

张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1867-1872.

ZHANG Zhen-xing, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(10): 1867-1872.

水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响

张振兴^{1,2,3}, 纪雄辉^{1,2,3*}, 谢运河^{1,2,3}, 官迪^{1,2,3}, 彭华^{1,2,3}, 朱坚^{1,2,3}, 田发祥^{1,2,3}

(1.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2.农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125; 3.南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410125)

摘要:为了深入探究镉污染稻田土壤施用生石灰降低稻米镉含量的过程机理, 采用盆栽试验, 分别在水稻插秧前、分蘖期、孕穗期、灌浆期进行生石灰施加处理, 水稻成熟后采集植株样品和土壤样品进行相关指标测定。试验结果显示, 在水稻不同生育期施加生石灰均可显著提高土壤 pH 值, 降低土壤有效态镉及根系镉含量, 同时显著降低糙米镉含量 ($P < 0.05$)。分蘖期施加生石灰对糙米镉含量的降低程度最大, 其含量比空白对照下降 55.2%, 显著低于其他处理。在分蘖期施加生石灰后发现, 水稻茎秆中的钙含量最高, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 而其茎秆中的镉含量反而最低, 显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。多变量主成分分析显示, 茎秆钙含量与镉含量显著负相关 ($P < 0.05$)。综上认为, 在水稻分蘖期施用生石灰不仅可以降低土壤有效态镉含量, 减少根系对镉的吸收积累, 还可以提高水稻茎秆中的钙含量, 进而抑制镉由根系向茎秆的转移, 表明这两个过程的叠加效应可能是水稻分蘖期施用生石灰降低糙米镉含量的关键因素。

关键词: 水稻; 生育期; 生石灰; 稻米; 钙; 镉

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)10-1867-08 doi:10.11654/jaes.2016-0432

Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain

ZHANG Zhen-xing^{1,2,3}, JI Xiong-hui^{1,2,3*}, XIE Yun-he^{1,2,3}, GUAN Di^{1,2,3}, PENG Hua^{1,2,3}, ZHU Jian^{1,2,3}, TIAN Fa-xiang^{1,2,3}

(1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 2. Key Laboratory for Agro-Environment in Midstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China; 3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410125, China)

Abstract: The pot experiment was carried out to further explore the process mechanism that how quicklime applications reduce Cd contents in rice grain cultivated in the Cd-contaminated paddy soils. In the control treatment no quicklime was applied into soil. While in other four treatments, the quicklime was added into soil as lime suspension before the transplanting and at tillering, booting and filling stages, respectively. The plant samples and soil samples were collected after the harvest and then were subjected to analyze aimed indexes. Results showed that soil pH was significantly increased, but available Cd contents in soil and total Cd contents in roots and brown rice were significantly ($P < 0.05$) decreased after soil was amended with quicklime at different growing stages. However, after the quicklime was applied at tillering stage, the total Cd contents in brown rice was decreased with a maximum reduction that was 55.2% below the control, which was significantly ($P < 0.05$) lower than other treatments. Meanwhile, the total Ca contents in rice stem-leave was found to be significantly ($P < 0.05$) higher than others, but the total Cd contents in rice stem-leave was significantly lower than others. Besides, the multivariate principal component analysis showed that Cd content in rice stem-leave was significantly ($P < 0.05$) negatively correlated with Ca contents. Therefore, the results indicate that applying quicklime at tillering stage not only reduce available Cd contents in soil and decrease Cd absorption and accumulation in root, but also can improve Ca contents in rice stem-leave and then inhibit the Cd translocation from root to stem-leave. The two processes may be key factors reducing Cd contents in the brown rice when quicklime is applied at tillering stage.

