

彭 华, 田发祥, 魏 维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6):1027–1033.

PENG Hua, TIAN Fa-xiang, WEI Wei, et al. Effects of silicon fertilizer application on the cadmium and silicon content of rice at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1027–1033.

不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响

彭 华^{1,2,3}, 田发祥^{1,3,4}, 魏 维⁵, 周宇健⁵, 官 迪^{1,3,4}, 柳赛花^{1,3,4}, 纪雄辉^{1,3,4*}

(1.湖南省农业生物资源利用研究所, 湖南省农业科学院, 长沙 410125; 2.中南大学, 长沙 410000; 3.农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125; 4.农田土壤重金属污染防控与修复湖南省重点实验室, 长沙 410125; 5.湖南大学, 长沙 410000)

摘 要:为探明硅肥对镉污染稻田降低稻米镉的作用机理,完善稻米镉消减的硅肥施用技术,采用田间试验,研究水稻不同生育期(基肥、分蘖期和孕穗期)施用硅肥对水稻吸收积累镉、硅的影响。结果表明:施用硅肥能够提高土壤 0.160~0.290 个 pH 单位,降低镉生物有效性,同时,显著增加土壤有效硅含量,增幅为 295.3%~399.2% ($P<0.05$);不同生育期施用硅肥中,基施硅肥能够显著增加 9.7% 的水稻产量,高于其他处理,基施硅肥显著降低了水稻茎秆、叶片、稻壳和稻米中的镉含量,降幅分别为 31.9% ($P<0.05$)、65.8% ($P<0.05$)、46.1% ($P<0.05$) 和 25.3% ($P<0.05$),施硅降低了镉由茎秆向叶片和稻壳的转运,从而降低了稻米镉的积累,同时显著增加茎秆、叶片和稻壳硅含量,增加幅度分别为 44.1% ($P<0.05$)、71.5% ($P<0.05$) 和 28.8% ($P<0.05$)。综上表明,镉污染稻田基施硅肥能够显著增加水稻产量,降低土壤镉生物有效性,阻止镉的迁移转运,减少稻米镉积累,是镉污染稻田修复中推荐的硅肥施用技术。

关键词:水稻;镉;硅

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)06-1027-07 doi:10.11654/jaes.2017-0288

Effects of silicon fertilizer application on the cadmium and silicon content of rice at different growth stages

PENG Hua^{1,2,3}, TIAN Fa-xiang^{1,3,4}, WEI Wei⁵, ZHOU Yu-jian⁵, GUAN Di^{1,3,4}, LIU Sai-hua^{1,3,4}, JI Xiong-hui^{1,3,4*}

(1.Institute of Agriculture and Biological Resources Utilization, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 2.Central South University, Changsha 410000, China; 3.Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agriculture Environment in Middle Reach Plain of Yangtze River, Changsha 410125, China; 4.Key Lab of Prevention, Control and Remediation of Soil Heavy Metal Pollution in Hunan Province, Changsha 410125, China; 5.Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: This aim of this research was to study the reduction mechanism of cadmium and improve the silicon fertilizer application process to inhibit cadmium (Cd) accumulation in rice, according to field trials. The results showed that silicon increased the pH of soil (0.160~0.290) and reduced the availability of cadmium. In contrast, basal application enhanced crop yield by 9.7% ($P<0.05$); and cadmium levels in rice stem, leaf, husk, and grain were significantly lowered, by 31.9%, 65.8%, 46.1%, and 25.3%, respectively ($P<0.05$). Meanwhile, silicon effectively inhibited cadmium transport from the stem to the leaf and husk, which reduced the Cd accumulation in grain. In addition, silicon fertilizer significantly increased the silica content in the stem, leaf, and husk to 44.1%, 71.5% and 28.8%, respectively ($P<0.05$). Our study suggested that basal silicon fertilizer could reduce the availability of Cd, prevent Cd migration and accumulation, and increase rice production simultaneously. Basal dressing is recommended as a method of silicon fertilizer application in Cd-polluted paddy fields.

