

营养型阻控剂影响菜园土中水稻生长及其Cd吸收

唐明灯, 王艳红, 李林峰, 尹贻龙, 徐梓盛, 陈勇, 艾绍英

引用本文:

唐明灯, 王艳红, 李林峰, 尹贻龙, 徐梓盛, 陈勇, 艾绍英. 营养型阻控剂影响菜园土中水稻生长及其Cd吸收[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 331–338.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0295>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚕沙与海泡石联合施用对水稻根际土壤Cd生物有效性及籽粒Cd富集的影响

刘顺翔, 胡钧铭, 吴昊, 林大松, 张俊辉, 李婷婷, 韦翔华, 蒋鑫, 刘斌

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1686–1695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1403>

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>

植保无人机喷施锌锰型水稻降Cd叶面阻控剂的飞行参数研究

隆志方, 黄蕊, 王继红, 刘翔, 刘贵阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1869–1876 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0861>

联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 李懋松, 熊润忠, 秦太峰

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2217–2226 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0573>

不同生育期施加超细磷矿粉对水稻吸收和转运Pb、Cd的影响

张青, 王煌平, 孔庆波, 栗方亮, 罗涛

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 45–54 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0607>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

唐明灯, 王艳红, 李林峰, 等. 营养型阻控剂影响菜园土中水稻生长及其Cd吸收[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 331–338.

TANG M D, WANG Y H, LI L F, et al. Effects of nutria-amendment on the biomass and cadmium uptake of *Oryza Sativa* grown in vegetative soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 331–338.



开放科学 OSID

营养型阻控剂影响菜园土中水稻生长及其Cd吸收

唐明灯, 王艳红, 李林峰, 尹贻龙, 徐梓盛, 陈勇, 艾绍英*

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省农业面源污染监测评估与防控工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要:为了探索以钙硅钾等营养元素为主要成分的土壤调理剂(营养型阻控剂)对镉(Cd)超标菜园土旱改水时水稻(*Oryza Sativa* L.)生长及其Cd吸收的影响,于2014年下半年在Cd超标菜园土中施用营养型阻控剂,对不同用量(分别为0、1.5、3.0、4.5、6.0 g·kg⁻¹,分别记作CK、T1、T2、T3、T4)营养型阻控剂的水稻盆栽试验开展研究。结果表明:营养型阻控剂对菜园土中水稻生长没有较好的促进作用,没有提高稻谷产量。供试水稻品种黄超占各部位Cd质量分数大小顺序为根>茎叶>稻米>稻壳,且各部位间达到显著差异水平;所有处理稻米Cd质量分数均低于现行的食品安全国家标准中Cd限量指标;与CK相比,营养型阻控剂显著降低糙米、水稻茎叶、水稻根的Cd质量分数,且呈现随营养型阻控剂用量增加而降低效应更佳的剂量效应;与CK相比,处理T4对稻米、水稻茎叶、水稻根三者Cd质量分数的降低效应最佳,降幅分别为32.8%、39.7%、24.4%;营养型阻控剂显著降低水稻根、茎叶和稻谷中Cd的累积量。施用营养型阻控剂显著提高了土壤pH值,提高的最大值为0.3个单位,但对土壤DTPA-Cd质量分数有提高作用(处理T1的DTPA-Cd质量分数显著大于CK、T3)、对土壤有效态硅质量分数有降低效应(处理T2、T3的有效态硅质量分数显著小于CK)。营养型阻控剂可适用于Cd超标菜园土,通过降低根Cd生物富集系数来显著降低水稻根、茎叶和稻米Cd质量分数,本盆栽试验中营养型阻控剂降低稻米Cd质量分数的最佳用量为6.0 g·kg⁻¹。

关键词:调理剂;Cd;水稻;土壤;重金属钝化

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0331-08 doi:10.11654/jaes.2023-0295

Effects of nutria-amendment on the biomass and cadmium uptake of *Oryza Sativa* grown in vegetative soil

TANG Mingdeng, WANG Yanhong, LI Linfeng, YIN Yilong, XU Zisheng, CHEN Yong, AI Shaoying*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences; Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation; Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Engineering Research Center for Monitoring and Prevention of Agricultural Non-point Source Pollution, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A pot experiment was conducted in 2014, to investigate the effects of a nutria-amendment[0(CK), 1.5(T1), 3.0(T2), 4.5 g·kg⁻¹(T3), and 6.0 g·kg⁻¹(T4)] on the growth and cadmium(Cd) uptake by *Oryza Sativa* L. grown in vegetative soil with a Cd concentration over its screening standard. The results showed that compared with the control, the nutria-amendment failed to promote the growth of the whole rice plant, and to increase rice yield. The order of Cd concentrations in the rice tissues from large to small was root > straw > brown rice > husk, with a significant difference among the four rice tissues ($P < 0.05$). Cd concentrations of brown rice in treatments were all below the national standard value of 0.2 mg·kg⁻¹. In contrast with the control, the nutria-amendment significantly decreased Cd concentrations in brown rice, rice straw, and rice root, with the highest concentration decrease of 32.8%, 39.7%, and 24.4% observed under the T4 treatment,

