂(钙镁磷肥、石灰、凹凸棒石)和有机改良剂(生物炭、畜禽粪便、生物有机肥)来改变土壤的 pH 值和氧化还原电位等,使土壤中镉被沉淀固定,从而降低镉的生物有效性<sup>[2-5]</sup>。尹微琴等通过白菜(俗称小青菜、小白菜等)盆栽试验和土柱淋洗试验研究了秸秆生物炭和垫料生物炭对土壤镉的钝化效果,结果发现添加 2 种生物炭均可显著降低土壤中镉的生物有效性,还可降低白菜对镉的吸收并提高白菜产量<sup>[6]</sup>。闫家普等发现,施用石灰和生物炭均可有效钝化土壤中有效态镉,且石灰与生物炭的复配施用对土壤有

效态镉的钝化效果更为显著<sup>[7]</sup>。罗惠莉等也发现,将生物炭与石灰石或沸石复配施用比单独施用生物炭更能有效降低土壤中镉的生物有效性和水稻中的镉含量<sup>[8]</sup>。胡洁等在重金属污染田间研究了钙镁磷肥对污染土壤中有效态镉的影响,结果发现,施用钙镁磷肥可通过提高土壤 pH 值而降低土壤中有效态镉含量,还可降低普通白菜体内镉含量<sup>[9]</sup>。刘悦畅等采用盆栽试验研究了枯草芽孢杆菌和沼泽红假单胞菌对镉污染土壤的修复效果,结果表明,2 种菌单独添加或混合添加均可固定土壤中有效态镉,且 2 种菌混合添加对土壤镉生物有效性的降低效果更为显著,同时也显著降低了普通白菜中镉含量并提高普通白菜生物量<sup>[10]</sup>。梁小迪等通过盆栽试验研究了不同类型土壤中(石灰土、赤红壤)添加耐性细菌和有机活化剂[黄腐酸、柠檬酸、乙二胺四乙酸(EDTA)、有机肥]对黑麦草吸收镉的影响,结果发现,在接种菌剂基础上添加黄腐酸或有机肥可提高黑麦草产量并增加黑麦草对镉的吸收<sup>[11]</sup>。陈展祥等通过室内盆栽试验研究凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响,结果表明,在土壤中添加凹凸棒石及其改性材料均可显著降低土壤镉的生物有效性,从而降低作物对镉的吸收,且改性材料的效果更优,其机理可能是凹凸棒石通过表面的硅羟基与镉离子形成了络合物而降低其在土壤中的迁移<sup>[12]</sup>。李超等采用盆栽试验研究了矿物源复合调理剂对土壤镉形态的影响,

收稿日期:2021-01-25

基金项目:江苏省农业委员会南京市六合区农产品产地土壤安全利用及修复试点示范项目。

作者简介:徐丽萍(1978—),女,江苏兴化人,高级农艺师,主要从事土壤肥料技术推广与研究。E-mail:57472276@qq.com。

发现施用矿物调理剂可通过提高土壤 pH 值而有效降低土壤有效态镉含量,使土壤镉难以利用;此外,施用矿物调理剂还可降低水稻植株中的镉含量<sup>[13]</sup>。土壤 pH 值是改变土壤镉生物有效性的最主要因素<sup>[14]</sup>。有研究发现,联合修复技术可弥补单一修复技术的不足,有效提高土壤镉污染的修复效率,是未来土壤镉污染修复的主要技术;目前,联合修复技术主要包括植物化学联合修复技术和植物微生物联合修复技术<sup>[15]</sup>,而关于化学联合微生物修复技术的研究较少。本试验针对江苏省南京市六合区镉含量超标的土壤,研究不同修复技术对土壤有效态镉及作物镉吸收的影响,以期为该地区镉超标土壤的修复提供有效的理论依据和一定的指导

