

贺敏杰, 蔡昆争, 王 维, 等. 硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1651–1659.

HE Min-jie, CAI Kun-zheng, WANG Wei, et al. Effects of split silicon application on the fractions of Cd in soil and its accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1651–1659.

硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响

贺敏杰¹, 蔡昆争¹, 王 维², 黄 飞¹, 蔡一霞^{1*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 2. 华南农业大学农学院, 广州 510642)

摘 要: 为了探明硅素运筹对土壤-水稻(*Oryza sativa* L.)体系中Cd迁移的影响, 探索缓解Cd污染土壤中水稻吸收和积累Cd的最佳施硅时期和施硅比例, 采用盆栽实验, 以稻田土壤为供试土壤, 外源添加氯化镉模拟Cd含量为100 mg·kg⁻¹的污染土壤, 在施硅总量(56 mg·kg⁻¹土壤)不变的基础上设置基施硅素(C1)、基肥和拔节期硅素1:1分期施用(C2)和拔节期施硅素(C3)3种处理, 以不施硅(CK)为对照, 研究硅素分期施用对土壤Cd的形态以及水稻对Cd的吸收、转运和累积的影响。结果表明: 与CK相比, C2和C3处理水稻成熟期土壤中Cd含量增加19.4%(*P*<0.05)、18.9%(*P*<0.05), C2和C3土壤可交换态Cd含量降低27.3%(*P*<0.05)、27.1%(*P*<0.05), 而土壤残渣态Cd含量分别增加97.7%(*P*<0.05)、111.3%(*P*<0.05)。成熟期各施硅处理水稻的根和糊粉层中Cd含量显著增加, 而茎、叶和精米中Cd含量明显降低, 其中C1、C2和C3精米的Cd含量分别比CK降低13.8%(*P*<0.05)、35.1%(*P*<0.05)和27.9%(*P*<0.05), 茎、叶、精米的Cd转移系数和富集系数也显著降低, 而根的Cd富集系数显著升高。此外, 本研究还发现土壤各形态Cd含量与水稻根和精米中Cd累积量有着显著的相关关系。综上表明, C2和C3成熟期土壤Cd的有效性显著降低, 残渣态Cd显著增加, Cd从土壤向稻株中的转移受到抑制, 水稻吸收的Cd大部分累积在根部, 降低Cd向地上部各器官的迁移, 从而导致精米Cd含量和累积量明显降低, 其中C2处理更利于整个生育期土壤可还原态Cd含量的减少和抽穗期土壤中可氧化态Cd含量的增加, 利于抽穗前水稻生长发育。C2处理施硅效果好, 值得推荐。

关键词: 水稻; 硅; Cd形态; 迁移; 积累

中图分类号: S511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)08-1651-09 **doi:** 10.11654/jaes.2018-0131

Effects of split silicon application on the fractions of Cd in soil and its accumulation in rice

HE Min-jie¹, CAI Kun-zheng¹, WANG Wei², HUANG Fei¹, CAI Yi-xia^{1*}

(1. Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The aims of this study are to investigate the influences of silicon application on the migration of cadmium in soil-rice (*Oryza sativa* L.) systems and to explore the optimal timing and ratio of silicon application for alleviating the uptake and accumulation of Cd in Cd-contaminated soil. A pot experiment was carried out to study the effects of silicon application at different stages on the fractions of Cd in soil and on the uptake, transport, and accumulation of Cd in rice. Cadmium chloride was added to simulate polluted soil with a Cd content of 100 mg·kg⁻¹. Based on the same total amount of silicon application (56 mg·kg⁻¹), three kinds of silicon application methods were designed: silicon applied as basal fertilizer (C1), silicon applied as basal fertilizer and at jointing stages with a ratio of 1:1 (C2), and silicon applied at jointing stages (C3). No silicon application was used as the control (CK). The results showed the Cd contents in soil at the mature stage in-

收稿日期: 2018-01-23 录用日期: 2018-03-29

作者简介: 贺敏杰(1992—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事硅缓解水稻镉胁迫研究。E-mail: 735581696@qq.com

*通信作者: 蔡一霞 E-mail: caiyixia@scau.edu

基金项目: 广东省科技计划项目(2013B020310010); 农业部农业环境重点实验室开放基金项目; 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102402)

Project supported: Science and Technology Planning Program of Guangdong Province(2013B020310010); Open Foundation of Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, P. R. China; The National High Technology Research and Development Program of China (2013AA102402)

creased by 19.4% ($P<0.05$) and 18.9% ($P<0.05$) with the C2 and C3 treatments, respectively, compared to the CK levels. The exchangeable Cd contents in soil with C2 and C3 treatments decreased by 27.3% ($P<0.05$) and 27.1% ($P<0.05$), respectively, whereas the residual Cd contents in soil increased by 97.7% ($P<0.05$) and 111.3% ($P<0.05$), respectively. The Cd contents in roots and the aleurone layer treated with silicon at maturity were elevated significantly, whereas those in stems, leaves, and white polished rice were lower. Furthermore, the Cd contents in the white rice were lower by 13.8% ($P<0.05$), 35.1% ($P<0.05$), and 27.9% ($P<0.05$) with C1, C2, and C3 treatments, respectively, compared to the CK levels. The transfer factors and bioconcentration enrichment factor (BEF) of Cd in stems, leaves, and polished rice at the mature stage were reduced by silicon application. However, the BEF of Cd in roots was increased. Furthermore, there was a significant correlation between the content of different fractions of Cd in soil and Cd accumulation in roots and polished rice. In summary, soil Cd availabilities with the C2 and C3 treatments at the mature stage were reduced, whereas residual Cd were significantly increased with silicon application. The transfer of Cd from the soil to the rice plant was inhibited, and much of the Cd absorbed by the rice was deposited in roots, which reduced the migration of Cd to aboveground. Consequently, the content and accumulation of Cd in white rice were decreased explicitly and those in polished rice were significantly decreased. In addition, C2 treatment was more effective for reducing the content of reducible Cd in soil throughout the growth period, increased the content of oxidizable Cd in soil at the heading stage, and promoted the growth and development of rice before the heading stage. The effect of C2 treatment was the best, and thus was recommended for practical use.

