

张 淼, 叶长城, 喻 理, 等. 矿物硅肥与微生物菌剂对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 627-633.

ZHANG Miao, YE Chang-cheng, YU Li, et al. Effects of mineral silicon fertilizer and microbial agent on uptake and accumulation of cadmium by rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 627-633.

矿物硅肥与微生物菌剂对水稻吸收积累镉的影响

张 淼, 叶长城, 喻 理, 彭 鸥, 张 燕, 许 蒙, 陈 喆, 铁柏清*

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要:采用室外盆栽试验和田间随机区组试验相结合的方法,研究基施矿物硅肥、微生物菌剂、矿物硅肥与微生物菌剂组配施用,对湖南地区晚稻成熟期内各部位中 Cd 的含量及产量的影响。结果表明,在盆栽试验中,与 CK 相比,微生物菌剂处理对水稻根部、茎鞘、谷壳和糙米中 Cd 含量的抑制效果最佳,降低幅度分别为 46.19%、52.46%、38.39%和 55.31%,而矿物硅肥处理对叶片中 Cd 含量的抑制效果最佳,降低幅度为 54.39%;在田间随机区组试验中,与 CK 相比,矿物硅肥处理对水稻根部、茎鞘和叶片中 Cd 含量的抑制效果最佳,降低幅度分别为 73.91%、71.28%和 76.77%,而微生物菌剂处理对谷壳和糙米中 Cd 含量的抑制效果最佳,降低幅度分别为 65.52%和 69.57%。对于轻度污染土壤,施用三种改良剂后,糙米中 Cd 含量明显降低,分别为 0.09、0.07、0.12 mg·kg⁻¹,均能达到国家食品卫生标准(Cd<0.2 mg·kg⁻¹);水稻产量方面,施用改良剂均能使水稻增产,其中以矿物硅肥+微生物菌剂组配处理的效果最为显著,在盆栽试验和田间随机区组试验中,分别比对照增产 28.06%和 31.1%。

关键词:镉污染;水稻;硅肥;微生物菌剂;配施

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)04-0627-07 doi:10.11654/jaes.2016.04.003

Effects of mineral silicon fertilizer and microbial agent on uptake and accumulation of cadmium by rice

ZHANG Miao, YE Chang-cheng, YU Li, PENG Ou, ZHANG Yan, XU Meng, CHEN Zhe, TIE Bai-qing*

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In pot and field experiments, the effects of base mineral silicon fertilizer and microbial agent alone and in combination on the concentrations of Cd in different parts and the yield of late rice were investigated during maturation period in Hunan region. Results showed that the microbial agent was more effective in reducing Cd accumulation in rice than mineral silicon fertilizer was. The Cd content in roots, leaves, sheaths and chaffs was 46.19%, 52.46%, 38.39% and 52.46% lower in microbial agent treatment than in CK, respectively. The mineral silicon fertilizer was more useful for reducing Cd content in the leaves, with 54.39% Cd reduction compared with CK in the pot experiment. In the field experiment, the mineral silicon fertilizer was the most effective in inhibiting Cd accumulation in roots, leaf sheaths and blades of rice among the three treatments, with a 73.91%, 71.28%, and 76.77% reduction in Cd content as compared with CK, respectively, while in microbial agent treatment the Cd content in chaff and brown rice reduced by 65.52% and 69.57%, respectively, compared with CK. In slightly contaminated soil, three treatments significantly reduced Cd content in brown rice, which was 0.09 mg·kg⁻¹, 0.07 mg·kg⁻¹, and 0.12 mg·kg⁻¹ in silicon fertilizer, microbial agent and their combination, respectively, meeting the national food health standards (Cd<0.2 mg·kg⁻¹). The yields of the rice were significantly increased by three treatments, with greatest yield increase found in combined silicon fertilizer and microbial agent treatment, in which there were 31.1% and 28.06% yield increases in the pot and field experiments, respectively, as compared with the CK.

