

改良-农艺综合措施对水稻吸收积累镉的影响

陈 喆, 铁柏清*, 刘孝利, 雷 鸣, 袁 啸, 大岛卓, 叶长城

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要:通过田间原位小区试验,以湖南冶炼区周边典型单一 Cd 污染稻田为研究对象,选取晚稻中优 978 为供试品种,在水稻孕穗末期施加石灰,同时采取后期持续淹水的综合调控措施,分析水稻 5 个关键生育期内各器官中 Cd 含量,探索改良-农艺综合措施对水稻吸收积累 Cd 的影响。结果表明,与采用传统农艺管理措施的对照区水稻相比,改良-农艺综合措施管理下的晚稻增产 33.24%,糙米中 Cd 含量降低 39.32%。采用该措施有可能使得土壤中 Cd 元素最终更易富集在水稻的根、茎、叶等不可食用部分,从而在一定程度上降低了水稻穗部的 Cd 累积量;孕穗末期施加石灰结合后期持续淹水的措施可有效阻控 Cd 向稻米中迁移,降低稻米中 Cd 的含量。该措施是一种经济、有效的稻米 Cd 污染控制技术,具有良好的推广应用前景,为镉污染农田的稻米安全生产提供有效的科学支持和理论依据。

关键词:镉;土壤;水稻;石灰;淹水调控;冶炼区

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)07-1302-07 doi:10.11654/jaes.2013.07.003

Impacts of Optimized Agronomic Regulation Management on Cadmium Absorption and Accumulation by Late Rice

CHEN Zhe, TIE Bai-qing*, LIU Xiao-li, LEI Ming, YUAN Xiao, DA Dao-zhuo, YE Chang-cheng

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

Abstract: An in situ field experiment was conducted in a Cd contaminated paddy soil to reveal the effects of optimized agricultural management strategy on Cd absorption and accumulation by rice, in the smelting area of Hunan Province. Taking hybrid rice (named Zhong you 978) as an sample in this experiment, lime application at end of booting stage combined with following continuous water-logging was selected as optimized agricultural management, simultaneously traditional agricultural management as a control. To evaluate effects of optimized agronomic management on Cd uptake by rice, the concentrations of Cd in different rice tissues at five key growth stage were examined. Results showed that, rice yield increased by 33.24% in optimized agronomic management of lime application and subsequent continuous water-logging treatment compared to control treatment, Cd concentration of brown rice decreased by 39.32% compared to control treatment. So, lime application at end of booting stage combined with following continuous water-logging was an effective measure to reduce rice Cd concentration standard exceeding risk and showed favorable practicality because of its easy operability, and also can provide scientific support and basis for food safety production and supervision.

Keywords: cadmium; soil; rice; lime; water-logging control; smelting area

中国是世界上最大的稻谷生产国,年均生产稻谷 1.87 亿 t, 约占世界稻谷产量的 35%。近年来我国稻

田土壤和稻米中重金属污染问题日益严重,其中稻米的镉(Cd)污染问题尤为突出^[1-2]。湖南省是我国的“鱼米之乡”,也是“有色金属之乡”,由于矿山开采和金属冶炼等活动造成了湖南省,尤其湘江流域稻米中重金属含量超标问题越来越突出^[3-4]。因此,如何降低稻米中 Cd 的含量,实现湖南省水稻安全生产倍受人们的关注。当前有许多关于添加改良剂来降低稻米 Cd 含量的研究,结果表明石灰是一种常用的改良剂,施加石灰能够有效地降低水稻中镉的含量^[5-6]。另外,田间

收稿日期:2012-12-16

基金项目:国家科技重大水专项“水体污染控制与治理”子课题“湘江流域重金属面源污染控制技术”(2009ZX07212-01-05);湖南省农业厅“镉污染稻田水稻吸收积累镉规律”(20172);湖南省教育厅“重金属复合污染土壤综合修复技术研究示范”项目(10A049)