收稿日期:2023-04-14 录用日期:2023-07-17

作者简介:唐明灯(1968—),男,湖南武冈人,副研究员,主要从事土壤重金属污染及调控研究。E-mail:njautmd@163.com

*通信作者:艾绍英 E-mail:shaoyingai@21cn.com

基金项目:广东省农业技术研发项目(2018LM2157)

Project supported: The Research and Development Program for Agricultural Technology of Guangdong Province(2018LM2157)

respectively. Moreover, the higher the dosage of nutria-amendment, the better the effect was on Cd concentration decrease in rice tissues. The nutria-amendment markedly increased the soil pH with the biggest increase of 0.3 units under the T4 treatment, and increased soil DTPA-Cd concentrations (DTPA-Cd concentrations of the T1 treatment were significantly bigger than those of CK and T3), while reducing soil available Si concentrations of the T2 and T3 treatments were significantly lower than those of CK. Therefore, the nutria-amendment owing to its ability to decrease the Cd bioconcentration factor in the rice root tissues, is suitable for application to the tested vegetative soil with a Cd concentration above its screening standard. Furthermore, the 6 g per 1 kg of vegetative soil was the efficient nutria-amendment dose in the pot experiment to obtain a lower Cd concentration in brown rice.

Keywords: amendment; cadmium; rice; soil; heavy metals immobilization

水稻(*Oryza Sativa* L.)是镉(Cd)吸收最强的大宗谷类作物^[1-2]。稻米是我国多数国民的主粮,21世纪初的调查表明,我国稻米Cd暴露风险非常高,尤其是南方酸性土壤区^[3-7]。

2014年全国土壤污染状况调查公报显示,耕地重金属点位超标率Cd排在第一位。相关文献研究表明,在Cd污染稻田土壤上,目前应用最广泛的是成本低、见效快、操作方便、农户易接受、不影响农事的原位钝化技术(土壤改良类技术),即通过施用钝化剂、土壤调理剂等,改变土壤pH值、降低土壤Cd活性,从而降低稻米Cd质量分数^[8-11]。但由于Cd污染土壤治理的复杂性,国内外仍缺乏成熟且能大面积推广应用的修复技术^[12],Cd污染稻田的安全利用(或修复)仍有很长的探索之路。随着我国治理修复技术规范和相关标准的出台(NY/T 3343—2018等),重金属质量分数超过标准限值的土壤调理剂^[13-14]不能再应用到稻田,需要研发符合标准的土壤调理剂。

熟石灰可显著降低酸性土壤稻米Cd质量分数^[12,15],硫酸钾能降低水稻Cd吸收^[16],无机硅能降低水稻Cd质量分数^[17-18],镁能抑制Cd从秸秆向籽粒迁移^[19]。综合以上物质能降低稻米Cd质量分数的优势,王艳红等^[20]以硅酸钙、熟石灰、硫酸钾和硫酸镁等水稻需要的钙、硅、钾、硫、镁等营养元素组配成新型土壤调理剂,该土壤调理剂符合相关标准(GB 15618—2018)^[21],已有试验结果表明该新型土壤调理剂具有较好的降低稻米Cd质量分数的效果^[22-23]。

我国对重金属污染土壤非常重视,2016年《土壤污染防治行动计划》颁布以来,主管部门相继出台了許多工作方案和技术规范,其中《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)》就将“土壤改良类技术”作为Ⅱ类耕地安全利用的技术之一,Ⅱ类耕地改种蔬菜也是其安全利用的技术之一。菜园土与水稻土均属人为土纲,菜园土没有受到长期淹水影响,没有犁底层且施肥量大,土壤中残留的磷、

钾等大量营养元素质量分数较高,超过水稻土。一般而言,长期淹水水稻稻米Cd的质量分数低于淹水时间短的水稻。为防止受污染耕地非粮化及保障口粮生产,Ⅱ类耕地中菜园土有可能用于种植水稻以保障粮食安全,但目前没有受污染菜园土中稻米重金属质量分数的报道,更没有受污染菜园土施用土壤调理剂后稻米重金属质量分数的报道。

本文在菜园土中施用不同剂量营养型阻控剂,开展水稻盆栽试验,探索营养型阻控剂影响菜园土中水稻Cd吸收的效应、营养型阻控剂适用的Cd超标土壤类型,进而为营养型阻控剂在Cd超标菜园土旱改水或菜稻轮作中的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

盆栽试验供试菜园土采自广州市白云区多年菜地,系由河流沉积物发育而来的普通肥熟旱耕人为土(Typic Fimi-orthic Anthrosols)。采集0~20 cm土壤,风干,过1 cm筛,备用。根据《土壤农业化学分析方法》^[24],土壤的部分性状测定结果如下:pH 6.10,有机质 29.0 g·kg⁻¹,全氮 1.80 g·kg⁻¹、碱解氮 209 mg·kg⁻¹、有效磷 61.4 mg·kg⁻¹、速效钾 168 mg·kg⁻¹,Cd 全量 1.30 mg·kg⁻¹,有效态 Cd 0.624 mg·kg⁻¹。可见该土壤肥力较高,但土壤Cd全量在农用地土壤污染风险筛选值(0.4 mg·kg⁻¹)与管制值(2 mg·kg⁻¹)之间(GB 15618—2018),农产品可能存在一定的超标风险。

