

田发祥, 纪雄辉, 谢运河, 等. 碱性缓释肥对水稻吸收积累 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2116-2122.

TIAN Fa-xiang, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Alkaline slow-release fertilizer decreased rice Cd uptake at Cd-contaminated paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2116-2122.

碱性缓释肥对水稻吸收积累 Cd 的影响

田发祥^{1,3}, 纪雄辉^{1,2,3*}, 谢运河^{1,2,3}, 吴家梅^{1,3}, 官迪^{1,3}

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

摘要:选择长株潭地区典型化工点源污染、污水灌溉面源污染和大气沉降面源污染的镉(Cd)污染稻田,研究碱性缓释肥对稻田土壤有效 Cd、水稻 Cd 含量的影响。结果表明:与常规施肥相比,北山、梅林桥、大同桥三个试验点施用碱性缓释肥的水稻产量增加 290.8(+3.9%)~605.0(+7.3%) kg·hm⁻²,平均增产 467.8 kg·hm⁻²(+5.7%, P<0.05);三个试验点施用石灰和碱性缓释肥均能提高土壤 pH,降低土壤有效 Cd 含量,其效果为碱性缓释肥小于石灰;三个试验点施用石灰和碱性缓释肥均能显著降低水稻稻米和茎叶 Cd 含量,在北山、大同桥酸性土壤中碱性缓释肥降低稻米 Cd 含量的效果优于石灰,两地的稻米 Cd 含量分别较施用石灰下降 0.023 mg·kg⁻¹(-13.5%)和 0.080 mg·kg⁻¹(-26.7%),梅林桥偏中性的土壤上则为石灰降低稻米 Cd 含量的效果优于碱性缓释肥。

关键词:镉;碱性缓释肥;水稻

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2116-07 doi:10.11654/jaes.2016-0381

Alkaline slow-release fertilizer decreased rice Cd uptake at Cd-contaminated paddy fields

TIAN Fa-xiang^{1,3}, JI Xiong-hui^{1,2,3*}, XIE Yun-he^{1,2,3}, WU Jia-mei^{1,3}, GUAN Di^{1,3}

(1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province/ Ministry of Agriculture Key Lab of Agri-Environment in the Midstream of Yangtze River Plain, Changsha 410125, China; 2. Longping Branch of Graduate School, Central South University, Changsha 410125, China; 3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410125, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the influences of alkaline slow-release fertilizer (AF) on soil available cadmium (Cd) and rice Cd content in typical Cd-contaminated paddy fields caused by chemical point source pollution (Beishan site), sewage irrigation non-point source pollution (Meilingqiao site) and atmospheric deposition non-point source pollution (Datongqiao site) in Chang-Zhu-Tan area. Three treatments were set up at each site, which were conventional fertilization (CK), additional lime application at 1500 kg·hm⁻² (CKCa) and application of alkaline slow-release fertilizer (AF). The results showed that: The application of AF significantly increased rice yields by 290.8(+3.9%)~605.0(+7.3%) kg·hm⁻² in the three experimental sites (Beishan, Meilingqiao, and Datongqiao) with an average increase of 467.8 kg·hm⁻² (+5.7%, P<0.05) compared with CK treatment; Applications of both lime and AF increased soil pH and reduced soil available Cd contents as compared to the CK treatment, with the effects of lime superior to AF at the three sites; Applications of both lime and AF decreased Cd contents in rice grain and stem at the three sites; AF was superior to lime on decreasing rice grain Cd content at the acidic soil sites (Beishan and Datongqiao) with the rice grain Cd content further decreased by 0.023 mg·kg⁻¹ (-13.5%) and 0.080 mg·kg⁻¹ (-26.7%) in the AF treatment as compared to CKCa treatment at the Beishan and Datongqiao sites respectively, while lime was superior to AF on decreasing rice grain Cd content at the nearly neutral site (Meilingqiao).