Keywords: rice; silicon; fractions of cadmium; transport; accumulation

近年来工业活动、城市垃圾、大气沉降以及农业生产中化肥农药的施用使得受重金属污染的耕地面积大量增加,全国受污染的土壤总的超标率为16.1%,其中Cd污染的点位超标率达到7.0%^[1]。Cd是对作物有较高毒性的元素之一,且在土壤和植株中较易迁移,不仅危害植物的生长和发育,也会直接或者间接地通过食物链对人类健康造成重大危害。水稻(*Oryza sativa* L.)是我国重要的粮食作物,潘根兴等^[2]对华东、华北、华中、西南等6地区县级以上市场的170多种大米样品进行了随机采购和数据分析,结果发现有10%的样品Cd超标。因此研究Cd污染土壤水稻体系中Cd的积累和转移规律对水稻的安全生产具有重要的理论指导意义。

目前改良重金属污染土壤最主要的措施之一是施用改良剂,降低其在土壤中的活性,进而减少其在植物体内的积累^[3]。现有的研究表明,硅是水稻生长发育过程吸收较多的元素之一,不仅能够促进水稻正常的生长发育,提高作物产量和改善籽粒品质,而且能够提高水稻的抗逆性^[4-5]。大量研究表明,硅能够缓解重金属对水稻的毒害效应^[6-7]。Liang等^[8]认为,施硅后水稻根部所吸收的Cd向地上部分迁移的量明显减少。张世浩^[9]研究发现,不同施硅量和施硅时期对水稻体内Cd吸收、积累与分配有一定影响,并认为拔节期施硅对稻米Cd积累有着明显的缓解作用。再者,不同时期施硅对水稻群体生长和产量影响也不同^[4]。因此可以推测不同生育期施硅对水稻Cd的累积与分配有可能存在不同影响。此外,重金属的活动性、生物有效性及毒害性等取决于它们在土壤中的化

学形态^[10-12]。硅能够改变土壤中重金属的形态,降低其在土壤中生物有效性,从而抑制水稻对Cd的吸收、减少Cd向地上部运输^[13-14]。

本文为了进一步探讨硅素施用时期对稻米Cd积累影响,在施硅总量不变的基础上,设置硅素分期施用3种方法,研究其对土壤各形态Cd含量与稻株内Cd的累积、迁移与分配的影响规律。其结果可作为指导生产实践中受Cd污染的稻田硅素施用的理论依据,对降低稻米Cd含量、促进水稻的安全优质生产有着重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2016年7月至2016年11月在农业部华南热带农业环境重点实验室实验基地(23.21°N, 113.42°E)温室大棚进行。以广东地区大面积推广品种黄华占为材料,供试土壤取自华南农业大学跃进南稻田耕作层0~30 cm土壤,供试土壤的基本理化性状如下:有机质 24.74 g·kg⁻¹,全氮 1.05 g·kg⁻¹,全磷 1.38 g·kg⁻¹,全钾 22.0 g·kg⁻¹,全镉低于检测线。

1.2 盆栽实验

水稻盆栽实验使用无盖的圆柱形黑色塑料桶(20 cm×28 cm×17 cm),人工添加外源Cd(CdCl₂·2.5 H₂O)模拟含Cd为100 mg·kg⁻¹的污染土壤,每盆装污染土5 kg。根据张世浩^[9]“100 mg·kg⁻¹的Cd污染土壤中加入56 mg·kg⁻¹ Si效果显著”的研究结果,在总施硅量(硅酸钾 56 mg·kg⁻¹土壤, K₂SiO₃·5H₂O)不变的基础上,设置3种施硅方式,分别是基施硅素(C1):

移栽前加入 5 L 2 mmol·L⁻¹ 硅溶液;基肥和拔节期施硅素 1:1 分期施用(C2):移栽前和拔节期各施用 2.5 L 2 mmol·L⁻¹ 硅溶液;拔节期施硅素(C3):拔节期施用 5 L 2 mmol·L⁻¹ 硅溶液。以不施硅(CK)为对照。每个处理种植 10 盆,共 40 盆。挑选长势均一的秧苗进行移栽,每盆 3 穴,每穴 1 株。为保证实验过程中水稻正常生长,在水稻移栽前每盆施用尿素 3 g、磷酸氢二钾 1 g 用作基肥,生育期间根据长势补充上述基肥。用硝酸调节硅酸钾溶液 pH 值至 7。在整个试验期间,盆钵置于通风玻璃温室内,用实验基地安装的自来水进行灌溉,每日下午 5 点,用 500 mL 塑料烧杯进行浇灌,使种植水稻的盆内水层保持 1~2 cm。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 水稻生物量、产量及构成因素的测定

于水稻抽穗期和成熟期各取 5 盆水稻,分别按地上部和地下部收获,分根、茎、叶、穗四部分(抽穗期的穗和茎混在一起),将根、茎、叶于 110 ℃ 烘箱中杀青 30 min,转入 70 ℃ 下烘干至恒重,用万分之一天平(Sartorius AG,德国生产)称重。成熟期的穗部自然风干,并对每盆穗数、每穗实粒数、每穗空粒数、千粒重、结实率、产量进行分析。