Keywords: Cd pollution; rice; silicon fertilizers; microbial agents; combined application

收稿日期:2015-11-15

作者简介:张 淼(1990—),女,硕士研究生,研究方向为环境污染治理与修复。E-mail:402310980@qq.com

*通信作者:铁柏清 E-mail:tiebq@qq.com

Cd 是生物生长发育过程的非必需元素,是自然界中对动植物和人体危害性最大的重金属种类之一,也是生物毒性最强的重金属元素^[1-2]。Cd 在较低浓度下便能经由土壤到达植物根部进而迁移至植物地上部^[3],大量积累后会对植物体造成危害,而由于镉的隐蔽性,植物在不影响生长的情况下往往会积累较高浓度的镉,并且通过食物链的富集作用进入人体,危害人体健康^[4],对人体具有三致(致病、致癌、致突变)作用,能诱发肾衰变、关节炎、痛痛病、癌症等病^[5-7]。近年来,随着大气沉降、工业废渣堆积、农田污灌、城市垃圾和污泥的农业化利用及化肥、农药和农膜的大量使用等,使农用土壤受到多种重金属不同程度的污染,尤其是 Cd 在环境中的化学活性强,移动性大,毒性持久,对土壤及农田造成的污染日趋严重^[8-9]。据统计,我国受镉(Cd)污染的耕地面积近 130 万 hm^2 ,涉及 11 个省市的 25 个地区^[10],可见对 Cd 污染的治理迫在眉睫。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,世界上有一半以上的人口以稻米为主食,我国 60%以上人口以稻米为主食^[11]。近年来,镉污染稻米事件层出不穷,尤其地处有色重金属之乡的湖南,稻米产业面临着前所未有的挑战^[12]。因此,寻找降低 Cd 含量效果更好的改良剂,开展对稻米 Cd 的阻控效果研究,进一步筛选出最佳稻米阻镉配套技术,对湖南稻米 Cd 污染阻控技术具有十分重要的现实意义和应用价值。

在 Cd 污染的农田土壤上,施用改良剂来达到降低作物可食部中 Cd 积累量的目标,从而保障粮食生产安全是较为有效的技术手段之一^[13]。石灰、海泡石、磷酸盐类等常用改良剂^[14]一直是国内外学者的研究热点,近年来探索新型有效改良剂(硅肥、生物碳、微肥类物质等)^[15-17]也成为研究趋势。因此,通过盆栽试验和田间随机区组试验,开展单一施用进口矿物硅、微生物菌剂及其组配施用方式,对稻米 Cd 的阻控效果进行研究,为探索矿物硅肥及微生物菌剂对阻控稻米 Cd 污染的机理提供科学依据并为稻米 Cd 污染控制技术提供科学依据和技术储备。

1 材料与方法

1.1 供试样品

1.1.1 供试水稻品种

采用湖南省筛选的相对低镉积累品种,盆栽试验及田间随机区组试验的晚稻品种均为湘晚籼 13 号,常规晚稻,全生育期 124 d。

1.1.2 试验土壤性质

(1)盆栽试验土壤 土壤类型为第四纪红壤,采自株洲市马家河镇新马村。供试土壤 pH 和重金属含量见表 1。

表 1 土壤理化性质($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	pH	Pb	Zn	Cu	Cd
样品	4.97±0.51	153.25±8.35	158.91±3.19	43.12±1.10	8.65±0.42
标准	<6.5	≤250	≤200	≤50	≤0.3

注:样品值为平均值±标准差;标准值为土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的Ⅱ级标准。

从表 1 可知,土壤 $\text{pH}<5.0$,属于偏酸性红壤,土壤中 Pb、Cu 和 Zn 的含量没有超过国家土壤环境质量Ⅱ级标准,但土壤中 Cd 的含量已超过Ⅱ级标准的 28.8 倍,故属于单一重度 Cd 污染稻田土壤(一般认为土壤总 $\text{Cd}>2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 归类为重度 Cd 污染土壤)。

(2)田间随机区组试验 选择湖南省茶陵县马江镇为试验点,土壤中 Cd 含量为 $0.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于轻度污染区。

1.1.3 供试盆栽装置

盆栽装置为 PE 材质 40 桶,上口径为 40 cm,下口径为 35 cm,桶高为 30 cm。每盆装土壤 25 kg,保持表土平整、湿润,于室外淹水等待土壤稳定紧实后备用。

1.1.4 供试肥料

基施硅肥:俄罗斯进口矿物硅肥,奥斯科海外有限公司提供,主要成分是古微生物化石(硅藻、原始海绵体、海龙),富含 70%以上二氧化硅和植物可用的氮、磷、钙、镁等微量元素,正常施用量 $75\sim 150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