Keywords: rice (*Oryza sativa* L.); cadmium; silicon

收稿日期:2017-03-07

作者简介:彭 华(1982—),男,湖南古丈人,助理研究员,主要研究方向为农田环境。E-mail:phlove10@163.com

*通信作者:纪雄辉 E-mail:jixionghui@sohu.com

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAD11B02);湖南省自然科学基金联合项目(2016JJ6066)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2013BAD11B02); The Natural Science Foundation of Hunan Province(2016JJ6066)

土壤重金属污染已成为世界性的环境问题。我国受重金属污染的耕地面积约占全国总耕地面积的19.4%,约为 $26 \times 10^5 \text{ hm}^2$,对我国粮食安全生产构成巨大威胁^[1]。据《全国土壤污染调查公报》指出,我国西南、中南地区土壤重金属超标范围较大,重金属污染主要涉及Cd、As、Pb等污染物质,土壤镉超标率为7%,位居第一位^[2]。镉活性强、毒性高且不能被微生物降解,在土壤中滞留时间长,被作物根系吸收后易向其他部位转移,收获作物可食部位进入食物链,这对食品安全和人类健康构成严重威胁^[3]。湖南是有色金属之乡,镉是湖南省稻田土壤中最为普遍的重金属污染元素,镉污染导致区域稻米产量和品质下降,影响着地区经济和社会的和谐发展。湖南洞庭湖区是我国双季稻主产区,也是全国商品粮基地,在我国粮食生产安全上占有举足轻重的地位,区域稻米质量安全备受关注。因此,修复区域重金属镉污染稻田是亟待解决的问题。

稻米镉污染控制消减等的研究成为稻田重金属污染修复的研究热点之一。由于重金属污染农田土壤养分缺乏、结构较差等限制因素,通过施加石灰、白云石、含磷矿物、粉煤灰、有机肥等改良剂辅助农作物减少重金属吸收的技术,以其见效快、低成本、易操作等特点,在重金属污染农田土壤修复实践中得到了较为广泛的应用。一般认为,硅对植物重金属胁迫具有一定的缓解作用^[4-6]。施用富硅改良剂已成为镉污染农田稻米安全生产的重要技术措施。在硅肥施用技术上,前人研究的硅肥叶面喷施和土壤撒施^[7-9]对降低水稻吸收积累镉具有较好效果,不同生育期施硅肥对水稻产量及其硅素吸收效率差异也已有报道^[10-11],然而水稻不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉的影响鲜有报道,同时稻田镉污染修复的硅肥施用技术的组配、集成仍需通过大量的试验研究得出。

因此,本实验采用田间试验研究了水稻不同生育期施硅肥对稻米镉含量的影响,以期为区域典型镉污染稻田提供并完善硅肥施用技术,探讨硅对降低稻米镉污染的机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

水稻试验地点位于湖南省长沙县北山镇农技站试验田,该地属于中亚热带季风湿润气候区,具有热量丰富、降水充沛、日照充足的特点,是南方典型的水稻生产区。土壤基本理化性质为:土壤pH 5.15(土:水

为1:2.5),有机质 $27.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $274.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $16.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $85.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤中全镉含量 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过土壤环境质量二级标准(GB 15618—2008),有效态镉含量 $0.233 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用田间小区试验,设置4个处理,每个处理重复3次,小区面积 30 m^2 。(1)对照处理(CK):常规施肥,不添硅肥;(2)移栽前基施硅肥(T1):常规施肥,与基肥同时施入,其 SiO_2 量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;(3)分蘖期追施硅肥(T2):常规施肥,分蘖期追施 SiO_2 量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;(4)孕穗期追施硅肥(T3):常规施肥,孕穗期追施 SiO_2 量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

施肥情况:以水稻专用复合肥(24-6-10)作基肥,施用量为 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分蘖期追施尿素 $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。硅肥:淄博金禾肥料有限公司提供($\text{SiO}_2 \geq 24\%$, $\text{CaO} \geq 32\%$, 硼锌铁铜钛钼钾 $\geq 15\%$, $\text{MgO} \geq 5\%$)。在水稻生长季,为了避免小区相互串水,小区田埂采用薄膜覆盖。化学肥料于作物移栽前1 d施入并耙匀。水稻品种为湘晚籼12号,生产中病虫害防治与当地习惯保持一致。