Keywords: cadmium; alkaline slow-release fertilizer; rice

收稿日期: 2016-03-23

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201501019)

作者简介: 田发祥(1981—),男,土家族,硕士,助理研究员,主要从事农业生态环境与植物营养研究。E-mail: tian831009@163.com

* 通信作者: 纪雄辉 E-mail: 1546861600@qq.com

镉(Cd)是自然界中广泛存在的一种植物非必需元素,在美国毒物管理委员会(ATSDR)黑名单上名列第六,其在环境中化学活性强、移动性大、毒性持久,易通过食物链的富集作用危及人类健康。受自然因素和人类活动的影响,环境中Cd的释放量日益增加,每年进入生物圈的Cd约 3×10^4 t^[1]。我国土壤重金属污染是在工业化发展过程中长期累积形成的,Cd污染农田不仅污染面积大、程度重,且呈逐年加重趋势^[2-3]。农田Cd污染一般会受到成土母质和人为因素等多种污染源的共同影响^[4-6]。目前治理土壤Cd污染的方法主要有物理法、化学法、生物法等,其中原位钝化修复技术因成本较低、操作简单、见效快而适合大面积中轻度重金属污染土壤治理,受到环境工作者的广泛关注^[7-8]。粘土矿物、生物炭、有机物料、土壤调理剂等是原位钝化修复技术常用的钝化剂^[9-11],在实际的应用过程中都有一定的降Cd效果,但在不同Cd污染特征的土壤上存在较大差异。

施肥是农业生产中最普遍也是最重要的增产增收措施,施肥也可以改良土壤,提高土壤pH值,因此通过施肥在保证水稻产量的同时降低稻米Cd含量将是今后发展的一个重要趋势。当前对降Cd肥料的研究大多集中在常规的单质肥料^[12-14]、碱性材料^[15],且其施用技术多为钝化剂与肥料分开施用,既要施肥,又要施钝化剂,费工费时,增加了农业生产成本,影响了该技术的推广应用。研发一种既能正常供应氮磷钾等养分,又能同时改良土壤,降低稻米Cd含量的新型肥料,即碱性肥料,将是新型肥料发展的一个重要方向。通过碱性肥料的施用,在降低当季稻米Cd含量的同时缓慢改良土壤,使土壤逐渐从酸性变成中性,从而解决土壤和水稻Cd污染问题。基于此,宇丰公司研发了“碱性缓释复合肥”,以期在正常供应氮磷钾养分的同时有效提高土壤pH值,从而降低土壤有效Cd含量,减小稻米Cd污染风险。为了检验碱性复合肥的降Cd效果,本文以石灰和常规施肥为对照,在长株潭比较典型的化工点源污染、污水灌溉污染、大气沉降污染的Cd污染稻田,研究碱性缓释肥对稻田土壤Cd的有效性、水稻Cd含量的影响,为碱性缓释肥修复Cd污染稻田提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地和供试材料

选择三种典型Cd污染特征稻田进行试验研究。

(1)北山:化工企业点源污染试验点。位于长沙县

北山镇($28^{\circ}26'22.7''N$, $113^{\circ}03'28.4''E$),为花岗岩发育的麻砂泥水稻土,双季稻种植,土壤pH 5.2,土壤全Cd含量 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Cd含量 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。污染原因为20世纪80年代至90年代上游化工厂排污通过灌溉引起下游农田Cd污染。种植的水稻品种为湘晚籼12号。

(2)梅林桥:大气沉降面源污染试验点。位于湘潭县梅林桥镇($27^{\circ}46'9.80''N$, $112^{\circ}56'52.93''E$),为第四纪红壤发育水稻土,双季稻种植,土壤pH 6.4,土壤全Cd含量 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Cd含量 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。主要污染原因是湘潭及株洲工业废气经大气沉降所致。种植的水稻品种为湘晚籼13号。

(3)大同桥:污水灌溉面源污染试验点。位于攸县大同桥镇($27^{\circ}08'25.21''N$, $113^{\circ}22'15.92''E$),为河流冲积物发育的酸性潮泥田,双季稻种植,土壤pH 5.0,土壤全Cd含量 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Cd含量 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。主要污染原因是攸县工矿企业污水流入农田或通过河流湖泊并经灌溉引起稻田土壤Cd污染。种植的水稻品种为湘晚籼12号。

供试的常规肥料为当地常规用肥;供试石灰由湖南宇丰农科生态工程股份有限公司提供, $\text{CaO} \geq 65\%$;供试碱性缓释复合肥为由湖南宇丰农科生态工程股份有限公司提供的“宇丰”碱性缓释肥料, $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$ 为10-4-11,其中缓释有效氮的质量分数(冷水不溶性氮占总氮百分率) $\geq 20\%$, $\text{CaO} \geq 8\%$, $\text{SiO}_2 \geq 15\%$, ZnO 为3%~5%, pH为8~10。

