

刘 静,王 萍,代良羽,等.喀斯特山区高镉稻田治理措施对稻米降镉的效果[J].江苏农业科学,2023,51(5):227-232.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.05.030

喀斯特山区高镉稻田治理措施对稻米降镉的效果

刘 静^{1,2},王 萍¹,代良羽¹,李筑江¹,林大松³,何腾兵^{2,4},周 凯⁵,刘 方⁶

(1. 贵州省农业生态与资源保护站,贵州贵阳 550001; 2. 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025;

3. 农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191; 4. 贵州大学新农村发展研究院,贵州贵阳 550025;

5. 开阳县农业农村局,贵州开阳 550300; 6. 贵州大学资源与环境工程学院,贵州贵阳 550025)

摘要:为在喀斯特山区筛选出最佳的土壤调理剂、叶面阻控剂和镉低累积水稻品种,并为贵州喀斯特山区污染耕地安全利用提供数据支撑,通过对贵州中部喀斯特山区高镉稻田土壤及稻米进行采样分析,合理设计田间处理方案,采取相同背景下田间小区试验的方式探讨不同土壤调理剂、不同叶面阻控剂对稻米中镉元素含量的降低效果,对比分析不同水稻的籽粒对镉元素的吸附强弱情况。结果显示,在高镉稻田中施用 4 种含氧化钙的土壤调理剂后,稻米中镉元素含量分别降低 83.9%、74.6%、82.1%、51.8%。在分蘖期至灌浆期喷施含锌、硒元素的叶面阻控剂后,稻米镉含量分别降低 54.7%、51.7%。3 种受试水稻品种稻米镉含量比常规水稻品种降低 8.36%、24.5%、33.3%。说明喀斯特山区水稻土中镉元素含量越高,稻米中镉元素的含量就会越高。在高镉区稻田施用由硅灰石、生石灰、沸石及海泡石组成的土壤调理剂(D3)、喷施含 Zn 元素的叶面阻控剂(Y2)、种植水稻品种成优 1479(P3),通过这 3 种调控措施的联合作用可以达到最大的稻米降镉效果。

关键词:水稻土;土壤调理剂;叶面阻控剂;低镉累积水稻品种;稻米镉含量;喀斯特山区

中图分类号:S511.01;X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)05-0227-06

目前,我国南方局部地区土壤重金属污染状况较为严峻,土壤重金属污染严重地威胁着当地的粮食安全,重金属污染土壤修复成为人们关注的主要热点之一^[1-4]。镉(Cd)是目前土壤中分布广泛、污染程度高的重金属元素^[5-7],由于镉在土壤中难以降解,且容易在作物体内累积,从而明显降低农产品质量。水稻是南方种植的主要作物,大量吸收土壤中的镉元素而在茎、叶及籽粒中累积,影响了稻米的品质,通过食物链进入人体,最终将影响人类的健康安全^[8];因而,降低稻米中镉元素的超标率是保障粮食安全的主要农业生产措施之一。施用土壤调理剂不仅有利于作物的生长发育,还能抑制土壤中镉元素向作物体内迁移,从而降低镉元素对作物的毒害以及减少镉元素在作物中的累

积^[9-10];不同类型的土壤调理剂施入镉污染的稻田中,不仅可以调节土壤的酸碱度,而且能明显降低土壤镉可提取态的含量,从而有效降低稻米中的镉元素含量^[11]。此外,喷施叶面肥能强化稻谷的抗氧化系统^[12];含锌叶面肥可以通过锌与镉的竞争吸附,抑制植株对镉元素的吸收^[12];相关研究表明,在水稻叶片上喷施硒或硅可以降低水稻根及茎中的镉元素含量^[13-14]。由于不同区域环境条件差异较大,土壤重金属污染调控技术难以找到相对有效的方法,需要从土壤调理剂、叶面阻控剂及作物品种筛选等方面综合考虑,才能从根本上降低重金属污染土壤上稻米中镉的含量水平^[15]。在贵州土壤高镉背景环境下如何采取有效调控措施减少土壤 Cd 向水稻籽粒的迁移以及调控技术能否推广应用,有必要开展深入的研究。因此,本研究通过在大田条件下开展土壤调理剂施用、秧苗喷施叶面阻控剂及低镉累积水稻品种筛选的小区试验,对不同措施条件下稻米镉含量变化进行比较分析,筛选出适宜在高镉稻田上施用的土壤调理剂、叶面阻控剂及低镉累积的水稻品种,为贵州山区实现受污染农用地的治理与修复提供依据。