1.3 样品采集与测定

水稻成熟期采集土壤和水稻地上部(茎秆、叶片、稻米)样品。用土钻在每小区随机采集5点土样,混合作为一个土壤样品,土样自然风干后研磨分别过20目和100目筛,备用。植株样品用自来水冲洗干净,并用纯水冲洗,于 80°C 烘干后粉碎,备用。土壤有效态镉采用DTPA浸提,火焰原子吸收分光光度仪测定,有效硅采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 浸提(NY/T 2272—2012),硅钼蓝比色法测定;植株样品镉含量用微波消解仪消解,ICP-MS测定。水稻植株全硅测定^[12]:将100 mg样品放入100 mL耐高压塑料管中,加入3 mL 50% NaOH溶液,盖上盖子,振荡器上摇匀,高压灭菌锅中 121°C 下灭菌20 min后,用漏斗转移至50 mL容量瓶中,蒸馏水定容,摇匀,用钼蓝比色法测定硅含量。

1.4 数据处理与统计分析

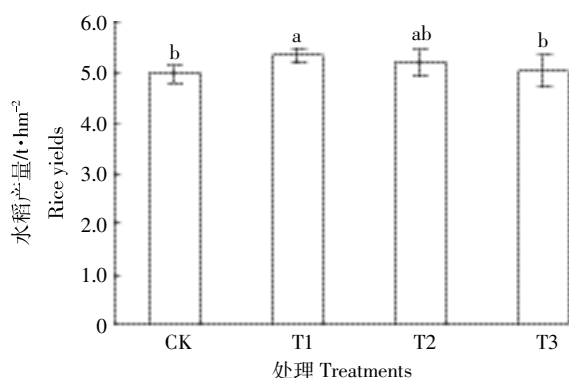
试验数据采用Microsoft Excel 2007软件进行处理,SPSS 17.0软件进行统计分析和处理间差异显著性检验(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量的影响

不同处理对水稻产量的影响如图1。可以看出,与CK处理相比,T1、T2和T3处理能够增加水稻产

量,其中 T1 处理增产幅度为 9.7% ($P<0.05$), T2 和 T3 处理对水稻增产效果低于 T1。结果表明,水稻不同生育期施用硅肥能够增加水稻产量,但硅肥施用时期对水稻的产量有较大影响,这与硅在稻田中释放、水稻吸硅时期及硅对水稻产量构成因子的影响关系密切。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同

Different letters mean significant difference at 0.05 level. The same below

图 1 不同施肥处理的水稻产量

Figure 1 Rice yields in different treatments

2.2 不同施肥处理对土壤 pH 及有效态镉、硅的影响

不同施肥处理下成熟期土壤 pH 值变化如图 2 所示。可以看出,硅肥能够提高成熟期土壤 pH 值,与 CK 处理相比, T1、T2 和 T3 处理分别提高了 0.290、0.263、0.160 个 pH 单位, T1 和 T2 处理提高土壤 pH 达显著水平。结果表明,施用硅肥能够提高土壤 pH 值,但随着硅肥施用时期延后,对土壤 pH 提高效果减弱。

不同施肥处理土壤有效态镉、硅含量差异见图 3。与 CK 处理相比, T1、T2 和 T3 处理能够降低土壤 DTPA-Cd 含量,降低顺序为 T1>T2>T3,其中 T1 处理显著降低土壤有效态镉含量,降低幅度为 7.4% ($P<$

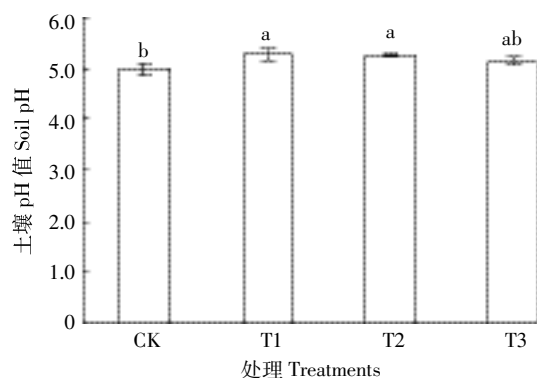


图 2 不同施肥处理对土壤 pH 值的影响

Figure 2 Effect of different treatments on the soil pH

0.05)。施用硅肥的 T1、T2 和 T3 处理土壤有效硅显著增加了 295.3%~399.2% ($P<0.01$),不同时期施用硅肥处理土壤有效硅含量大小顺序为 T1>T2>T3,各处理之间差异没有达到显著水平,随硅肥施用时间的延后,土壤有效硅含量具有逐渐降低的趋势,这可能与硅肥在稻田中的释放、转化及水稻吸收有关。