作者简介:陈 喆(1987—),男,在读研究生,研究方向为环境污染治理与修复。E-mail:ldchenzhe@qq.com

* 通信作者:铁柏清 E-mail:tiebq@qq.com

水分管理措施对土壤中镉的有效性也有明显的影响,如甲卡拉铁等的研究表明淹水使土壤有效 Cd 下降 58.2%~84.1%^[7]。胡坤等研究了 Cd 污染土壤上不同水分管理方式对水稻生长和 Cd 吸收的影响,结果表明淹水处理显著降低了水稻籽粒中的 Cd 浓度与总量^[8]。但这些研究多以水稻全生育期持续淹水的盆栽试验居多,并且以研究成熟期水稻的 Cd 污染状况为主,而利用大田试验来研究水稻全生育期的 Cd 迁移积累情况却鲜有报道。本研究选取湖南典型受镉污染稻田开展稻米镉污染控制技术方面的研究,在水稻孕穗末期施用石灰配合后期持续淹水,重点研究不同生育期水稻各部位对重金属 Cd 的吸收积累规律,以及探讨改良-农艺综合措施阻控 Cd 向稻米中迁移的机理,以期为湖南地区稻米 Cd 污染控制技术提供有效的科学支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻:中优 978(杂交晚稻),全生育期 112 d 左右,从株洲马家河镇农技站购买。

供试土壤:湖南株洲市新马村 Cd 污染稻田(N27°50'1.3",E113°02'8.4"),土壤类型为第四纪红壤。在进行大田试验前和水稻收获后,在实验区按照十字交叉法布设 5 个采样点(包括单元中心、进水口、出水口位置),用土壤取样器采集 0~20 cm 耕作层土壤 1 kg 左右,装入样品袋,运回实验室。样品经自然风干,除去石砾、植物根系等异物,混合均匀后用四分法保留至 500 g,用木锤将样品锤碎、研磨,过 100 目尼龙筛,保存于密封塑料袋中待分析。

实验区对照区(CK)和处理区(ARM;Agronomic

Regulation Management)的土壤 pH 值都<5.0,属于酸性红壤,CK 区和 ARM 区土壤的其他基本理化性质一致(表 1)。土壤中 Pb、Cu 和 Zn 的含量没有超过国家土壤环境质量二级标准,但土壤中 Cd 的含量分别超过该标准的 13.67 倍和 14.3 倍。

1.2 试验设计

本试验选取湖南省株洲市天元区马家河镇新马村 Cd 污染稻田进行田间试验,共设置 2 个处理,即 CK 和 ARM 处理。每处理设置 3 个试验小区,每个试验小区面积为 667 m²(1 亩),试验田总面积为 4002 m²(6 亩),具体小区面积及管理措施见表 2。氮肥总施用量为 170 kg·hm⁻²(纯氮),N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:1。其中,氮肥用尿素,分基肥和追肥施用,即 50%作基肥,20%作分蘖肥,在插秧后 8 d 施用;20%作穗肥,在穗分化期施用;10%作粒肥,在抽穗期施用。磷肥为钙镁磷肥,全部作基肥。钾肥为氯化钾,50%作基肥,50%作追肥,在穗分化期施用。2011 年 6 月 1 日播种,2011 年 6 月 28 日移栽。种植密度为 20 cm×20 cm,选壮苗栽植,其他防治水稻病虫害等措施按照当地习惯进行。CK 区不施用物化改良剂和不采取淹水调控措施,按照当地传统耕作方式与习惯进行,播种时间和方式与 ARM 区相同。一季晚稻收获时间为 2011 年 9 月 27 日。分别于分蘖期(7 月 26 日)、孕穗期(8 月 14 日)、抽穗期(8 月 25 日)、乳熟期(9 月 19 日)、成熟期(9 月 27 日)按照梅花 5 点采样法均匀采集水稻样品并制成 1 个混合样品,每处理共采集 3 个混合样品,再将样品按根、茎、叶、穗、谷壳、糙米等进行分解,分别测定水稻各器官或部位中 Cd 的含量。

1.3 分析测定

土壤重金属的全量用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄^[9]进

表 1 土壤理化性质(mg·kg⁻¹)
Table 1 Soil physical and chemical properties(mg·kg⁻¹)

