



DOI:10.3969/j.issn.2096-7047.2024.04.005

不同安全利用技术措施及其组合对轻中度镉污染水稻田修复治理效果的试验研究

叶孙麟, 郑安羿, 张起佳, 郭腾飞, 谢晓涛, 吴泽文, 王贤兴

(中国冶金地质总局第二地质勘查院 福建福州 350108)

摘要:为降低镉元素在水稻中的富集,提高受污染耕地的安全利用率,稳步提升耕地环境安全和农产品质量安全保障水平,借鉴现行耕地安全利用技术措施,开展了轻中度镉污染水稻田的修复治理试验。试验共设置低积累水稻品种、土壤调理剂、叶面阻控剂、低积累水稻品种+水分调控+叶面阻控剂、低积累水稻品种+土壤调理剂等5个试验区,分别测定了不同技术措施及其组合处理的水稻农艺性状、镉含量等指标。结果表明:适宜种植的低积累水稻品种为甬优1540、甬优4949、甬优15和甬优2460,推荐施用的土壤调理剂、叶面阻控剂分别为富态威田美(颗粒)、绿珑硒;各单项技术措施的组合使用,有较好的镉治理效果。

关键词:镉污染;耕地土壤;土壤修复;土壤调理剂;叶面阻控剂;水稻

中图分类号:S156

文献标志码:A

文章编号:2096-7047(2024)04-0026-07

Experimental Study on the Remediation Effect of Different Safety Utilization Technology Measures and Combinations on Light to Moderate Cadmium Contaminated Rice Fields

YE Sunlin, ZHENG Anyi, ZHANG Qijia, GUO Tengfei, XIE Xiaotao, WU Zewen, WANG Xianxing
(The Second Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to reduce the enrichment of cadmium in rice, improve the safe utilization rate of polluted farmland, steadily enhance the environmental safety of farmland and the quality and safety guarantee level of agricultural products, and draw on the current technical measures for safe utilization of farmland, a remediation experiment is carried out for light to moderate cadmium contaminated rice fields. The experiment set up five experimental areas, including low accumulation rice varieties, soil conditioners, foliar inhibitors, low accumulation rice varieties+water regulation+foliar inhibitors, and low accumulation rice varieties+soil conditioners. The agronomic traits and cadmium content of rice treated with different technical measures and those combinations are measured separately. The results show that the suitable low accumulation rice varieties for planting are Yongyou 1540, Yongyou 4949, Yongyou 15, and Yongyou 2460. The recommended soil conditioners and foliar inhibitors for application are Futaiweitianmei (granules) and Lulongxi, respectively. The combination of various individual technical measures has a good cadmium treatment effect.

Keywords: cadmium pollution; cultivated soil; soil remediation; soil conditioner; foliar inhibitor; rice



研究发现,我国耕地重金属污染程度总体较轻,但重点区域重金属污染风险较大^[1-3]。土壤是农产品生产的载体,土壤环境质量直接影响农产品的品质^[2,4],进而影响人体健康,因此,耕地污染是对我国农业发展和农产品质量安全的重大挑战。近年来,随着我国工业化、城镇化和农业现代化的不断发展,重金属排放量不断增加,土壤与农产品重金属污染日趋严重^[5]。

农用地土壤重金属污染物不仅对农作物生长造成影响,还可通过食物链的传递对人体健康造成危害^[6-8]。镉(Cd)是一种毒性极强的重金属元素,迁移能力强,能够通过食物链进入人体并积累,对人体造成慢性、蓄积性的危害。水稻是一种镉积累能力非常强的作物,在进入人体的镉食物来源中,通过水稻带入的占40%以上。不合格化肥、有机肥的施用可能是土壤中重金属的重要来源和导致土壤重金属累积的主要原因^[9],采取相应的安全利用措施是保障农产品安全与土壤环境质量的重要手段。因此,采用不同的安全利用技术措施及其组合,开展了轻中度镉污染水稻田修复治理效果的试验研究,以期为进一步保障粮食安全提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验依托福建省某县区受污染耕地安全利用项目,选取当地镉污染土壤作为试验地。

