

三种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响

龙思斯¹, 杨益新², 宋正国³, 雷 鸣^{1*}, 杨 勇^{1,4}, 蒋宏芳⁴, 喻 理¹, 沈 跃³, 周 爽¹

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南省湘阴县农业局, 湖南 岳阳 416000; 3. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 4. 湖南安邦新农业科技股份有限公司/湖南省安邦农业研究院, 湖南 衡阳 421200)

摘 要: 如何降低水稻中镉(Cd)的含量已经成为一个研究热点。在湖南省衡阳县某地受轻度镉污染的农田上种植两季水稻(早稻、晚稻), 随机采购市场上销售的阻控剂(石灰、硅肥和叶面锌肥), 研究这3种类型阻控剂对水稻富集镉及稻谷中镉含量的影响, 这3种类型的阻控剂的施用方式是石灰和硅肥作为基肥施于土壤, 叶面锌肥通过叶面喷施。结果表明: 与没有施加阻控剂相比, 除石灰和晚稻稻处理之外, 其他处理增产效果显著。在3种类型的阻控剂中, 叶面锌肥对籽实富集镉的阻控效果最佳, 分别使早稻Y 俩优792和晚稻农香130降低了51.28%和50.92%, 基施硅肥阻镉效果次之。田间试验结果进一步表明施硅肥和喷施叶面锌肥可作为当地的水稻镉污染阻控剂, 但叶面锌肥与稻谷中镉的交互作用需要更深入的探讨。

关键词: 水稻; Cd; 石灰; 硅肥; 叶面锌肥; 富集

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2016)05-0459-07

doi: 10.13254/j.jare.2016.0043

引用格式:

龙思斯, 杨益新, 宋正国, 等. 三种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5):459-465.

LONG Si-si, YANG Yi-xin, SONG Zheng-guo, 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.

Effects of Three Inhibitors on the Accumulation of Cadmium in Rice(*Oryza sativa* L.)

LONG Si-si¹, YANG Yi-xin², SONG Zheng-guo³, LEI Ming^{1*}, YANG Yong^{1,4}, JIANG Hong-fang⁴, YU Li¹, SHEN Yue³, ZHOU Shuang¹

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Bureau of Xiangyin County Agriculture of Hunan Province, Yueyang 416000, China; 3. Institute of Environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 4. Hunan Anbang New Agricultural Science and Technology Co LTD, Hunan Anbang Academy of Agricultural Sciences, Hengyang 421200, China)

Abstract: How to control cadmium(Cd) pollution in rice grain has become a hot research issue. The effects of the three amendments such as lime, silicon fertilizer and zinc foliar fertilizer from local market on the accumulation Cd in rice grain including early rice and later rice growth in one Cd-contaminated field in Hengyang County, Hunan Province were studied. Among the three treatments, the silicon fertilizer and lime were applied into soil, and the zinc fertilizer was sprayed on the leaf of rice plant. The results showed that, except lime and zinc fertilizer(late rice), in comparison to nonamendment, the output of early rice and late rice increased with increasing of the other types of resistances. Among three kinds of resistances, the zinc foliar fertilizer had significant impacts on decreasing Cd in edible grains, in which Cd concentrations of early rice(Y-liangyou 792) and late rice(Nongxiang130) reduced by 51.28% and 50.92%, respectively, followed by silicon fertilizer. The present study demonstrated that the silicon fertilizer and zinc foliar fertilizer would be used as resistances for remediation Cd-polluted rice plant, moreover, the relationship between Zn and Cd in rice-soil would need further studied.

Keywords: rice plant; cadmium; lime; silicon fertilizer; zinc foliar fertilizer; accumulation

收稿日期: 2016-02-17

基金项目: 国家“863”项目子课题(2012AA10404-5); 湖南省安邦农业研究院资助项目

作者简介: 龙思斯(1991—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 研究方向为环境污染修复与治理。E-mail: 358719093@qq.com