收稿日期:2022-04-21

基金项目:国家自然科学基金联合基金(编号:U1612442);贵州省农业生态与资源保护站项目。

作者简介:刘 静(1984—),女,贵州毕节人,硕士,高级工程师,主要从事土壤污染治理与耕地安全利用方面的研究。E-mail:673270382@qq.com。

通信作者:何腾兵,教授,主要从事土壤资源利用与生态安全方面的研究。E-mail:hetengbing@163.com。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验区位于贵州中部的开阳县,地貌以喀斯特山地为主,海拔为 1 100 m 左右,年均温为 10.6 ℃,年降水量达 1 250 mm;土壤类型为碳酸盐岩风化发育的石灰土及水稻土。在 2018 年 8 月对贵州省开阳县境内有代表性的水稻土进行耕层土壤(0~20 cm)混合样品采集(28 个),同时对应采集稻田上成熟的稻谷样品(28 个)。根据前期土壤

调查结果,于 2019 年 3—12 月在该区稻米镉超标的地块上开展田间小区试验。

1.2 试验材料

土壤调理剂:1 号土壤调理剂(D1,原材料是牡蛎壳)、2 号土壤调理剂(D2,原料是含量中等的生石灰)、3 号土壤调理剂(D3,原材料由硅灰石、生石灰、沸石及海泡石组成)、4 号土壤调理剂(D4,原料是含量较高的生石灰),其主要成分及重金属含量检测结果见表 1。4 种土壤调理剂均在市场购买。

表 1 不同土壤调理剂的主要成分及重金属含量

处理编号	主要成分	重金属含量(mg/kg)								pH 值
		Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	
D1	CaO≥45%	0.10	0.007	10.20	2.96	ND	4.00	9.98	14.00	8.29
D2	CaO≥40%	0.02	0.035	11.40	3.04	14.90	2.21	5.31	3.78	7.37
D3	CaO≥34.0%;SiO ₂ ≥5.5%	0.34	0.048	18.10	7.11	34.50	5.33	26.70	10.10	7.33
D4	CaO≥87.0%	0.04	0.003	26.40	0.35	21.80	8.48	8.36	11.40	12.80

叶面阻控剂:1 号(Y1,硅肥),先将硅酸四乙酯与超纯水按 57:55 比例混合后加入乙醇、盐酸,常温搅拌 2 h 后加热至 46 ℃再搅拌 6 h,定容至 50 L,硅溶液浓度为 2.5 mmol/L。2 号(Y2,锌-赖氨酸混合物),将 50 mol 七水合硫酸锌与 50 mol 赖氨酸溶入超纯水中,调 pH 值至 4.5 后加热到 80 ℃,风干后呈乳白色固体;3 号(Y3,铁-赖氨酸混合物),将 50 mol 七水合硫酸亚铁及 50 mol 赖氨酸溶入超纯水中,调 pH 值到 4.5 后加热至 80 ℃,风干后呈暗金色粉状晶体。4 号(Y4,硒肥)。

水稻品种:水稻宜香优 2115(P0,农户常规种植品种作对照品种)、水稻品种金优 217(P1)、籼型三系杂交水稻品种泸香优 110(P2)、水稻品种成优 1479(P3)。选用以上 4 种水稻品种(当地种子部门备案品种)进行大田试验。