1.3.2 土壤 pH 值、镉含量及其形态的分析

于水稻抽穗期和成熟期,各取 5 盆水稻土,每盆选取三个等距离的点用取土器取 20 cm 土,并将三个点的土样混合在一起。土样放在阴凉处风干、待测。

土壤 pH 值参考鲍士旦^[15]的方法测定。

土壤 Cd 含量测定方法:准确称取 0.15 g 过 100 目筛的风干待测土壤于聚四氟乙烯消解管中,加入消解液[V(HNO₃):V(HF)=4:1]10 mL,盖上密封盖,放入微波消解仪(CEM)进行消解,消解结束后将液体倒入 25 mL 小烧杯中于电热板上加热将酸挥发干,在赶酸过程中可适当加入 1 mL H₂O₂使反应更加充分;冷却后用去离子水洗涤转入 50 mL 容量瓶中定容;将样品转移到 50 mL 塑料瓶中,用火焰原子吸收仪(德国耶拿 ZEEnit® 700P)测定土壤 Cd 含量。

土壤中 Cd 各个形态的含量按照吕兑安^[16]改进的 BCR 连续提取法进行提取。

1.3.3 水稻植株中 Cd 含量测定

参考鲍士旦^[15]的方法。

1.4 数据处理及统计方法

数据统计与分析均采用 SPSS 18.0 显著性 *F* 测验和 Duncan 多重比较法(*P*<0.05 和 *P*<0.01),图形采用 Origin 8.0 进行绘制。

$Cd \text{ 的累积量 (mg) } = c \times m,$

式中:*c* 为该物质中 Cd 含量,mg·kg⁻¹; *m* 为该物质的质量,kg。

富集系数=植株 Cd 含量(mg·kg⁻¹)/土壤 Cd 含量(mg·kg⁻¹)

转运系数=植株地上部 Cd 含量(mg·kg⁻¹)/植株地下部 Cd 含量(mg·kg⁻¹)

灌浆结实期土壤 Cd 迁出率=[抽穗期土壤 Cd 含量(mg·kg⁻¹)-成熟期土壤 Cd 含量(mg·kg⁻¹)/抽穗期土壤 Cd 含量(mg·kg⁻¹)×100%

2 结果与分析

2.1 对 Cd 污染土壤中水稻生物量、产量及构成因素的影响

2.1.1 对水稻生物量的影响

对水稻生物量的影响如表 1 所示。硅素分期施用对抽穗期水稻茎、叶干质量的影响并不显著,但是 C1 根的生物量较 CK 显著增加。成熟期根、茎、叶以及籽粒干质量受硅素分期施用的影响较大,C1 的籽粒干质量较 CK 增加 11.0 % (*P*<0.05); C2 处理的茎和籽粒干质量较 CK 分别增加 25.2% (*P*<0.05)、27.7% (*P*<0.05); C3 处理的根和茎的干质量较 CK 分别增加 33.2% (*P*<0.05)、16.4% (*P*<0.05)。与 CK 相比,C1、C2、C3 施硅处理成熟期地上部干质量的增幅分别是 9.6% (*P*<0.05)、13.5% (*P*<0.05)、11.1% (*P*<0.05)。这说明在 100 mg·kg⁻¹ Cd 污染土壤中施硅有利于稻株生长,利于干物质积累,提高稻株生物量,C2 表现尤为明显。

2.1.2 对产量构成因素的影响

由表 2 可知,硅素分期施用对水稻千粒重、结实率以及每穗空粒数有一定影响,但对每穗实粒数影响不大。与 CK 相比,3 种硅素施用处理的水稻千粒重(C1 除外)和结实率均显著增加,而每穗空粒数则显著降低。与 CK 相比,C1、C2、C3 千粒重和结实率的增幅分别达到 3.7%、7.2% (*P*<0.05)、6.2% (*P*<0.05) 和 19.9% (*P*<0.05)、23.2% (*P*<0.05)、31.6% (*P*<0.05)。

2.2 对土壤 Cd 含量及其形态的影响

2.2.1 对土壤 Cd 含量的影响

水稻抽穗期各个处理土壤 Cd 含量无显著差异(表 3),而成熟期 C2 和 C3 的土壤 Cd 含量显著高于 CK,这说明拔节期施硅可有效地阻止土壤中 Cd 向水稻植株中转移,使滞留在土壤中的 Cd 明显增加。此外,施硅降低灌浆结实阶段土壤 Cd 迁出率。与 CK 相

表 1 硅素分期施用对 Cd 污染土壤中水稻生物量的影响(g·盆⁻¹)

Table 1 Effects of split silicon application on biomass of rice in the soil polluted with cadmium(g·pot⁻¹)

生育期	处理	根	茎	叶	籽粒	地上部干质量
抽穗期	CK	34.31±3.07b	22.80±0.60a	14.63±0.61a	—	43.43±0.36a
	C1	42.39±2.66a	33.06±3.42a	15.81±0.85a	—	48.87±4.26a
	C2	36.68±1.25ab	32.70±1.42a	14.95±0.70a	—	47.65±2.12a
	C3	33.86±0.60b	27.66±2.88a	13.09±1.71a	—	40.75±4.31a
成熟期	CK	39.53±3.89b	37.35±1.65b	15.63±0.22a	56.49±4.52c	109.48±0.98b
	C1	49.71±3.35ab	42.13±1.17ab	15.09±0.98a	62.72±5.89b	119.94±1.91a
	C2	50.35±4.63ab	46.77±2.58a	16.21±1.29a	72.12±2.36a	124.30±3.60a
	C3	52.64±0.77a	43.46±0.60a	16.89±0.78a	61.31±3.89bc	121.66±1.55a

注:不同小写字母表示同一时期不同处理之间差异显著, $P<0.05$ 。C1:基施硅素;C2:基肥和拔节期施硅素 1:1 分期施用;C3:拔节期施硅素;CK:不施硅。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in the treatments within the same column at the same growth stage. C1: basal fertilizer, C2: silicon applied as basal fertilizer and at jointing stages with a ratio of 1:1, C3: silicon applied at jointing stages, CK: no silicon application. The same as below.