* 通信作者: 雷 鸣 E-mail: leiming8297@163.com

重金属镉(Cd)是我国耕地土壤主要的无机污染物。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》指出在所有土壤污染物中,Cd 的超标率为 7.0%^[1]。无论浓度高低,土壤中的 Cd 易被水稻吸收并富集在稻米,导致稻米中 Cd 含量超过国家食品卫生标准值。2013 年据报道,沈阳、广东、湖南、湖北和山西等地均出现“Cd 米”问题,其中南方部分地区农产品中 Cd 含量超标大米占 10 %以上^[2]。如果人们长期食用 Cd 含量超标的食品,将严重影响人体健康,如日本的“痛痛病”就是典型病例。为了降低稻米中 Cd 的风险,许多学者开展如何阻控土壤中 Cd 的迁移和降低大米中 Cd 含量的研究^[3-11],但是由于土壤 Cd 具有不能被微生物降解、累积性、持久性和难移动性等特点,以及农田土壤不能轻易改变使用性质,在现阶段土壤 Cd 含量没有彻底消除和大幅度降低的情况下,添加原位阻控剂来阻控土壤中重金属迁移的措施得到大家的认可而被广泛推广^[3-5],如王林等^[4]通过田间试验证明原位阻控剂能显著降低糙米中的 Cd 和 Pb 含量。朱雁鸣等^[5]通过盆栽实验,研究添加阻控剂能够降低大豆苗富集重金属含量。此外,石灰^[4, 6-7]、硅肥^[8-10]和喷施叶面肥^[11]等也是备受关注,但是究竟它们之间对降低稻米中 Cd 含量的效果如何,还鲜有报道。本研究随机在市场购买 3 种常用的阻控剂,于 2014 年在衡阳某受到 Cd 轻度污染的农田进行大田试验,比较研究 3 种阻控剂对水稻吸收 Cd 的抑制效果,为有效解决农田土壤 Cd 污染和食品安全问题提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验田块

试验地点位于湖省衡阳市衡阳县的农田,其周围曾有化工厂、水泥厂和陶瓷厂等,农田已受到一定的污染。试验实施之前,按照梅花法采集农田土壤样品,经自然风干后,磨细过 100 目尼龙筛,存储于密封袋内备用。采用电位法(水土比为 2.5:1)^[12]测定土壤 pH

值,土壤重金属 Cd 采用王水($\text{HNO}_3\text{:HCl}=3\text{:}1$)+高氯酸消化法消煮,同时用土壤国家标准参比物质(GSS-5)和空白样进行分析质量控制,土壤有机质、全氮和全钾含量按照《土壤农业化学分析》方法进行分析^[12]。土壤重金属元素分析用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国 Varian)测定。试验农田土壤的平均 pH=6.72,Cd 的含量为 $0.353 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $8.46 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N 含量为 $0.302 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 K 含量为 $10.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 水稻品种和阻控剂

供试水稻品名为早稻 Y 两优 792 和晚稻农香 130(杂交稻,全生育期 114 d),秧苗由衡阳安邦农业科技有限公司试验基地提供。供试的石灰、硅肥和叶面锌肥的基本情况见表 1。

1.3 试验设计

试验设计方案设 4 个处理:空白对照(CK),石灰处理(SH),基施硅肥处理(GF),喷施叶面锌肥处理(YX),每个处理重复 3 次,随机分布,共 12 个小区。每个小区面积 20.0 m^2 ,小区之间用田埂隔开,具体试验处理方案见表 2。石灰在水稻种植前 3 d 撒施于土表,并与表层土壤混匀;叶面锌肥分别在水稻分蘖期、抽穗期和乳熟期按照要求进行喷施,喷液量以作物叶片正背面沾满雾滴为宜。农田基肥为掺混肥料:N-P₂O₅-K₂O=25-12-14,共施加 50 kg,灌溉水以当地的稻田管理措施进行管理。试验设计两季水稻连作,时间为 2014 年 5—10 月,其中早稻时间为 2014 年 5 月 8 日—7 月 17 日,晚稻时间为 2014 年 8 月 2 日—10 月 22 日。

1.4 分析测定

植株样品于每季水稻收获期进行采集,每个小区随机取 3 株。采集后,用自来水洗净泥土,分为根、茎、叶和籽实。将籽实样品置于室外阳光下晒干,其他部位样品皆装入 A4 信封袋编号后置于 102 ℃烘箱内杀青 2 h,再调至 65 ℃烘至恒重。水稻的根、茎、叶用植物粉碎机粉碎后,装入密封袋保存待用。植株样品