1.3 试验设计与实施

1.3.1 试验设计 田间试验区土壤镉元素含量范围在 0.7~0.9 mg/kg 之间,超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中的风险筛选值^[16]。田块 1 进行土壤调理剂施用试验,设置 5 个处理,即 CK(未施用调节剂)、D1、D2、D3、D4,重复 3 次,共设置 15 个小区;每个试验小区面积均为 20 m²(5 m×4 m),种植水稻品种为宜香优 2115。田块分 2 个区域,1 个区域种植不同的水稻品种,即 P0、P1、P2、P3,设置 3 次重复,共设置 12 个小区。另 1 个区域喷施叶面阻控剂,设置 5 个处

理,即 CK(未喷施叶面阻控剂)、Y1、Y2、Y3、Y4,重复 3 次,共设置 15 个小区,种植的水稻品种为宜香优 2115。以上试验小区均采取完全随机排列。

1.3.2 试验实施 D1、D2、D3 土壤调理剂(按施用说明)在秧苗移栽前 5 d 按照 3 000 kg/hm² 撒施,D4 土壤调理剂在秧苗移栽前 5 d 按照 2 250 kg/hm² 撒施,撒施后翻耕使土壤调理剂均匀混合在土壤中。叶面阻控剂分别在 7 月 20 日、8 月 24 日、9 月 10 日进行喷施;施用时取 400 mL 硅溶液(Y1)稀释至 6 L,每个小区喷施 2 L(喷施 66.6 L/hm²);取 600 mg 锌-赖氨酸(Y2)加水溶解定容至 6 L,每个小区喷施 2 L(喷施 100 g/hm²);取 201 mg 铁-赖氨酸(Y3)加水溶解定容到 6 L,每个小区喷施 2 L(喷施 33.45 g/hm²);取 Y4 号硒肥 90 mL 加水稀释到 4.5 L,每个小区喷施 1.5 L(喷施 15 L/hm²)。不同水稻品种试验小区之间不做田埂,直接留出 30 cm 间距。采用一致的生产管理措施进行田间全程管理。

1.4 样品采集

在水稻收获前 1~3 d,采用梅花状 5 点取样法在每个小区采集 0~20 cm 表层土壤混合样品(四分法缩分至 2.5 kg),同时采集对应的水稻籽粒样品,即每个处理小区采集对应土壤采样点附近的 5 株稻穗,装入网袋中,待水稻植株自然风干,将籽粒从植株上脱离,在干燥箱 70 ℃左右进行烘干,再用粉碎机磨细。土壤样品风干后磨细过 10 目尼龙筛,再继

续研磨过 100 目尼龙筛,装入塑料袋中备用。土壤调理剂、叶面阻控剂、水稻品种试验小区采集土壤样品和稻米样品各 15、15、12 个。

1.5 样品分析测试

土壤 pH 值采用 pH 计测定。土壤或稻米样品先用三酸进行消煮,采用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱法测定待测液中镉元素的浓度,再计算出土壤或稻米中镉的含量。

1.6 数据处理与分析

进行统计分析时,采用 Microsoft Office Excel 2010 和 SPSS 23.0 软件;用 Origin 8.5 及 Microsoft Office Excel 2010 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 高镉稻田土壤 Cd 与稻米 Cd 的关联性

调查区稻田土壤 pH 值的平均值为 6.37,pH 值

范围在 6.27 ~ 6.51 之间,土壤镉元素含量介于 0.31 ~ 1.91 mg/kg 之间(表 2),超出 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中风险筛选值($5.5 \leq \text{pH 值} \leq 6.5$, $\text{Cd} \leq 0.4 \text{ mg/kg}$; $6.5 \leq \text{pH 值} \leq 7.5$, $\text{Cd} \leq 0.6 \text{ mg/kg}$)的样品数量占 78.6%,其中土壤 Cd 含量超过风险筛选值 1.0 倍以上的样品数量占 14.3%;但全部土壤样品的 Cd 含量均未超出风险管制值($5.5 \leq \text{pH 值} \leq 6.5$, $\text{Cd} \leq 2.0 \text{ mg/kg}$; $6.5 \leq \text{pH 值} \leq 7.5$, $\text{Cd} \leq 3.0 \text{ mg/kg}$);说明喀斯特山区高镉稻田土壤种植农产品时存在较大的污染风险。从表 2 看出,调查区内稻米镉元素含量变化范围介于 0.014 ~ 0.354 mg/kg 之间,28 个稻米样品中有 7 个样品的隔元素含量超过我国水稻中镉污染物标准的限值 0.2 mg/kg,超标率为 25.0%,其中稻米 Cd 含量超过标准值的 1.5 倍以上样品数量占 7.1%。