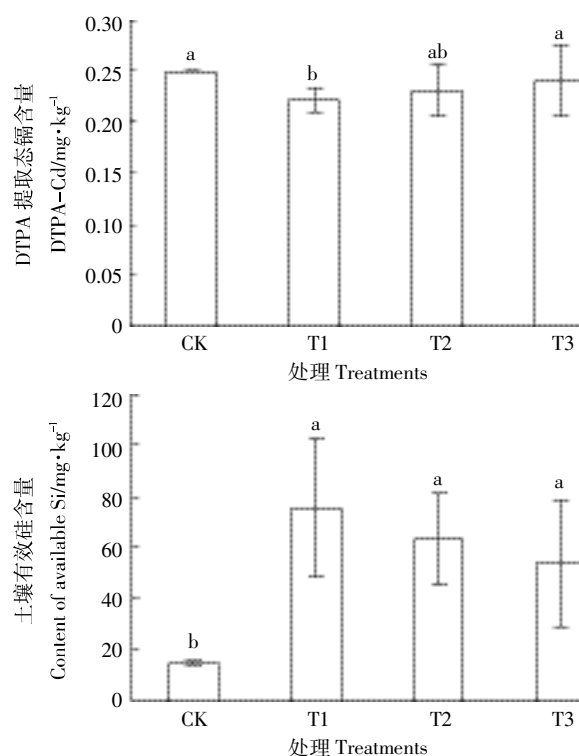


图 3 不同施肥处理对土壤 DTPA-Cd 和有效硅含量的影响

Figure 3 Effect of different treatment on soil DTPA-Cd and available silicon contents

2.3 不同施肥处理对水稻植株镉、硅含量的影响

总体而言,不同时期施用硅肥均能降低水稻对镉的吸收和积累,如图 4 所示。与 CK 处理相比, T1、T2 和 T3 处理降低了水稻茎中的镉含量,其中 T1 处理降幅为 31.9% ($P<0.05$),差异达到显著水平。T1、T2 和 T3 处理均显著降低水稻叶片中镉含量,降低幅度为 60.0%~65.8% ($P<0.05$),同时,显著降低了水稻稻壳中镉含量,降幅为 26.5%~46.1% ($P<0.05$)。稻米中镉含量与稻壳中镉含量趋势一致,与 CK 处理(稻米镉含量 0.431 mg·kg⁻¹)相比, T1、T2 处理稻米镉含量分别显著降低 25.3% ($P<0.05$)和 16.7% ($P<0.05$)。表明施用硅肥能够降低水稻地上部各器官对镉的吸收积累,水稻不同生育期施硅降低地上部镉积累的差异较大。