1.2 供试营养型阻控剂

供试营养型阻控剂属专利产品,由硅酸钙、熟石灰、硫酸钾、硫酸镁等按一定比例均匀混合配制而成^[20],其pH值为12.5,Cd质量分数为0.05 mg·kg⁻¹。

1.3 供试水稻

水稻品种名为黄超占,系广东省农业科学院水稻研究所经系谱法选择育成的常规籼稻品种,是广东省的主栽品种之一。

1.4 试验设计及实施

每千克土壤施用营养型阻控剂的用量分别为1.5、3.0、4.5、6.0 g(对应的处理号分别为T1、T2、T3、T4),另设置不施营养型阻控剂的菜园土为对照(CK),每个处理4次重复,共20盆。将8 kg土壤和对应量的营养型阻控剂(0、12、24、36、48 g)及3.43 g过磷酸钙肥料,混合均匀装入塑料盆(底径、口径、高分别为21、30、21 cm),加1 000 mL自来水平衡2 d。选择大小一致的黄超占水稻种子,用10%过氧化氢消毒30 min。2014年7月29日进行直接播种,每盆播种3穴,每穴10颗水稻种子。2014年8月1日种子出芽,2014年8月15日每穴定苗至3株。尿素(3.43 g·盆⁻¹)和硫酸钾(2.37 g·盆⁻¹)以追肥形式按50%、30%、20%分成3次溶于水浇灌(时间分别为2014年8月23日、8月31日、10月3日)。参考大田水稻种植方式进行水分管理:淹水-分蘖后晒田-淹水-灌浆后期自然落干。根据水稻病虫害情况适时进行防治。2014年11月1日收获盆栽水稻,采集水稻植株样品、稻谷样品和土壤样品。

1.5 样品前处理及测定

盆栽水稻植株样品用不锈钢剪刀从土面分为地上部和根,将地上部脱粒分为茎叶和稻谷。用自来水冲洗根和茎叶,冲洗干净后用去离子水泡洗2次,沥干水后装于纸袋;稻谷样品直接装于纸袋。水稻根、茎叶、稻谷样品于烘箱中105℃杀青30 min,75℃恒温烘干至恒质量;称量记录水稻根、茎叶、稻谷样品的质量。利用不锈钢砻谷机脱壳稻谷样品,分为稻壳和糙米,分别记录稻壳和糙米的质量。用不锈钢粉碎机粉碎水稻根、茎叶、稻壳、糙米样品,样品过40目尼龙筛后装入纸袋存放于干燥器中待测Cd质量分数。用不锈钢土钻在塑料盆中均匀钻取土壤样品,土样风干、过20目尼龙筛,待测土壤pH值、有效态Cd、有效态硅。

称取0.5 g已制备的水稻根、茎叶、稻壳和糙米样

品于聚四氟乙烯杯,加10 mL混酸(9 mL硝酸+1 mL高氯酸,均为优质纯)湿法消解,用石墨炉原子吸收分光光度计(PerkinElmer AAnalyst 600,下同)测定植株样品消解液中Cd浓度。称取10.00 g土壤,电位法测定土壤pH(土水质量比为1:2.5);称取10.00 g土壤,加入50 mL DTPA溶液浸提1 h,用石墨炉原子吸收分光光度计测定滤液中的Cd浓度,计算得出有效态Cd质量分数^[25]。取5.00 g土壤,用柠檬酸提取-钼蓝比色法浸提、820 nm波长下比色测定土壤有效硅^[24]。

1.6 数据处理与统计

数据经Excel 16.0处理,SPSS 10.0进行LSD法多重比较、*T*检验、相关性等统计分析。

全株生物量(g·盆⁻¹)=根生物量(g·盆⁻¹)+茎叶生物量(g·盆⁻¹)+稻谷产量(g·盆⁻¹)

水稻某部位Cd累积量=某部位Cd质量分数×该部位生物量,其中稻谷Cd累积量=稻壳Cd质量分数×稻壳质量+糙米Cd质量分数×糙米质量

根Cd生物富集系数(BCF_{根/土})=水稻根系Cd质量分数/土壤Cd全量

Cd转运系数=水稻茎叶Cd质量分数/根系Cd质量分数(TF_{茎叶/根}),或稻米Cd质量分数/茎叶Cd质量分数(TF_{稻米/茎叶}),或稻壳Cd质量分数/茎叶Cd质量分数(TF_{稻壳/茎叶})

2 结果与分析

2.1 水稻生物量及稻谷产量

由表1可知,与CK相比,施用营养型阻控剂后水稻根、茎叶的生物量先降低后增加,T4处理的根、茎叶生物量显著高于CK,相关性分析显示,水稻根或茎叶的生物量均与营养型阻控剂的施用量显著正相关,相关系数分别为0.461(*P*<0.05,*n*=20)、0.646(*P*<0.01,*n*=20)。然而,稻谷产量先降低后增加、再降低,甚至CK处理稻谷产量显著高于T1与T4。稻谷产量与营养型阻控剂的施用量呈负相关,相关系数为-0.316

表1 水稻生物量及稻谷产量(g·盆⁻¹)
Table 1 Biomass of rice and rice grain yield(g·pot⁻¹)

处理 Treatment	根生物量 Root biomass	茎叶生物量 Straw biomass	稻谷产量 Rice grain yield	全株生物量 Whole plant biomass
CK	6.55±0.77b	79.0±7.9bc	69.2±4.5a	154.82±12.14ab
T1	5.79±0.51b	76.9±0.7c	60.1±4.3b	142.78±3.21c
T2	6.12±0.63b	76.1±5.3c	63.7±3.3ab	145.90±8.35bc
T3	6.24±0.96b	86.6±4.8ab	63.8±5.4ab	156.58±6.84ab
T4	8.02±1.00a	92.3±6.5a	61.9±4.4b	162.24±2.59a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。
Note:The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments (*P*<0.05). The same below.