表 2 高镉稻田土壤中镉元素含量与稻米中镉元素含量的统计值(n=28)

样品	镉元素含量(mg/kg)						
	算术平均数	几何平均数	最小值	最大值	中位数	标准差	变异系数
土壤	0.840	0.765	0.311	1.907	0.783	0.383	0.456
稻米	0.138	0.100	0.014	0.354	0.129	0.095	0.685

从统计分析结果来看,稻米 Cd 含量的变异系数远大于土壤,变异系数达到 68.5%,表明研究区稻米 Cd 含量的变化幅度较大,可能与土壤肥力水平和水稻品种不同有关。从图 1 看出,研究区稻米镉元素含量与水稻土中全镉元素含量之间有着极显著的正相关关系^[17-18]($r = 0.596$, $P < 0.01$),进一步说明高镉稻田区稻米 Cd 的含量与土壤 Cd 含量水平有密切的关联性,通过调控土壤条件及阻控土壤镉向水稻植株的迁移,能够降低稻米 Cd 的含量水平。

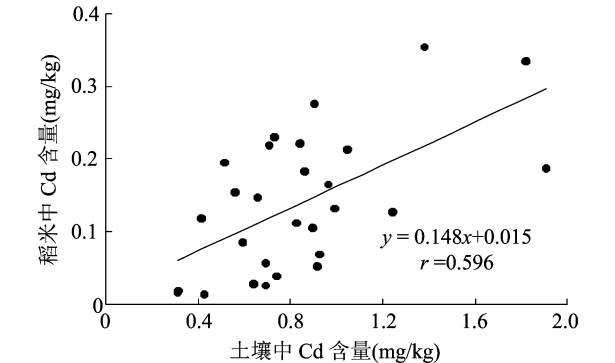


图1 土壤 Cd 含量与稻米 Cd 含量的相关性

2.2 土壤调理剂施用对稻米 Cd 含量的影响

从表 3 可以看出,水稻产量受施用的 D1、D2、

D3 土壤调理剂的影响极小,D4 土壤调理剂的施用导致水稻减产 11.8%,超过了《耕地污染治理效果评价准则》(NY/T 3343—2018)中规定的“治理区域农产品单位产量与治理前同等条件对照相比减产幅度应小于或等于 10%”的要求^[19]。

表 3 施用不同土壤调理剂对水稻产量的影响

调理剂	土壤 pH 值	产量 (kg/hm ²)	与 CK 增产 (%)
CK	6.47 ± 0.392b	8 505 ± 75.8a	
D1	7.08 ± 0.334a	8 565 ± 55.1a	0.74
D2	6.66 ± 0.241ab	8 685 ± 92.7a	2.21
D3	6.57 ± 0.446ab	8 505 ± 118.0a	0.00
D4	6.74 ± 0.366ab	7 500 ± 52.7a	-11.80

注:同列数据后不同的小字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 5 同。

小区中土壤镉元素的含量随施用的土壤调理剂的不同而不同(图 2),在稻田土壤 Cd 平均含量为 0.931 mg/kg 的田块(CK 小区)中施用 D1、D2、D3、D4 等 4 种土壤调理剂后,土壤中 Cd 含量未出现显著性变化,但总体而言有所降低,其中 D1、D3 土壤调节剂的降镉效果较明显,下降率分别达到