水稻地上部各部位硅含量如图 4 所示。总体而言,施用硅肥增加水稻地上部硅的吸收和积累,茎秆、

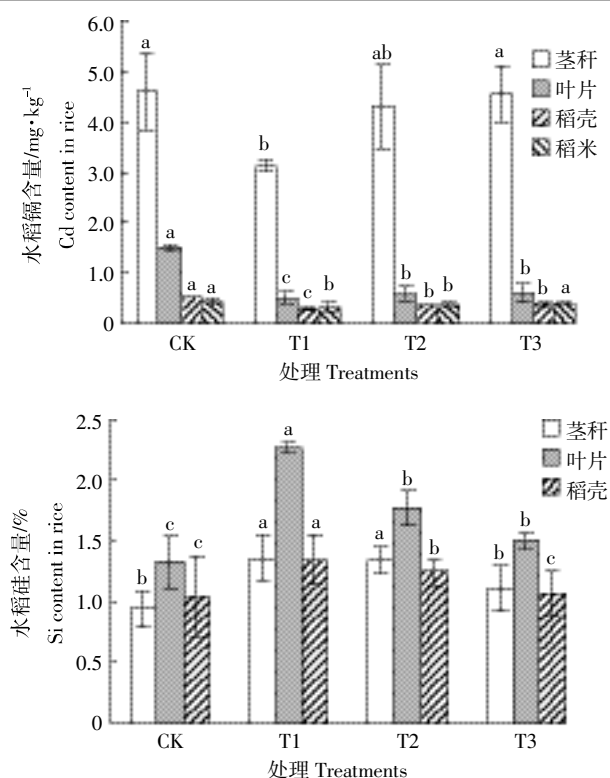


图4 不同处理对水稻各器官镉、硅含量的影响

Figure 4 Effect of different treatment on the different organ cadmium and silicon contents

叶片和稻壳中硅含量大小顺序均为 $T1 > T2 > T3 > CK$ 。与 CK 处理相比, T1、T2 和 T3 处理均能够增加茎、叶和壳中硅含量, T1 和 T2 处理在茎秆、叶片和稻壳增加幅度分别为 42.3%~44.1% ($P < 0.05$)、33.8%~71.5% ($P < 0.05$)、18.8%~28.8% ($P < 0.05$), T3 处理显著增加了叶片中硅含量, 增幅为 13.9% ($P < 0.05$), 其茎秆和稻壳硅含量增加没有达到显著水平。表明水稻供硅时间对水稻吸收积累硅具有较大影响, 随着施硅时间延

后, 水稻对硅的吸收呈递减趋势, 表明水稻对硅的吸收积累与水稻吸硅时期和硅肥在土壤中释放有关。

2.4 水稻植株体内镉、硅转运系数

施用硅肥对水稻镉、硅转运的影响见表 1。可以看出, 与 CK 处理相比, T1、T2 和 T3 显著降低水稻镉由茎秆向叶片的转运系数, 降低幅度为 30.8%~50.6% ($P < 0.05$)。水稻植株茎秆向稻壳转运系数降低, 但没有达到显著水平。T1、T2 和 T3 处理显著增加水稻镉由稻壳向稻米镉转运系数, 增加 7.7%~24.2% ($P < 0.05$), 随着硅肥施用时期的延后, 稻米镉由稻壳向稻米转运系数加大, 表明硅对水稻体内镉的阻隔作用降低, 并对稻米镉积累具有一定促进作用, 但这种转运积累过程对稻米镉积累影响较植株整体对镉的吸收效果小。综上表明, 稻米镉的积累与水稻镉的吸收以及镉在植株体内的转运关系密切。

对水稻植株体内硅而言, 与 CK 处理相比, T1、T2 增加了硅由茎秆向叶片的转运, 其中, T1 处理达到显著水平, 增幅为 13.9% ($P < 0.05$), 而 T3 处理降低了硅由茎秆向叶片的转运系数, 差异没有达到显著水平, 可以看出土壤硅素释放过程和水稻对硅的吸收时期及其转运共同决定了水稻对硅素营养的吸收积累。另外, 各施硅处理硅由茎秆向稻壳的转运系数差异并不显著, 但较 CK 处理均显著降低, 降低幅度为 15.8%~33.1% ($P < 0.05$), 这可能是本试验中稻壳中硅较叶片中低的原因。

2.5 土壤、水稻各变量之间相互关系

土壤、水稻各变量之间相互关系见表 2。可以看出, 土壤有效硅含量与茎秆硅含量和土壤 pH 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.926 和 0.969, 与土壤 DT-PA-Cd 呈极显著负相关, 表明施硅肥能够提升土壤

表1 不同处理对镉、硅在植株体内转运的影响

Table 1 Effect of different treatments on Cd and silicon transportation in rice

处理 Treatments	镉转运系数 Cd transport coefficient			硅转运系数 Si transport coefficient	
	茎-叶 Shoot-leaf	茎-壳 Shoot-husk	壳-米 Husk-rice	茎-叶 Shoot-leaf	茎-壳 Shoot-husk
CK	0.22a	0.09a	1.04c	1.42b	1.12a
T1	0.15b	0.08a	1.12b	1.62a	0.85b
T2	0.11b	0.08a	1.22a	1.43b	0.94b
T3	0.12b	0.08a	1.29a	1.40b	0.75b