(1)供试土壤:根据前期的项目背景调查,供试区域土壤中有效镉平均质量分数为0.19 mg/kg,最大值为0.27 mg/kg,依据《农产品产地土壤重金属污染程度的分级》(DB35/T 859—2016),该地区耕地土壤中有效镉含量已超出安全值,为警戒级土壤,即中轻度重金属污染土壤。

(2)供试土壤调理剂:牡盖酸清,粉剂, $w(\text{CaO}) \geq 45\%$, pH 为 8.5 ~ 10.5;佑甜又美,粉剂, $w(\text{CaO}) \geq 30\%$, $w(\text{MgO}) \geq 8\%$, $w(\text{SiO}_2) \geq 35\%$, pH 为 9.0 ~ 11.0;富态威田美,颗粒, $w(\text{CaO}) \geq 30\%$, pH 为 8.5 ~ 10.5;牡盖酸清,颗粒, $w(\text{CaO}) \geq 35\%$, pH 为 8.5 ~ 10.5;致发牡蛎钙,颗粒, $w(\text{CaO}) \geq 35\%$, pH 为 8.0 ~ 10.0。

(3)供试叶面阻控剂:楚戈, $\rho(\text{Si}) \geq 100 \text{ g/L}$, pH 为 9.5 ~ 11.5;玲珑硅, $\rho(\text{Si}) \geq 120 \text{ g/L}$,

$\rho(\text{Na}) \leq 50 \text{ g/L}$, pH 为 9.0 ~ 11.0;绿珑硒, $\rho(\text{Se}) \geq 100 \text{ g/L}$, pH 为 9.0 ~ 11.0;浓缩锌, $\rho(\text{Zn}) \geq 180 \text{ g/L}$, pH 为 9.5 ~ 11.5;浓缩硅, $\rho(\text{Si}) \geq 180 \text{ g/L}$, pH 为 9.0 ~ 11.0。

(4)供试水稻:选用福建省常见的水稻品种,包括甬优 1540、甬优 9 号、中浙优 8 号、甬优 2640、甬优 4949、甬优 15、丰两优 1 号、晶两优 1377、玮两优 1273、韵两优 332,均由当地种业公司提供。

1.2 试验设计

土壤重金属污染防治必须坚持以预防为主,在预防的基础上对已污染的土壤实施修复^[10]。重金属污染土壤修复方法的选择取决于污染场地特征、污染物的浓度和种类、土地使用功能等因素^[11]。为科学规范推进轻中度污染耕地安全利用与治理修复,农业农村部推出了《轻中度污染耕地安全利用与治理修复推荐技术名录(2019年版)》,总结并推荐了农艺调控类、土壤改良类、生物类、综合类等技术措施^[12]。试验借鉴现行耕地安全利用技术措施,通过设置低积累水稻品种、土壤调理剂、叶面阻控剂、低积累水稻品种+水分管理+叶面阻控剂、低积累水稻品种+土壤调理剂等5种安全利用技术模式试验区,通过对比分析,筛选出合适的降镉技术措施及适应轻中度镉污染农耕地水稻生长的安全利用修复治理技术模式。试验设计区域分布见图1,试验小区具体设计如下。

(1)低积累水稻品种试验区:在供试区域内选取3块地势平坦、每块面积约1亩(1亩=667 m²)的田块作为试验区,比较不同品种水稻稻谷中的镉含量;每块田块均分为10个小区,分别种植一个水稻品种;每个小区间留出30 cm宽间隔,不用田埂隔开,每块田田间水分管理和施肥情况与当地管理保持一致。

(2)土壤调理剂试验区:在供试区域内选取条件基本一致的5块田,每块面积0.6亩;每块田分成两份,分别作为空白对照组(CK)和试验组,田埂宽度不少于20 cm,高度不低于30 cm,并用塑料薄膜覆盖,每个小区都设置单独的进、出水口,每块田田间水分管理和施肥情况与当地管理保持一致;每块田试验组撒施一种土壤调理剂,在其余种植条件相同的情况下,比较土壤中有效镉含量和稻谷中镉含量的变化趋势。