ID	pH	Pb	Zn	Cu	Cd	有效 Cd	碱解氮	速效磷	速效钾
CK	4.97±0.51*	125.19±8.35	149.18±3.19	27.06±1.10	4.10±0.42	1.68±0.13	115.71±20.12	9.97±1.39	65.12±5.22
ARM	4.83±0.35	131.54±2.45	147.86±3.25	27.45±2.45	4.29±0.45	1.73±0.16	108.82±33.04	10.05±0.93	66.21±4.63
二级标准 **	<6.5	≤250	≤200	≤50	≤0.3				

注:* 为平均值±标准差;** 土壤环境质量标准(GB 15618—1995,二级)。

表 2 处理名称及内容
Table 2 Treatments and detail

ID	小区面积/m ²	具体操作规程
CK	667	不施用任何改良剂,水分管理为常规管理;基本苗参考当地的高产管理技术。
ARM	667	在 CK 的基础上,于孕穗末期灌水保持田面 2~3 cm 的水层,然后将 90 g·m ⁻² 当量的石灰均匀撒施入水中,田间一直保持淹水状态,直到收割前 5 d 自然蒸腾与蒸发落干或排干。

行湿法消解,用原子吸收分光光度计-火焰法(TAS-990,北京普析)测定其中重金属的含量;土壤有效态 Cd 按照 GB/T 23739—2009 中 DTPA 的方法提取,再用原子吸收分光光度计-火焰法(TAS-990,北京普析)测定;其他土壤理化性质指标测定方法参照刘凤枝的农业环境监测实用手册^[9]。

水稻样品采集后用自来水洗净,再手工肢解为根、茎、叶、穗、谷粒等部位,经自然风干,根据常规农业生产习惯,将谷粒样品置于室外阳光下晒干,其他部位样品皆装入编号信封置于 103 ℃烘箱内杀青 1 h,调至 65 ℃烘至恒重后,再称取和记录各部位样品的干重,晒干谷粒用糙米机再细分为谷壳、糙米,然后用植物粉碎机粉碎植物样品后装入密封袋中保存,用万分之一天平(AUX120,日本岛津)称取植物样品(0.500 0±0.000 2)g,用混合酸(HNO₃:HClO₄=4:1)^[10]在可调温电热板(ED36,美国 Labtech)上进行湿法消解,每批样品做 3 个空白样和 3 个灌木枝叶质控样[国家一级标准物质 GBW07603(GSV-2)],消解、定容后用火焰原子吸收光谱分析法测定水稻根、茎、叶及穗部样品的 Cd 浓度,用石墨炉原子吸收光谱分析法(GTA120,美国 Varrian)测定糙米样品中 Cd 含量。

稻谷产量的测定方法:水稻成熟后,依照当地习惯用农用收割机按试验小区分开收获、装袋,运回实验室后将不同小区的稻谷样品平铺于干净平整的场地上晒干后称重,所称重量除以对应的小区面积即为该小区稻谷产量(g·m⁻²)。

1.4 数据处理

转运系数是指植物地上部某元素质量分数与植物地下部元素质量分数之比,用来评价植物将重金属从地下部向地上部的运输和富集能力^[11]。水稻不同功能器官之间转运系数可按式^[11]计算:

$$R = \frac{S}{L}$$

式中:R 为转运系数;S 为某元素植物地上部分含量,mg·kg⁻¹;L 为某元素植物地下部分含量,mg·kg⁻¹。

用 Microsoft Excel 2003 处理试验数据和绘制图表,用 DPS v7.05 统计软件做数据的显著性比较分析。

2 结果与分析

2.1 各生育期晚稻不同部位对 Cd 吸收与积累规律

水稻不同生育期转运系数如表 3 所示。CK 组和 ARM 组的转运系数大部分均小于 1,从各时期转运系数均值大小可知各部位转运能力总体规律为茎/

表 3 水稻不同功能器官间的转运系数

Table 3 Transfer coefficients of different rice organs

生育期	CK 处理转运系数			ARM 处理转运系数		
	茎/根	叶/茎	穗/叶	茎/根	叶/茎	穗/叶
分蘖期	0.102	0.638	—	0.084	0.667	—
孕穗末期	0.131	0.895	0.833	0.047	0.729	0.472
抽穗期	0.107	1.191	0.513	0.124	0.635	0.995
乳熟期	0.119	0.634	1.465	0.108	0.708	0.706
成熟期	0.168	0.549	0.689	0.167	1.042	1.247
各时期均值	0.125	0.781	0.875	0.106	0.756	0.855

根<叶/茎<穗/叶,说明叶部向果实穗部的转运能力相对最强,其原因可能是镉更易与子实中分子量较小的可溶性蛋白质结合,利于其转运并积累在植物的体内,在水稻籽粒中,以蛋白质相结合的镉比例最高,其中以球蛋白和清蛋白结合的镉比例最高^[12]。根部向茎部及茎部向叶片的转运系数,总体上是随着水稻的生长呈先增加再降低的趋势。比较两组处理间的转运系数可知,ARM 处理降低了根部向茎叶穗部的转运能力,在孕穗末期尤为突出,说明追施石灰可以在短时间内强烈抑制根部吸收积累的镉向地上部转移。

水稻不同生育期各部位中 Cd 的含量如图 1 所示,中优 978 晚稻体系中各部位 Cd 含量分布的总体规律是根部>茎部>叶部>穗部(谷壳>糙米),与前人研究结论一致^[13]。水稻体根、茎、叶部都在孕穗末期达到 Cd 吸收积累的最大值,且各部位的 Cd 积累分布量不是随生育期的推演而呈现出简单的线性递增或递减关系,而是一个动态迁移积累过程^[14]。在水稻成熟期,根、茎、叶部中的 Cd 含量在一定程度上都是 ARM>CK,而水稻果实穗部的 Cd 含量则表现为在一定程度上 CK>ARM,研究表明采用改良剂与农艺调控综合措施很可能使得土壤中 Cd 元素最终更易富集在根、茎和叶等不可食用部分,因而在一定程度上降低了果实穗部的 Cd 含量,减轻了对水稻子实的 Cd 毒害作用^[15]。

由图 1(a)可知,水稻根部富集 Cd 含量明显高于土壤 Cd 含量,在孕穗末期,CK 和 ARM 区的水稻根部浓度分别为 10.93、11.67 mg·kg⁻¹,分别是土壤中 Cd 含量的 2.67 倍和 2.72 倍。根部 Cd 最低浓度出现在乳熟期,分别是土壤 Cd 含量的 1.38 倍和 1.27 倍。因此,采取的农艺调控措施对阻控根部吸收积累 Cd 的效果并不显著(P>0.05)。

从图 1(b)可知,在 CK 中水稻茎部的 Cd 积累最高和最低含量分别出现在孕穗末期(1.43 mg·kg⁻¹)和

乳熟期 ($0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 2 个时期的 Cd 吸收降幅为 52.82%; 从水稻全生育期的茎部 Cd 含量动态变化情况来看, 水稻成熟期茎部 Cd 含量与分蘖期相比较, 最终还是上升了 3.44%。CK 区的水稻体茎部吸收规律则不同, ARM 区由于在水稻孕穗末期撒施了石灰的缘故, 使得孕穗末期茎部 Cd 浓度有显著的降低 ($P < 0.05$), 相关研究也已证实^[15], 施加石灰等改良剂可提高土壤及土壤溶液中的 pH, 促使土壤中有效态重金属活性降低, 继而转化为不易被植物体吸收的稳定形态。但在土壤的缓冲体系作用下, 土壤及土壤溶液又会逐渐达到酸碱平衡, 故抽穗期、乳熟期和成熟期的茎部吸收规律又和 CK 区水稻基本一致。