1.2 试验方法

在北山、梅林桥、大同桥镇同时进行田间小区试验,每个试验点均设3个处理。处理1:CK,常规施肥,按照当地农民习惯施肥,其中基施 $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}=10-4-11$ 复合肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,移栽后7~10 d追施尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理2:CKCa,常规施肥,增施石灰 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理3:AF,基施“宇丰”碱性缓释复混肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,移栽后7~10 d追施尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。所有处理养分保持一致($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$ 用量分别为144、30、82.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

所有处理均设置3次重复,随机区组排列,外设保护行。各小区面积 20 m^2 ,小区间用铺塑料薄膜的土埂隔开,各小区单排单灌。基肥和石灰于插秧前1周均匀撒入土壤并充分混匀。7月25日移栽,10月27日收获,水管理同当地一致,即前期淹水,分蘖盛期后晒田控苗,孕穗期淹水灌溉,成熟期落干黄熟。按当地习惯进行病虫害管理。于水稻成熟期按五点采样方

法采取土壤和植株样品进行相关指标分析。

1.3 分析方法

土壤有效态 Cd 含量:采用《土壤质量 有效态铅和镉的测定原子吸收法》(GB/T 23739—2009)进行测定。称 10 g 过 20 目筛土样,加入 DTPA-TEA-CaCl₂ 浸提液(土:水=1:5)50 mL,振荡 2 h 后过滤,稀释 20 倍后用 ICP-MS(ICAP Q,thermo fisher scientific)测定溶液 Cd 含量。土壤 Cd 全量:称过 100 目筛土样 0.300 0 g 于消煮管中,采用 HNO₃-H₂O₂-HF 微波消煮,定容后过滤,用 ICP-MS 测定溶液 Cd 浓度。水稻糙米及植株 Cd 含量:称样 0.300 0 g 于消煮管中,分别加入 HNO₃ 5 mL、H₂O₂ 1 mL,微波消解,定容后过滤,用 ICP-MS 测定 Cd 含量。以上所有样品均做平行样。

数据采用 SPSS 17.0 及 Microsoft Excel 2003 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量的影响

由图 1 可知,北山、梅林桥、大同桥三个试验点的产量均以碱性缓释肥处理最高,产量分别为 7 753.6、9 346.8、8 921.7 kg·hm⁻²,较对照增产 3.9%、5.7%($P<0.05$)、7.3%($P<0.05$),分别较石灰处理增产 383.8 kg·hm⁻²(+5.2%)、619.0 kg·hm⁻²(+7.1%, $P<0.05$)、665.7 kg·hm⁻²(+8.1%, $P<0.05$);三点平均较对照处理增产 467.8 kg·hm⁻²(+5.7%, $P<0.05$),较石灰处理增产 556.1 kg·hm⁻²(+6.9%, $P<0.05$)。与对照处理相比,石灰处理产量有所下降,但差异不明显。本试验中碱性缓释肥的氮素主要以脲甲醛为主,脲甲醛是尿素与甲

醛经过化学反应而合成的一种缓释肥,其氮素难溶于水,只有在土壤生物或化学作用下,才能缓慢分解为无机氮而被植物吸收利用,其肥效的长短取决于脲甲醛分子链的长短,分子链越长肥效期也就越长。其中未反应的尿素,在微生物分解下短期内即可转化为能被作物直接吸收的无机氮,是脲甲醛缓释肥中的速效成分(养分释放周期 10~30 d);其中的羟甲基脲,在微生物的作用下需要较长时间才能分解,转化为可被作物直接吸收的无机态氮,是脲甲醛缓释肥中的中效成分(养分释放周期 30~60 d);其中的甲基脲和聚甲基脲,必须经过微生物的长期多次分解才能转化为可被作物吸收的无机态氮,是脲甲醛缓释肥中的长效成分(养分释放周期 60~120 d)。同时,其中的亚甲基脲具有吸附作用,可促使肥料与土壤微粒结合形成胶状螯合物,从而减少养分流失,能够被作物充分吸收,实现肥料利用率的提高^[16]。可见,试验中碱性缓释肥延长了氮肥的供应时间,符合水稻生长对养分的需求,故有利于水稻产量的提高。