Keywords: *Oryza sativa* L.; growing stage; quicklime; rice grain; calcium (Ca); cadmium (Cd)

收稿日期: 2016-03-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD15B04, 2013BAD03B02); 农业部自由申报项目(2014-S20)

作者简介: 张振兴(1984-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农业生态环境。E-mail: 357953669@qq.com

* 通信作者: 纪雄辉 E-mail: jixionghui@yahoo.com

水稻是我国最重要的粮食作物之一,养活了我国约65%的人口,在国家粮食安全中的地位举足轻重^[1]。目前,我国稻田土壤重金属镉(Cd)污染程度和范围日益严峻,而土壤中的Cd可以通过大米食物链在人体内积累,并对人体健康产生极大危害^[2-3]。因此,修复稻田Cd污染土壤并降低稻米Cd含量迫在眉睫。

稻田土壤中的生物活性Cd迁移性强且毒性高,可以通过竞争吸收机制进入水稻体内^[4-5],而向土壤中施入生石灰(CaO)可以提高土壤pH,降低Cd的有效性,进而减少水稻对Cd的吸收及向籽粒的运输,施用CaO已成为修复稻田Cd污染的重要举措之一^[6]。研究表明,水稻在不同生育期对Cd的吸收、转运、积累特征不同^[7-11],不同生育期的Cd吸收对籽粒中Cd积累的贡献率也不同。因此,通过在水稻不同生育期施用CaO来降低稻米Cd含量值得研究,但目前鲜见相关的研究报道。

本试验以中度Cd污染麻沙泥稻田土壤为供试土壤,采用盆栽试验研究了水稻不同生育期土壤施加CaO对稻米Cd含量的影响,以及Ca、Cd在水稻植株内的分布特征。分析了关联水稻籽粒Cd含量的相关因素,以进一步了解CaO降低稻米Cd含量的过程机理,为Cd污染土壤的稻米安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土壤取自镉污染水稻田块(28°26'38"N, 113°03'50"E,长沙),是由花岗岩发育而来的黄红麻沙土(土属为耕型花岗岩黄红壤)。采集表层0~20 cm耕作层土壤,运回实验室在室内自然风干后过10目标准筛,去除植物残体和杂质,充分混匀后保存备用。原始土壤全镉含量为0.71 mg·kg⁻¹,有效镉含量为0.33 mg·kg⁻¹,有机质含量为29.0 g·kg⁻¹,全N 1.76 g·kg⁻¹,全P 0.64 g·kg⁻¹,全K 12.53 g·kg⁻¹,pH 5.03。试验用水稻为“玉针香”中熟晚籼稻品种,此品种为镉高吸收品种。试验用生石灰为分析纯试剂氧化钙,CaO含量≥98.0%。

1.2 试验方法

1.2.1 水稻种植

取3.0 kg风干土壤与分析纯肥料均匀混合,装入水稻种植盆中。添加养分表示方式为N、P₂O₅、K₂O,添加量分别为200、130、200 mg·kg⁻¹,所使用的肥料为尿素、磷酸二氢钾、氯化钾,均为分析纯试剂。土壤装盆后淹水一周,于2015年7月27日选择长势一致的健康秧苗进行插秧,每个种植盆内移植两株秧苗,水稻置于简易网室内生长,保持水稻浅层淹水生长至成熟收获。

1.2.2 试验处理

试验设置5个处理,每个处理重复3次。处理一(CK):对照,土壤不添加CaO。处理二(T1):水稻秧苗插秧前添加CaO(7月20日)。处理三(T2):水稻植株生长到分蘖期添加CaO(8月28日)。处理四(T3):水稻植株生长到孕穗期添加CaO(9月21日)。处理五(T4):水稻植株生长到灌浆期添加CaO(10月5日)。T1、T2、T3、T4处理中CaO添加量均为0.67 g·kg⁻¹干土。CaO施用量是根据本课题组大田施用量来估算确定的:大田生石灰施用量为1.5 t·hm⁻²,每公顷耕作层土壤大约为2250 t,最后计算可得每千克土壤施用0.67 g生石灰。盆栽土壤种植水稻后,由于根系的存在使得土壤搅动难以操作,因此,本试验在水稻不同生育期采用打孔方式向土壤中添加生石灰悬浊液。具体操作如下:把土壤淹水层倾斜倒入烧杯中,再把生石灰加入到烧杯中,充分搅动使生石灰与水反应,同时在土壤表层向下打孔贯穿整个土层,每1 cm²打一个小孔(孔径约为5 mm),最后把烧杯内的悬浊液充分摇匀后再倒入土壤,悬浊液就会由小孔渗入到土壤中。