作用。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本试验于 2018 年 5 月至 2019 年 10 月在江苏省南京市六合区某污染地块进行。试验区域土壤 pH 值为 7.44 ~ 7.98,呈弱碱性。试验区域土壤中的镉含量范围为 0.489 ~ 0.667 mg/kg。不同采样点土壤的镉含量分布不均,10 个采样点中有 5 个点的镉含量超出 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中农用地土壤污染风险筛选值,超标比率为 50%,超标倍数在 1 倍以内(表 1)。

表 1 试验区域土壤重金属含量

采样点	pH 值	总镉含量 (mg/kg)	总汞含量 (mg/kg)	总铬含量 (mg/kg)	总铅含量 (mg/kg)	总砷含量 (mg/kg)
1	7.74	0.667	0.071	93.7	38.6	13.20
2	7.86	0.629	0.073	102.0	39.9	12.70
3	7.67	0.577	0.069	104.0	40.6	8.97
4	7.98	0.489	0.074	101.0	38.3	14.00
5	7.86	0.513	0.074	97.7	38.7	15.10
6	7.93	0.583	0.096	96.4	39.1	13.30
7	7.92	0.588	0.098	109.0	39.6	14.40
8	7.72	0.648	0.073	117.0	41.0	13.90
9	7.46	0.523	0.068	114.0	40.4	13.60
10	7.44	0.523	0.067	113.0	40.4	15.00

1.2 试验设计

1.2.1 小麦—豆类低积累品种小区试验 试验于 2018、2019 年在小麦—豆类轮作中选取 6 个品种作为处理,大豆—小麦—大豆品种(按播种时间)分为:中黄 13—宁麦 13—六月白(V1)、苏豆 7 号—扬麦 20—苏 17022(V2)、皖豆 15—扬麦 27—皖豆 15(V3)、苏豆 13 号—宁麦 26—苏豆 13(V4)、苏豆 14 号—宁麦 28—苏 1703(V5)、苏豆 18 号—光明麦 1311—苏源 1 号(V6)。每个处理设置 3 次重复,每个重复面积为 30 m<sup>2</sup>。

1.2.2 不同钝化剂小区试验 2019 年大豆季设置 11 个处理:空白对照(CK)、宁粮钙镁磷肥(A1)、调理剂 LC—S01(A2)、凹凸棒石黏土(A3)、宁粮矿物质+有机质+微生物钝化剂(A4)、宁粮矿物质+有机质钝化剂(A5)、调理剂 LC—L01(A6)、生物有机肥(六合耕保站,B1)、活性钙镁(六合耕保站,B2)、

有机—无机钝化剂(P2)、宁粮矿物质钝化剂(P3)。

该区域除了施用钝化剂以外,其余田间管理均参照该地区常规管理模式,种植制度为小麦—大豆轮作,小麦和大豆均使用当地主栽品种小麦为宁麦 13,大豆为中黄 13。

1.2.3 大区试验 2019 年在试验小区外约 2.47 hm<sup>2</sup>的农田撒施宁粮土壤调理剂进行修复,共分 3 个梯度,土壤调理剂施用量分别为 50 kg/666.67 m<sup>2</sup>(D1)、100 kg/666.67 m<sup>2</sup>(D2)、150 kg/666.67 m<sup>2</sup>(D3),施用面积分别为 0.80、1.00、0.67 hm<sup>2</sup>,撒施后旋耕,平衡 3 ~ 5 d 后播种,大豆品种为中黄 37。大区试验除调理剂用量不同外,其余管理措施均按照当地常规进行。

1.3 样品采集

利用土钻采集土壤样品,采样深度为 0 ~ 15 cm,每个样品均为多点混合,剔除植物残根,自然

条件下风干。作物收获后采集植株样品。

#### 1.4 测定指标及方法

土壤 pH 值采用电极法测定,总汞含量采用原子荧光分光光度法测定,总铬、砷、镉、铅、镍、铜、锌含量采用王水提取-电感耦合等离子体质谱法测定,有效态镉含量采用二乙烯三胺五醋酸(DTPA)原子吸收法测定。