表 1 阻控剂的基本情况

Table 1 Basic situation of inhibitors

抑制剂	生产厂家	总 Cd/mg·kg ⁻¹	有效 Cd/mg·kg ⁻¹
石灰	邵东县界岭乡海乐石灰厂	—	—
基施硅肥	北京亚科丰肥业有限公司	0.571±0.02	0.024±0.001
叶面锌肥	原厂家用于基础配比的分析纯 ZnSO ₄	—	—
肥料标准	GB/T 23349—2009	≤0.001 0%	

注:“—”为未检测出。

表 2 试验处理
Table 2 Each treatments of the experiment

处理	具体操作流程
CK	不施加任何阻控剂
GF	水稻移栽前 3 d 基施亚科丰肥业有限公司生产的硅钙镁钾肥(有效元素硅≥30%,CaO≥20% ,K ₂ O≥5%,MgO≥10%), 用量为 100 kg·667 m ² ,折合为 3.0 kg·小区 ⁻¹
SH	水稻移栽前 3 d 基施邵东县界岭乡海乐石灰厂石灰,用量为 100 kg·667 m ² ,折合为 3.0 kg·小区 ⁻¹
YX	于水稻分蘖期、抽穗期和乳熟期分别喷施 1 次叶面锌肥,剂量为 1.0 g·小区 ⁻¹

(根、茎、叶、谷壳和糙米)采用混合酸硝酸-高氯酸(体积比为 4:1)消化法消煮,同时用植物国家标准参比物质[灌木枝叶 GBW07603(GSV-2)、大米植物国家标准参比物质 GBW10010(GSB-1)]和空白样进行分析质量控制。分析过程中所用试剂均为优级纯。Cd 全量测定采用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国 Varian)测定。

1.5 数据处理

本研究利用 Microsoft Excel 2003 进行均值、标准差计算和作图,利用 SPSS(Statistical Product and Service Solutions, 18.0)的 ANOVA 模块(LSD 法,α=0.05)试验处理进行方差分析和均值比较。

2 结果与讨论

2.1 土壤和阻控剂中 Cd 的含量

土壤中 Cd 的含量为 0.353±0.02 mg·kg⁻¹,与国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995,0.3 mg·kg⁻¹)相比,实验区稻田土壤属于轻度 Cd 污染区。此外,由表 1 和表 2 可知,中国肥料标准(GB/T 23349—2009)中重金属 Cd 的指标为≤0.001 0%,本供试硅肥中总 Cd 含量为 0.571±0.02 mg·kg⁻¹,表明在市场购买的硅肥符合国家的农用标准,但它的长期施用是否会对农田土壤和水稻富集 Cd 存在风险有待商榷。王起超等^[13]研究表明,绝大多数化肥中 Cu、Pb、Zn、Cd 不超过土壤环境质量二级标准,但个别复合肥料中 Hg 和 Zn 含量过高,具有一定的环境风险。但是王美等^[14]认

为施用化肥对农作物重金属富集的影响不明确,而施用有机肥可提高作物可食部位 Cu、Pb、Zn、Cd 的含量。

2.2 阻控剂对水稻产量的影响

由表 3 可知,与 CK 相比,除了早稻 SH 处理和晚稻的 SH、YX 处理外,其他处理下的供试水稻产量都有不同程度的提高,其增幅为 16.81%~32.39%,差异显著($P<0.05$)。在本试验条件下,产量最高的是 GF,较对照增产了 32.39%。这是由于水稻是典型的喜硅植物,硅肥的施加能够增加水稻植株对硅的吸收和利用^[15]。随着硅元素进入水稻叶片,增加叶绿素的含量^[16],从而通过提高叶片光合能力来促进水稻的生长发育。石灰对水稻产量无显著影响,但也有研究表明^[17-18]过量的施用石灰能使土壤质地日趋黏重,导致土壤氮元素的缺失。而氮的吸收量与水稻产量显著正相关,最终可能限制水稻的增产。锌能提高水稻成穗率、结实率和千粒重^[19],从而促使水稻增产。本实验叶面锌肥对稻谷的产量均有促进作用,宋科等^[20]研究也表明锌肥处理能显著提高水稻产量,增产率达到 10%以上。