1.2.3 样品采集

水稻成熟后采集植株样品(10月27日),样品分为三部分:根系、茎秆、稻谷粒。根系用自来水冲洗干净,再用纯净水彻底润洗5次;茎秆用纯净水冲洗掉表面灰尘,于80℃烘干后粉碎;稻谷粒80℃烘干,用糙米机脱掉谷壳后粉碎。全部植株样品粉碎后过100目标准筛,封存于塑料自封袋中待用。采集植株样品当天采集土壤样品,使用土钻在每个种植盆内取6钻土壤混合,土壤样品自然风干后研磨过20目或100目标准筛待用。

1.2.4 样品分析

土壤养分含量及pH采用常规方法测定^[12];土壤有效态Cd采用乙酸铵浸提法测定^[13];植物样品Cd、Ca全量采用HNO₃-HClO₄(5:1)湿解法消煮,定容稀释后采用ICP-MS测定。全部分析器皿均在稀硝酸溶液中浸泡24 h,纯水冲洗3次。

根系Cd吸收系数=根系Cd含量/土壤Cd全量

Cd初级转运系数=茎秆Cd含量/根系Cd含量

Cd次级转运系数=糙米Cd含量/茎秆Cd含量

1.3 数据统计

使用SAS(The SAS system for windows V8)统计分

析软件对数据进行方差分析(ANOVA),通过最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检测,显著性水平 $P<0.05$,利用Canoco 4.5软件完成变量之间的PCA相关性分析,采用Excel软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 及有效态 Cd 含量

与对照 CK 处理相比,不同时期施用 CaO 均可显著提高土壤 pH($P<0.05$,图 1a),比对照平均升高 1.20 个单位,分蘖期 T2 处理的土壤 pH 值增加幅度最高,其值为 7.18,且显著高于插秧前 T1 和灌浆期 T4 处理($P<0.05$),而与孕穗期 T3 处理无显著差异。这表明在水稻分蘖期施用 CaO 对提高土壤 pH 的效果最佳。不同时期施用 CaO 后,土壤有效态 Cd 含量较对照均显著降低($P<0.05$,图 1b),而不同时期施用 CaO 处理之间没有显著性差异。

2.2 水稻植株内 Cd 含量分布及 Cd 的吸收转运系数

土壤施加 CaO 可以显著降低水稻根系 Cd 含量($P<0.05$,表 1),其中 T1、T2、T3 处理之间的根系 Cd

含量没有显著差异,但 T2 处理的根系 Cd 含量最低,且显著低于 CK 和 T4 处理($P<0.05$);而茎秆 Cd 含量仅在分蘖期施用 CaO 后显著降低($P<0.05$),在 T3 和 T4 处理中反而显著升高($P<0.05$),插秧前施加 CaO 没有变化;糙米 Cd 含量在所有施加 CaO 处理中均显著降低($P<0.05$),比对照降低 22.1%~55.2%,其中分蘖期 T2 处理对糙米 Cd 含量的降低程度最明显,其值仅为对照的 44.8%,其次是 T1 处理。这表明土壤施加 CaO 可明显降低水稻根系对 Cd 的吸收量,同时降低糙米 Cd 含量,而对茎秆中的 Cd 含量影响因施用时期不同而有差异。

施加 CaO 处理后,根系对 Cd 的吸收系数均比对照显著降低($P<0.05$,表 2),其中 T2 处理的降低幅度最大,为对照的 59.9%,且其值显著低于 T4 处理($P<0.05$);与对照 CK 相比,分蘖期 T2 处理的 Cd 初级转运系数下降 9.5%,但差异不显著。其他 3 个处理在添加 CaO 后,水稻体内的 Cd 初级转运系数反而显著升高($P<0.05$),最高可达到对照的 1.9 倍。与 Cd 吸收系数相似,Cd 次级转运系数在添加 CaO 后均降低,且除分蘖