#### 1.5 数据分析和处理

用 SPSS 22.0 进行数据统计分析。钝化率按以下公式计算:钝化率 = (对照有效镉含量 - 处理有

效镉含量)/对照有效镉含量 × 100%。

## 2 结果与分析

### 2.1 作物籽粒镉含量

2.1.1 不同钝化剂对作物籽粒镉含量的影响 如图 1 所示,对照 GB 2762—2012《食品安全国家标准

食品中污染物限量》中大豆和小麦籽粒中的镉限量值,大豆和小麦籽粒中镉含量均低于国家标准。其中,宁粮矿物质 + 有机质钝化剂处理(A5)大豆籽粒镉含量最低,为 0.047 mg/kg。

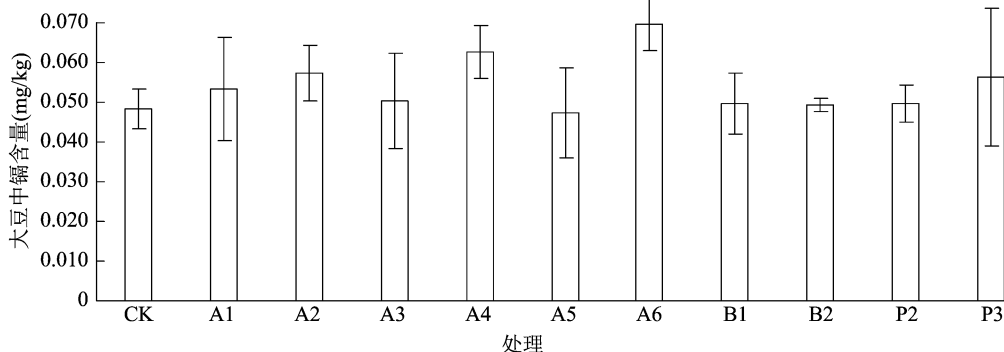
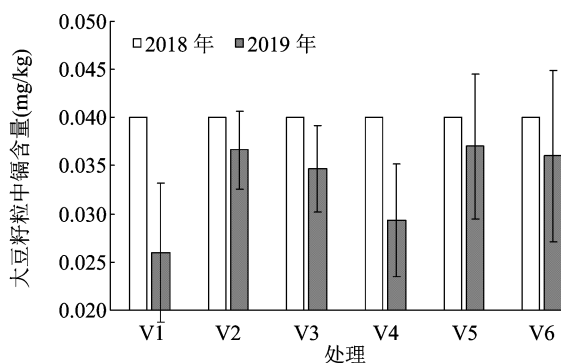


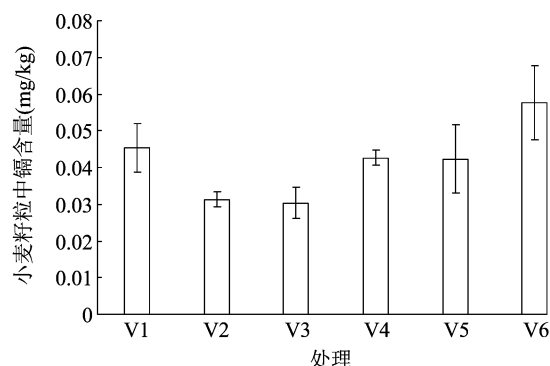
图1 2019 年大豆季钝化剂试验作物籽粒镉含量

2.1.2 不同品种作物籽粒镉含量 如图 2 所示,第 2 季试验除扬麦 20(V2)和扬麦 27(V3)外,其余品种小麦籽粒中镉含量均高于第 1、第 3 季大豆中的镉含量,可知小麦比大豆更容易累积镉。第 3 季大