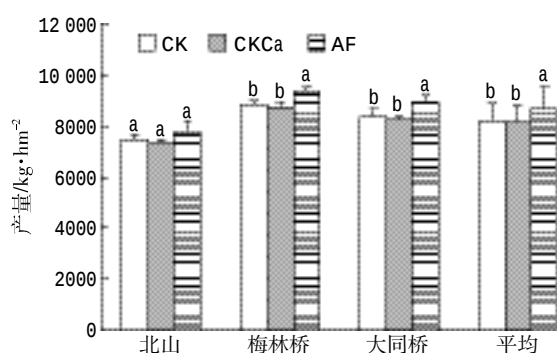
2.2 不同处理对水稻吸收积累 Cd 含量的影响

北山、梅林桥、大同桥三个试验点的稻米、茎叶 Cd 含量见表 1。结果表明,施用石灰或碱性缓释肥均能降低稻米、茎叶 Cd 含量。与对照相比,三个试验点施用石灰的稻米 Cd 含量分别下降 0.101 mg·kg⁻¹(-37.0%, $P<0.05$)、0.140 mg·kg⁻¹(-65.7%, $P<0.05$)、0.045 mg·kg⁻¹(-13.1%),茎叶 Cd 含量分别下降 0.444 mg·kg⁻¹(-32.1%)、0.518 mg·kg⁻¹(-59.3%, $P<0.05$)、0.517 mg·kg⁻¹(-24.2%);三个试验点施用碱性缓释肥的稻米 Cd 含量分别下降 0.124 mg·kg⁻¹(-45.5%, $P<0.05$)、0.074 mg·kg⁻¹(-34.8%, $P<0.05$)、0.126 mg·kg⁻¹(-36.3%, $P<0.05$),茎叶 Cd 含量分别下降 0.142 mg·kg⁻¹(-10.3%)、0.245 mg·kg⁻¹(-28.0%, $P<0.05$)、0.625 mg·kg⁻¹(-29.3%)。

在北山、大同桥以碱性缓释肥处理降 Cd 效果较好,同石灰相比,两地的稻米 Cd 含量分别下降 0.023 mg·kg⁻¹(-13.5%)、0.080 mg·kg⁻¹(-26.7%),大同桥的茎叶 Cd 含量下降 0.108 mg·kg⁻¹(-6.7%),北山茎叶 Cd 含量有所提高,但处理间差异不明显;而在梅林桥碱性缓释肥的降 Cd 效果不如石灰,其稻米、茎叶 Cd 含量较石灰提高 0.066 mg·kg⁻¹(90.1%)、0.273 mg·kg⁻¹(76.8%, $P<0.05$)。可见,不同试验点的降 Cd 差异可能与当地的土壤质地、pH 条件有关。

2.3 不同处理对土壤 pH 及土壤有效态 Cd 含量的影响

测定水稻成熟期土壤 pH 和土壤有效态 Cd 含量



图中小写字母表示 0.05 的显著水平

Different lowercase letters indicate significant differences among the treatments at 0.05 level

图 1 不同处理水稻产量

Figure 1 The rice gain yields of different treatments at the three experiment sites

表明(表 2),北山、梅林桥、大同桥施用石灰皆能增加土壤 pH,其中,梅林桥、大同桥土壤 pH 显著提高,与对照相比,三个试验点施用石灰后成熟期土壤 pH 分别提高 0.35、0.45 ($P<0.05$)、0.44 ($P<0.05$) 个单位;碱性缓释肥也能增加成熟期土壤 pH,三个试验点分别较对照提高 0.20、0.16、0.11 个单位,但差异不显著。碱性缓释肥提升土壤 pH 值的效果不如石灰。

北山、梅林桥、大同桥三试验点施用石灰都能降低土壤有效 Cd 的含量,其中大同桥下降 $0.022\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降幅达 11.7%,达显著水平;北山、梅林桥降幅虽没有显著水平,但其降幅也分别达 6.9%、6.5%。碱性缓释肥在酸性土壤上(北山、大同桥)能够降低土壤 Cd 的有效性,与对照相比,两地降幅分别为 8.3%、6.9%,但在偏中性土壤上(梅林桥)无效,甚至还略有增加。总体来说,碱性缓释肥在降低土壤 Cd 的有效性上不如石灰。从土壤 Cd 有效性降低幅度看,大同