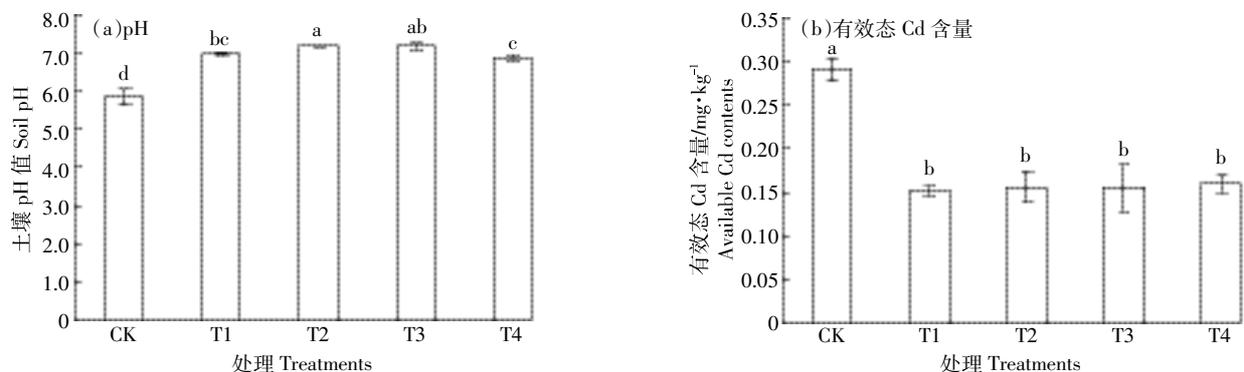


图 1 水稻不同生育期施用生石灰对土壤 pH 及有效态 Cd 含量的影响

Figure 1 Effects of lime application on the soil pH and available Cd contents in soil

表 1 不同生育期施用生石灰对水稻植株内 Cd 含量分布的影响

Table 1 Effects of lime application on the Cd contents in different parts of rice plant

处理 Treatments	根系 Cd 含量/mg·kg ⁻¹ Cd contents in root	茎秆 Cd 含量/mg·kg ⁻¹ Cd contents in stem	糙米 Cd 含量/mg·kg ⁻¹ Cd contents in brown rice
对照 Control(CK)	12.75±0.31a(100.0%)	3.43±0.46b(100.0%)	1.44±0.04a(100.0%)
插秧前 Before transplanting(T1)	8.42±0.52bc(66.0%)	3.42±0.31b(99.7%)	0.74±0.01c(51.7%)
分蘖期 Tillering stage(T2)	7.63±0.38c(59.9%)	1.84±0.30c(53.8%)	0.64±0.01d(44.8%)
孕穗期 Booting stage(T3)	8.07±0.63c(63.3%)	4.13±0.46a(120.4%)	1.12±0.07b(77.9%)
灌浆期 Filling stage(T4)	9.12±0.57b(71.5%)	4.47±0.27a(130.3%)	1.12±0.04b(77.8%)

注:同一列不同字母表示不同处理间差异性显著($P<0.05$);括号内的百分数为与对照数值的百分比。下同。

Note: different letters within a column indicates significant differences between different treatments($P<0.05$), the value in the brackets means the percentage of the control, the same below.

期 T2 处理外均显著降低($P<0.05$)。这表明水稻不同生育期施加 CaO 不仅可以降低根系对 Cd 的吸收系数,还可以降低茎秆中的 Cd 向籽粒中的转移系数。

2.3 水稻植株内 Ca 含量分布

不同时期施加 CaO 后,水稻根系 Ca 含量显著升高($P<0.05$,表 3),除灌浆期 T4 处理与对照没有显著差异;茎秆 Ca 含量仅在分蘖期 T2 处理中显著升高($P<0.05$),其他处理没有显著变化。此外,糙米 Ca 含量在施加 CaO 后反而降低,在孕穗期 T3 和灌浆期 T4 处理中显著性下降($P<0.05$),而插秧前 T1 和分蘖期 T2 处理中的糙米 Ca 含量与对照无显著差异,但施加 CaO 的 4 个处理之间没有显著性差异。

2.4 糙米 Cd 含量与其他变量之间的相关性分析

分析表 4 可知,糙米 Cd 含量与根系 Cd 含量、根系 Cd 吸收系数、土壤有效态 Cd 含量、茎秆 Cd 含量呈显著或极显著正相关性,其相关系数分别为 0.795、0.794、0.745、0.569,与土壤 pH、根系 Ca 含量呈极显著负相关性,其相关系数分别为-0.746、-0.707。因此,上述变量可能是控制糙米中 Cd 含量的关键因素,其他因素对糙米 Cd 含量的影响可能较小。

变量因子 PCA 相关性分析显示,轴 1 和轴 2 的变量解释因子为 86.0%,糙米 Cd 含量在轴 1 方向上与根系 Cd 含量、根系 Cd 吸收系数、土壤有效态 Cd 含量、土壤 pH、根系 Ca 含量、茎秆 Cd 含量等变量的相关性较高(图 2)。这与表 4 相关系数的分析结果相似。土壤有效态 Cd 含量与土壤 pH 的负相关性很高,