表 2 硅素分期施用对 Cd 污染土壤下水稻产量构成因素的影响

Table 2 Effects of split silicon application on yield factors of rice planted in cadmium polluted soil

处理	千粒重/g	结实率/%	每穗实粒数	每穗空粒数
CK	21.06±0.06b	71.93±1.71b	114.97±6.85a	22.25±1.73a
C1	21.83±0.52ab	86.28±3.13a	117.95±2.69a	13.95±2.11b
C2	22.58±0.05a	88.61±1.76a	124.03±1.43a	13.47±0.66b
C3	22.37±0.47a	94.67±2.27a	112.49±9.12a	9.18±2.23b

表 3 硅素分期施用对抽穗期和成熟期土壤 Cd 含量及其迁出率的影响

Table 3 Effects of split silicon application on Cd content of soil at heading and mature stage

处理	抽穗期/mg·kg ⁻¹	成熟期/mg·kg ⁻¹	灌浆结实期土壤 Cd 迁出率/%
CK	62.08±1.91a	55.23±0.80b	10.96±1.28a
C1	64.44±5.69a	58.49±4.42ab	8.98±1.86ab
C2	68.46±5.61a	65.96±1.84a	3.62±0.46c
C3	69.27±3.32a	65.65±2.41a	5.13±1.19bc

比,各施硅处理灌浆结实阶段土壤 Cd 迁出率的降幅分别为 18.1%、67.0% ($P<0.05$)、53.3% ($P<0.05$)。这说明从抽穗到成熟这一阶段,即水稻籽粒灌浆期,CK 土壤中仍有较多的 Cd 向水稻植株中转移,而施用硅素可以阻碍土壤 Cd 向稻株中迁移,使其滞留在土壤中,尤其是拔节期施硅,可明显使更多的 Cd 滞留在土壤中。

2.2.2 对土壤各形态 Cd 含量的影响

由图 1 可知,3 种施硅处理对水稻抽穗期土壤可交换态和残渣态 Cd 含量无显著影响,但显著降低了成熟期土壤可交换态 Cd 含量、提高了残渣态 Cd 含量。

土壤中可还原态和可氧化态 Cd 的含量也受到硅素分期施用的影响。抽穗期,C1 和 C2 处理还原态 Cd 含量显著低于 CK 和 C3,然而,土壤可氧化态 Cd 含量却高于 CK 和 C3;成熟期 3 种施硅处理的土壤可还原态 Cd 含量显著低于 CK,而土壤可氧化态 Cd 含量却高于 CK,其中 C2 含量显著高于 C1。由此可知,基施硅素 C1 有利于水稻生长前期土壤可还原态 Cd 含量降低和可氧化态 Cd 含量的增加,而基肥和拔节期硅素 1:1 分期施用处理 C2 对提高水稻生长后期土壤可氧化态 Cd 含量有利,而且 C2 这种基肥与拔节期分期施用硅素更利于整个生育期土壤可氧化态 Cd 含量增加和土壤可还原态 Cd 含量的减少。

由图 2、图 3 可知,土壤中各形态 Cd 含量的比例明显受硅素分期施用的影响,施硅处理的成熟期土壤中残渣态 Cd 的比例增加,而可交换态 Cd 的比例明显降低。与 CK 相比,成熟期 C1、C2、C3 处理残渣态 Cd 的比例分别上升了 50.7%、77.9%、82.5%,而可交换态 Cd 的比例分别降低了 19.8%、34.5%、37.0% (图 3)。这说明拔节期施硅显著影响了水稻灌浆结实期间土壤中 Cd 的形态,从而影响这一时间 Cd 从土壤向稻株的转移,使土壤中滞留更多的残渣态 Cd 和可氧化态