($P>0.05$, $n=20$); 与 CK 相比, T1 稻谷产量降幅为 13.15%。水稻全株生物量也呈现先降低后增加的趋势, 营养型阻控剂用量与水稻全株生物量的相关系数为 0.420 ($P>0.05$, $n=20$), 无显著相关性; T1、T2 全株生物量比 CK 低(其中 T1 达显著水平), 而 T3、T4 比对照高。

2.2 水稻不同部位 Cd 质量分数

由表 2 可见, 供试水稻不同部位 Cd 质量分数大小顺序为根>茎叶>糙米>稻壳, T 检验结果表明, 水稻根、茎叶、糙米、稻壳的 Cd 质量分数之间均达到显著差异水平。与 CK 相比, 营养型阻控剂可降低水稻根、茎叶及糙米 Cd 质量分数, 且部分处理达到显著水平 ($P<0.05$, $n=20$), 根、茎叶或糙米 Cd 质量分数与营养型阻控剂施用量显著负相关, 相关系数分别为 -0.721、-0.885、-0.662 ($P<0.01$, $n=20$); 所有处理的糙米 Cd 质量分数均低于《食品中污染物的限量》(GB 2762—2022) 中 Cd 的限量指标^[26], 其中处理 T4 的糙米 Cd 质量分数比 CK 降低 32.8%。营养型阻控剂对该水稻品种的稻壳 Cd 质量分数没有显著影响 ($P>0.05$, $n=20$)。相关性分析表明, 根 Cd 质量分数与水稻茎叶 Cd 质量分数极显著正相关, 相关系数为 0.842 ($P<0.01$, $n=20$), 水稻茎叶 Cd 质量分数与糙米 Cd 质量分数极显著正相关, 相关系数为 0.799 ($P<0.01$, $n=20$), 糙米与稻壳 Cd 质量分数极显著正相关, 相关系数为 0.693 ($P<0.01$, $n=20$)。据此初步推断, 营养型阻控剂通过增加土壤 Cd 的拮抗因子, 调整土壤营养元素组成, 从而降低水稻根部 Cd 质量分数; 但本研究数据有限, 还不能揭示营养型阻控剂降低水稻根部 Cd 质量分数的深层机制, 需要后续进一步研究。

2.3 土壤 pH 值、DTPA-Cd 质量分数与有效态硅质量分数

与初始土壤 pH 6.10 相比, 种植水稻后所有处理土壤 pH 值都升高至 7.00 左右(表 3); 土壤 pH 值随营养型阻控剂用量的增加而提高, 土壤 pH 值与营养型阻控剂用量极显著正相关, 相关系数为 0.827 ($P<0.01$,

$n=20$); 处理 T4 的 pH 值最大, 显著高于 T1 与 CK。营养型阻控剂对土壤 DTPA-Cd 质量分数有一定的提高作用(表 3), 处理 T1 的 DTPA-Cd 质量分数显著大于 CK 和 T3, 营养型阻控剂用量与土壤 DTPA-Cd 质量分数无显著相关性 ($P>0.05$, $n=20$)。营养型阻控剂降低土壤有效态硅质量分数, 其中处理 T2、T3 显著低于 CK, 营养型阻控剂用量与菜园土土壤有效态硅质量分数两者之间无显著相关关系, 相关系数为 -0.434 ($P>0.05$, $n=20$)(表 3), 由此推测, 随营养型阻控剂施入菜园土的硅酸钙被土壤固持后, 水溶性硅酸盐对土壤有效态硅没有贡献。土壤 pH 值与土壤 DTPA-Cd 质量分数没有显著相关性, 土壤 DTPA-Cd 质量分数与有效态硅质量分数也无显著相关性, 但土壤 pH 值与土壤有效态硅质量分数之间显著负相关, 相关系数为 -0.505 ($P<0.05$, $n=20$)。因此推断, 营养型阻控剂不是通过提高土壤 pH 值, 降低土壤 DTPA-Cd 质量分数, 提高土壤有效态硅质量分数, 进而降低水稻根、茎叶、糙米等部位 Cd 质量分数的。

2.4 水稻植株不同部位的 Cd 累积量

与 CK 相比, 施用营养型阻控剂降低了试验水稻根、茎叶、稻谷的 Cd 累积量(表 4)。从表 4 可看出, 水稻吸收的 Cd 大部分累积在水稻茎叶中, 水稻 Cd 累积量表现为茎叶>根>稻谷, 且 T 检验表明, 水稻茎叶、根、稻谷三者的 Cd 累积量之间均有显著差异。经综合所有处理后得出, 根平均 Cd 累积量: 茎叶平均 Cd

表3 土壤 pH 值、DTPA-Cd 质量分数与有效态硅质量分数
Table 3 Soil pH value, available Cd and Si concentration