表 4 糙米 Cd 含量与其他变量之间的相关性

Table 4 The correlation between Cd contents in brown rice and other variables

变量 Variables	相关系数 Correlation coefficient
茎秆 Cd 含量	0.569*
根系 Cd 含量	0.795**
土壤有效态 Cd 含量	0.745**
土壤 pH	-0.746**
糙米 Ca 含量	0.268
茎秆 Ca 含量	-0.419
根系 Ca 含量	-0.707**
根系 Cd 吸收系数	0.794**
Cd 初级转运系数	0.146
Cd 次级转运系数	0.391

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.

表明土壤 pH 的升高可以有效降低土壤有效态 Cd 含量。此外,根系 Cd 含量、根系 Cd 吸收系数均与根系 Ca 含量的负相关性很高,且茎秆 Cd 含量、Cd 初级转运系数均与茎秆 Ca 含量的负相关性很高,表明植株体内 Ca 含量的积累可能降低了水稻对 Cd 的吸收和转移,最终降低茎秆中 Cd 向糙米的转移和积累。

3 讨论

稻田酸性土壤施加生石灰后,土壤溶质 pH 升高将增加土壤胶体表面的负电荷容量,从而增强对重金

表 2 不同生育期施用生石灰对水稻植株 Cd 吸收和转运系数的影响

Table 2 Effects of lime application on the uptake and transfer index of Cd in rice plant

处理 Treatments	根系 Cd 吸收系数 Cd absorption coefficient	Cd 初级转运系数 Cd primary transport coefficient	Cd 次级转运系数 Cd secondary transport coefficient
对照 Control(CK)	18.00±0.44a(100.0%)	0.27±0.03c(100.0%)	0.43±0.07a(100.0%)
插秧前 Before transplanting(T1)	11.89±0.74bc(66.0%)	0.41±0.01b(151.0%)	0.22±0.02b(51.5%)
分蘖期 Tillering stage(T2)	10.78±0.53c(59.9%)	0.24±0.05c(90.5%)	0.35±0.06a(83.4%)
孕穗期 Booting stage(T3)	11.39±0.89c(63.3%)	0.51±0.06a(190.8%)	0.27±0.02b(64.0%)
灌浆期 Filling stage(T4)	12.88±0.81b(71.5%)	0.49±0.05a(183.0%)	0.25±0.01b(59.0%)

表 3 不同生育期施用生石灰对水稻植株内 Ca 含量分布的影响

Table 3 Effects of lime application on the Ca contents in different parts of rice plant

处理 Treatments	根系 Ca 含量/mg·kg ⁻¹ Ca contents in root	茎秆 Ca 含量/mg·kg ⁻¹ Ca contents in stem	糙米 Ca 含量/mg·kg ⁻¹ Ca contents in brown rice
对照 Control(CK)	2 211.4±164.3b(100.0%)	7 262.4±1 362.8b(100.0%)	144.7±18.7a(100.0%)
插秧前 Before transplanting(T1)	2 897.0±33.5a(131.0%)	7 336.7±931.8b(101.0%)	125.1±11.3ab(86.4%)
分蘖期 Tillering stage(T2)	2 864.0±312.1a(130.5%)	8 847.8±400.5a(122.8%)	129.1±14.0ab(89.2%)
孕穗期 Booting stage(T3)	2 712.1±350.6a(123.6%)	6 788.1±156.0b(93.5%)	116.0±3.4b(80.2%)
灌浆期 Filling stage(T4)	2 572.6±122.4ab(116.3%)	7 757.4±568.0ab(107.8%)	117.9±2.6b(81.4%)

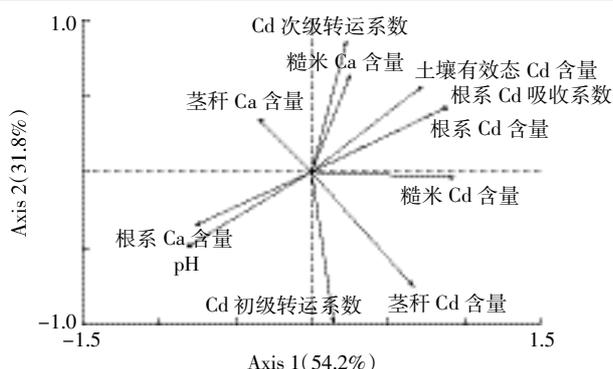


图2 基于PCA分析的土壤植株指标变量之间的相关性

Figure 2 The correlations among parameters of soil and plant based on PCA analysis