2.3 阻控剂对成熟期水稻植株中 Cd 含量的影响

对早稻 Y 俩优 792 和晚稻农香 130 成熟期各部位的 Cd 含量进行处理间多重比较分析,结果见表 4。由表 4 可知,无论是否施加阻控剂,水稻根系都可吸收和累积大量的 Cd,而水稻的茎叶储存的 Cd 相对较少。土壤中的 Cd 离子通过根的表皮细胞空隙以及根

表 3 3 种处理对早稻和晚稻产量的影响
Table 3 Impact of treatments on the yields of early rice and late rice

处理 Treatments	早稻 Early rice		晚稻 Late rice	
	产量 Output/kg·667 m ²	相对值 Relative value/%	产量 Output/kg·667 m ²	相对值 Relative value/%
CK	289.14±7.11c	100.00	264.65±3.36b	100.00
GF	427.63±1.34a	132.39	340.02±22.8a	122.17
SH	303.07±0.89c	104.61	269.77±0.99b	101.90
YX	347.53±6.57b	116.81	299.89±3.67ab	111.04

注:同列不同字母代表处理间差异显著性($P<0.05$)。下同。

表 4 早稻和晚稻各器官中 Cd 的含量

Table 4 Cd contents in organs at early rice and late rice

水稻	处理 Treatments	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf		籽实 Edible grains	
		含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	降幅/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	降幅/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	降幅/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	降幅/%
早稻 Early rice	CK	1.00±0.14a		0.14±0.03a		0.08±0.01a		0.039±0.002a	
	GF	0.53±0.05c	47.50	0.10±0.01b	28.57	0.05±0.00c	37.50	0.023±0.003b	41.03
	SH	0.45±0.06c	55.58	0.07±0.01c	50.67	0.06±0.00b	25.02	0.024±0.004b	38.46
	YX	0.89±0.06b	11.48	0.11±0.03b	21.42	0.05±0.01c	37.00	0.019±0.001c	51.28
晚稻 Late rice	CK	0.45±0.04a		0.11±0.02a		0.09±0.01a		0.016±0.001a	
	GF	0.29±0.01bc	35.56	0.06±0.00c	45.87	0.05±0.00c	44.44	0.009±0.000b	43.75
	SH	0.25±0.03c	44.48	0.06±0.01c	40.60	0.06±0.00b	33.51	0.009±0.001bc	40.37
	YX	0.34±0.02b	24.98	0.07±0.00b	36.89	0.08±0.00a	11.60	0.008±0.0001c	50.92

表皮细胞膜上的运输蛋白进入细胞内,水稻地下部分的根系直接接触土壤,是最容易吸收和积累 Cd 的器官;茎部连接着地下部分和地上部分,向叶片及以上运输着根部积累的物质。叶片是进行光合作用和蒸腾作用的主要器官,也是水稻籽实营养的重要供给者,其从茎部和外界接触的 Cd 对籽实的 Cd 积累有密切关系。由早晚稻籽实中 Cd 含量可知,Cd 越往上迁移含量越少,一般是新陈代谢旺盛的器官的富集量高于营养贮藏器官中的富集量^[21]。因此,在一般情况下,Cd 在水稻植株的分布是:根>茎>叶>籽实。

由表 4 早稻各部位 Cd 含量可知,与对照相比,3 种阻控剂对水稻根茎叶吸收 Cd 具有一定抑制作用。根部 Cd 含量变化范围为 0.452~1.003 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;茎部中 Cd 的含量变化范围为 0.064~0.137 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;叶部中 Cd 含量变化范围为 0.045~0.081 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;籽实中 Cd 含量变化范围为 0.019~0.039 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中,GF 和 SH 对水稻根茎叶和籽实中 Cd 含量作用明显,而 YX 处理下的根部 Cd 含量无显著变化。根部 Cd 含量大小关系为 CK>YX>GF≈SH(“>”代表差异显著($P<0.05$),“≈”代表差异不显著,下同。);茎部 Cd 含量大小关系为 CK>YX≈GF>SH;叶部 Cd 含量大小关系为 CK>SH>YX≈GF;籽实 Cd 含量大小关系为 CK>SH≈GF>YX。