微生物菌剂:CJY 微生物菌剂,主要含有多种优势菌群及微量元素,可作底肥,也可作追肥使用,正常施用量 $1200\text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.2 试验设计

室外盆栽试验及田间区组试验均采用完全随机方案设计,详见表 2 和表 3。试验共设计了 4 个处理水平:空白对照(CK),基施进口矿物硅肥(Si),基施微生物菌剂(F),进口矿物硅肥+微生物菌剂(Si+F),每个处理水平重复 3 次。在水稻盆栽试验开展前,采集盆栽土壤样品,测定土壤理化性质,并于移栽前一周基施氮肥、磷肥及钾肥,移栽后正常水分管理。田间随机区组试验小区面积 $30\text{ m}^2(5\text{ m}\times 6\text{ m})$,各处理设独立灌溉沟渠,采用单一随机种植模式,移栽前施磷

肥和氮钾复合肥作基肥,田间管理按大田常规操作进行。

表2 盆栽试验处理及操作规程

Table 2 Design for pot experiment

编号	处理名称	具体操作规程
1	CK	不施用任何改良剂,水分肥分管理为常规管理;基本苗参考长沙地区的高产管理技术
2	Si	基施进口矿物硅肥,用量为 150 kg·hm ⁻² ,折合为 1.88 g·盆 ⁻¹ 。其他措施同 CK
3	F	基施微生物菌剂,用量为 1200 mL·hm ⁻² ,折合为 0.03 mL·盆 ⁻¹ ,于分蘖末期施用同样剂量的微生物菌剂。其他措施同 CK
4	Si+F	在 Si 处理基础上,再增加 F 处理。其他措施同 CK

表3 田间随机区组试验处理及操作规程

Table 3 Design for field experiment

编号	处理名称	具体操作规程
1	CK	完全按照当地农民的常规栽培管理,即不施用任何土壤改良剂,水分管理为常规管理;基本苗参考当地的高产栽培管理技术
2	Si	基施进口矿物硅肥,用量为 150 kg·hm ⁻² 。其他措施同 CK
3	F	基施微生物菌剂,用量为 1200 mL·hm ⁻² ,于分蘖末期施用同样剂量的微生物菌剂,其他措施同 CK
4	Si+F	在 Si 处理基础上,再增加 F 处理。其他措施同 CK

1.3 分析测定

1.3.1 土壤性质测定

在试验前,按梅花采样法采集试验田土壤样品,自然风干后,采用电位法(水土比为 2.5:1)^[18]测定土壤 pH。经 HCl-HNO₃-HClO₄^[19]微波法消解土壤样品,用 ICP-OES(美国 PE8300)检测土样中 Cd 的含量。

1.3.2 水稻样品预处理

水稻样品采集后,用自来水清洗根部泥土,再手工拆解为根、茎、叶、穗、谷粒等部位,将谷粒样品置于室外阳光下晒干,晒干后称取记录其干重,其他部位样品皆装入编号信封置于 103 °C 烘箱内杀青 1 h,调至 65 °C 烘至恒重后,用植物粉碎机粉碎植物样品,装入密封袋保存。

1.3.3 水稻样品中 Cd 的测定方法

按混合酸湿法消解^[18],取水稻样品用消解仪进行消解:称取 0.500 0±0.000 2 g 水稻粉末样品放入 50 mL 高温消煮管中,加 10 mL 混合酸(GR 级 HNO₃:GR 级 HClO₄=4:1),盖上弯颈小漏斗后插入消解孔中放置过夜;次日,开通风橱,先将消解仪温度设置为 95 °C,缓慢解热使样品起泡,保持 95 °C 恒温 10 min,升温到

120 °C 使酸回流并保持 30 min,再次升温到 170 °C 并保持 60 min,彻底消解样品,如果溶液不透明,冷却后补加 5 mL 混合酸,或滴加 H₂O₂,升温并保持温度,至溶液透明;最后升温至 190 °C,赶酸至溶液 3~5 mL 左右消解完毕,待消解液冷却后,用去离子水定容至 25 mL,过滤至干净 50 型 PE 瓶中即完成消解。