属阳离子的吸附能力。同时,pH升高也会促进重金属阳离子羟基态的形成,而羟基态金属阳离子与土壤吸附点位的亲和力高于自由阳离子,故有利于重金属形成碳酸盐等沉淀物^[14-16]。本试验发现,在水稻不同生育期添加生石灰均可提高土壤pH值,降低土壤有效态Cd含量,进而降低糙米Cd含量,且土壤pH值与糙米Cd含量呈极显著负相关性,说明生石灰对土壤pH的提高作用是降低糙米Cd含量的关键因素^[17]。本试验还发现,在水稻分蘖期施用生石灰时,糙米Cd含量最低且显著低于其他处理,同时糙米Cd含量与根系及茎秆Ca含量呈明显负相关性。而在水稻中发现,低亲和性的Ca离子跨膜转运载体LCT1参与调控Cd向水稻籽粒中的运输^[18]。据此推断,分蘖期施用生石灰对稻米Cd含量的阻控效应可能与水稻植株Ca营养的生理代谢紧密相关^[19-20]。

研究表明,土壤中Ca含量的升高会降低砂质土壤对Cd的吸附能力,增加Cd在土壤体系中的移动性^[21-22]。本试验添加生石灰后并未发现Cd有效性的升高,反而显著下降,但水稻根系对Ca的吸收积累量却显著增加。因此,生石灰添加可能提高了土壤中Ca的生物有效性,同时没有影响土壤对Cd的吸附性。在禾本科植物小麦中发现^[23],低亲和性的Ca离子跨膜转运载体LCT1可以转运Cd离子至细胞中,但当土壤溶质中Ca离子和Cd离子共存时会产生离子吸收拮抗作用^[24],Ca有效性的增加使得Ca离子的竞争吸收更强,进而减少根系对Cd的吸收,降低Cd在植株体内的积累^[20,25-26]。这与本试验的结果恰好相符。

水稻根系对重金属Cd的吸收过程,茎秆中Cd的长距离运输过程,以及Cd在籽粒中的积累过程都是控制稻米中Cd含量的可能机理^[27]。水稻茎秆中的Cd含量对不同生育期施用石灰的响应变化不同,在

分蘖期施用生石灰处理时,茎秆中的Cd含量最低,同时发现茎秆中的Ca含量却显著高于其他处理,而茎秆Ca含量与Cd含量、Cd初级转运系数均呈显著负相关性。这表明分蘖期施用生石灰对茎秆中Ca含量的增加作用可能抑制了根系中Cd向地上部的运输^[20,24]。此外,与分蘖期施用生石灰相比,灌浆期施用生石灰后根系及茎秆Ca含量无显著性变化,但其茎秆及籽粒中的Cd含量却显著升高,表明水稻不同生育时期Ca与Cd的相互作用差异可能是影响稻米Cd含量的因素^[8,28]。

水稻植株体内的Cd由茎秆向籽粒的转移可以用Cd次级转运系数来表征^[29]。施用生石灰后发现,Cd次级转运系数明显降低,而分蘖期施用生石灰的Cd次级转运系数与对照无显著差异,但是分蘖期施用生石灰的糙米Cd含量却显著低于对照。这说明糙米Cd含量与茎秆Cd含量的关联性更强,而与Cd次级转运系数的关联性较弱。因此我们推测,分蘖期施用生石灰可以增加茎秆Ca含量,进而抑制Cd由根系向茎秆的运输积累,最终降低稻米Cd含量。但水稻植株体内Ca对Cd的这种阻控机理有待深入研究。

4 结论

在水稻分蘖期施用生石灰后,一方面可以提高土壤pH值,降低有效态Cd含量,减少根系对Cd的吸收积累量;另一方面,增加了茎秆中的Ca含量,抑制了Cd由根系向茎秆的转移积累。因此,水稻分蘖期施用生石灰引发的这两种过程的叠加效应可能是降低糙米Cd含量的主要因素。