由表 4 晚稻各部位 Cd 含量可知,与对照相比,3 种阻控剂对水稻根茎叶吸收 Cd 有一定抑制作用。根部 Cd 含量变化范围为 0.295~0.453 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;茎部中 Cd 的含量变化范围为 0.062~0.107 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;叶部中 Cd 含量变化范围为 0.051~0.088 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;籽实中 Cd 含量变化范围为 0.008~0.014 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中,GF 和 SH 对水稻根茎叶和籽实中 Cd 含量作用明显,而 YX 处理下的根部 Cd 含量无显著变化。根部 Cd 含量大小

关系为 CK>YX≈GF≈SH;茎部 Cd 含量大小关系为 CK>YX>SH>GF;叶部 Cd 含量大小关系为 CK≈YX>SH>GF;籽实中 Cd 含量大小关系为 CK>GF≈SH≈YX。

因此,施硅肥和石灰、喷施锌肥都能显著降低水稻各部位 Cd 含量,其中石灰降低水稻根部 Cd 含量效果最好,这是由于石灰一方面调节土壤 pH 值,另外一方面由于其主要的成分为钙的化合物,对土壤中 Cd 离子起到较好的固化作用,可以大大减少水稻根系对 Cd 的吸收积累^[7]。基施硅肥降低水稻茎部和叶部 Cd 含量效果最好,且晚稻时期对降低籽实 Cd 含量与叶面锌肥的效果无显著差异。基施硅肥后,除了能提高土壤 pH 值,降低 Cd 活性^[22]外,硅还能与重金属形成共沉淀,沉积在土壤和根系表面^[23]。也有研究显示^[3],硅在水稻地上部分的积累能阻止 Cd 的质外体运输途径,减少水稻地上部分 Cd 的沉积,最终降低稻米中 Cd 的含量;另外,基施硅肥是多元素的混合肥料,其中含有的有效钾、有效钙和有效镁等微量元素均对 Cd 有一定拮抗作用。叶面锌肥对降低籽实 Cd 含量处理效果最好,但对晚稻叶部的作用效果存在差异。本实验喷施叶面锌肥对水稻根部作用不明显,说明叶面喷施锌肥后锌元素极少向地下迁移,从而对地下部分的 Cd 没有明显的作用效果。有研究表明^[24-25],叶面锌肥对降低水稻叶片 Cd 含量的作用是由锌镉共用亲和性质膜转运蛋白所产生的 Zn/Cd 拮抗作用,从而阻控了早稻(Y 俩优 792)茎部和叶部 Cd 向上的迁移;而对晚稻(农香 130)叶片中 Cd 富集起到促进作用,且高于茎部,这与索炎炎等^[26]的试验研究有一定相似之处。水稻中锌元素含量存在显著的基因型差异^[24],最终对水稻中 Cd 的分布影响也会存在差异。且 Adiloglu^[27]研究证明施用锌肥可以降低

谷类作物中 Cd 积累,竞争 Cd 在细胞上的结合位点,而在缺锌土壤上锌肥的施用却导致 Cd 的含量增加,说明植物对 Cd 和锌之间的吸收极易发生改变。本实验 2 个品种在相同的叶面锌肥浓度下表现的锌镉交互作用也不同,锌在水稻植株中与 Cd 的作用体现的拮抗和协同并没有一致的结论。