豆中镉的含量低于第 1 季。第 3 季试验品种六月白籽粒中累积的镉含量最低,为 0.026 mg/kg;苏豆 13 籽粒中镉含量也较低,为 0.029 mg/kg。



a. 2018、2019 年大豆季



b. 2018 年小麦季

图2 品种筛选试验作物籽粒镉含量

### 2.2 不同钝化剂对土壤有效镉含量的影响

如图 3 所示,2019 年大豆季调理剂 LC - L01 (A6)处理土壤有效镉为 0.126 mg/kg,宁粮矿物质 + 有机质 + 微生物钝化剂(A4)处理土壤有效镉为 0.128 mg/kg,活性钙镁(六合耕保站, B2)、钙镁磷肥(A1)处理土壤有效镉均为 0.130 mg/kg。

### 2.3 不同钝化剂对钝化率的影响

如图 4 所示,钝化率是表示钝化剂降低土壤有

效镉含量的能力。经过示范改良后,有 4 个处理的钝化率大于 30%,其中调理剂 LC - L01 (A6)处理的钝化率为 41.00%,宁粮矿物质 + 有机质 + 微生物钝化剂(A4)处理的钝化率为 39.91%,活性钙镁(六合耕保站, B2)处理的钝化率为 39.12%,宁粮钙镁磷肥(A1)处理的钝化率为 38.81%。