桥施用石灰、碱性缓释肥的效果较好,北山点次之,梅林桥点最差。这可能与土壤质地、土壤酸碱度、土壤有机质有关。

2.4 水稻 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量、土壤 pH 的相关性分析

北山、梅林桥、大同桥的水稻稻米、茎叶以及土壤有效态 Cd 含量、土壤 pH 之间的相关性表明(表 3),水稻稻米 Cd 含量与水稻茎叶 Cd 含量皆呈正相关关系,其中梅林桥、大同桥分别达极显著、显著水平,表明水稻茎叶中吸收积累的 Cd 越多,转运至稻米中的 Cd 也越多,但在北山镇两者相关性不显著,说明在北山镇水稻稻米 Cd 含量还受其他因素的影响。三试验点的稻米及茎叶 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量呈正相关,但都未达显著水平,表明水稻吸收积累 Cd 不仅受土壤有效态 Cd 含量的影响,还受许多其他因素的制约。三试验点的土壤有效态 Cd 含量与土壤 pH 呈

表 1 三个试验点不同处理的水稻稻米与茎叶Cd 含量 (mg·kg⁻¹)
Table 1 The Cd contents of rice grains and stems of different treatments at the three sites (mg·kg⁻¹)

处理	北山		梅林桥		大同桥	
	米 Cd	茎叶 Cd	米 Cd	茎叶 Cd	米 Cd	茎叶 Cd
CK	0.273±0.027a	1.380±0.133a	0.212±0.032a	0.874±0.056a	0.346±0.078a	2.136±0.222a
CKCa	0.172±0.057b	0.936±0.429a	0.073±0.006b	0.356±0.024c	0.301±0.067ab	1.618±0.264a
AF	0.149±0.036b	1.238±0.414a	0.138±0.028b	0.629±0.102b	0.221±0.023b	1.510±0.196a

注:同列数据后的不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters within a column indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments.

表 2 三个试验点不同处理的土壤 pH、有效态 Cd 含量
Table 2 The soil pH, available Cd contents from different treatments at the three sites

处理	北山		梅林桥		大同桥	
	pH	土壤有效 Cd/mg·kg ⁻¹	pH	土壤有效 Cd/mg·kg ⁻¹	pH	土壤有效 Cd/mg·kg ⁻¹
CK	5.19±0.08a	0.230±0.005a	6.43±0.07b	0.303±0.009ab	4.97±0.09b	0.186±0.004a
CKCa	5.54±0.20a	0.214±0.012a	6.88±0.15a	0.283±0.013b	5.41±0.10a	0.164±0.005c
AF	5.39±0.08a	0.211±0.009a	6.59±0.10b	0.327±0.026a	5.08±0.08b	0.173±0.002b

注:同列数据后的不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters within a column indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments.

表 3 三个试验点水稻稻米、茎叶 Cd 含量与土壤 pH 及土壤有效态 Cd 含量的相关性(n=9)
Table 3 Correlations between soil available Cd, pH, and Cd contents of rice and stem at the three sites

项目	北山			梅林桥			大同桥		
	茎叶 Cd	土壤有效 Cd	土壤 pH	茎叶 Cd	土壤有效 Cd	土壤 pH	茎叶 Cd	土壤有效 Cd	土壤 pH
稻米 Cd	0.59	0.44	-0.29	0.93**	0.33	-0.84**	0.66*	0.27	0.09
茎叶 Cd		0.06	-0.32		0.27	-0.94**		0.60	-0.51
土壤有效 Cd			-0.31			-0.40			-0.78**

注:“*”表示 0.05 的显著水平,“**”表示 0.01 的显著水平。
Note: * Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed);** Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed).

负相关,但只有大同桥达极显著水平,其余两点相关性不显著,说明大同桥可以通过提高土壤 pH 值来降低土壤有效 Cd 含量,而其余两地通过提高土壤 pH 值对土壤有效态 Cd 含量的影响相对要小。土壤 pH 与水稻茎叶 Cd 含量在三个试验点均呈负相关,但只有梅林桥点达极显著水平,其余两点相关不显著;同时,土壤 pH 与水稻稻米 Cd 含量在北山、梅林桥也呈负相关,但也只有梅林桥点达极显著水平,北山点相关不显著。可见梅林桥可以通过提高土壤 pH 值来降低稻米及茎叶中的 Cd 含量,而北山、大同桥仅仅依靠提高土壤 pH 值来降低水稻 Cd 含量是不够的。