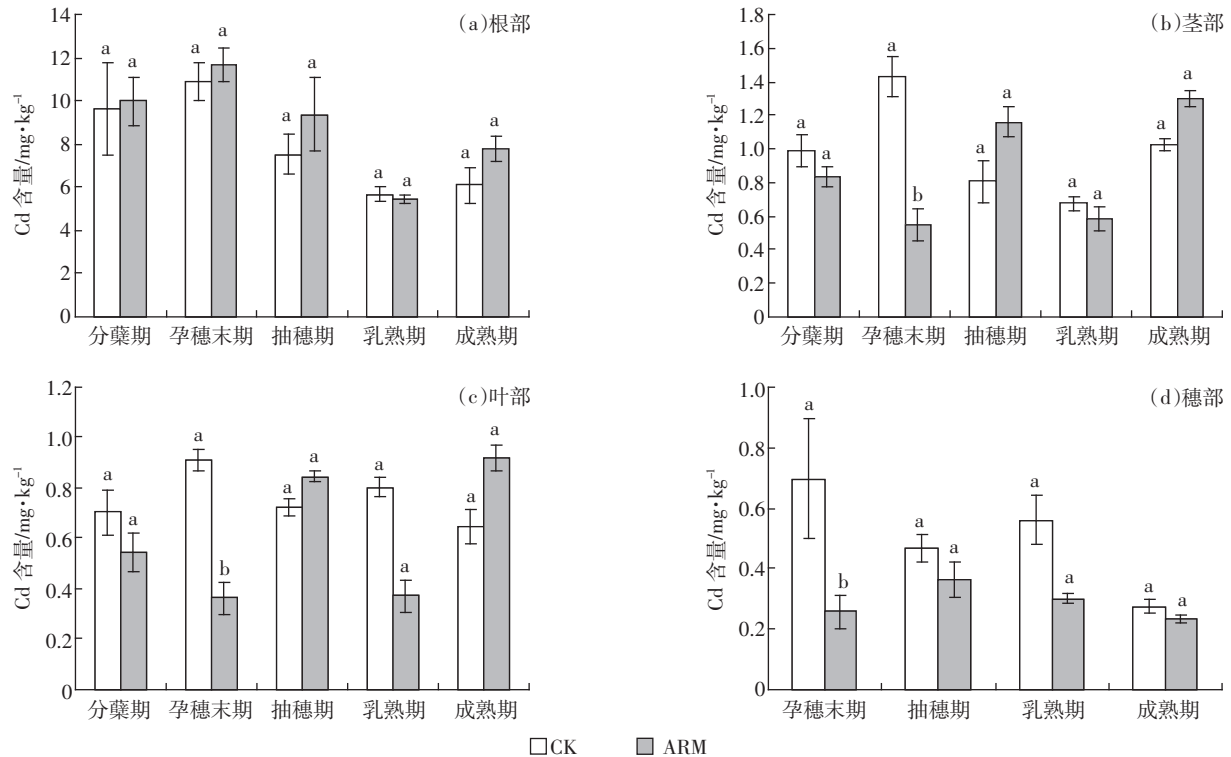
从图 1(c) 可看出, CK 区的水稻体叶部吸收积累 Cd 的最高和最低含量分别出现在孕穗末期 ($0.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和成熟期 ($0.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 2 个时期的 Cd 吸收降幅为 28.98%; 从水稻全生育期的叶部 Cd 含量动态变化情况来看, 水稻成熟期叶部 Cd 含量与分蘖时期相比较, 最终下降了 8.23%。与 CK 区不同, ARM 区水稻叶部 Cd 含量在分蘖末期也因撒施碱性石灰的关系有显著降低 ($P < 0.05$)。

由图 1(d) 可知, CK 区的水稻穗部在成熟期吸收 Cd 的量为最小 ($0.275 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 在孕穗末期吸收 Cd 的量达到最大 ($0.697 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 即从孕穗末期到成熟期, 水稻穗部吸收 Cd 的量增加了 60.55%。水稻体中 Cd 含量的升降变化过程反映出水稻吸收积累 Cd 是一个动态迁移的过程。相比 CK 区, ARM 区的水稻穗部中 Cd 含量却在孕穗末期显著下降 ($P < 0.05$), 在抽穗期、乳熟期和成熟期也都有降低的趋势 ($P > 0.05$)。