处理 Treatment	pH 值 pH value	DTPA-Cd 质量分数 DTPA-Cd concentration/(mg·kg ⁻¹)	有效硅质量分数 Available Si concentration/(mg·kg ⁻¹)
CK	6.97±0.10c	0.464±0.012b	343±24a
T1	7.12±0.05b	0.509±0.026a	329±15ab
T2	7.18±0.03ab	0.473±0.035ab	317±4b
T3	7.22±0.05ab	0.463±0.033b	310±8b
T4	7.27±0.05a	0.478±0.035ab	327±12ab

表2 水稻植株各部分 Cd 质量分数(mg·kg⁻¹)
Table 2 Cd concentrations in parts of rice plants(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	根 Rice root	茎叶 Rice straw	稻壳 Rice husk	糙米 Brown rice
CK	2.45±0.39a	0.588±0.023a	0.049±0.010a	0.152±0.021a
T1	2.09±0.19ab	0.475±0.035b	0.051±0.010a	0.131±0.019ab
T2	1.90±0.08b	0.395±0.033c	0.051±0.007a	0.128±0.011ab
T3	1.75±0.15b	0.355±0.028c	0.050±0.008a	0.123±0.015b
T4	1.85±0.10b	0.355±0.040c	0.045±0.011a	0.102±0.024b

表4 水稻植株不同部位的Cd累积量($\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)
Table 4 Cd accumulation in parts of rice plants($\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

处理 Treatment	根 Rice root	茎叶 Rice straw	稻谷 Rice grain
CK	16.1±3.6a	42.9±6.9a	8.43±1.55a
T1	11.4±2.7c	33.1±7.2ab	6.39±1.01b
T2	11.6±1.3bc	30.0±3.0b	6.70±0.37ab
T3	11.0±2.7c	31.8±8.8b	6.46±1.01b
T4	15.3±1.8ab	29.1±7.5b	5.30±1.44b

累积量:稻谷平均Cd累积量 $\approx 2:5:1$ 。

2.5 水稻Cd的生物富集系数与转运系数

水稻根Cd生物富集系数($\text{BCF}_{\text{根/土}}$)的大小表示水稻对土壤重金属Cd富集能力的强弱;水稻Cd的转运系数大小表示水稻从根向茎叶($\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$)、或从茎叶向稻米($\text{TF}_{\text{稻米/茎叶}}$)、或从茎叶向稻壳($\text{TF}_{\text{稻壳/茎叶}}$)转运重金属Cd的能力强弱。由表5可见,所有处理的 $\text{BCF}_{\text{根/土}}$ 均大于1,表明试验水稻的Cd富集能力比较强,施用营养型阻控剂能显著降低水稻 $\text{BCF}_{\text{根/土}}$,且 $\text{BCF}_{\text{根/土}}$ 与营养型阻控剂用量显著负相关,相关系数为 -0.721 ($P<0.01$, $n=20$)。水稻Cd的 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 、 $\text{TF}_{\text{稻米/茎叶}}$ 、 $\text{TF}_{\text{稻壳/茎叶}}$ 均远小于1,表明试验水稻植株对Cd的转运能力较弱,不是重金属Cd的富集植物。营养型阻控剂降低试验水稻的 $\text{BCF}_{\text{根/土}}$ (显著)和 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ (不显著),显著提高试验水稻的 $\text{TF}_{\text{稻米/茎叶}}$ 、 $\text{TF}_{\text{稻壳/茎叶}}$ 。由此推测可知,营养型阻控剂降低试验水稻Cd的吸收主要是依靠降低 $\text{BCF}_{\text{根/土}}$ 来实现的。

3 讨论

水稻植株中根Cd质量分数远大于地上部Cd质量分数^[27-29],但地上不同部分的Cd质量分数会有差异。野外调查水稻样品植株Cd质量分数大小顺序为根>茎>叶>糙米^[27],田间小区试验水稻不同部位Cd质量分数大小顺序为根>茎叶>稻壳>糙米^[28],盆栽试验水稻不同部位Cd质量分数大小顺序为根>茎叶>糙米>稻壳^[29],本试验水稻不同部位Cd质量分数大小

顺序与李超等^[29]的结果一致。

水稻Cd吸收是一个复杂过程,其受外部环境和内在遗传基因的共同调控^[30],施用营养型阻控剂使水稻Cd吸收量下降属于外部环境调控。王艳红等^[22]在Cd质量分数为 $0.448\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的大田开展小区试验,营养型阻控剂用量为 $2\ 250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,糙米Cd质量分数降幅为60.5%,与本试验糙米Cd质量分数降低的结果呈现一致性,但该小区试验稻谷产量有提高趋势、稻壳Cd质量分数降幅为41%,与本试验稻谷产量和稻壳Cd质量分数的变化规律不一致,以上区别的主要原因可能是供试水稻品种不一致^[31]。王艳红等^[22]的研究还表明,营养型阻控剂使小区试验土壤pH值提高0.2个单位,没有显著降低土壤DTPA-Cd质量分数,也没有显著提高土壤有效态硅质量分数,与本试验土壤理化性质的变化趋势一致;另外营养型阻控剂能降低水稻土中稻米Cd质量分数,也能降低本试验菜园土中稻米Cd质量分数。初步推测,营养型阻控剂降低水稻Cd吸收可以适用于多种类型的土壤,是一种相对比较广谱的土壤调理剂,但还需要后续试验进行验证。