注: 同一列不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。转运系数: 茎-叶即叶片中镉(硅)含量/茎秆中镉(硅)含量, 茎-壳即稻壳中镉(硅)含量/茎秆中镉(硅)含量, 壳-米即稻米中镉(硅)含量/稻壳中镉(硅)含量。

Note: Different letters within a column indicates significant differences between different treatments ($P < 0.05$), the same below. Transport coefficient: shoot-leaf means specific value between the leaf Cd(Si) content and stem Cd(Si) content, shoot-husk means specific value between the husk Cd(Si) content and stem Cd(Si) content, husk-rice means specific value between the rice Cd(Si) content and husk Cd(Si) content.

表 2 各变量之间相互关系

Table 2 The correlation between variables

变量	土壤有效硅	茎秆硅含量	叶片硅含量	土壤有效镉	茎秆镉含量	叶片镉含量	稻壳镉含量	稻米镉含量	土壤 pH
土壤有效硅	1								
茎秆硅含量	0.926*	1							
叶片硅含量		0.670*	1						
稻壳硅含量			0.963*						
土壤有效镉	-0.801**			1					
茎秆镉含量		-0.735*		0.901*	1				
叶片镉含量	-0.989*	-0.734**	-0.728*	0.883*	0.625*	1			
稻壳镉含量		-0.729**	-0.956*	0.951*	0.773**	0.798**	1		
稻米镉含量			-0.995**	0.771**	0.959**		0.970*	1	
土壤 pH	0.969*			-0.995**					1

注:* 在 0.05 水平上显著相关;** 在 0.01 水平上显著相关。

Note: *significant correlation at the 0.05 level, **significant correlation at the 0.01 level.

pH 值,增加有效硅含量,降低土壤镉生物有效性,促进茎秆对硅的吸收积累。茎秆硅含量与叶片硅含量呈显著相关,与水稻茎秆、叶片和稻壳镉含量呈显著负相关,相关系数分别为-0.735、-0.734 和-0.729,表明水稻茎秆中硅的积累能够抑制水稻地上部镉的积累,这种抑制效应可能主要是通过降低土壤中镉的生物有效性或是在水稻根部与镉形成了难迁移结合态。叶片中硅含量与稻壳硅含量呈显著正相关,而与叶片、稻壳和稻米镉含量呈显著负相关,相关系数达 0.728、0.956 和 0.995,表明地上部植株硅的大量累积,降低了地上部镉向末端的迁移转运。土壤有效镉与土壤 pH 呈极显著负相关,相关系数为-0.995,而与茎秆、叶片、稻壳和稻米镉含量呈显著正相关,表明土壤中镉的生物有效性决定了水稻对镉的吸收积累,其生物有效性与土壤 pH 关系密切。茎秆镉含量与叶片、稻壳和稻米镉含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.625、0.773 和 0.959,这与镉在水稻体内的迁移转运有关。稻米镉含量受限于土壤有效镉和茎秆镉含量,与叶片硅含量呈显著负相关,相关系数为-0.995,表明上述因素是控制稻米镉含量的关键因素。

3 讨论

施用硅肥能够增加水稻产量^[13-15]。本研究得出,施用硅肥能够增加水稻产量,增产幅度为 3.3%~9.7%,其中基施增产效果达显著水平,增产结果与龚金龙等^[10]研究结果吻合,即幼穗分化-抽穗期供硅能够提高穗数、穗粒数、结实率等,最终达到增产效果。硅肥属于碱性物质,施入稻田能够增加土壤 pH 值,土壤 pH 升高会使带负电荷的土壤胶体对带正电荷的重金属离

子吸附能力增加,土壤中的 Fe、Mn 等离子与 OH⁻ 结合形成羟基化合物为重金属提供更多的吸附点位^[16-17],且羟基态阳离子与土壤吸附点位的亲和力高于自由阳离子,更加有利于重金属形成碳酸盐^[18-19]、硅酸盐^[20]等沉淀物,降低土壤镉生物有效性。本试验研究,在水稻不同生育期施用硅肥均可提高土壤 pH 值,从而降低了土壤有效态镉含量,同时,土壤有效态镉含量与水稻茎、叶、壳和稻米镉含量显著正相关,表明硅肥提高土壤 pH 值、降低土壤镉生物有效性是降低水稻稻米镉积累的原因之一。该结果与诸多研究报道相一致^[21-22]。然而,不同时期施用硅肥对土壤 pH 提升效果不同,可能由于随着水稻的生长,根系分泌有机酸逐渐增多^[23],导致硅肥对土壤 pH 值增加效果降低。