用 ICP-OES(美国 PE8300)测定 Cd 浓度在 0.1 mg·kg⁻¹ 以上的水稻样品,用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国 Varian)测定 Cd 浓度在 0.1 mg·kg⁻¹ 以下的水稻样品。未能及时测定的消解液放入冰柜冷藏保存。

1.3.4 数据处理方法

本文数据图表处理采用 Microsoft Excel 2013,多重差异显著性分析采用 SPSS(Statistical Product and Service Solutions, 19.0)进行。

2 结果与分析

2.1 矿物硅肥与微生物菌剂对晚稻植株各部位吸收积累 Cd 的影响

2.1.1 盆栽试验

湘晚籼 13 从移栽到收割的时间为 2014 年 7 月至 10 月,表 4 为不同改良剂对晚稻各部位中 Cd 含量的影响。

表4 盆栽试验不同处理对水稻植株各部位 Cd 含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on Cd concentrations in different parts of rice in pot experiment

处理名称	根部 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	茎鞘 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	叶片 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %
CK	38.60a	0	22.72a	0	8.09a	0
Si	20.97c	45.67 ↓	12.84bc	43.49 ↓	3.69b	54.39 ↓
F	20.77c	46.19 ↓	10.80c	52.46 ↓	4.42b	45.36 ↓
Si+F	29.44b	23.73 ↓	14.56b	35.92 ↓	7.12ab	11.99 ↓

注:不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。下同。

从表 4 可知,在盆栽试验中,各处理水稻植株不同部位中 Cd 含量大小依次为根部>茎鞘>叶片,且施用不同改良剂对水稻吸收积累 Cd 含量呈一定的降低趋势。水稻根部的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F>Si≈F(“≈”表示处理间 Cd 含量差异不显著,“>”表示处理间差异显著,下同),与 CK 相比,施用改良剂处理均能显著降低水稻根部 Cd 的含量,其中以 Si 和 F 单独施用处理对根部 Cd 含量的抑制效果较好,降 Cd 幅度分别为 45.67% 和 46.19%;水稻茎鞘的 Cd 含量

大小依次为 CK>Si+F≈Si>F, 与 CK 相比, 施用改良剂处理均能显著降低水稻茎鞘中 Cd 的含量, 其中以 F 处理对茎鞘 Cd 含量的抑制效果最佳, 降 Cd 幅度为 52.46%; 水稻叶片的 Cd 含量大小依次为 CK≈Si+F>F≈Si, 与 CK 相比, F 和 Si 处理均能显著降低水稻叶片中 Cd 的含量, 降 Cd 幅度分别为 45.36% 和 54.39%, 但是 Si+F 对叶片中 Cd 含量的降低效果不显著。

2.1.2 田间随机区组试验

由表 5 可知, 田间随机区组试验中, 各处理水稻植株不同部位中 Cd 含量大小依次为根部>茎鞘>叶片, 与盆栽实验的结果一致。水稻根部的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F≈F>Si, 与 CK 相比, 施用改良剂处理均能显著降低水稻根部中 Cd 的含量, 其中以 Si 单独施用处理对根部 Cd 含量的抑制效果最佳, 降 Cd 幅度分别为 73.91%; 水稻茎鞘的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F≈F≈Si, 与 CK 相比, 施用改良剂处理均能显著降低水稻茎鞘中 Cd 的含量, 其中以 F 和 Si 处理对茎鞘 Cd 含量的抑制效果较好, 降 Cd 幅度分别为 63.08% 和 71.28%; 水稻叶片的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F≈F≈Si, 与 CK 相比, 施用改良剂处理均能显著降低水稻叶片中 Cd 的含量, 且 F 和 Si 单独施用对叶片 Cd 含量的抑制效果最佳, 降 Cd 幅度分别为 74.75% 和 76.77%。

综上所述, 施用单一改良剂及其组配施用对晚稻植株各部位 Cd 含量有一定的抑制作用, 且单一施用矿物硅肥和微生物菌剂处理的效果较好, 其中单一施用矿物硅肥的效果最佳, 能有效降低根部、茎鞘和叶片中 Cd 的含量, 与盆栽实验结果呈一致趋势。

表 5 田间试验不同处理对水稻植株各部位 Cd 含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on Cd concentrations in different parts of rice in field experiment