图 1 试验设计区域分布

(3)叶面阻控剂试验区:在供试区域内选取条件基本一致的 5 块田,每块面积 0.6 亩;每块田分成两份,分别作为 CK 和试验组,每个小区间留出 30 cm 宽间隔,不用田埂隔开,田间水分管理和施肥情况与当地管理保持一致;每块田试验组喷施一种叶面阻控剂,在其余种植条件相同的情况下,比较水稻稻谷中镉含量的变化趋势。

(4)低积累水稻品种+水分调控+叶面阻控剂试验区:在供试区域内选取条件基本一致的 3 块田,每块面积 1 亩;每块田分成两份,分别作为 CK 和试验组,田埂宽度不少于 20 cm,高度不低于 30 cm,并用塑料薄膜覆盖,每个小区都设置单独的进、出水口;每块田试验组采用种植低积累水稻品种+水分调控+叶面阻控剂的措施,在其余种植条件基本一致的情况下,比较水稻稻谷中镉含量的变化趋势;供试所用低积累水稻品种为甬优 1540,叶面阻控剂分别为楚戈、玲珑硅和绿珑硒,并保持持续淹水。

(5)低积累水稻品种+土壤调理剂试验区:在供试区域内选取条件基本一致的 3 块田,每块面积 1 亩;每块田分成两份,分别作为 CK 和试验组,田埂宽度不少于 20 cm,高度不低于 30 cm,并用塑料薄膜覆盖,每个小区都设置单独的进、出水口;每块田试验组采用种植低积累水稻品种+土壤调理剂的措施,在其余种植条件基本一致的情

况下,比较稻谷中镉含量的变化趋势;供试所用低积累水稻品种为甬优 1540、甬优 9 和中浙优 8 号,土壤调理剂选用牡盖酸清(粉剂)。

1.3 测定项目及方法

稻谷中的镉含量采用《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)中的方法测定,土壤 pH 采用《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962—2018)中的方法测定,土壤中有效镉的含量采用《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)中的方法测定。

2 结果与分析

2.1 低积累水稻品种试验区结果分析

不同品种水稻稻谷中镉含量的统计结果见图 2。由图 2 可知:10 种水稻稻谷中镉的质量分数为 0.025~0.063 mg/kg,均未超出《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中对于水稻镉的限量要求(<0.2 mg/kg),即各品种水稻稻谷中的镉含量均未超标;各品种水稻稻谷中的镉含量从高到低依次为韵两优 332>丰两优 1 号>甬优 9 号=中浙优 8 号>晶两优 1377=玮两优 1273>甬优 1540>甬优 4949>甬优 15>甬优 2640;韵两优 332 的稻谷中镉含量最高,甬优 2640 的稻谷中镉含量最低,两者差异显著。