3 讨论

研究表明,土壤 pH 是影响土壤 Cd 活性的主要因素,控制着土壤中 Cd 的吸附-解吸、沉淀-溶解平衡等过程,pH 值升高会促进土壤胶体对 Cd 的吸附,有利于生成碳酸盐、氢氧化物沉淀,降低土壤 Cd 的迁移性和生物有效性^[17-20]。石灰是强碱性物质,能显著改良土壤酸性,提高土壤 pH 值,因此施石灰是目前改良土壤酸性^[21]和修复 Cd 污染土壤^[22]的主要措施。本试验中,北山、梅林桥、大同桥三个中轻度 Cd 污染稻田施用石灰均显著提高了土壤 pH,降低了土壤有效态 Cd 含量,降低了水稻稻米及茎叶 Cd 含量,且对水稻产量皆无明显影响。然而,石灰施用后易产生 CaCO_3 、 CaSO_4 而导致土壤板结,如果常年大量施用无疑会降低土壤肥力和土地生产力,因而施用石灰只能作为一种应急性的修复措施,不能长期施用。本试验的“碱性缓释肥”作为一种新型的肥料产品,其水溶液的 pH 值为 8~10,也能够调节土壤酸度,提高土壤 pH 值,但因其碱性没有石灰强,施用量也只有石灰的一半,所以本试验中“碱性缓释肥”在提高土壤 pH 值、降低土壤有效 Cd 含量方面上不如石灰。

然而,水稻积累 Cd 除受土壤本身的有效 Cd 含量、土壤 pH 值影响外,外源物的添加也能降低水稻对 Cd 的吸收^[23-25]。宇丰公司生产的“碱性缓释肥”除能够满足作物对养分的需求外,还含有 CaO 、 SiO_2 、 ZnO 等成分,能有效降低水稻对 Cd 的吸收,减少 Cd 在稻米中累积。研究表明,施硅能显著抑制 Cd 向地上部的运输,使质外体运输途径的运输量减少,同时降低了质外体内不同形态 Cd 的含量,特别是结合态的 Cd 显著减少^[26];赵颖等^[27]、史新慧等^[28]、余跑兰等^[29]的研究认为,硅可以降低水稻体内 Cd 的迁移能力,使大部分 Cd 滞留在根部和茎叶中,阻止 Cd 向上迁

移,即降低水稻可食部分的 Cd 含量。同时,还有研究表明^[15,30],添加锌肥能降低水稻对 Cd 的吸收,其降 Cd 机理主要表现为 Zn、Cd 在土壤、植株中的拮抗作用;在微量元素中,锌对水稻 Cd 的吸收抑制作用最为显著,其次是铜^[31]。张建辉等^[32]在湖南省采集 108 组稻米和土壤样品,测定稻米 Cd、土壤总 Cd、土壤有效 Cd 和有效锌含量,统计结果显示,稻米 Cd 和土壤有效锌含量呈开口向下的二次曲线关系,稻米 Cd 含量受到土壤有效 Cd 含量的促进,而土壤有效态 Zn 小于 $12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,有效态 Cd 与有效态 Zn 对稻米中 Cd 的含量表现为协同作用,大于 $12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,两者表现为拮抗作用,可以抑制稻米 Cd 的积累。

CaO 是石灰的主要功能成分,其作用机理同石灰。试验中北山、梅林桥、大同桥三个试验点施用“碱性缓释肥”,虽然其在提高土壤 pH 值、降低土壤有效 Cd 含量上不如石灰,但在北山、大同桥的酸性土壤上,施用“碱性缓释肥”,其稻米 Cd 含量较石灰处理明显下降。这与“碱性缓释肥”含有 CaO 、 SiO_2 、 ZnO 等成分不无关系,一方面 Zn 与 Cd 的拮抗作用减少了水稻对 Cd 的吸收量,另一方面水稻对硅的吸收抑制 Cd 向地上部的运输,降低水稻体内 Cd 的迁移能力,使大部分 Cd 滞留在根部和茎叶中,阻止 Cd 向上迁移,从而降低水稻稻米的 Cd 含量。在梅林桥的偏中性土壤上施用碱性缓释肥,水稻降 Cd 幅度不如石灰,这可能存在以下原因:由于 Zn 与 Cd 性质相似,在偏中性的土壤上,施入的外源锌容易生成碳酸盐、氢氧化物沉淀而被土壤吸附固定,从而降低了其降 Cd 的效果^[19,33];水稻对硅的吸收主要以单硅酸为主,而有研究表明,在 pH=6 时,溶液中可溶性硅以聚硅酸凝胶状态存在^[34],因此在本试验梅林桥的土壤施硅难以被水稻吸收利用,也导致其降 Cd 效果下降,故“碱性缓释肥”在偏中性的土壤上降低水稻 Cd 含量的效果不如石灰。