处理	根部 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	茎鞘 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	叶片 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %
CK	3.22a	0.00	1.95a	0.00	0.99a	0.00
Si	0.84c	73.91 ↓	0.56b	71.28 ↓	0.23b	76.77 ↓
F	1.14bc	64.59 ↓	0.72b	63.08 ↓	0.25b	74.75 ↓
Si+F	1.40b	56.52 ↓	1.03b	47.18 ↓	0.38b	61.62 ↓

2.2 矿物硅肥与微生物菌剂对晚稻成熟期稻谷 Cd 含量及产量的影响

2.2.1 盆栽试验

从表 6 可知, 晚稻稻谷中谷壳和糙米的 Cd 含量大小依次为谷壳>糙米; 水稻谷壳的 Cd 含量大小依

次为 CK>Si+F≈Si>F, 与 CK 相比, 施用改良剂处理措施均能显著降低水稻谷壳中 Cd 的含量, 其中 Si 和 F 处理对谷壳 Cd 含量的抑制效果较好, 降 Cd 幅度分别为 27.20% 和 38.39%; 水稻糙米的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F≈Si≈F, 与 CK 相比, 施用改良剂处理措施均能显著降低糙米中 Cd 的含量, 以 F 处理对糙米 Cd 含量的抑制效果最佳, 降 Cd 幅度达到 55.31%。结果说明, 施用单一改良剂及其组配施用对晚稻稻谷 Cd 含量有一定的抑制作用, 以单一施用微生物菌剂处理的效果最佳, 能有效降低谷壳和糙米中 Cd 的含量, 明显抑制 Cd 向糙米中的吸收转运过程。

表 6 盆栽试验不同处理对稻谷 Cd 含量及水稻产量的影响

Table 6 Effects of different treatments on grain Cd concentrations and yields of rice in pot experiment

处理	谷壳 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	糙米 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	产量/ g·苑 ⁻¹	升降幅度/ %
CK	3.23a	0	2.26a	0	15.75b	0
Si	2.35bc	27.2 ↓	1.36b	39.82 ↓	16.05b	1.90 ↑
F	1.99c	38.39 ↓	1.01b	55.31 ↓	19.08ab	21.14 ↑
Si+F	2.62b	18.89 ↓	1.40b	38.05 ↓	20.17a	28.06 ↑

在水稻产量(以稻谷干重计)方面, 与 CK 相比, 单一施用俄罗斯进口矿物硅肥、微生物菌剂及其组配施用处理措施均能使水稻产量有一定的增加, 但单一施用硅肥的效果并不显著, 只有 Si+F 处理的效果最佳, 使水稻增产 28.06%。

2.2.2 田间随机区组试验

从表 7 可知, 田间随机区组试验晚稻稻谷中谷壳和糙米的 Cd 含量大小依次为谷壳>糙米。水稻谷壳的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F≈Si≈F, 与 CK 相比, 施用改良剂处理措施均能显著降低水稻谷壳中 Cd 的含量, 以 Si 和 F 处理对谷壳 Cd 含量的抑制效果较好, 降 Cd 幅度分别达到 62.07% 和 65.52%; 水稻糙米的 Cd 含量大小依次为 CK>Si+F≈Si≈F, 与 CK 相比, 施用改良剂处理措施均能显著降低水稻糙米中 Cd 的含量, 且都达到国家食品卫生安全标准, 其中 Si 和 F 处理对糙米 Cd 含量的抑制效果较好, 降 Cd 幅度分别达到 60.87% 和 69.57%。综上所述, 田间随机区组实验与盆栽实验结果一致, 说明施用单一改良剂及其组配施用能有效抑制晚稻稻谷 Cd 含量, 以单一施用微生物菌剂处理的效果最佳, 能明显抑制 Cd 向糙米中的吸收转运过程。

在水稻产量(以稻谷干重计)方面, 与 CK 相比,

表 7 不同处理对稻谷 Cd 含量及水稻产量的影响

Table 7 Effects of different treatments on grain Cd concentrations and yields of rice in field experiment

处理	谷壳 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	糙米 Cd/ mg·kg ⁻¹	升降幅度/ %	产量/ g·m ⁻²	升降幅度/ %
CK	0.29a	0	0.23a	0	20.13c	0
Si	0.11b	62.07 ↓	0.09b	60.87 ↓	24.11ab	19.77 ↑
F	0.10b	65.52 ↓	0.07b	69.57 ↓	25.58ab	20.07 ↑
Si+F	0.17b	41.38 ↓	0.12b	47.83 ↓	26.39a	31.10 ↑