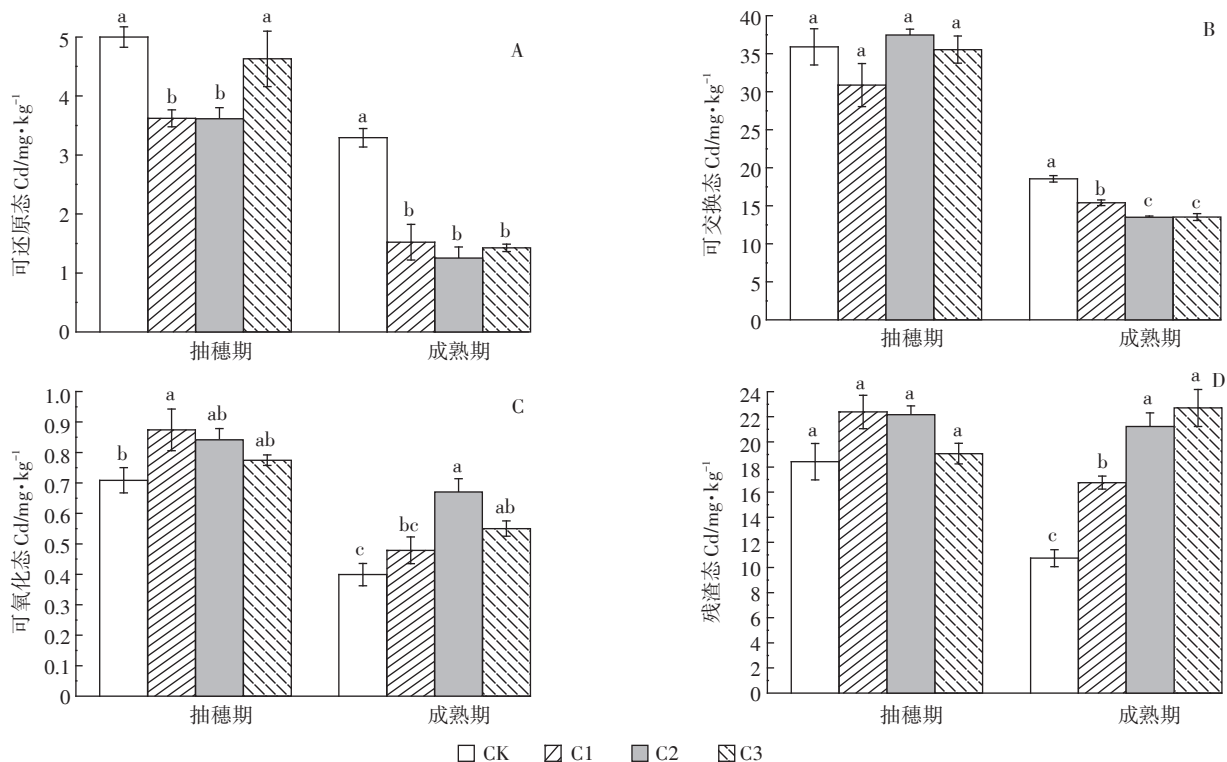


图1 硅素分期施用对土壤中可还原态Cd(A)、可交换态Cd(B)、可氧化态Cd(C)以及残渣态Cd(D)含量的影响

Figure 1 Effects of split silicon application on the contents of reducible Cd(A), exchangeable Cd(B), oxidizable Cd(C) and residual Cd(D) in soil

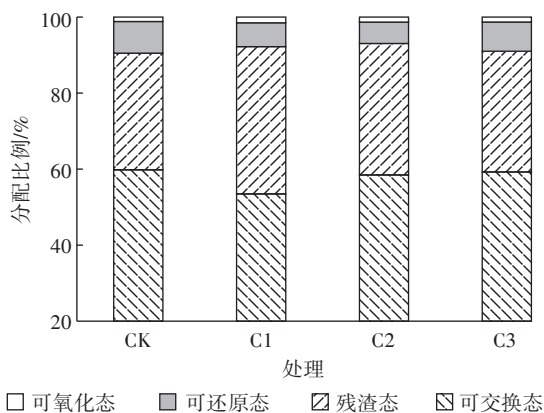


图2 硅素分期施用对水稻抽穗期土壤中各形态Cd分配比例的影响

Figure 2 Effects of split silicon application on cadmium distribution ratios of all fractions in soil at heading stage of rice

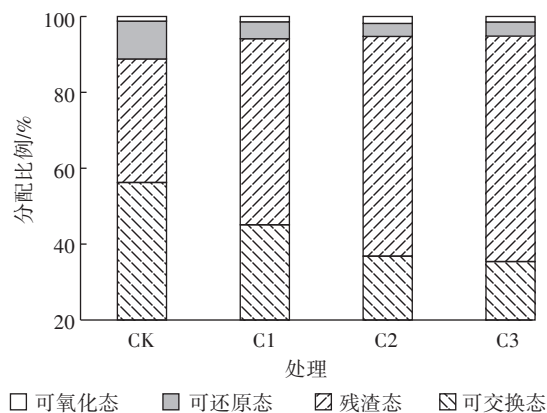


图3 硅素分期施用对水稻成熟期土壤中各形态Cd分配比例的影响

Figure 3 Effects of split silicon application on cadmium distribution ratios of all fractions in soil at mature stage of rice

Cd,从而减少了相对活跃的可交换态和可还原态Cd含量。

2.3 硅素分期施用对水稻植株Cd含量的影响

2.3.1 对水稻各器官Cd含量的影响

由表4可知,硅素分期施用对水稻抽穗期和成熟期各器官Cd含量均有一定的影响。抽穗期,C1和C2的茎和叶Cd含量与CK、C3相比显著降低,而C2和

C3根中Cd含量显著升高;成熟期,施硅处理的根和糊粉层中Cd含量增加,而茎、叶和精米中的Cd含量显著降低,C1、C2和C3精米的Cd含量与CK相比分别降低了13.8% ($P < 0.05$)、35.1% ($P < 0.05$)、27.9% ($P < 0.05$)。

2.3.2 对水稻各器官Cd累积量的影响

由表5可知,抽穗期,C2、C3根中Cd累积量显著

高于CK,而其茎、叶中Cd累积量与CK相比无显著差异。但从单盆稻株Cd累积量来看,C2单盆稻株Cd累积量显著高于CK。成熟期,3种施硅处理的根和谷壳(除C1外)中Cd累积量较CK而言均有所增加。与CK相比,C1、C2和C3精米中Cd累积量分别降低了21%、27% ($P<0.05$)、34% ($P<0.05$)。值得注意的是C2和C3处理,其根中Cd累积量较高,导致成熟期单盆稻株Cd累积量显著高于CK和C1处理。

2.3.3 对水稻各器官Cd富集系数的影响

由表6可知,水稻抽穗期和成熟期各器官Cd富

集系数明显受到硅素分期施用的影响。抽穗期,C2和C3根的Cd富集系数较CK显著增加,而C1和C2的茎、叶Cd富集系数显著降低;成熟期,C2和C3根的Cd富集系数较CK分别增加27.7% ($P<0.05$)、34.6% ($P<0.05$),而茎和叶的Cd富集系数显著降低。施硅各处理精米的Cd富集系数差异显著,CK富集系数最高,其次是C1,C2和C3较低。谷壳和糊粉层的Cd富集系数在各个处理之间均未表现出显著性差异。

2.3.4 对水稻各器官Cd转移系数的影响

由表7可知,抽穗期C1、C2水稻茎的Cd转移系

表4 硅素分期施用对Cd污染土壤下水稻各器官Cd含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Effects of split silicon application on Cd contents of different rice organs in cadmium polluted soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