致谢:感谢长株潭重金属污染耕地修复及农作物种植结构调整试点工作。

参考文献:

- [1] Xu X P, He P, Zhao S C, et al. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 186:58-65.
- [2] Fu J J, Zhou Q F, Liu J M, et al. High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical E-waste recycling area in Southeast China and its potential risk to human health[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(7): 1269-1275.
- [3] Zhao Q H, Wang Y, Cao Y, et al. Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui Province, Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470:340-347.
- [4] de Livera J, McLaughlin M J, Hettiarachchi G M, et al. Cadmium solu-

- bility in paddy soils; Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(8): 1489–1497.
- [5] Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, et al. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status[J]. *The Plant Journal*, 2002, 32(4): 539–548.
- [6] Yong S O, Kim S C, Kim D K, et al. Ameliorants to immobilize Cd in rice paddy soils contaminated by abandoned metal mines in Korea[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33: 23–30.
- [7] 史 静, 李正文, 龚伟群, 等. 2种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化: 品种、土壤和 Cd 处理的影响[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(1): 32–40.
- SHI Jing, LI Zheng-wen, GONG Wei-qun, et al. Uptake and partitioning of Cd and Zn by two non-hybrid rice cultivars in different growth stages; Effect of cultivars, soil type and Cd spike[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1): 32–40.
- [8] Yan Y F, Choi D H, Kim D S, et al. Absorption, translocation, and remobilization of cadmium supplied at different growth stages of rice[J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2010, 13(2): 113–119.
- [9] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 不同生育期水稻对 Cd、Pb 的吸收累积特征及品种差异[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1125–1130.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Characteristics of Cd and Pb absorption and accumulation by rice at different growth stages and the differences between varieties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1125–1130.
- [10] 胡 莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 432–437.
- HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, et al. Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 432–437.
- [11] 唐 皓, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻镉高积累材料不同生育期镉积累变化特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 471–477.
- TANG Hao, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Cadmium accumulation in high cadmium-accumulating rice cultivars at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 471–477.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 1999.
- [13] Meers E, Du Laing G, Unamuno V, et al. Comparison of cadmium extractability from soils by commonly used single extraction protocols[J]. *Geoderma*, 2007, 141(3): 247–259.
- [14] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, et al. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(4): 419–429.
- [15] 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.
- [16] 殷 飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂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.
- [17] Zeng F, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84–91.
- [18] Uraguchi S, Kamiya T, Sakamoto T, et al. Low-affinity cation transporter (OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(52): 20959–20964.
- [19] Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1707–1719.
- [20] Zorrig W, Shahzad Z, Abdelly C, et al. Calcium enhances cadmium tolerance and decreases cadmium accumulation in lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(34): 8441–8448.
- [21] Christensen T H. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1983, 21(4): 105–114.
- [22] Tomoyuki M, Takashi K, Hiroyuki T, et al. Remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: Verification of on-site washing[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1): 112–119.
- [23] Clemens S, Antosiewicz D M, Ward J M, et al. The plant cDNA LCT1 mediates the uptake of calcium and cadmium in yeast[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1998, 95(20): 12043–12048.
- [24] Eller F, Brix H. Influence of low calcium availability on cadmium uptake and translocation in a fast-growing shrub and a metal-accumulating herb[J]. *AOB Plants*, 2015, 8: plv143; doi: 10.1093/aobpla/plv143.
- [25] Yang C M, Juang K W. Alleviation effects of calcium and potassium on cadmium rhizotoxicity and absorption by soybean and wheat roots[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(5): 748–754.
- [26] Gong X, Liu Y, Huang D, et al. Effects of exogenous calcium and spermidine on cadmium stress moderation and metal accumulation in *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, doi: 10.1007/s11356-016-6122-6.
- [27] Welch R M, Norvell W A. Mechanisms of cadmium uptake, translocation and deposition in plants[M]//Springer Netherlands: Cadmium in Soils and Plants. 1999: 125–150.
- [28] Ishizuka Y. Studies on the calcium and magnesium absorption of rice plants at different stages of their growth in water culture[J]. *Agricultural and Biological Chemistry of Japan*, 1933, 9(7): 110–111.
- [29] Liu J, Min Q, Cai G, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1): 443–447.