### 2.4 作物产量

如图 5 所示,2018 年大豆季品种筛选小区试验

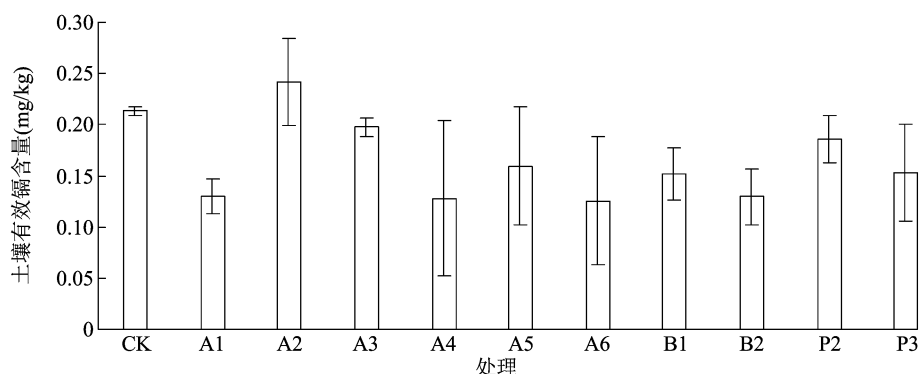


图3 不同钝化剂的土壤有效镉含量

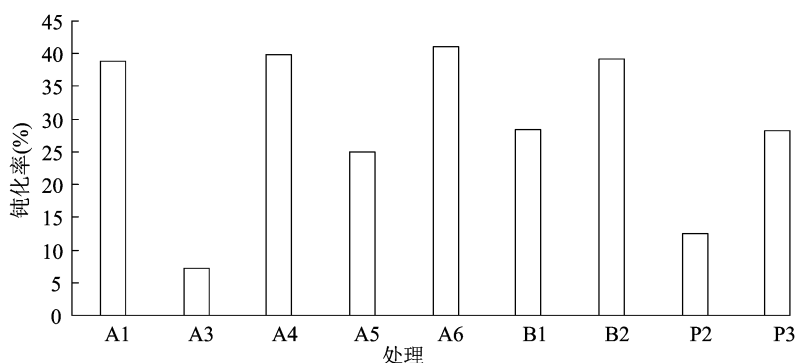


图4 钝化剂试验的钝化率

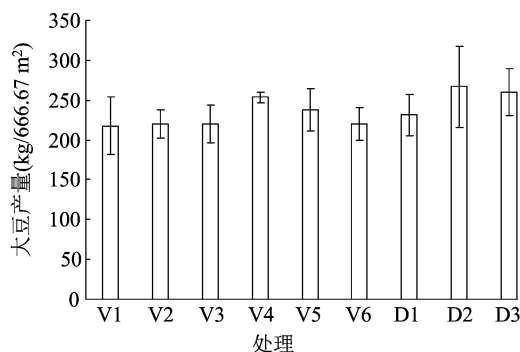


图5 2018 年大豆季品种筛选和大区试验不同处理大豆产量

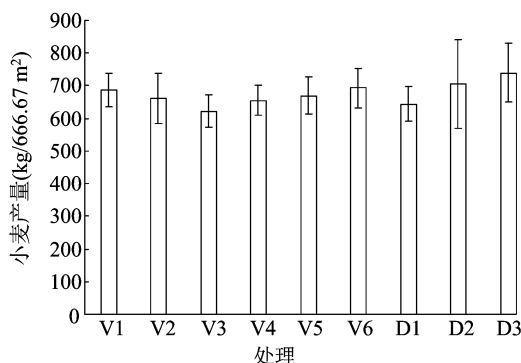


图6 2018 年小麦季不同处理小麦产量

中苏豆 13 (V3) 产量为 253.35 kg/666.67 m<sup>2</sup>。

如图 6 所示,2018 年小麦季小麦品种扬麦 20 (V2) 和扬麦 27 (V3) 镉含量均较低,扬麦 20 的产量高于扬麦 27,故优先选择扬麦 20 作为该地区镉污染修复治理小麦的推广品种。

如图 7 所示,2019 年大豆季品种筛选试验中 V3 处理数据缺失是因为皖豆 15 (V3) 是早熟品种,测产时豆荚已经变黄、脱落,茎秆倒伏,无法测产。第 1 季品种筛选试验大豆累积的镉含量较为一致,故在第 3 季时更换了品种。第 3 季六月白 (V1) 的镉含量最低,产量较低;苏豆 13 (V4) 的镉含量仅高于六月白,产量较高,为保证产量可以选择苏豆 13 作为镉修复的推广品种。

### 3 结论

经过试验,筛选出有效钝化剂种类为调理剂 LC-L01、宁粮矿物质+有机质+微生物钝化剂、宁粮矿物质钝化剂和钙镁磷肥。

本试验发现,大豆品种苏豆 13、小麦品种扬麦 20 和扬麦 27 可作为镉低累积品种在镉轻度污染土壤中进行种植生产。

根据本试验结果可形成一套适用于该地区轻度镉污染的土壤调理剂耦合农艺措施修复技术模式,即“低累积品种+土壤调理剂+生物有机肥+叶面硅肥”的模式,具体如下:大豆品种推荐苏豆 13,小麦品种推荐扬麦 20 和扬麦 27;土壤调理剂为