生育期	处理	根	茎	叶	精米	糊粉层	谷壳
抽穗期	CK	124.28±2.90b	6.31±0.14a	5.24±0.20a	—	—	—
	C1	130.77±4.11b	3.91±0.22b	3.68±0.17b	—	—	—
	C2	181.13±5.33a	4.27±0.25b	4.08±0.10b	—	—	—
	C3	167.98±6.22a	5.97±0.29a	5.02±0.12a	—	—	—
成熟期	CK	135.92±6.57b	5.39±0.18a	3.64±0.10a	2.76±0.16a	3.10±0.05b	2.60±0.13c
	C1	150.83±2.73b	3.63±0.42b	2.92±0.17b	2.38±0.08b	3.41±0.04a	2.61±0.18bc
	C2	207.08±5.68a	3.50±0.61b	2.76±0.23b	1.79±0.08c	3.52±0.05a	2.87±0.13ab
	C3	216.64±1.75a	3.62±0.21b	2.83±0.90b	1.99±0.12c	3.36±0.10a	3.04±0.03a

表5 硅素分期施用对Cd污染土壤下水稻各器官Cd累积量的影响($\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$)

Table 5 Effects of split silicon application on Cd accumulations in different organs of rice in cadmium polluted soil ($\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$)

生育期	处理	根	茎	叶	谷壳	糊粉层	精米	单盆植株
抽穗期	CK	4.280±0.472b	0.182±0.016a	0.077±0.006a	—	—	—	4.539±0.477b
	C1	5.565±0.517ab	0.131±0.019a	0.058±0.005a	—	—	—	5.754±0.540ab
	C2	6.645±0.331a	0.140±0.011a	0.061±0.004a	—	—	—	6.846±0.331a
	C3	5.694±0.300a	0.165±0.019a	0.066±0.008a	—	—	—	5.925±0.320ab
成熟期	CK	5.422±0.576b	0.202±0.015a	0.057±0.002a	0.026±0.002ab	0.016±0.002a	0.100±0.011a	5.821±0.829b
	C1	7.511±0.614b	0.154±0.022a	0.044±0.005a	0.024±0.002b	0.016±0.001a	0.079±0.004ab	7.828±0.638b
	C2	10.478±0.427a	0.167±0.036a	0.045±0.007a	0.032±0.002a	0.020±0.001a	0.063±0.005b	10.815±1.292a
	C3	11.397±0.160a	0.158±0.011a	0.048±0.003a	0.030±0.002ab	0.016±0.001a	0.066±0.008b	11.714±0.234a

表6 硅素分期施用对Cd污染土壤下水稻各器官Cd富集系数的影响

Table 6 Effects of split silicon application on bioconcentration enrichment factor (BEF) of Cd in different organs in cadmium polluted soil

生育期	处理	根	茎	叶	谷壳	糊粉层	精米
抽穗期	CK	2.003±0.002b	0.102±0.003a	0.084±0.001a	—	—	—
	C1	2.049±0.118b	0.061±0.005b	0.058±0.003c	—	—	—
	C2	2.652±0.125a	0.062±0.003b	0.060±0.002c	—	—	—
	C3	2.428±0.030a	0.087±0.007a	0.074±0.003b	—	—	—
成熟期	CK	2.459±0.078b	0.098±0.001a	0.066±0.002a	0.047±0.002a	0.055±0.001a	0.050±0.002a
	C1	2.599±0.138b	0.062±0.005b	0.050±0.001b	0.045±0.003a	0.058±0.004a	0.041±0.002b
	C2	3.140±0.045a	0.053±0.008b	0.042±0.002c	0.044±0.001a	0.053±0.002a	0.027±0.001c
	C3	3.311±0.174a	0.055±0.001b	0.043±0.002c	0.046±0.001a	0.051±0.002a	0.030±0.001c

数较CK分别降低了41.2% ($P<0.05$)、52.9% ($P<0.05$),抽穗期C1、C2、C3叶片的Cd转移系数均低于CK,降幅分别为33.3% ($P<0.05$)、45.2% ($P<0.05$)、28.6% ($P<0.05$);成熟期各施硅处理茎、叶、谷壳以及精米的Cd转移系数均显著低于CK,C2和C3转运系数达到最低。

2.4 对土壤pH的影响

由图4可知,硅素可显著提高污染土壤pH值。抽穗期C1处理土壤pH值显著高于其他处理,这一点可能与本试验C1处理的硅全部在移栽前施用有关;而随着生育进程的推进和拔节期硅素的施用,成熟期C2、C3处理土壤的pH值显著上升,但3种施硅处理之间无显著差异。

2.5 成熟期土壤各形态Cd含量与水稻各器官Cd累积量的相关性分析

由表8可知,水稻根中Cd的累积量与土壤可交换态和可还原态Cd含量呈显著负相关,与残渣态以及可氧化态呈显著正相关,而精米中Cd的累积量与土壤各形态Cd含量的相关性正好相反,精米中Cd累积量与土壤可交换态和可还原态Cd含量呈显著正相关,与残渣态和可氧化态呈显著负相关。其他器官

茎、叶、谷壳、糊粉层中Cd累积量与土壤各形态Cd含量无显著性相关关系。

3 讨论

3.1 对水稻生长发育及产量的影响

研究表明,施硅对水稻有一定的增产作用^[17-19]。宋合林等^[20]研究表明,不同生育时期施用硅肥对水稻生长发育均有良好的作用,增产效果较为明显,尤以拔节前追施硅肥效果为最佳,增产幅度达到10.5%。张国良等^[21]研究结果表明,不同时期施用硅肥均可通过提高水稻的结实率、增加每穗实粒数、提高千粒重来增加水稻产量。本研究结果表明,在 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Cd污染水平下,基肥和拔节期硅素1:1分期施用处理C2以及拔节期施硅C3能够增加水稻根、茎和籽粒的干质量。同时也增加水稻的千粒重和结实率,降低每穗空粒数,这与周青等^[4,22]发现拔节期前施硅可增加水稻每穗结实粒数的结果一致;但C2比C3更能够有效提高成熟期水稻地上部干质量,其原因可能是