4 结论

(1)与常规施肥相比,增施石灰北山、梅林桥、大同桥三个试验点水稻产量均有所下降,但都没有达显著水平;施用碱性缓释肥,三个试验点水稻产量提高 $290.8(+3.9\%) \sim 605.0(+7.3\%) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均增产 $467.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}(+5.7\%, P<0.05)$,增产显著。

(2)施用石灰和碱性缓释肥都能提升土壤 pH、降低土壤 Cd 的有效性,但碱性缓释肥在提升土壤 pH 的能力及降低土壤有效 Cd 含量上均不如石灰。

(3)同常规处理相比,施用石灰和碱性缓释肥均能降低稻米、茎叶Cd含量。在酸性土壤上碱性缓释肥的效果优于石灰;在偏中性的土壤上,石灰降低水稻Cd含量的效果要优于碱性缓释肥。可见,碱性缓释肥在酸性土壤上的效果较好。

参考文献:

- [1] Tschuschke S, Schmitt-Wrede H P, Greven H, et al. Cadmium resistance conferred to yeast by a non-metalllothionein-encoding gene of the Earthworm *Enchytraeus*[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2002, 277(7):5120-5125.
- [2] 国家环境保护总局. 中东部地区生态环境现状调查报告[J]. 环境保护, 2003, 8:3-8.
State Environmental Protection Agency. Investigation report of eco-environmental situation in China's mid-east regions[J]. *Environmental Protection*, 2003, 8:3-8.
- [3] 徐良将, 张明礼, 杨浩. 土壤重金属镉污染的生物修复技术研究进展[J]. 南京师范大学学报:自然科学版, 2011, 34(1):102-106.
XU Liang-jiang, ZHANG Ming-li, YANG Hao. Research progress of bioremediation technology of cadmium polluted soil[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 34(1):102-106.
- [4] 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):2390-2398.
LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, et al. Cadmium and selected heavy metals in soils of Jianping area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and source recognition[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6):2390-2398.
- [5] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10):1946-1954.
ZHANG Ming-kui, WANG Hao, ZHANG Hui-min. Distinguishing different sources of heavy metals in soils on the coastal plain of Eastern Zhejiang Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10):1946-1954.
- [6] 李启权, 张少尧, 代天飞, 等. 成都平原农地土壤镉含量特征及来源研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):898-906.
LI Qi-quan, ZHANG Shao-yao, DAI Tian-fei, et al. Contents and sources of cadmium in farmland soils of Chengdu plain, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):898-906.
- [7] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5):1214-1222.
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5):1214-1222.
- [8] Jurate K, Anders L, Christian M. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments: A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):215-225.
- [9] Elouear Z, Bouhamed F, Bouzid J. Evaluation of different amendments to stabilize cadmium, zinc, and copper in a contaminated soil: Influence on metal leaching and phytoavailability[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2014, 23(6):628-640.
- [10] 刘昭兵, 纪雄辉, 王国祥, 等. 赤泥对Cd污染稻田水稻生长及吸收累积Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):692-769.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, WANG Guo-xiang, et al. Effects of red-mud on rice growth and cadmium uptake in cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):692-769.
- [11] 谢运河, 纪雄辉, 黄涓, 等. 有机物料和钝化剂对低Cd环境容量土壤黑麦草与桂牧1号轮作的Cd安全分析[J]. 草业学报, 2015, 24(3):30-37.
XIE Yun-he, JI Xiong-hui, HUANG Juan, et al. Cadmium security analysis of different organic materials and passivators under ryegrass-Guimu 1 hybrid rotation in soils with low Cd environmental capacity[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(3):30-37.
- [12] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 氮肥品种和用量对水稻产量和镉吸收的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2):281-285.
JIAKA La-tie, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effect of nitrogen fertilizer type and application rate on cadmium uptake and grain yield of paddy rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2):281-285.
- [13] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6):1585-1590.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6):1585-1590.
- [14] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 不同磷、钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(4):990-995.
JIAKA La-tie, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effect of different phosphate and potassium fertilizers on yields and cadmium uptake by paddy rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(4):990-995.
- [15] 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]. *Environmental Science*, 2011, 32(4):1164-1170.
- [16] 石学勇, 张兵印, 王金铭. 脲甲醛缓释肥生产工艺技术及应用[J]. 硫磺设计与粉体工程, 2013(1):41-43.
SHI Xue-yong, ZHANG Bing-yin, WANG Jin-ming. Production process technology for urea-formaldehyde slow release fertilizer and its application[J]. *S P & BMH Related Engineering*, 2013(1):41-43.
- [17] 殷丽萍, 张博, 李昂, 等. 土壤酸碱度对重金属在土壤中行为的影响[J]. 辽宁化工, 2014, 43(7):865-867.
YIN Li-ping, ZHANG Bo, LI Ang, et al. Influence of soil pH value on geochemical behavior of heavy metals in soil[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2014, 43(7):865-867.
- [18] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH对土壤及其组分吸附和解吸附的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):320-324.
ZHANG Hui-min, XU Ming-gang, LÜ Jia-long, et al. A review of studies on effects of cadmium sorption and desorption in soil[J]. *Journal*