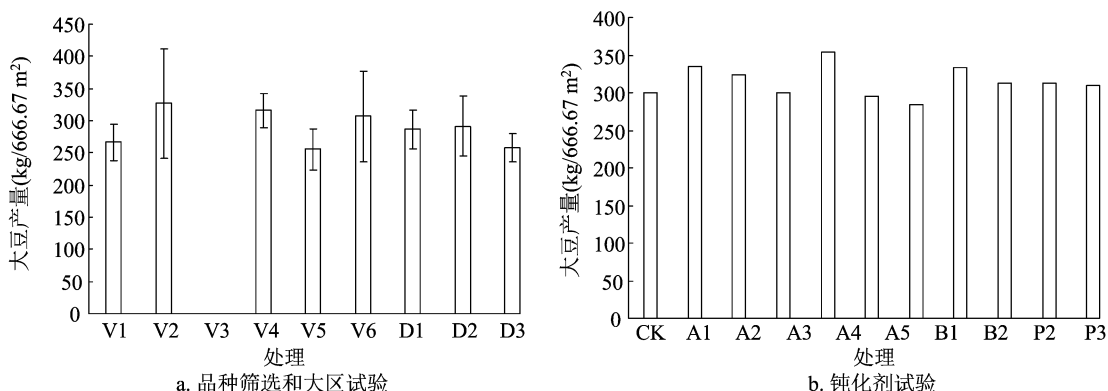


图7 2019 年大豆产量

宁粮生物工程有限公司自主研发的钝化剂( $\text{CaO}$  含量 $\geq 33.0\%$ 、 $\text{MgO}$  含量 $\geq 5.0\%$ 、 $\text{SiO}_2$  含量 $\geq 28.0\%$ ), 轻度镉污染土壤用量为  $150 \sim 200 \text{ kg}/667.67 \text{ m}^2$ ; 中度镉污染土壤可用  $200 \sim 250 \text{ kg}/667.67 \text{ m}^2$ , 调理剂每年施用 1 次, 此后视污染土壤钝化修复效果情况, 在下季作物播种前适当追加或不用土壤调理剂; 生物有机肥(有机质含量 $\geq 55\%$ , 有效活菌数 $\geq 0.2$  亿  $\text{CFU}/\text{g}$ ) 和叶面硅肥( $\text{Si}$  含量 $\geq 110 \text{ g}/\text{L}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  含量 $\geq 120 \text{ g}/\text{L}$ , 腐殖酸含量 $\geq 30 \text{ g}/\text{L}$ ) 均为宁粮生物工程有限公司生产的产品, 生物有机肥在每季作物播种前施用, 用量为  $100 \sim 250 \text{ kg}/666.67 \text{ m}^2$ , 叶面肥在小麦分蘖和孕穗期各喷洒 1 次, 每次用量为  $50 \text{ mL}/666.67 \text{ m}^2$ , 稀释 600 倍。

#### 参考文献:

- [1] 宋玉婷, 雷泞菲. 我国土壤镉污染的现状与修复措施[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 87-91.
- [2] 段海芹, 秦 秦, 吕卫光, 等. 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[EB/OL]. (2020-10-20) [2021-01-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=TRXB20201018004&uniplatform=NZKPT&v=qQqccBVS8RaTWosPeuuh5kniQwbKtIGxukIY%25mmd2FiQU6M4sgBKOU6ARqmHtbuQWZTle0>.
- [3] 李 英, 商建英, 黄益宗, 等. 镉铜复合污染土壤钝化材料研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 58(4): 1-12.
- [4] 丁 寒, 吕金印. 基于 WOS 引文数据库对土壤镉污染研究文献

的计量分析[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 95-101.

- [5] 胡艳美, 王旭军, 党秀丽. 改良剂对农田土壤重金属镉修复的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 17-23.
- [6] 尹微琴, 孟莉蓉, 郁彬琦, 等. 垫料生物炭对土壤镉的钝化作用[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 62-67.
- [7] 闫家普, 丁效东, 崔 良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1842-1849.
- [8] 罗惠莉, 周 思, 周静如, 等. 生物炭基调理剂对土壤镉生物有效性的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(10): 48-51, 55.
- [9] 胡 洁, 周海燕, 刘 成, 等. 无机有机钝化剂对土壤镉有效态及小白菜吸收镉的影响[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(11): 91-95.
- [10] 刘悦畅, 李保珍, 王 涛, 等. 2 种菌联合修复农田土壤镉污染的研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 364-369.
- [11] 梁小迪, 史鼎鼎, 徐少慧, 等. 耐性细菌与活化剂对土壤镉生物有效性的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(1): 48-53, 108.
- [12] 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 等. 凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4744-4751.
- [13] 李 超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2143-2154.
- [14] 陈 楠, 张 昊, 杨慧敏, 等. 土壤 pH 对土壤镉形态及稻米镉积累的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 176-182, 209.
- [15] 王玺洋, 辛在军, 李晓晖, 等. 稻秆炭与巨菌草联合对铜镉污染土壤的修复[J]. 农业环境科学学报, 2020, 40(1): 1-13.