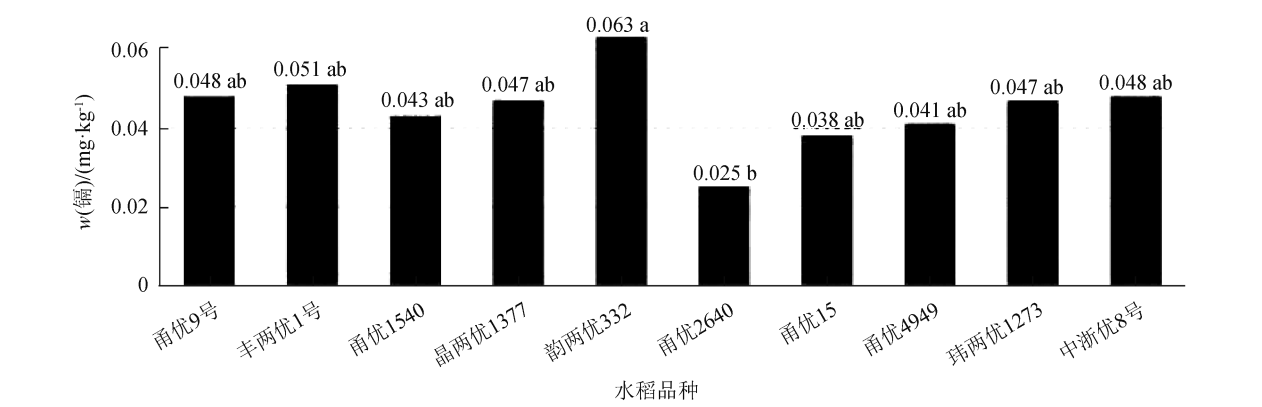


图 2 不同品种水稻稻谷中镉含量的统计结果

不同品种水稻的农艺性状和产量见表 1。由表 1 可知:不同品种水稻的产量从高到低依次为甬优 1540>晶两优 1377>甬优 2640>甬优 15>甬优 4949>玮两优 1273>丰两优 1 号>韵两优 332>中浙优 8 号>甬优 9 号,甬优 1540、晶两优 1377、甬优 2640、甬优 15、甬优 4949 表现出较好的产量优势,中浙优 8 号和甬优 9 号产量较低;通过 SPSS 29.0 分析,不同品种水稻的农艺性状和产量等数据在统计学中均无显著性差异。

表 1 不同品种水稻的农艺性状和产量

水稻品种	株高/cm	有效穗/ (万穗·亩 ⁻¹)	秸秆质量/ (kg·亩 ⁻¹)	千粒质量/g	产量/ (kg·亩 ⁻¹)
甬优 1540	100.20 a	16.10 a	210.50 a	28.93 a	586.67 a
甬优 9 号	106.87 a	18.43 a	248.25 a	28.48 a	470.50 a
中浙优 8 号	130.07 a	16.80 a	22.36 a	25.72 a	487.53 a
甬优 2640	99.00 a	15.67 a	289.25 a	29.99 a	570.00 a
甬优 4949	116.20 a	17.00 a	246.95 a	25.27 a	564.17 a
甬优 15	116.47 a	16.13 a	284.85 a	29.24 a	566.50 a
丰两优 1 号	114.67 a	21.00 a	292.90 a	27.74 a	506.33 a
晶两优 1377	109.80 a	19.80 a	376.20 a	23.85 a	583.00 a
玮两优 1273	113.80 a	19.77 a	360.10 a	28.72 a	553.50 a
韵两优 332	108.93 a	17.17 a	338.30 a	29.99 a	505.08 a

注:1) 同列数据后相同小写字母表示处理间无显著性差异($P<0.05$)

综合 10 种水稻稻谷中镉含量和产量因素,在轻中度镉污染耕地上,推荐种植甬优 1540、甬优 4949、甬优 15、甬优 2640 等 4 种水稻品种。

2.2 土壤调理剂试验区结果分析

土壤调理剂试验区的土壤 pH、有效镉含量及水稻稻谷中镉含量见表 2。由表 2 可知:牡盖酸清(粉剂)、富态威田美处理的土壤 pH 分别提高 0.1、0.2,pH 的提升有利于降低重金属的可利用性^[13-15];佑甜又美处理对土壤 pH 的提升无影响;牡盖酸清(颗粒)、致发牡蛎钙处理的土壤 pH 分别降低 0.2、0.7。从土壤中有效镉含量看,牡盖

酸清(颗粒)、佑甜又美处理对降低土壤中有效镉含量有较好的效果,分别降低 16.7%、4.5%,其他土壤调理剂处理无效果,甚至造成土壤中有效镉含量增加。从稻谷中镉含量看,试验组的水稻稻谷中镉含量均未超出 GB 2762—2017 的限量要求,其中富态威田美、致发牡蛎钙处理对降低稻谷中镉含量有积极作用,分别降低 32.8%、26.3%,其余的土壤调理剂处理无效果,甚至出现相反的效应。