单一施用俄罗斯进口矿物硅肥,微生物菌剂及其组配施用处理措施均能使水稻产量有一定的增加,其中 Si+F 处理的效果最佳,使水稻增产 31.10%,与盆栽试验结果一致。

3 讨论

硅(Si)是土壤中丰度最高的元素,是对植物生长有益的元素,能促进茎鞘壁加厚,有利于抗倒伏,增强植物对生物胁迫和非生物胁迫的抗性,研究已证实它能够帮助植物克服各种环境胁迫^[19]。富硅材料一般呈碱性,施入土壤中不仅能提高土壤的 pH,降低土壤中重金属的植物有效性,起到钝化镉的作用,并且减少重金属向地上部的转运量,从而达到了区室化阻隔之目的^[20-21]。水稻是一种典型的硅富集作物,硅的高积累对水稻的丰产和可持续农耕作业尤为重要,史新慧等^[22]通过水稻水培试验结果证实:施硅能显著抑制 Cd 向水稻地上部的运输,加硅也降低了质外体内不同形态 Cd 的含量,特别是结合态的 Cd,施硅显著降低了 Cd 毒害所诱导的过氧化物酶活性,说明加硅缓解了高浓度 Cd 对水稻的毒害作用;陈喆等^[23]通过室外盆栽试验得出,施用含硅肥料能有效控制水稻植株各部位 Cd 含量的迁移,并能明显降低水稻各部位及糙米中 Cd 的含量;黄道友等^[24]研究发现,向镉污染土壤施用熔渣硅肥能够抑制水稻对镉吸收,降低稻米中的镉含量;龚光明等^[25]研究结果表明,施用俄罗斯硅肥能抑制水稻对土壤中镉的吸收,降低镉对水稻的毒害作用,降低稻米的镉含量,提高水稻的产量。

微生物菌剂是由一种或数种有益微生物、经工业化培养发酵而成的生物性肥料,是以微生物生命活动产生肥力效应的制品,有研究表明施用生物菌肥能够明显增强土壤生化作用强度,提高土壤酶活性、呼吸强度、氨化作用强度^[26]。微生物菌肥配施一定数量的化学肥料可以提高水稻产量,有利于提高土壤供肥能力,增强根系活力,改善植物的营养,促进矿质营养释

放,协助养分吸收,刺激植株生长,减少病虫害,使作物增产,对水稻各项生育指标有较好影响^[27-28]。就生物菌肥本身而言,在细胞壁及周围区域形成大量颗粒状镉沉积物,在菌体表面形成附着的沉淀物,利用胞内外沉积作用可能是对镉的抗性和富集作用的重要途径,从而减少土壤中可溶态镉含量^[29]。秦礼宝等^[30]研究表明,微生物肥可以改善土壤的松散性,土壤个体的生长环境得到了改善,有利于提高水稻的成穗率、结实率、千粒重,对产量的提高有一定的帮助,并且具有良好的减肥稳产效果,在改良土壤、保护农业生态环境方面也有积极意义。

本试验研究结果表明,施用单一矿物硅肥、微生物菌剂及其组配方式均能降低水稻各部位 Cd 含量,但单一施用改良剂方式效果优于组配施用效果,说明这两组改良剂组配施用并没有起到协同作用,可能是由于两种改良剂产生了拮抗作用的原因,具体原因还有待进一步的研究与探索。对于水稻稻谷,施用改良剂处理方式均可使糙米含量明显降低,尤其是对轻度污染农田的稻米,均能达到国家食品卫生标准,也能提高水稻产量。因此,矿物硅肥与微生物菌在米镉污染治理与控制方面使用简单、效果良好,具有较好的应用前景。

4 结论

(1)通过分析盆栽试验和田间随机区组试验晚稻植株各部位中 Cd 的含量变化情况,发现水稻各部位间 Cd 含量大小规律为根部>茎鞘>叶片>谷壳>糙米。

(2)研究表明,无论是盆栽试验还是田间随机区组试验,改良剂单一施用及组配施用均能降低晚稻植株各部位 Cd 含量,其中单一施用硅肥与微生物菌剂对降低根部、茎鞘和叶片的效果要优于组配施用的效果。