土壤中能够被植物根系吸收利用的Cd形态为Cd有效态,有效态Cd一般用模拟土壤环境的化学试剂来浸提并测定。土壤有效态Cd又细分为水溶态和可交换态^[32];土壤有效态Cd质量分数越大,Cd越容易被植物吸收利用。土壤有效态Cd的测定目前主要利用HCl、EDTA、DTPA、CaCl₂和H₂O 5种浸提剂,它们对土壤Cd的提取能力依次减弱^[33],其中DTPA对土壤Cd的提取能力居于中等强度。因此,土壤有效态Cd的质量分数与土壤DTPA-Cd的质量分数不一定每个试验均具有较好的线性对应关系,即DTPA-Cd质量分数大的土壤,其有效态Cd质量分数不一定大,或者说,DTPA-Cd质量分数没有变化,不一定表明土壤有效态Cd质量分数也不变。土壤调理剂能降低土壤DTPA-Cd和有效态Cd质量分数,且降低水稻稻米Cd

表5 水稻Cd的生物富集系数与转运系数
Table 5 Cd bioconcentration factors and translocation factors of rice plants

处理 Treatment	$\text{BCF}_{\text{根/土}}$ $\text{BCF}_{\text{root/soil}}$	转运系数 Translocation factor		
		$\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ $\text{TF}_{\text{straw/root}}$	$\text{TF}_{\text{稻米/茎叶}}$ $\text{TF}_{\text{rice/straw}}$	$\text{TF}_{\text{稻壳/茎叶}}$ $\text{TF}_{\text{husk/straw}}$
CK	1.88±0.30a	0.230±0.061a	0.282±0.038b	0.090±0.012b
T1	1.61±0.15ab	0.226±0.070a	0.310±0.047ab	0.120±0.021ab
T2	1.46±0.06b	0.209±0.025a	0.326±0.032ab	0.130±0.020a
T3	1.35±0.11b	0.211±0.058a	0.343±0.038a	0.141±0.031a
T4	1.42±0.07b	0.167±0.049a	0.326±0.012ab	0.143±0.013a

质量分数^[8,14,34-35];施用的物料产品没有显著影响土壤 DTPA-Cd 质量分数,但提高了土壤有效态 Cd 质量分数和稻米 Cd 质量分数^[36]。王艳红等^[22]及本试验的结果中,营养型阻控剂对土壤 DTPA-Cd 质量分数没有显著影响,但降低了土壤有效态 Cd 和稻米 Cd 质量分数,推测本试验供试土壤的 DTPA-Cd 质量分数很可能高于土壤中有效态 Cd 质量分数,从而掩盖了营养型阻控剂降低土壤有效性 Cd 的特性。

营养型阻控剂是由熟石灰、硅酸钙、硫酸钾等混合而成^[20]。一方面石灰提高土壤 pH 值,促进土壤中 Cd 形成氧化物沉淀,降低 Cd 可交换态含量;另一方面石灰使土壤微生物群落结构发生改变,微生物产生的高分子聚合物与 Cd 形成络合物而使 Cd 固定^[12]。硫酸钾提供硫酸根,硫酸根还原为硫离子与 Cd 形成沉淀,而使 Cd 固定^[16]。硅酸钙中的硅,既是水稻的有益元素,也能改变土壤 Cd 的形态,降低 Cd 的生物有效性^[17]。营养型阻控剂中钙、钾、镁有效性高,对土壤 Cd 有一定的拮抗作用^[13]。因此,营养型阻控剂可依靠多种组分与土壤 Cd 发生相互作用,降低根 Cd 的生物富集系数,进而降低稻米 Cd 质量分数,但在该过程中哪一种组分起主导作用,还需要进一步试验研究。

营养型阻控剂中钙、硅、钾、硫、镁是水稻必需的大、中量营养元素,五者质量百分数分别约为 40%、10%、3%、2%、1%,且五者较土壤中相应元素的活性更高而更容易被水稻吸收。随着土壤中施入营养型阻控剂,土壤中钙、钾、镁等碱金属和碱土金属能抑制水稻对 Cd²⁺ 的吸收,这是因为钾、钙、镁等可与 Cd 竞争根系转运蛋白上的结合位点^[37-38]。在 Cd 从根向地上部转运过程中,钙通过在转录水平上抑制 Cd 的转运子(OsNRAMP5 和 OsHMA2)产生来降低 Cd 的转运量,而且钙还会与 Cd 竞争转运子(OsLCT1)^[39];硅与 Cd 形成复合物结合在细胞壁上或在液泡内区隔化阻止 Cd 在水稻植株内的转运^[40],而且硅可以通过抑制水稻 Cd 转运基因的表达来降低 Cd 在水稻植株内的转运^[41];镁也具有显著抑制 Cd 从根部向地上部转运的作用^[42]。所以,营养型阻控剂具有较好的降低菜园土中水稻 Cd 吸收的效果。