13.3%、12.3%。然而从稻米 Cd 含量的变化可以发现,对照 CK 稻米中 Cd 含量平均值为 0.448 mg/kg,高于食品中镉限量值(0.2 mg/kg);但施用 D1、D2、D3、D4 等 4 种土壤调理剂后,稻米中 Cd 含量分别为 0.072、0.114、0.080、0.217 mg/kg,施用 D1 土壤调理剂后稻米 Cd 含量比对照降低 84.0%;施用 D3 土壤调节剂后稻米 Cd 含量比对照降低 82.0%。田间试验结果表明,4 种土壤调理剂 D1、D2、D3、D4 均能显著降低稻米 Cd 含量,本试验结果与其他区域的研究结果相似,即在酸性土壤上施用石灰可以抑制水稻吸收镉元素^[20],土壤施用海泡石与石灰石混合物可以明显降低稻米中镉的积累量^[21-23]。从表 3 可见,4 种土壤调理剂能使土壤 pH 值提高 0.10 ~ 0.61,D1 土壤调理剂显著地提高土壤 pH 值,比对照增加 9.43%;其余 3 种土壤调理剂均提高土壤 pH 值,但与对照差异不显著,其中提高最低的是 D3 土壤调理剂,仅提高 1.55%。相关研究表明,土壤 pH 值的提高有利于降低水稻中镉的含量^[24],通过施用不同浓度配比的石灰石与海泡石^[25]以及单独施加海泡石^[23,26]均可以提高土壤的碱度,而通过调控土壤的酸碱度可以降低稻米籽粒中镉元素的含量^[27]。可见,可以通过施用土壤调理剂提高土壤 pH 值来促进重金属元素形成沉淀,从而影响水稻对镉元素的有效吸收。综上所述,D1、D3 土壤调理剂的施用可以使稻米 Cd 含量降低 80.0%,但从原料来源及成本来看,D1 土壤调理剂原料是牡蛎壳,而 D3 土壤调理剂原材料由硅灰石、生石灰、沸石及海泡石组成,D3 土壤调理剂更适宜在贵州山区进行推广使用。

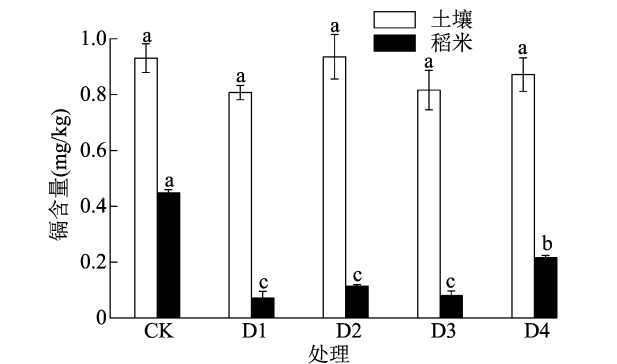


图2 不同土壤调理剂对土壤和稻米镉含量的变化

2.3 叶面阻控剂喷施对稻米 Cd 含量的影响

叶面阻控剂小区水稻产量如表 4 所示。与对照相比,叶面阻控剂 Y1、Y2 使水稻增产 4.82%、10.80%;而叶面阻控剂 Y3、Y4 分别使水稻减产

13.30%、3.62%,特别是 Y3 的减产率超过了 NY/T 3343—2018《耕地污染治理效果评估准则》^[19]中规定的“治理区域农产品单位产量与治理前同等条件对照相比减产幅度应小于或等于 10%”的要求。

表 4 不同叶面阻控剂对水稻产量的影响

处理	土壤 pH 值	产量 (kg/hm ²)	增产率 (%)
Y1	6.38 ± 0.256a	7 245 ± 44.1ab	4.82
Y2	6.28 ± 0.090a	7 665 ± 34.7a	10.8
Y3	6.32 ± 0.084a	6 000 ± 16.7a	-13.3
Y4	6.38 ± 0.199a	6 660 ± 25.5ab	-3.62