(3)在盆栽试验中,单一施用改良剂及其配施都能对稻米 Cd 的含量起到阻控效果,显著降低了水稻稻谷中 Cd 的含量,其中以微生物菌剂处理的效果最佳。在轻度污染区的田间随机区组试验中,根据各种改良剂对糙米阻控潜力来看,与 CK 相比,所有处理措施都能显著降低水稻糙米中 Cd 的含量,且均可达到国家食品卫生标准,其中以微生物菌剂处理的效果最为显著,与盆栽实验结果一致。

(4)在两组实验中,水稻产量与 CK 相比,单一施用改良剂及其组配施用均能使水稻有一定程度的增产作用,其中以矿物硅肥+微生物菌剂组配处理的效

果最佳。

参考文献:

- [1] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 549-552.
CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, YANG Xue-chun. Regulation of phyto-availability of Hg, Cd, Pb in soil by limestone [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 549-552.
- [2] Arao T, Kawasaki A, Baba K, et al. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009(43): 9361-9367.
- [3] Dong J, Wu F B, Zhang G P. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings [J]. *Chemosphere*, 2006, 64: 1659-1666.
- [4] 张兴梅, 杨清伟, 李扬. 土壤镉污染现状及修复研究进展[J]. 河北农业科学, 2010, 14(3): 79-81.
ZHANG Xing-mei, YANG Qing-wei, LI Yang. Progress of status and remediation of soil cadmium pollution[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2010, 14(3): 79-81.
- [5] 康浩, 石贵玉, 潘文平, 等. 镉对植物毒害的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(26): 11200-11204.
KANG Hao, SHI Gui-yu, PAN Wen-ping, et al. Research progress of toxic effect of cadmium on plant[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(26): 11200-11204.
- [6] Moreno C J, Moral R, Perrez E A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant[J]. *Plant Nutrition*, 2000, 23(2): 243-250.
- [7] Moriarty F. Ecotoxicology: The study of pollutants in ecosystems[M]. London, Academic Press, 1999: 29-35.
- [8] 赵庆龄. 基于文献计量的土壤重金属污染国际比较研究[D]. 中国农业科学院, 2010.
ZHAO Qing-ling. International comparison on the studies of soil heavy metal pollution based on bibliometric[D]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [9] 李兆辉, 王光明, 徐云明, 等. 镉、汞、铅污染及其微生物修复研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2010, 37(8): 39-43.
LI Zhao-hui, WANG Guang-ming, XU Yun-ming, et al. Progress on pollutions of cadmium, mercury, lead and microbial remediation[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, 37(8): 39-43.
- [10] 安红敏, 郑伟, 高扬. 镉的健康危害及干预治疗研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(9): 739-742.
AN Hong-min, ZHENG Wei, GAO Yang. Research progress in cadmium toxicity[J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, 24(9): 739-742.
- [11] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2457-2467.
LING Qi-hong, ZHANG Hong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457-2467.
- [12] 曾文伟, 石柱. “镉米”认知与区域优质稻产业发展对策[J]. 作物研究, 2015, 29(2): 185-187.
ZENG Wen-wei, SHI Zhu. "Cadmium rice" cognitive and regional background industry development countermeasure[J]. *Crop Research*, 2015, 29(2): 185-187.
- [13] 许珂, 铁柏清, 陈喆, 等. 硅肥与硒肥施用对水稻吸收积累 Cd 的影响规律研究[J]. 湖南农业科学, 2012(11): 56-59.
XU Ke, TIE Bo-qing, CHEN Zhe, et al. Influence rule of single fertilization of Si or Se on uptake and accumulation of Cd by rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(11): 56-59.
- [14] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1204-1208.
DING Ling-yun, LAN Chong-yu, LIN Jian-ping, et al. Effects of different ameliorations on rice production and heavy metals uptake by rice grown on soil contaminated by heavy metals[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1204-1208.
- [15] 陈喆, 铁柏清, 刘孝利, 等. 改良-农艺综合措施对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1302-1308.
CHEN Zhe, TIE Bai-qing, LIU Xiao-li, et al. Impacts of optimized agronomic regulation management on cadmium absorption and accumulation by late rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1302-1308.
- [16] 毛懿德, 铁柏清, 叶长城, 等. 生物炭对重污染土壤镉形态及油菜吸收镉的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 579-582.