4 结论

(1) 营养型阻控剂没有提高供试水稻稻谷产量。

(2) 供试水稻各部位 Cd 质量分数具有显著差异,所有处理均表现为根>茎叶>稻米>稻壳;营养型阻控剂显著降低水稻根、茎叶和稻米 Cd 质量分数及三者

的 Cd 累积量,且水稻 Cd 质量分数与营养型阻控剂用量存在显著的剂量效应。营养型阻控剂提高了菜园土 pH 值,同时也提高了土壤 DTPA-Cd 质量分数,降低了土壤有效态硅质量分数。

(3) 从降低稻米 Cd 效率来看,盆栽试验中营养型阻控剂的最佳用量为 6.0 g·kg⁻¹。

参考文献:

- [1] CHANEY R L, REEVES P G, RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biometals*, 2004, 17: 549-553.
- [2] MEHARG A A, NORTON G, DEACON C, et al. Variation in rice cadmium related to human exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11): 5613-5618.
- [3] 甄艳红, 成颜军, 潘根兴, 等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(1): 119-122. ZHEN Y H, CHENG Y J, PAN G X, et al. Cd, Zn and Se content of the polished rice samples from some Chinese open markets and their relevance to food safety[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(1): 119-122.
- [4] HU Y N, CHENG H F, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92/93: 515-532.
- [5] 汪鹏, 王静, 陈宏坪, 等. 我国稻田系统镉污染风险与阻控[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7): 1409-1417. WANG P, WANG J, CHEN H P, et al. Cadmium risk and mitigation in paddy systems in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1409-1417.
- [6] CHEN H P, ZHANG W W, YANG X P, et al. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain[J]. *Chemosphere*, 2018, 207: 669-707.
- [7] 董敏刚, 彭梓濠, 常春英, 等. 南方典型镉污染地区土壤-农产品镉含量与人群健康风险评估[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(1): 133-138. DONG M G, PENG Z H, CHANG C Y, et al. Concentrations of Cd in soil and corresponding crop and vegetable and population health risk assessment from a typical Cd-contaminated area in south China[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(1): 133-138.
- [8] LIU X Y, TIAN F X, XIE Y H, et al. Control effects of Tianshifu soil conditioners on Cd contamination in paddy fields of Hunan Province[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(7): 1447-1451.
- [9] 谢敏, 黎良平, 戴典. VIP+n 技术对重金属污染土壤和稻谷降镉效果研究[J]. *吉林农业*, 2017, 8: 75-77. XIE M, LI L P, DAI D. Research on effect of rice Cd reduction and heavy metal contaminated soil through VIP+n technologies[J]. *Jilin Agriculture*, 2017, 8: 75-77.
- [10] 陈立伟, 杨文毅, 周航, 等. 土壤调理剂对土壤-水稻系统 Cd、Zn 迁移累积的影响及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1635-1641. CHEN L W, YANG W T, ZHOU H, et al. Effects of combined amendment on transport and accumulation of Cd and Zn in