因此, 在重金属 Cd 污染的土壤上种植水稻过程中, 如果在水稻孕穗末期施加石灰, 并结合后期持续淹水的农业管理措施, 有利于阻控土壤 Cd 向水稻体不同部位迁移。

2.2 改良农艺措施对稻米 Cd 含量及产量的影响

由图 2 可知, 从乳熟期到成熟期, 两个处理的水稻谷壳和糙米 Cd 含量都呈现出下降的趋势, 表明在籽粒成熟的过程中, 籽粒中 Cd 的含量并不是一个富集增加的过程, 而是一个稀释降低的过程。与 CK 区相比, ARM 区水稻在乳熟期和成熟期的谷壳中 Cd 的含量在一定程度上有所降低, 但差异都不显著 ($P > 0.05$)。在乳熟期, ARM 区水稻糙米的 Cd 含量显著低



图中所示为 2 个处理的平均值及标准差, 不同小写英文字母表示 $P < 0.05$ 水平上的差异显著。下同

The columns marked by different letters represent significant difference at 0.05 level. Bars show standard error, $n=2$. The same below

图 1 水稻不同生育期各部位中 Cd 的含量

Figure 1 Concentrations of Cd in rice tissues in different growth stages

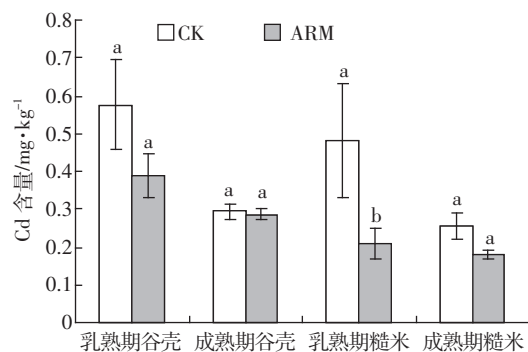


图 2 糙米和谷壳中 Cd 含量

Figure 2 Concentrations of Cd in brown rice and hull

于 CK 区水稻糙米 Cd 含量 ($P<0.05$); 在成熟期, ARM 区水稻糙米 Cd 含量也低于 CK 区水稻糙米 Cd 含量。

由表 4 可知, 在水稻成熟期, 水稻茎、叶部 Cd 的含量都已超过了饲料卫生标准对鸡、猪配合饲料的安全生产要求 ($\text{Cd 含量} \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 故该区生产的稻草不适合作为畜禽饲料; 但谷壳中 Cd 的含量并未超过饲料卫生标准中米糠的安全生产限值 ($\text{Cd 含量} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。研究表明: 与 CK 相比, ARM 区通过运用改良农艺综合措施有效降低了糙米中 Cd 的含量 ($0.179 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 降幅达到 39.32%, 并达到食品卫生标准 (大米 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 同时采取该措施还使得晚稻增产了 33.24%, 水稻增产归功于石灰既是一种常用的钙肥, 又有预防和杀死虫害的功效, 这与 Li 等^[6]报道的施加石灰促使水稻增产的结论一致。另外, 本文没有采用全生育期淹水的方法来降 Cd, 而采用了孕穗末期的短期淹水的方法, 是因为与全生育期淹水相比, 短期淹水对水稻产量不会产生较大影响, 这与甲卡拉铁等^[7]关于不同淹水灌溉对水稻产量影响的研究结论一致。

因此, 在湖南典型 Cd 污染酸性土壤上进行大田水稻试验, 研究结果表明该改良农艺措施可操作性强, 控 Cd 和增产的效果明显, 具有良好的推广应用前景。

表 4 成熟期处理间水稻各部位 Cd 含量及稻米产量

Table 4 The contents in fruit parts and the rice production of 2 treatments in rice maturity stage