土壤调理剂试验区的水稻农艺性状和产量见表 3。由表 3 可知:牡盖酸清(粉剂)处理的水稻

表 2 土壤调理剂试验区的土壤 pH、有效镉含量及水稻稻谷中镉含量

土壤调理剂	土壤 pH		土壤中 $w(\text{有效镉})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		稻谷中 $w(\text{镉})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	
	CK	试验组	CK	试验组	CK	试验组
牡盖酸清(粉剂)	6.0	6.1	0.10	0.10	0.067	0.079
佑甜又美	6.1	6.1	0.22	0.21	0.031	0.064
富态威田美	5.5	5.7	0.16	0.17	0.067	0.045
牡盖酸清(颗粒)	5.7	5.5	0.12	0.10	0.088	0.110
致发牡蛎钙	6.4	5.7	0.12	0.13	0.099	0.073

表 3 土壤调理剂验证区的水稻农艺性状和产量

土壤调理剂	处理	株高/ cm	有效穗/ (万穗·亩 ⁻¹)	秸秆质量/ (kg·亩 ⁻¹)	千粒质量/ g	产量/ (kg·亩 ⁻¹)
牡盖酸清(粉剂)	CK	102.4	18.5	213.75	28.52	535.0
	试验组	96.0	16.0	196.50	27.60	497.5
佑甜又美	CK	94.6	12.0	147.90	28.12	557.5
	试验组	99.0	16.0	154.50	28.68	562.5
富态威田美	CK	95.8	15.0	142.50	27.84	540.0
	试验组	91.6	12.0	141.00	27.56	565.0
牡盖酸清(颗粒)	CK	98.8	14.5	159.00	28.12	587.5
	试验组	99.2	15.0	195.75	27.50	547.5
致发牡蛎钙	CK	104.6	15.0	237.75	28.12	517.5
	试验组	102.2	17.5	252.00	27.60	582.5

农艺性状和产量均呈下降趋势;牡盖酸清(颗粒)处理对水稻农艺性状有所提升,但水稻产量出现下降;富态威田美处理虽对水稻农艺性状无明显提升,但产量提高了 4.6%;佑甜又美、致发牡蛎钙处理对水稻农艺性状和产量均有提升,其中产量分别提高了 0.9%、12.6%。综合来看,在镉污染耕地上推荐富态威田美作为土壤调理剂。

2.3 叶面阻控剂试验区结果分析

叶面阻控剂试验区的水稻稻谷中镉含量见表 4。由表 4 可知:试验区产出的水稻稻谷中的镉含量均未超过 GB 2762—2017 的限量要求;5 种叶面阻控剂中,绿珑硒和楚戈的降镉效果较好,稻谷中的镉含量分别降低 73.9%、30.6%,玲珑硅、浓缩锌和浓缩硅使水稻稻谷中的镉含量分别升高 31.2%、12.5%和 4.3%。

叶面阻控剂试验区的水稻农艺性状和产量见表 5。由表 5 可知:绿珑硒处理对水稻农艺性状和产量均有提升效果,株高、有效穗、秸秆质量、产量分别提高了 6.7%、52.0%、8.1%、4.6%;楚戈、

表 4 叶面阻控剂试验区的水稻稻谷中镉含量

叶面阻控剂	稻谷中 $w(\text{镉})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	
	CK	试验组
楚戈	0.072	0.050
玲珑硅	0.048	0.063
绿珑硒	0.046	0.012
浓缩锌	0.024	0.027
浓缩硅	0.023	0.024

玲珑硅、浓缩锌和浓缩硅处理的水稻农艺性状和产量均未表现出较好的效果。综合考虑,在镉污染耕地上推荐绿珑硒作为叶面阻控剂。

2.4 低积累水稻品种+水分调控+不同叶面阻控剂试验区结果分析

低积累水稻品种+水分调控+不同叶面阻控剂试验区的水稻稻谷中镉含量见表 6。由表 6 可知:试验小区产出的水稻稻谷的镉含量均未超过 GB 2762—2017 的限量要求;甬优 1540+淹水+玲珑硅和甬优 1540+淹水+绿珑硒处理均表现出较好的降镉效果,稻谷中的镉含量分别降低 30.8%