从图 3 看出,对照中土壤镉元素的平均含量是 0.792 mg/kg,对水稻植株喷施 4 种叶面阻控剂后,Y1、Y2、Y3、Y4 处理对应土壤中镉元素的均值 0.747、0.779、0.803、0.747 mg/kg,表明土壤中镉元素含量受叶面阻控剂的影响极小。从表 4 看出,田间试验期间分别在分蘖期、抽穗期、灌浆期对秧苗喷施 Y1、Y2、Y3、Y4 叶面阻控剂后,土壤 pH 值相比未喷施叶面阻控剂的对照土壤来说未出现明显的变化,喷施叶面阻控剂对土壤 Cd 的含量水平没有影响。

从稻米中镉元素含量的变化(图 3)可知,空白处理中稻米镉元素的含量为 0.439 mg/kg。对秧苗喷施 Y1、Y2、Y3、Y4 叶面阻控剂后,对应稻米 Cd 含量分别为 0.488、0.199、0.489、0.212 mg/kg。其中,喷施 Y1、Y3 叶面阻控剂后稻米 Cd 含量分别增加 11.2%、11.4%;但喷施 Y2、Y4 叶面阻控剂后稻米 Cd 含量出现显著性降低,下降率分别达 54.7%、51.7%。可见,喷施含 Zn、Se 元素的叶面阻控剂可以明显降低稻米 Cd 含量水平。向焱赟等的研究表明,适宜浓度的锌能够与镉产生拮抗作用,抑制植物对镉的吸收,从而明显降低镉含量^[28]。然而,喷施含 Se 的 Y4 叶面阻控剂也能大幅度降低稻米 Cd

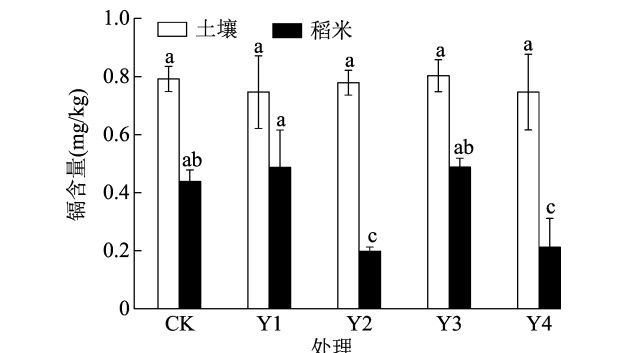


图3 不同叶面阻控剂对稻米镉含量的影响

含量,但试验小区稻米出现减产及稻米 Cd 含量仍有轻微超标现象;从综合效益来看,喷施含 Zn 的叶面阻控剂 Y2 综合效果更优。

2.4 水稻品种对稻米 Cd 含量的影响

4 种水稻品种稻米产量见表 5,受试 3 个水稻品种与对照水稻品种产量相比,P1 号水稻较常规品种提高 7.9%;P2 号水稻较常规品种不变;P3 号水稻较常规品种提高 13.8%。在高镉土壤上种植不同水稻品种,其产量差异不显著。

表 5 高镉稻田种植不同水稻品种的产量情况

处理	产量 (kg/hm ²)	比常规品种增产 (%)
P0	6 075 ± 64.0a	
P1	6 555 ± 74.7a	7.9
P2	6 075 ± 61.0a	0.0
P3	6 915 ± 34.7a	13.8

从图 4 看出,4 个水稻品种试验小区中土壤镉含量分别为 0.778、0.752、0.761、0.792 mg/kg,种植不同水稻品种后土壤镉含量几乎不变。但是,不同的水稻品种稻米中镉元素含量存在明显差异;常规水稻品种样品中镉元素的含量为 0.658 mg/kg,3 种试验水稻品种对应稻米镉元素含量分别为 0.603、0.497、0.439 mg/kg,均低于常规水稻镉元素的含量,特别是 P2、P3 水稻品种与常规水稻品种相比,品种间差异显著。但是,从产量及稻米 Cd 含量变化来看,P3 水稻品种(成优 1479)减镉效果更好。