- soil-rice system and the related health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4):1635-1641.
- [11] 章清杞, 林荔辉, 张青龄, 等. 水稻镉积累调控技术研究进展[J]. 中国稻米, 2020, 26(6):27-31. ZHANG Q Q, LIN L H, ZHANG Q L, et al. Research progress on regulation technology of cadmium accumulation in rice[J]. *China Rice*, 2020, 26(6):27-31.
- [12] 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. CHEN Y Q, ZHANG Y, CHEN G L. Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8):1419-1424.
- [13] 龙思斯, 杨益新, 宋正国, 等. 三种类型阻控剂对不同水稻品种水稻镉富集的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5):459-465. LONG S S, YANG Y X, SONG Z G, et al. Effects of three inhibitors on the accumulation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5):459-465.
- [14] 林小兵, 武琳, 王惠明, 等. 不同用量土壤调理剂对镉污染农田土壤环境的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7):1734-1745. LIN X B, WU L, WANG H M, et al. Soil environment under different application rates of soil conditioners[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7):1734-1745.
- [15] HUANG G X, DING C F, HU Z Y, et al. Topdressing iron fertilizer coupled with pre-immobilization in acidic paddy fields reduced cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:1040-1047.
- [16] WANG K, FU G P, YU Y, et al. Effects of different potassium fertilizers on cadmium uptake by three crops[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(26):27014-27022.
- [17] LI L F, AI S Y, LI Y C, et al. Exogenous silicon mediates alleviation of cadmium stress by promoting photosynthetic activity and activities of antioxidative enzymes in rice[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37:602-611.
- [18] XIAO Z X, PENG M, MEI Y C, et al. Effect of organosilicone and mineral silicon fertilizers on chemical forms cadmium and lead in soil and their accumulation in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 283:117107.
- [19] 胡坤, 喻华, 冯文强, 等. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8):2341-2348. HU K, YU H, FENG W Q, et al. Effects of secondary, micro-and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8):2341-2348.
- [20] 王艳红, 艾绍英, 唐明灯, 等. 一种降低水稻稻米Cd含量的营养型阻控剂及其使用方法:201510532910.9[P]. 2017-10-10. WANG Y H, AI S Y, TANG M D, et al. A nutria-amendment for reducing rice Cd concentrations and its applying methods: 201510532910.9 [P]. 2017-10-10.
- [21] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018. Ministry of Ecology and Environment of PRC, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality: risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [22] 王艳红, 李林峰, 唐明灯, 等. 不同钝化剂对降低水稻糙米Cd积累及土壤性状的影响[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(9):974-978. WANG Y H, LI L F, TANG M D, et al. Effects of different amendments on reducing Cd accumulation in brown rice and soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(9):974-978.
- [23] 李奇, 王艳红, 李义纯, 等. 不同类型调理剂对镉污染土壤修复效果和微生物群落的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(7):1855-1866. LI Q, WANG Y H, LI Y C, et al. Effects of the different types of conditioners on remediation and microbial community in Cd-contaminated soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(7):1855-1866.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:农业科技出版社, 1999. LU R K. Soil and agro-chemical analysis methods[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [25] 唐明灯, 李盟军, 王艳红, 等. 猪场废弃物对Cd超标土壤生菜生长及Cd含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):558-564. TANG M D, LI M J, WANG Y H, et al. Effects of pig farm wastes on growth and Cd concentrations of lettuce grown in a cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):558-564.
- [26] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中污染物的限量:GB 2762—2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022. National Health and Family Planning Commission of PRC, China Food and Drug Administration. Maximum levels of contaminants in foods: GB 2762—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [27] 付玉豪, 李凤梅, 郭书海, 等. 沈阳张士灌区彰驿站镇土壤与水稻植株镉污染分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7):1965-1972. FU Y H, LI F M, GUO S H, et al. Cadmium pollution in soil and rice plants in Zhangyizhan Town of Zhangshi irrigation area of Shenyang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7):1965-1972.
- [28] 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 等. 改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7):3331-3338. LI Y C, WANG Y H, TANG M D, et al. Effects of an amendment on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7):3331-3338.
- [29] 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. LI C, AI S Y, TANG M D, et al. Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11):2143-2154.
- [30] 张上都, 伍祥, 彭菊, 等. 贵州省水稻耕种区主栽品种镉积累特征分析及低镉积累品种的筛选[J]. 种子, 2021, 40(11):15-21. ZHANG S D, WU X, PENG J, et al. Analysis on cadmium accumulation characteristics of main varieties and screening of varieties with low cadmium accumulation in rice cultivation area of Guizhou Province[J]. *Seeds*, 2021, 40(11):15-21.
- [31] 李翔, 杨驰浩, 刘晔, 等. 钝化剂对农田土壤Cd有效性及不同水稻品种吸收Cd的研究[J]. 环境工程, 2021, 39(9):211-216. LI X, YANG C H, LIU Y, et al. Effect of passivators on Cd availability in

- farmland soil and Cd uptake by different rice varieties[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(9):211–216.
- [32] SAKAN S, POPOVIĆ A, ŠKRIVANJ S, et al. Comparison of single extraction procedures and the application of an index for the assessment of heavy metal bioavailability in river sediments[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(21):21485–21500.
- [33] BAKIRCIOGLU D, BAKIRCIOGLU Y, HILMILBAR K. Comparison of extraction procedures for assessing soil metal bioavailability of wheat grains[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2011, 39(8):728–734.
- [34] 曹胜, 周卫军, 周雨舟, 等. 硅钙镁土壤调理剂对酸性镉污染土壤及稻米的降镉效果[J]. 河南农业科学, 2017, 46(12):54–58. CAO S, ZHOU W J, ZHOU Y Z, et al. The cadmium reduction effect of silicon calcium magnesium soil conditioner on acid cadmium polluted soil and rice[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(12):54–58.
- [35] 王剑, 杨婷婷, 朱有为, 等. 田间条件下施用石灰石及调理剂降低土壤镉可提取性的效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4):334–340. WANG J, YANG T T, ZHU Y W, et al. Effect of limestone and conditioner on reducing soil Cd extractability under field conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4):334–340.
- [36] 范晶晶, 许超, 王辉, 等. 3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10):2143–2150. FAN J J, XU C, WANG H, et al. Effects of three organic materials on the availability of cadmium in soil and cadmium accumulation and translocation in rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2143–2150.
- [37] CAI Y, LIN L, CHENG W, et al. Genotypic dependent effect of exogenous glutathione on Cd-induced changes in cadmium and mineral uptake and accumulation in rice seedlings (*Oryza sativa*)[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2010, 56(11):516–525.
- [38] SOLTÍ Á, SÁRVÁRIÉ, TÓTH B, et al. Cd affects the translocation of some metals either Fe-like or Ca-like way in poplar[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2011, 49(5):494–498.
- [39] TREESUBSUNTORN C, THIRAVETTYAN P. Calcium acetate-induced reduction of cadmium accumulation in *Oryza sativa*: expression of auto-inhibited calcium-ATPase and cadmium transporters[J]. *Plant Biology*, 2019, 21:862–872.
- [40] MA C, CI K, ZHU J, et al. Impacts of exogenous mineral silicon on cadmium migration and transformation in the soil-rice system and on soil health[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 759:143501.
- [41] SHAO J F, CHE J, YAMAJI N, et al. Silicon reduces cadmium accumulation by suppressing expression of transporter genes involved in cadmium uptake and translocation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(20):5641–5651.
- [42] KUDO H, HUDO K, UEMURA M, et al. Magnesium inhibits cadmium translocation from roots to shoots, rather than the uptake from roots in barley[J]. *Botany*, 2015, 93:345–351.