2.4 阻控剂对水稻地上部分 Cd 的转运系数的影响

Cd 在水稻籽实中的富集不仅仅与土壤中 Cd 含量相关,也依赖于各个器官对 Cd 的转运能力。转运系数是植物上部某元素质量分数与植物下部某元素质量分数之比,用来评价植物将重金属从下部向上部的迁移能力^[3,28],也常用来作为筛选最佳阻控剂的施用量的指标。水稻下部与上部 Cd 的转运系数越小,说明 Cd 越容易被固定在植株下部中,转运到植株上部中的 Cd 越少^[29];同理,籽实与叶部 Cd 转运系数越小,Cd 进入食物链的可能性就越低。本研究中早稻和晚稻中 Cd 的转运系数如表 5 所示。从表 5 可看出,早稻中 Cd 转运系数普遍规律是(茎:根)<(籽实:叶)<(叶:茎),晚稻的转运系数普遍规律是(籽实:叶)<(茎:根)<(叶:茎)。根到茎的转运系数范围为 0.127~0.260,表明地下部分向地上部分输送能力非常弱;茎到叶的转运系数范围为 0.399~1.197;叶到籽实的转运系数为 0.114~0.486。其中,叶:茎转运系数最大,说明水稻茎部 Cd 极易迁移至叶部。文志琦等^[30]研究证明水稻吸收的 Cd 主要集中在根系和叶片中,是 Cd 主要的储存器官,且通过分析赵步洪等^[31]研究中不同部位茎叶 Cd 浓度发现,基部叶的 Cd 含量显著大于茎部的倒一节间。因此,特定情况下,叶部的 Cd 含量是极可能大于茎部的。

石灰与对照的转运系数相差相对不大,说明石灰对水稻植株内部的 Cd 迁移影响不大。与 CK 相比,基施硅肥在水稻各部位转运中都有一定抑制作用,史新慧等^[32]研究表明水稻叶片中含有一种能参与控制水稻内部硅沉积的结合蛋白,说明在该品种下沉积的硅能与 Cd 发生沉淀反应或区室化效应或分解与有机

酸结合在液泡中^[33],最终将 Cd 滞留在运输途径中,降低其向上的转运系数。叶面锌肥各部位转运系数相对其他处理最低,说明其与 Cd 的拮抗作用明显,但在晚稻(叶:茎)中却表现出促进作用,运输系数远远大于 CK 值,且>1。说明在晚稻(农香 130)中叶面锌肥处理下茎部向叶部的迁移能力相对较强,而其向籽实中的迁移能力相对减弱,表明叶面锌肥处理下锌镉拮抗作用更能使 Cd 积累在叶部。

3 结论

(1)从水稻产量来看,除石灰之外,其他阻控剂对稻谷产量有一定促进作用,增产范围为 16.81%~32.39%,其中施硅肥能明显提高稻谷的产量。

(2)3 种阻控剂均能显著降低早晚稻植株中 Cd 的含量。其中以石灰和硅肥对根部 Cd 积累的阻控效果最好,分别降低了早稻根部 Cd 含量 55.58 %、44.48 %和晚稻根部 Cd 含量 47.50 %、35.56 %;基施硅肥对降低叶中 Cd 含量作用显著,分别降低了早稻叶部 37.50 %和晚稻叶部 44.44 %;叶面锌肥对阻控籽实富集 Cd 贡献最大,分别降低了早稻籽实 51.28 %和晚稻籽实 50.92 %,硅肥次之。

(3)水稻植株内各部位间的转运系数在 0.114~1.197 之间,叶:茎转运系数最大,说明水稻叶部也是 Cd 的主要存储器官,具有富集 Cd 的潜力。

(4)叶面锌肥的作用主要集中在水稻的叶部,对籽实积累 Cd 的阻控效果最好。从农业发展来看,叶面锌肥成本低,但其与 Cd 交互作用的复杂性仍需进一步的探讨,施加硅肥是目前最理想的阻控技术。

参考文献:

[1] 王玉军,刘 存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.
WANG Yu-jun, LIU Cun, ZHOU Dong-mei, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: Discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general

表 5 水稻中 Cd 的转运系数
Table 5 Transfer coefficient of cadmium in rice organs

处理 Treatments	早稻中 Cd 的转运系数 Transfer coefficient of early rice			晚稻中 Cd 的转运系数 Transfer coefficient of late rice		
	茎:根 Stem:Root	叶:茎 Leaf:Stem	籽实:叶 Edible grains:Leaf	茎:根 Stem:Root	叶:茎 Leaf:Stem	籽实:叶 Edible grains:Leaf
CK	0.137	0.600	0.486	0.242	0.828	0.187
GF	0.133	0.514	0.456	0.213	0.809	0.175
SH	0.137	0.598	0.408	0.260	0.815	0.165
YX	0.127	0.399	0.420	0.175	1.197	0.114

- survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1465-1473. (in Chinese)
- [2] 徐晟徽, 郭书海, 胡筱敏, 等. 沈阳张士灌区重金属污染再评价及镉的形态分析[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2144-2148.
- XU Sheng-hui, GUO Shu-hai, HU Xiao-min, et al. Revaluation of soil heavy metals pollution in Zhangshi irrigation area of Shenyang and analysis of Cd forms in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2144-2148. (in Chinese)
- [3] 陈 喆, 铁柏清, 雷 鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2762-2770.
- CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2762-2770. (in Chinese)
- [4] 王 林, 徐应明, 梁学峰, 等. 广西刁江流域 Cd 和 Pb 复合污染稻田土壤的钝化修复[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(5): 563-568.
- WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Remediation of contaminated paddy soil by immobilization of pollutants in the Diaojiang Catchment, Guangxi Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(5): 563-568. (in Chinese)
- [5] 朱雁鸣, 韦朝阳, 冯人伟, 等. 三种添加剂对矿冶区多种重金属污染土壤的修复效果评估——大豆苗期盆栽实验 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1277-1284.
- ZHU Yan-ming, WEI Chao-yang, FENG Ren-wei, et al. Assessment of three chemical additives for remediation of heavy metal contaminated soils from mining and smelting areas: A seedling pot trial using soybeans [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1277-1284. (in Chinese)
- [6] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 514-519.
- DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, CAO Ying-fei, et al. Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soils with different properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 514-519. (in Chinese)
- [7] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 1164-1170.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Effects and mechanism of alkaline wastes application and zinc fertilizer addition on Cd bioavailability in contaminated soil[J]. *Environment Science*, 2011, 32(4): 1164-1170. (in Chinese)
- [8] 李艳利, 王厚鑫, 张玉龙, 等. 外源硅对土壤镉吸附特性的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 446-448.
- LI Yan-li, WANG Hou-xin, ZHANG Yu-long, et al. Influence of silicon on the adsorption characteristics of cadmium in soils[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 446-448. (in Chinese)
- [9] 孙 岩, 韩 颖, 李 军, 等. 硅对镉胁迫下水稻生物量及镉的化学形态的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(3): 1240-1244.
- SUN Yan, HAN Ying, LI Jun, et al. Effect of Si on rice biomass and chemical species of Cd under Cd stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(3): 1240-1244. (in Chinese)
- [10] 文晓慧, 蔡昆争, 葛少彬, 等. 硅对镉和锌复合胁迫下水稻幼苗生长及重金属吸收的影响[J]. *华北农学报*, 2011, 26(5): 153-158.
- WEN Xiao-hui, CAI Kun-zheng, GE Shao-bin, et al. Effects of silicon on plant growth and heavy metal absorption in rice seedlings under Cd and Zn stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2011, 26(5): 153-158. (in Chinese)
- [11] 汤海涛, 李卫东, 孙玉桃, 等. 不同叶面肥对轻度重金属污染稻田水稻重金属积累调控效果研究[J]. *湖南农业科学*, 2013(1): 40-44.
- TANG Hai-tao, LI Wei-dong, SUN Yu-tao, et al. Controlling effects of different foliar fertilizers on heavy metal accumulation in rice plant in mild heavy metal polluted paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(1): 40-44. (in Chinese)
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 474-490.
- LU Ru-kun. Analysis of soil agricultural chemical[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000: 474-490. (in Chinese)
- [13] 王超起, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. *农村生态环境*, 2004, 20(2): 62-64.
- WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2): 62-64. (in Chinese)
- [14] 王 美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 466-480.
- WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480. (in Chinese)
- [15] 杨 丹, 张玉龙, 杨东伟, 等. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 II. 对水稻吸收硅素及产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 764-767.
- YANG Dan, ZHANG Yu-long, YANG Dong-wei, et al. Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils II. Effect on silicon uptake and yield of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4): 764-767. (in Chinese)
- [16] Seebold K W, Kucharek T A, Datnoff L E, et al. The Influence of silicon on components of resistance to blast in susceptible, partially resistant, and resistant cultivars of rice[J]. *Physiopathology*, 2001, 91(1): 63-69.
- [17] Keisuke K, Midori O, Hiroaki M, et al. Radiation use efficiency, N accumulation and biomass production of high-yielding rice in aerobic culture[J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(1): 81-89.
- [18] 于天一, 逢焕成, 唐海明, 等. 不同母质发育的土壤对双季稻产量及养分吸收特性的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(5): 896-904.
- YU Tian-yi, FANG Huan-cheng, TANG Hai-ming, et al. Effects of paddy soils from different parent materials on yield and nutrient uptake characteristics of double-cropping rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(5): 896-904. (in Chinese)
- [19] 张 宇, 彭显龙, 罗盛国, 等. 施锌对寒地水稻返青和产量的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(2): 437-441.
- ZHANG Yu, PENG Xian-long, LUO Sheng-guo, et al. Effects of zinc application on returning green and yield of rice in cold area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 437-441. (in Chinese)