本研究得出茎秆硅含量与水稻茎秆、叶片、稻壳镉含量,叶片硅含量与叶片、稻壳和稻米镉含量均呈负相关关系。表明施硅增加水稻对硅的吸收,降低了水稻地上各部位对镉的积累,可能是因为加硅使镉沉淀在根部内皮细胞壁,增加了锰膜对镉的积累,减少其向上转运^[24]。另外,加硅能够抑制质外体运输途径,阻塞细胞壁孔隙度,影响镉的质外体运输,从而降低镉向地上部运输^[25-26],同时,加硅使硅、镉主要积累在植物茎秆细胞壁边缘或以植硅体形态存在于茎秆中,降低了稻米潜在风险^[27],富硅改良剂增加了水稻中硅的含量,促进了硅与重金属形成复合物沉淀,进而减少了重金属转运^[28-29]。硅对水稻体内镉不同迁移态影响研究也表明,硅降低水稻根和茎叶中迁移性较强的乙醇提取态和去离子水提取态的镉含量,促进难迁移的醋酸提取态和盐酸提取态镉形态的生成,降低水稻体内镉的迁移性^[30]。综上表明,施硅降低土壤镉生物

有效性、抑制镉向上运输及镉在地上部的迁移转运过程共同决定了镉在水稻地上部的积累。

在本试验条件下,施用硅肥能够降低稻米中镉含量,但其含量仍超过 GB 2762—2005《食品中污染物限量》的标准限值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在本实验镉污染水平下($0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),仅单独依靠施用硅肥措施可能无法解决稻米镉超标问题,还需寻求其他措施加以综合利用。在施用硅肥修复稻田镉污染时,外源镉污染如大气沉降、灌溉水等因子也会对修复结果造成一定干扰。对于低浓度 Cd 污染农田,也许可以通过施用硅肥来降低稻米中 Cd 含量,控制其浓度在国家限量标准值内。我们在治理修复稻田镉污染工作中,在控制和隔绝污染源的同时,采用高效合理修复技术措施才是稻田镉污染修复的可持续发展道路。

4 结论

中度镉污染稻田施用硅肥能够增加水稻产量,施用硅肥可增加土壤有效硅含量,提高土壤 pH 值,从而降低镉生物有效性,降低镉在水稻体内的迁移转运,从而降低水稻地上部镉的积累,同时,增加了水稻地上部对硅的吸收积累,但不同时期施用硅肥对水稻增产效率、稻米降镉率和硅的积累差异明显。基施硅肥不仅增产效果明显,且消减稻米镉效果最佳,是一项值得推荐的硅肥施用技术。