处理	Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$				稻谷产量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
	茎	叶	谷壳	糙米	
CK	1.021 ± 0.036	0.647 ± 0.072	0.294 ± 0.020	$0.295 \pm 0.035a$	$597.2 \pm 2.3a$
ARM	1.301 ± 0.049	0.921 ± 0.051	0.286 ± 0.014	$0.179 \pm 0.011a$	$894.3 \pm 1.6b$
国家粮食卫生标准 (GB 2715—2005)				≤ 0.2	
饲料卫生标准 (GB 13078—2001)				≤ 0.5 (参照鸡、猪配合饲料) ≤ 1.0 (米糠)	

注: 表中数字为 3 个重复的平均值 $\pm$ 标准差; 同列不同小写英文字母表示 $P<0.05$ 水平上的差异显著。

3 讨论

晚稻大田试验表明, 水稻中 Cd 含量吸收积累基本规律为根 $>$ 茎 $>$ 叶 $>$ 穗 (谷壳 $>$ 糙米), 本试验采用孕穗末期追施石灰改良剂并结合水稻后期淹水的农艺调控措施后, 水稻根、茎和叶中的 Cd 含量比例呈现升高的趋势, 而果实部分 (谷壳和糙米) 中的 Cd 含量比例呈现下降的趋势, 表现出对控制稻米 Cd 污染起到良好的阻控效果。相关机理研究亦表明, 土壤中 Cd 的植物有效性受众多因素的制约, 其中土壤 pH 是最为显著的一个因素, 控制着金属形态在土壤-溶液间的平衡^[17-18]。

本研究于水稻孕穗末期施加石灰, 最终使 ARM 区土壤 pH 从 4.83 升至 6.04, pH 升高了 1.21, 同时, 土壤有效态 Cd 含量则由 $1.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $1.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效态 Cd 含量降低了 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 5)。大量研究已证实, 施加石灰能提高土壤 pH, 降低土壤提取态 Cd 含量, 达到钝化土壤中 Cd 的效果。这主要有两个方面原因: 一是施用石灰使得土壤胶体表面负电荷增加, 对重金属离子的吸附能力增强^[19-20]; 另一方面土壤 pH 提高可使土壤中的 Fe、Mn 等离子形成羟基化合物, 提供更多的重金属吸附位点^[20]。因此, 碱性石灰不仅是一种农业生产普遍应用的钙肥和杀虫剂, 而且是一种能够快速调节土壤 pH, 降低重金属植物有效性的土壤改良剂, 尤其在酸性水稻土上施用适量石灰不仅可以改善有益微生物的活动条件, 提高保

表 5 试验前后土壤的 pH 及有效态 Cd 含量

Table 5 Soil pH and available Cd contents during the test

指标	大田试验前		水稻收获后	
	CK	ARM	CK	ARM
pH	$4.97 \pm 0.51bc$	$4.83 \pm 0.35c$	$5.45 \pm 0.56b$	$6.04 \pm 0.48a$
有效态 Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$1.68 \pm 0.13a$	$1.73 \pm 0.16a$	$1.61 \pm 0.18a$	$1.15 \pm 0.15b$

注: 同行不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著。

肥能力,还能增强作物抵御病虫害能力,进而成为一种增产措施。另外,硫和铁是影响土壤氧化还原的重要元素,水稻根表铁膜主要由铁氧化物胶膜形成,该胶膜是一种两性胶体,能够通过吸附和共沉淀等作用影响多种元素在土壤中的化学行为和生物有效性,从而减少根系对毒害离子的吸收,维持正常生长^[21-22]。在淹水的还原条件下,土壤中的 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} , S^{2-} 与Cd生成CdS沉淀,降低了Cd的有效性。排水后土壤处于氧化状态,S被氧化成 SO_4^{2-} ,土壤pH降低而Cd的有效性增加,从而促进植物吸收^[23]。本研究合理运用了两种稻米Cd污染控制技术原理及方法,提出了改良-农艺综合控制方案,可为湖南地区稻米Cd污染控制技术提供数据支持。