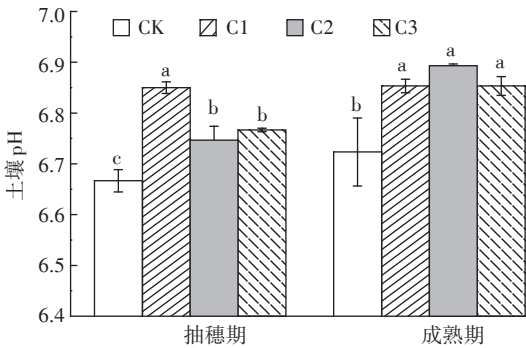


图4 分期施用硅素对土壤pH值的影响

Figure 4 Effects of split silicon application on pH value of soil

表8 成熟期土壤各形态Cd含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和水稻各器官Cd累积量(mg)之间的相关关系($n=12$)

Table 8 Correlation between Cd speciation in soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and Cd accumulations(mg) in different organs of rice at mature stage($n=12$)

水稻各器官	土壤各形态Cd			
	可交换态Cd	残渣态Cd	可还原态Cd	可氧化态Cd
根	-0.823**	0.791**	-0.699*	0.601*
茎	0.413	-0.645	0.442	-0.365
叶	0.534	-0.449	0.644	-0.420
谷壳	-0.504	0.396	-0.247	0.453
糊粉层	-0.406	0.192	-0.284	0.368
精米	0.675*	-0.818**	0.718**	-0.690*

注:*代表 $P<0.05$,**代表 $P<0.01$ 。

Note:* represents $P<0.05$,** represents $P<0.01$.

表7 硅素分期施用对Cd污染土壤下水稻各器官Cd转移系数的影响

Table 7 Effect of split silicon application on transfer factor in different organs in cadmium polluted soil

生育期	处理	茎	叶	谷壳	糊粉层	精米
抽穗期	CK	0.051±0.001a	0.042±0.002a	—	—	—
	C1	0.030±0.001bc	0.028±0.001b	—	—	—
	C2	0.024±0.002c	0.023±0.001c	—	—	—
	C3	0.036±0.003b	0.030±0.002b	—	—	—
成熟期	CK	0.40±0.001a	0.027±0.001a	0.019±0.001a	0.023±0.001a	0.020±0.001a
	C1	0.024±0.002b	0.019±0.001b	0.017±0.001b	0.023±0.001a	0.016±0.001b
	C2	0.017±0.003c	0.013±0.001c	0.014±0.002c	0.017±0.002b	0.009±0.002c
	C3	0.017±0.001c	0.013±0.001c	0.014±0.004c	0.016±0.001b	0.009±0.001c

硅素分期施用更有利于水稻的前期营养生长以及后期的生殖生长,硅在整个水稻生育期均起到作用。

3.2 对水稻Cd吸收、累积及转运的影响

本试验条件下,抽穗期C1和C2处理茎和叶中的Cd含量显著降低,但C2根中Cd含量及累积量却显著增加,这说明基施硅素有利于减少水稻从移栽到抽穗期阶段地上部茎和叶中Cd的累积,使吸收的Cd积累在根中。成熟期,3种施硅处理茎、叶和精米中Cd的含量均明显降低,尤其是C2和C3中精米Cd含量达到最低,且C2和C3精米中Cd累积量也达到最低;但却显著增加了C2和C3根、糊粉层Cd的含量。由此可知,在总施硅量不变的基础上,拔节期施硅可抑制根中Cd向地上部及籽粒中的转移,从而使Cd滞留在根部,表现为施硅显著增加了根对Cd吸收,提高了根对Cd的富集能力(表6)。而C2分期施用硅素不仅有利于抽穗前根中Cd累积,抑制Cd从根向地上部茎叶中转运,而且也利于降低精米中Cd积累。

抽穗期C1和C2根中Cd富集系数增加,而茎、叶中Cd富集系数显著降低,这说明基施硅素可促进抽穗前水稻根对Cd的富集,并对茎叶的Cd富集起到抑制作用。到成熟期施硅对根、茎、叶的Cd富集能力仍有显著影响,这与抽穗期表现基本一致。此结果与史新慧等^[17,23]水培试验研究结果一致。抽穗期水稻C1和C2茎、叶中Cd转移系数显著降低,而到成熟期C2和C3茎叶的Cd转移系数明显下降,表明从抽穗到成熟这一生育阶段,C2、C3两处理从土壤中吸收的Cd大部分都累积在根部,从根向地上部转移的Cd受到抑制,从而降低茎、叶、精米中Cd含量。

上述结果说明基施硅素可抑制Cd在移栽到抽穗这一阶段从根中向水稻茎叶中转移,而对于基肥和拔节期硅素1:1分期施用处理C2而言,其不仅可以影响Cd在移栽到抽穗这一生育阶段从根中向地上部的转移,而且可以明显抑制灌浆结实阶段Cd向精米中的转移。

3.3 对土壤Cd含量及其各形态的影响

现有研究认为Tessier法中前三种形态(可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态)和BCR中前两种形态(可交换态、可还原态)进入环境后容易迁移转化,为生物可利用形态^[16]。本研究表明,成熟期C2和C3土壤Cd含量显著高于CK;施硅能显著降低成熟期水稻土壤可交换态Cd以及可还原态Cd的含量,使土壤残渣态Cd含量明显增加。同时本研究发现,土壤各形态Cd含量与水稻根和精米中Cd累积量有

着显著性相关关系。这说明拔节期施硅显著影响了水稻灌浆结实期间土壤中Cd的形态,从而影响这一时间段Cd从土壤向稻株的转移,使土壤中滞留更多残渣态Cd和可氧化态Cd,从而减少了相对活跃的可交换态和可还原态Cd含量,进而精米中Cd累积量也显著降低。