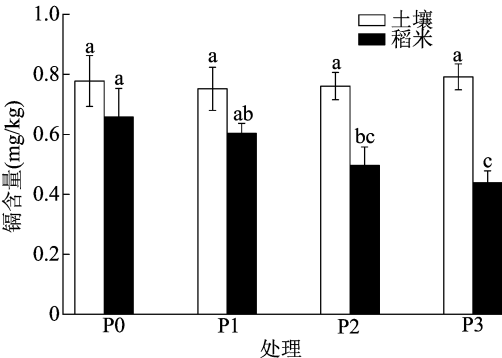


图4 不同水稻品种稻米 Cd 含量比较

3 讨论与结论

从本研究的田间试验结果来看,在喀斯特山区高镉稻田上施用土壤调理剂后,土壤镉的下降率达 51.8%~83.9%,特别是 D1 土壤调理剂(原料是牡蛎壳,CaO≥45%),其次是 D3 土壤调理剂(原材料由硅灰石、生石灰、沸石及海泡石组成,CaO ≥

34.0%,SiO₂≥5.5%),施用含氧化钙的 4 种土壤调理剂均能显著降低稻米镉含量^[29],其作用主要是提高土壤的 pH 值。研究表明,土壤酸碱度的改变可以改变作物吸收镉元素,从而改变稻米中镉元素的含量^[30]。然而,虽然 D1 处理能显著提高土壤的 pH 值,其作用效果大于 D3 处理,但 D3 处理土壤调理剂含多种养分元素,一方面可以提高土壤碱度,另一方面能降低水稻植株吸收土壤中的镉元素能力,还能增加土壤中养分的来源。可见,对高镉稻田撒施土壤调理剂能够降低稻米中镉元素含量的同时,通过补充适量的土壤养分及植物营养元素能促进植株的生长,还能明显降镉。本研究喷施叶面阻控剂的田间试验结果显示,喷施含 Zn 元素的叶面阻控剂一方面能增加水稻产量,同时还可以明显地减少稻米中镉的含量水平;锌是植物生长的必要微量元素,在植物体内对镉元素产生拮抗作用;众多研究表明,当植物体内锌元素含量增加时,镉元素含量将会减少^[28,31-32];锌肥不仅能降低稻米中镉含量,还能提高水稻产量^[28,33-35]。本研究采取的单因子田间试验设计,仅对土壤调理剂、叶面阻控剂的降镉效果单一因素进行评价。因此,在高镉土壤上种植水稻,需要采取综合的调控措施,从土壤调理剂、叶面阻控剂、水稻品种方面进行全面考虑,才能达到显著降低稻米中镉含量的效果,实现稻田安全利用的目标。

喀斯特山区稻米镉元素含量与水稻土中全镉元素含量之间有着极为显著的正相关关系($r = 0.596, P < 0.01$),在高镉稻田上施用含氧化钙的 4 种土壤调理剂后稻米 Cd 含量降低率达 51.8%~83.9%。在分蘖期、抽穗期、灌浆期对秧苗喷施锌-赖氨酸使稻米 Cd 含量减少 54.7%。另外,3 种受试水稻品种稻米 Cd 含量比对照的常规水稻品种分别降低 8.36%、24.50%、33.30%,但筛选水稻品种对稻米降 Cd 的效果明显低于施用土壤调理剂及喷施叶面阻控剂产生的降镉效果。本试验研究结果显示,优化组合是施用以原材料由硅灰石、生石灰、沸石及海泡石组成的土壤调理剂(D3)、喷施含 Zn 元素的叶面阻控剂(Y2)、种植水稻品种成优 1479(P3),通过 3 种调控措施的联合作用可以达到最优的稻米降镉效果。

参考文献:

[1]黄 林,钟格梅,蒋 慧,等. 广西环境镉污染地区人群健康影响

- 评估[J]. 应用预防医学,2017,23(3):181–186.
- [2]彭 华,戴金鹏,纪雄辉,等. 稻田土壤与稻米中的镉含量关系初探[J]. 湖南农业科学,2013(7):68–72.
- [3]陶 雪,杨 琥,季 荣,等. 固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J]. 土壤,2016,48(1):1–11.
- [4]范美蓉,罗 琳,廖育林,等. 不同改良剂对镉污染土壤的改良效果和对水稻光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(4):430–434.
- [5]叶海波,杨肖娥,何 冰,等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(5):513–518.
- [6]宋 伟,陈百明,刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293–298.
- [7]苏稚喆,王雪华,杨 华,等. 镉胁迫下麻疯树转录组测序分析[J]. 中国生物工程杂志,2016,36(4):69–77.
- [8]陆 静. 西南地区农业土壤污染状况及防治对策建议[J]. 南方农业,2018,12(16):83–86.
- [9]李 心,林大松,刘 岩,等. 不同土壤调理剂对镉污染水稻田镉效应研究[J]. 农业环境科学学报,2018,37(7):1511–1520.
- [10]郭利敏,艾绍英,唐明灯,等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(3):654–658.
- [11]杨发文,涂书新. 水稻镉污染叶面阻控和土壤钝化的大田效果和机制[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会第二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会摘要集. 合肥,2018:173–174.
- [12]Rizwan M, Ali S, Adrees M, et al. Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms, and management: a critical review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18):17859–17879.
- [13]Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235/236:343–351.
- [14]刘 静,李筑江,王 萍,等. 不同叶面肥对稻米重金属含量的影响[J]. 农业与技术,2021,41(8):801–804.
- [15]唐熙雯,周 旋,黄凤球,等. 不同污染程度耕地下稻米镉综合治理效果研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(10):1339–1346.
- [16]土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [17]史琼彬. 有机物料对紫色水稻土颗粒有机质及镉生物有效性的影响[D]. 重庆:西南大学,2016:28–29.
- [18]赵 萌. 硫对水稻根区微界面有效态镉的影响及机制[D]. 北京:中国农业科学院,2021:7–119.
- [19]农业农村部生态总站. 耕地污染治理效果评估准则:NY/T 3343—2018[S]. 北京:中华人民共和国农业农村部,2019.
- [20]宗良纲,徐晓炎. 水稻对土壤中镉的吸收及其调控措施[J]. 生态学杂志,2004,23(3):120–123.
- [21]周 歆. 重金属低累积水稻品种筛选及稻田化学改良技术研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2013:36–37.
- [22]朱奇宏,黄道友,刘国胜,等. 石灰和海泡石对镉污染土壤的修复效应与机理研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):111–116.
- [23]程 晨. 镉污染酸性红壤植物吸取与钝化修复长效性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2017:34–36.
- [24]韦小了,牟 力,付天岭,等. 不同钝化剂组合对水稻各部位吸收积累Cd及产量的影响[J]. 土壤学报,2019,56(4):883–894.
- [25]曹雪莹. 湘中镉污染酸性红壤的钝化修复研究[D]. 长沙:湖南师范大学,2015:27–30.
- [26]孙约兵,王朋超,徐应明,等. 海泡石对镉–铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学,2014,35(12):4720–4726.
- [27]李 欣. 减少水稻对镉吸收的土壤调控措施[J]. 农业科技与装备,2009(4):27–30.
- [28]向焱赞,伍 湘,张小毅,等. 叶面阻控剂对水稻吸收和转运镉的影响研究进展[J]. 作物研究,2020,34(3):290–296.
- [29]向 玲,刘铮翔,熊 孜,等. 活化改性矿物基土壤调理剂的研发及产业化:(VI)调理剂与微生物菌剂联合修复稻田镉污染[J]. 中国高科技,2018(12):15–18.
- [30]李伯平. 叶面阻控剂与土壤调理剂对稻米降镉效果研究[J]. 湖南农业科学,2016(9):30–32.
- [31]Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 116(1):73–78.
- [32]董如茵,徐应明,王 林,等. 土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(8):2589–2596.
- [33]李明举,严正炼,王文华. 水稻施用锌肥对镉吸收的抑制效果初探[J]. 现代化农业,2014(8):39–41.
- [34]朱永官. 锌肥对不同基因型大麦吸收积累镉的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1985–1988.
- [35]张 磊,宋凤斌. 土壤施锌对不同镉浓度下玉米吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报,2005,24(6):1054–1058.