表 5 叶面阻控剂试验区的水稻农艺性状和产量

叶面阻控剂	处理	株高/ cm	有效穗/ (万穗·亩 ⁻¹)	秸秆质量/ (kg·亩 ⁻¹)	千粒质量/ g	产量/ (kg·亩 ⁻¹)
楚戈	CK	100.6	14.0	234.00	29.80	522.5
	试验组	105.4	12.5	145.50	28.12	515.0
玲珑硅	CK	100.0	14.0	257.25	29.56	572.5
	试验组	104.2	16.5	250.50	28.72	510.0
绿珑硒	CK	100.8	12.5	185.25	28.76	540.0
	试验组	107.6	19.0	200.25	28.76	565.0
浓缩锌	CK	100.4	15.5	165.00	28.48	567.5
	试验组	100.0	13.5	147.00	28.68	545.0
浓缩硅	CK	100.2	15.0	202.50	28.40	567.5
	试验组	98.0	13.0	162.75	28.36	457.5

表 6 低积累水稻品种+水分调控+不同叶面阻控剂
试验区的水稻稻谷中镉含量

项目	稻谷中 $w(\text{镉})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	
	CK	试验组
甬优 1540+淹水+楚戈	0.018	0.027
甬优 1540+淹水+玲珑硅	0.052	0.036
甬优 1540+淹水+绿珑硒	0.067	0.050

和 25.4%;甬优 1540+淹水+楚戈处理的稻谷中的镉含量升高 50.0%,这表明喷施叶面阻控剂楚戈可能会导致水稻中镉含量出现大幅升高。

低积累水稻品种+水分调控+不同叶面阻控剂试验区的水稻农艺性状和产量见表 7。

由表 7 可知:甬优 1540+淹水+绿珑硒处理的水稻农艺性状和产量均表现出较好的效果,其余处理在水稻农艺性状和产量方面的效果不明显。

表 7 低积累水稻品种+水分调控+不同叶面阻控剂试验区的水稻农艺性状和产量

项目	处理	株高/ cm	有效穗/ (万穗·亩 ⁻¹)	秸秆质量/ (kg·亩 ⁻¹)	千粒质量/ g	产量/ (kg·亩 ⁻¹)
甬优 1540+淹水+楚戈	CK	98.6	15.0	11.70	28.44	528.72
	试验组	99.8	15.0	10.35	27.76	520.59
甬优 1540+淹水+玲珑硅	CK	95.2	16.5	12.70	28.40	536.85
	试验组	97.0	14.0	8.35	27.68	477.42
甬优 1540+淹水+绿珑硒	CK	101.8	16.5	13.86	28.92	494.71
	试验组	102.8	12.5	11.85	27.88	556.57

2.5 低积累水稻品种+土壤调理剂试验区结果分析

低积累水稻品种+土壤调理剂试验区的水稻稻谷中镉含量见表 8。

表 8 低积累水稻品种+土壤调理剂试验区的水稻稻谷中镉含量

项目	稻谷中 $w(\text{镉})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	
	CK	试验组
甬优 1540+牡盖酸清(粉剂)	0.062	0.046
甬优 9 号+牡盖酸清(粉剂)	0.051	0.043
中浙优 8 号+牡盖酸清(粉剂)	0.057	0.059

由表 8 可知,试验小区产出的水稻稻谷的镉含量均未超过 GB 2762—2017 的限量要求。试验选用的甬优 1540、甬优 9 号、中浙优 8 号既是当地主栽品种,又是《福建省重金属污染耕地安全利用技术指南(试行)》推荐的低积累镉水稻品种。试验结果表明:甬优 1540+牡盖酸清(粉剂)和甬优 9 号+牡盖酸清(粉剂)处理表现出较好的降镉效果,水稻稻谷的镉含量分别降低 25.8%、15.7%;中浙优 8 号+牡盖酸清(粉剂)处理的降镉效果不明显。因牡盖酸清(粉剂)对土壤及水稻的降镉效果并不明显(见表 2),表明甬优 1540