- [20] 宋 科,姚 政,徐四新,等. 锌肥对崇明水稻的增产效果研究[J]. 上海农业学报, 2011, 27(2): 63–66.
SONG Ke, YAO Zheng, XU Si-xin, et al. Study the effects zinc fertilizer on rice yield in Chongming Country[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2011, 27(2): 63–66. (in Chinese)
- [21] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Uptake subcellular distribution, and chemical forms of cadmium in wild-type and mutant rice[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 371–377.
- [22] Wang L J, Wang Y H, Chen Q, et al. Silicon induced cadmium tolerance of rice *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(10): 1397–1406.
- [23] 黄 涓,纪雄辉,谢运河,等. 镉污染稻田施用钾硅肥对杂交晚稻吸收积累镉的影响[J]. 杂交水稻, 2014, 29(6): 73–77.
HUANG Juan, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Effects of potassium-silicon fertilizer on Cd uptake and accumulation of late hybrid rice in Cd contaminated soil[J]. *Hybrid Rice*, 2014, 29(6): 73–77. (in Chinese)
- [24] 虞银江,廖海兵,陈文荣,等. 水稻吸收、运输锌及其籽粒富集锌的机制[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(3): 365–373.
YU Yin-jiang, LIAO Hai-bing, CHEN Wen-rong, et al. Mechanism of Zn uptake, translocation in rice plant and Zn-enrichment in rice grain [J]. *Chin Rice Sci*, 2012, 26(3): 365–373. (in Chinese)
- [25] 周 坤,刘 俊,徐卫红,等. 外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1592–1599.
ZHOU Kun, LIU Jun, XU Wei-hong, et al. Effect of exogenous zinc on activity of antioxidant enzyme, accumulation and chemical forms of cadmium in different varieties of tomato[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1592–1599. (in Chinese)
- [26] 索炎炎,吴士文,朱骏杰,等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(4): 449–458.
SUO Yan-yan, WU Shi-wen, ZHU Jun-jie, et al. Effects of foliar Zn application on rice yield and element contents under different Cd levels [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2012, 38(4): 449–458. (in Chinese)
- [27] Adiloglu A. The effect of zinc (Zn) application on uptake of cadmium (Cd) in some cereal species[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2002, 48(6): 553–556.
- [28] 杨惟薇,刘 敏,曹美珠,等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(6): 774–779.
YANG Wei-wei, LIU Min, CAO Mei-zhu, et al. Accumulation and transfer of lead (Pb) and cadmium (Cd) on different species of maize[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6): 774–779. (in Chinese)
- [29] 陈京都,何 理,林忠成,等. 不同生育期类型水稻对镉积累的研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 390–393.
CHEN Jing-du, HE Li, LIN Zhong-cheng, et al. Cd accumulation in japonica rice relative to growth type[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(3): 390–393. (in Chinese)
- [30] 文志琦,赵艳玲,崔冠男,等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1280–1286.
WEN Zhi-qi, ZHAO Yan-ling, CUI Guan-nan, et al. Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1280–1286. (in Chinese)
- [31] 赵步洪,张洪熙,奚岭林,等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 306–312.
ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice [J]. *Chinese J Rice Sci*, 2006, 20(3): 306–312. (in Chinese)
- [32] 史新慧,王 贺,张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1112–1126.
SHI Xin-hui, WANG He, ZHANG Fu-suo, et al. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1112–1126. (in Chinese)
- [33] Neumann D, Zur Nieden U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Phytochemistry*, 2001, 56(7): 658–692.