- of Agro-Environment Science, 2005, 24(Suppl):320-324.
- [19] 胡宁静, 骆永明, 宋 静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其与有机质、pH 和温度的关系[J]. 土壤学报, 2007, 44(3):437-443.
- HU Ning-jing, LUO Yong-ming, SONG Jing. Influence of soil organic matter, pH and temperature on Cd sorption by four soils from Yangtze River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3):437-443.
- [20] 杜彩艳, 祖燕群, 李 元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效锌影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4):539-543.
- DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil[J]. Journal of Yunnan Agriculture University, 2005, 20(4):539-543.
- [21] 蔡 东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9):206-213.
- CAI Dong, XIAO Wen-fang, LI Guo-huai. Advance on study of liming on acid soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9):206-213.
- [22] 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.
- [23] 周利强, 尹 斌, 吴龙华, 等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. 土壤, 2013, 45(2):227-232.
- ZHOU Li-qiang, YIN Bin, WU Long-hua, et al. Effects of different organic amendments on uptake of heavy metals in rice from contaminated soil[J]. Soils, 2013, 45(2):227-232.
- [24] 王凯荣, 张玉焯, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):476-481.
- WANG Kai-rong, ZHANG Yu-zhu, HU Rong-gui. Effects of different types of soil amelioration materials on reducing concentrations of Pb and Cd in brown rice in heavy metal polluted paddy soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2):476-481.
- [25] 王开峰, 彭 娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):105-108.
- WANG Kai-feng, PENG Na, WANG Kai-rong, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1):105-108.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 余跑兰, 肖小军, 陈 燕, 等. 硅肥对提高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. Effect of silicon fertilizer on population production and cadmium absorption for early rice[J]. China Rice, 2015, 21(4):135-137.
- [30] 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3):826-832.
- XIE Yun-he, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Effect of different organic fertilizers on bioavailability of soil Cd and Zn[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3):826-832.
- [31] 胡 坤, 喻 华, 冯文强, 等. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8):2341-2348.
- HU Kun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effect of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8):2341-2348.
- [32] 张建辉, 王芳斌, 汪霞丽, 等. 湖南稻米镉和土壤镉锌的关系分析[J]. 食品科学, 2015, 36(22):156-160.
- ZHANG Jian-hui, WANG Fang-bin, WANG Xia-li, et al. Relationship between Cd and Zn in soil and in rice grain[J]. Food Science, 2015, 36(22):156-160.
- [33] 王学锋, 尚 菲, 马 鑫, 等. pH 和腐植酸对镉、镍、锌在土壤中的形态分布及其生物活性的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 12(7):8082-8086, 8092.
- WANG Xue-feng, SHANG Fei, MA Xin, et al. pH and humic acid effect on the form distribution of cadmium, nickel, zinc in the soil and biological[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(27):8082-8086, 8092.
- [34] 陈翠芳, 钟继洪, 李淑仪. 施硅对抑制植物吸收重金属镉的效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4):567-570.
- CHEN Cui-fang, ZHONG Ji-hong, LI Shu-yi. Research progress on inhibitory effects of silicon on cadmium absorption by plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4):567-570.