MAO Yi-de, TIE Bai-qing, YE Chang-cheng, et al. Effects of biochar on forms and uptake of cadmium by rape seed in cadmium-polluted soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(4): 579-582.
- [17] 叶长城, 陈喆, 铁柏清, 等. 生物菌肥与石灰配施对水稻吸收积累 Cd 的影响[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(6): 49-54.
YE Chang-cheng, CHEN Zhe, TIE Bai-qing, et al. Effect of bio-fertilizers and lime combined application on cadmium uptake by rice plant [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, 37(6): 49-54.
- [18] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
LIU Feng-zhi. Agricultural environment monitoring of practical manual [M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [19] 陈喆, 张森, 叶长城, 等. 富硅肥料和水分管理对稻米镉污染阻控效果研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4003-4011.
CHEN Zhe, ZHANG Miao, YE Chang-cheng, et al. Mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) with Si fertilizers and irrigation managements[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 4003-4011.
- [20] Qiu Hao, Gu H H, He E K, et al. Attenuation of metal bioavailability in acidic multi-metal contaminated soil treated with fly ash and steel slag [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(4): 544-553.
- [21] 邓腾灏, 谷海红, 仇荣亮. 钢渣对多金属复合污染土壤的改良效果及水稻吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 455-460.
DENG Teng-hao-bo, GU Hai-hong, QIU Rong-liang. Ameliorative effects of steel slag application on multi-metal contaminated soil and heavy metal uptake of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 455-460.
- [22] 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):1112-1116.
- SHI Xin-hui, WANG He, ZHANG Fu-suo. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1112-1116.
- [23] 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 Bai-qing, LEI Ming, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2762-2770.
- [24] 黄道友, 陈惠萍, 龚高堂, 等. 湖南省主要类型水稻土壤镉污染改良利用研究[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(6):364-370.
- HUANG Dao-you, CHEN Hui-ping, GONG Gao-tang, et al. Resesarch report on improvement and utilization of main type paddy soil polluted by cadmium in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2000, 21(6):364-370.
- [25] 龚光明, 何可佳, 夏元芳, 等. 俄罗斯硅肥对水稻的降镉增产效果研究[J]. 现代农业科技, 2014(10):233-234.
- GONG Guang-ming, HE Ke-jia, XIA Yuan-fang, et al. Study on effect of cadmium-decreasing and yield-increasing of Russian silicon fertilizer on rice[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(10):233-234.
- [26] 栗 丽, 洪坚平, 谢英荷, 等. 生物菌肥对采煤塌陷复垦土壤生物活性及盆栽油菜产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5):939-944.
- LI Li, HONG Jian-ping, XIE Ying-he, et al. Effect of bacterial manure on soil biological activity, yield and quality of rape in reclaimed core-mining areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5):939-944.
- [27] 徐志峰, 王旭辉, 丁亚欣, 等. 生物菌肥在农业生产中的应用[J]. 现代农业科技, 2010(5):269-270.
- XU Zhi-feng, WANG Xu-hui, DING Ya-xin, et al. The application of the bio-bacterial manure in agricultural production[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010(5):269-270.
- [28] 曹国军, 李三元, 胡永平, 等. 微生物肥料对水稻产量及其构成因子的影响[J]. 农技服务, 2011, 28(8):1138-1139.
- CAO Guo-jun, LI San-yuan, HU Yong-ping, et al. Microbial fertilizer on rice yield and its composition factors of influence[J]. *Agricultural Technology Service*, 2011, 28(8):1138-1139.
- [29] 应娇妍, 袁红莉, 李宝珍. 一株茎点霉菌的抗镉机制[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6):575-578.
- YING Jiao-yan, YUAN Hong-li, LI Bao-zhen. The cadmium resistance mechanisms of Phoma strain[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(6):575-578.
- [30] 秦礼宝, 钱卫红, 杨蛟虎, 等. 翠京元微生物肥对水稻生长和产量的影响效应分析[J]. 北方水稻, 2014, 44(6):61-63.
- QIN Li-bao, QIAN Wei-hong, YANG Jiao-hu, et al. Cuijingyuan microbial fertilizer on rice growth and yield effect analysis[J]. *North Rice*, 2014, 44(6):61-63.