土壤pH往往被认为是影响重金属Cd活性的因素之一,土壤pH值越高土壤中重金属Cd的活性越低^[24]。这是因为,土壤pH值的改变可导致土壤中重金属化学形态发生变化,当土壤pH值达到一定程度后重金属Cd与硅相互作用产生了沉淀。本试验施硅处理显著提高了抽穗期、成熟期土壤pH值,施硅后土壤中的残渣态Cd显著增加,即有效态Cd含量降低。

4 结论

(1)施硅能有效提高成熟期水稻地上部各器官干重,降低精米中Cd的含量、累积量以及富集系数。C2和C3处理均可显著降低成熟期水稻土壤中可交换态Cd和可还原态Cd,提高土壤中残渣态Cd和可氧化态Cd,同时使水稻植株吸收的Cd大量滞留在根部,抑制Cd从根向地上部各器官的迁移,使根中Cd累积量明显增加。

(2)综观各处理水稻的产量构成及各器官与土壤Cd含量,C2更利于整个生育期土壤可还原态Cd含量的减少,促进水稻抽穗前生长发育,使更多的Cd滞留在土壤中,吸收的Cd积淀在根部。值得提出的是,因本试验对移栽前(基肥)和拔节期硅素分期施用的配比只用了一种,对于其他施用配比还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京, 2014-04-17.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. The nationwide survey communique of soil pollution[R]. Beijing, 2014-04-17.
- [2] 潘根兴,李恋卿. 重金属污染土壤生物黑炭修复技术[J]. 中国农村科技, 2013(4):40-41.
PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Biological black carbon repair technology of heavy metal contaminated soil[J]. *China Rural Science & Technology*, 2013(4):40-41.
- [3] 赵颖,李军. 硅对水稻吸收镉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3):59-64.
ZHAO Ying, LI Jun. Effect of silicon on cadmium uptake by rice[J].

- Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(3):59-64.
- [4] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 水稻拔节期施用硅肥对群体质量及产量的影响[J]. 淮阴工学院学报, 2001, 10(3):20-23.
- ZHOU Qing, PAN Guo-qing, SHI Zuo-jia, et al. The effects of using Si at elongation stage on population quality and grain yield of rice[J]. *Journal of Huaiyin Institute of Technology*, 2001, 10(3):20-23.
- [5] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(1):11-18.
- [6] 刘彩凤, 史刚荣, 余如刚, 等. 硅缓解植物镉毒害的生理生态机制[J]. 生态学报, 2017, 37(23):1-12.
- LIU Cai-feng, SHI Gang-rong, YU Ru-gang, et al. Eco-physiological mechanisms of silicon-induced alleviation of cadmium toxicity in plants: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23):1-12.
- [7] Zhang C C, Wang L J, Nie Q, et al. Long-term effects of exogenous silicon cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3):300-307.
- [8] Liang Y C, Si J, Nikolic M, et al. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(6):1185-1195.
- [9] 张世浩. 施硅量和施硅时期对镉污染土壤中水稻植株镉积累与转运的调控[D]. 广州:华南农业大学, 2016.
- ZHANG Shi-hao. Regulation of the amount and the time of silicon application on the cadmium accumulation and translocation in the rice (*Oryza sativa* L.) grown under the cadmium-pollution soil[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2016.
- [10] Davidson C M, Thomas R P, Mcvey S E, et al. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1994, 291:277-286.
- [11] Quevauviller P. Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis I. standardization[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 1998, 17(5):289-298.
- [12] Violante A, Cozzolino V, Perelomov L, et al. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 10:268-292.
- [13] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1):116-121.
- YANG Chao-guang, DOU Hu, LIANG Yong-chao, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1):116-121.
- [14] Wang M Y, Chen A K, Wong M H. Cadmium accumulation in and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) varieties with different rates of radial oxygen loss[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(4):1730-1736.
- [15] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2005:373-376.
- BAO Shi-dan. The agricultural chemical analysis method of soil[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2005:373-376
- [16] 吕兑安. 猪粪堆肥过程中重金属形态变化特征及钝化技术研究[D]. 长春:中国科学院东北地理与生态研究所, 2014.
- LÜ Dui-an. Speciation of heavy metals and technologies to reduce its bioavailability during composting of pig manure[D]. Changchun:North-east Institution of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [17] 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.
- [18] Kim Y H, Khan A L, Kim D H, et al. Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones[J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14:1-13.
- [19] Liu J, Ma J, He C W, et al. Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon[J]. *New Phytologist*, 2013, 200(3):691-699.
- [20] 宋合林, 刘兵, 崔占文, 等. 不同生育时期施用硅肥对水稻产量的影响[J]. 现代化农业, 2009(9):18.
- SONG He-lin, LIU Bing, CUI Zhan-wen, et al. Effect of applied silicon at different periods on grain yield in rice[J]. *Modernizing Agriculture*, 2009(9):18.
- [21] 张国良, 戴其根, 周青, 等. 硅肥对水稻群体质量及产量影响研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(3):114-117.
- ZHANG Guo-liang, DAI Qi-gen, ZHOU Qing, et al. Influences of silicon fertilizer on population quality and yield in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(3):114-117.
- [22] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 不同时期施用硅肥对水稻群体质量及产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2001(3):25-27.
- ZHOU Qing, PAN Guo-qing, SHI Zuo-jia, et al. The effects of using Si at different stages on population quality and grain yield of rice[J]. *Tillage and Cultivation*, 2001(3):25-27.
- [23] 史新慧. 水稻硅结合蛋白的鉴定及功能研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
- SHI Xin-hui. Identification and functional analysis of a silica-binding protein in rice plant[D]. Beijing:China Agricultural University, 2005.
- [24] Li P, Wang X, Zhang T, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4):449-455.