和甬优 9 号对重金属镉的富集能力较弱,与低积累水稻品种试验区所得结果一致。

低积累水稻品种+土壤调理剂试验区的水稻农艺性状和产量见表 9。由表 9 可知:甬优 1540+牡盖酸清(粉剂)和中浙优 8 号+牡盖酸清(粉剂)

处理对水稻农艺性状和产量均表现出积极的作用,产量分别增加 7.5%和 6.9%;甬优 9 号+牡盖酸清(粉剂)对水稻农艺性状和产量的提升无明显效果。

表 9 低积累水稻品种+土壤调理剂试验区的水稻农艺性状和产量

项目	处理	株高/ cm	有效穗/ (万穗·亩 ⁻¹)	秸秆质量/ (kg·亩 ⁻¹)	千粒质量/ g	产量/ (kg·亩 ⁻¹)
甬优 1540+牡盖酸清(粉剂)	CK	100.6	14.0	14.90	28.60	469.37
	试验组	99.0	18.5	13.00	28.44	504.60
甬优 9 号+牡盖酸清(粉剂)	CK	106.6	18.5	14.97	28.60	548.77
	试验组	101.4	21.4	11.39	29.08	514.71
中浙优 8 号+牡盖酸清(粉剂)	CK	131.6	21.3	19.77	28.36	549.69
	试验组	132.6	18.5	20.05	28.24	587.88

3 结 语

本文通过设立低积累水稻品种、土壤调理剂、叶面阻控剂等 3 种筛选试验区以及低积累水稻品种+水分调控+叶面阻控剂、低积累水稻品种+土壤调理剂等 2 种综合试验区进行试验,对比分析结果得出,在轻中度镉污染耕地修复治理中,适宜推荐种植的中低积累水稻品种为甬优 1540、甬优 4949、甬优 15 和甬优 2460,推荐施用的土壤调理剂为富态威田美(颗粒),推荐施用的叶面阻控剂为绿珑硒。综合试验区结果表明,通过对各单项措施进行组合,产生了较好的治理效果。在实际中轻度镉污染耕地的修复治理中,可根据实际情况对上述推荐使用的低积累水稻品种、土壤调理剂和叶面阻控剂进行组合应用,因地制宜地开展安全利用和修复治理。

参考文献

[1] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报,2013,50(1):186-194.

[2] 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.

[3] QIN G W, NIU Z D, YU J D, et al. Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology[J]. Chemosphere, 2021, 267: 129205.

[4] 王星蒙,丁振军. 铁岭农用地土壤重金属生态风险评价[J]. 绿色科技,2022,24(18):195-197.

[5] 尚二萍,许尔琪,张红旗,等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学,2018,39(10): 4670-4683.

[6] 钟来元,郭良珍. 不同利用方式农用地土壤重金属污染状况及其动态变化特征——以广东省徐闻县为例[J]. 生态环境学报,2011,20(12):1934-1939.

[7] 叶脉,张景茹,张路路,等. 广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评估[J]. 环境科学,2020, 41(12):5579-5588.

[8] 孙厚云,卫晓锋,孙晓明,等. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 2021,42(3):1166-1176.

[9] 白玲玉,曾希柏,李莲芳,等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学,2010, 43(1):96-104.

[10] 陈远其,张煜,陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1419-1424.

[11] 刘旭,吴余金,熊晓晖,等. 生物调理剂对重金属污染土壤的原位修复效果[J]. 江西科学,2014,32(4):523-526.

[12] 徐嘉礼,罗春晖,吴海波,等. 不同治理措施在绍兴受镉污染水稻田的应用效果[J]. 浙江农业科学,2021, 62(9): 1682-1685.

[13] 李思民,王豪吉,朱曦,等. 土壤 pH 和有机质含量对重金属可利用性的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021,41(1):49-55.

[14] 岳国辉. 土壤 pH 和有机质含量对重金属可利用性的影响[J]. 中国金属通报,2021(5):196-197.

[15] 杜彩艳,祖艳群,李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报,2005(4):539-543.