参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 49(2): 750–759.
- [2] <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/W02014041755899580-4588.pdf>.
- [3] He B, Yun Z J, Shi J B, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(2): 134–140.
- [4] Rizwan M, Meunier J D, Miche H, et al. Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209/210: 326–334.
- [5] Ye J, Yan C L, Liu J C, et al. Effects of silicon on the distribution of cadmium compartmentation in root tips of *Kandelia candel* (S. L.) Yong[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 369–373.
- [6] Meharg C, Meharg A A. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 120: 8–17.
- [7] 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]. *Environment Science*, 2014, 35(7): 2762–2770.
- [8] 徐 奕, 李剑睿, 黄青青, 等. 坡缕石钝化与喷施叶面硅肥联合对水稻吸收积累镉效应影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1633–1641.
- XU Yi, LI Jian-rui, HUANG Qing-qing, et al. Effect of palygorskite immobilization combined with foliar silicon fertilizer application on Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1633–1641.
- [9] 余跑兰, 肖小军, 陈 燕, 等. 硅肥对早稻群体生产力和镉吸收的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 135–137.
- YU Pao-lan, XIAO Xiao-jun, CHEN Yan, et al. Effects of silicon fertilizer on population production and cadmium absorption for early rice[J]. *China Rice*, 2015, 21(4): 135–137.
- [10] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1475–1488.
- GONG Jin-long, HU Ya-jie, LONG Hou-yuan, et al. Effect of application of silicon at different periods on grain yield and silicon absorption, use efficiency in super rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1475–1488.
- [11] 金正勋, LUGO Oke, 朱方旭, 等. 硅肥施用量及时期对寒地水稻产量和品质性状及抗倒性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2015, 10: 49–53.
- JIN Zheng-xun, LUGO Oke, ZHU Fang-xu, et al. Effect of silicon application rate and stage on yield, quality and lodging resistance of rice in cold region[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015, 10: 49–53.
- [12] 戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 等. 测定水稻硅含量的一种简易方法[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(5): 460–462.
- DAI Wei-min, ZHANG Ke-qin, DUAN Bin-wu, et al. Rapid determination of silicon content in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Chinese J Rice Sci*, 2005, 19(5): 460–462.
- [13] 邓接楼, 王艾平, 何长水, 等. 硅肥对水稻生长发育及产量品质的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 12: 58–61.
- DENG Jie-lou, WANG Ai-ping, HE Chang-shui, et al. The effect of silicon fertilizer on growth and development, yield and quality of rice [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2011, 12: 58–61.
- [14] 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.
- [15] 赵 理, 史春余, 王新娟, 等. 不同类型硅肥对水稻生长发育及其产量的影响[J]. 山东农业科学, 2012, 44(6): 72–76.
- ZHAO Li, SHI Chun-yu, WANG Xin-juan, et al. Effects of different silicon fertilizers on growth and yield of rice[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(6): 72–76.
- [16] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. 中国农业生态学报, 2010, 18(4): 847–851.

- ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, LIU Guo-sheng, et al. Effects and mechanisms of amendments on remediation of cadmium contaminated acid paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 847-851.
- [17] 杨文弢, 周 航, 邓贵友, 等. 组配改良剂对污染稻田中铅、镉和砷生物有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 257-263.
- YANG Wen-tao, ZHOU Hang, DENG Gui-you, et al. Effects of combined amendment on bioavailability of Pb, Cd, and As in polluted paddy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1): 257-263.
- [18] 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.
- [19] 殷 飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂及对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 438-448.
- YIN Fei, WANG Hai-juan, LI Yan-yan, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 438-448.
- [20] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3种改良剂对不同土壤-水稻系统中Cd行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 834-840.
- ZONG Liang-gang, ZHANG Li-na, SUN Jing-ke, et al. Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 834-840.
- [21] 邓腾灏博, 谷海红, 仇荣亮. 钢渣施用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] 陈桂芬, 雷 静, 黄雁飞, 等. 广西稻田镉污染状况及硅对稻米镉的消减作用[J]. 南方农业学报, 2015, 46(5): 772-776.
- CHEN Gui-fen, LEI Jing, HUANG Yan-fei, et al. Status of heavy metal contamination of paddy soil in Guangxi and effect of silicon fertilizer to reduce Cd content of brown rice[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(5): 772-776.
- [23] Aulakh M S, Wassmann R, Bueno C, et al. Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars [J]. *Plant Biology*, 2001, 230(1): 77-86.
- [24] Zhang Q, Liu J C, Lu H L, et al. Effect of silicon on growth, root anatomy, radial oxygen loss (ROL) and Fe/Mn plaque of *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco seedlings exposed to cadmium[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 2015, 4: 6-11.
- [25] Shi X, Zhang C, Wang H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1): 53-60.
- [26] da Cunha K P V, do Nascimento C W A. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2009, 197(1/2/3/4): 323-330.
- [27] Zhang C C, Wang L J, Nie Q, et al. Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 300-307.
- [28] Neumann D, ZurNieden U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Phytochemistry*, 2001, 56(7): 685-692.
- [29] Gu H H, Qiu H, Tian T, et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9): 1234-1240.
- [30] Prabagar S, Hodson M J, Evans D E. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Krast.) [J]. *Environment and Experiment Botany*, 2011, 70(2): 266-276.