4 结论

(1) 晚稻各部位的转运能力大小依次为茎/根<叶/茎<穗/叶;晚稻各部位Cd含量大小依次为根部>茎部>叶部>穗部(谷壳>糙米)。试验数据表明采用孕穗末期施加石灰结合后期持续淹水的综合措施有可能使得土壤中Cd元素最终更易富集在水稻根、茎、叶等不可食用部分,从而在一定程度上降低了果实穗部的Cd含量,具体阻控机理有待进一步研究。

(2) 相比对照实验区,采用改良-农艺综合措施能够有效降低糙米中Cd的含量($0.179 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),达到国家粮食卫生标准,同时水稻的产量显著增加33.24%。

(3) 在湖南典型冶炼区Cd污染酸性红壤上进行大田原位试验,在水稻孕穗末期施加石灰的措施既能提高土壤pH,降低土壤有效态Cd的含量,又能作为一种农业钙肥和杀虫剂促使水稻增产。该综合措施是一种经济、有效、合理的稻米Cd污染控制技术。

参考文献:

- [1] 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, 26(8): 3-8.
State Environmental Protection Administration. The survey report of ecological environment in the middle eastern part of China[J]. *Environmental Protection*, 2003, 26(8): 3-8.
- [2] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 生态农业与食品安全[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1127-1134.
ZHAO Qi-guo, HUANG Guo-qin, QIAN Hai-yan. Ecological agriculture and food safety[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1127-1134.
- [3] 王凯荣, 张玉烛. 25年引灌含Cd污水对酸性农田土壤的污染及其危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 658-661.
WANG Kai-rong, ZHANG Yu-zhu. Investigation and evaluation on Cd pollution of the acidic farmland soils irrigated with Cd polluted wastewater for 25 years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 658-661.
- [4] 雷 鸣, 曾 敏, 郑袁明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1212-1219.
LEI Ming, ZENG Min, ZHENG Yuan-ming, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(6): 1212-1220.
- [5] 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.
- [6] 王凯荣, 张玉烛, 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 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.
- [7] 甲卡拉铁, 喻 华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3414-3421.
JIA Ka-la-tie, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effect of different N, P and K fertilizers on soil pH and available Cd under waterlogged conditions[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3414-3421.
- [8] 胡 坤, 喻 华, 冯文强, 等. 不同水分管理方式下3种中微量元素肥料对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(3): 772-776.
HU Kun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of water management methods and three secondary and micro elements on rice growth and cadmium uptake[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(3): 772-776.
- [9] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 97-107.
LIU Feng-zhi. Practical handbook of agricultural environmental monitoring[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2001: 97-107.
- [10] Liu Jian-guo, Qian Min, Cai Guo-liang, et al. Variations between rice cultivars in root secretion of organic acids and the relationship with plant cadmium uptake[J]. *Environment Geochemical Health*, 2007, 29: 189-195.
- [11] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138.
NIE Fa-hui. New comprehensions of hyperaccumulator[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 136-138.
- [12] 杨居荣, 何孟常, 查 燕, 等. 稻、麦籽实中镉的结合形态[J]. 中国环境科学, 2000, 20(5): 404-406.
YANG Ju-rong, HE Meng-chang, ZHA Yan, et al. Binding forms of Cd in the rice and wheat seeds[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(5): 404-406.
- [13] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量

- [J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 306-312.
- ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3): 306-312.
- [14] 许珂, 铁柏清, 陈喆, 等. 硅肥和硒肥施用对水稻吸收积累镉的影响规律研究[J]. 湖南农业科学, 2012(11): 56-59.
- XU Ke, TIE Bai-qing, CHEN Zhe, et al. Effect of silicon and selenium on cadmium uptake by rice[J]. *Hunan Agriculture Sciences*, 2012(11): 56-59.
- [15] 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]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 847-851.
- ZHU Qi-hong, HANG 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.
- [16] Li P, Wang X X, Zhang T L, 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: 449-455.
- [17] Gerriste R G, Van Driel W. The relationship between adsorption of trace metals, organic matter, and pH in temperate soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13: 197-204.
- [18] Hooda P S, Alloway B J. Cadmium and lead sorption behaviors of selected English and Indian soils[J]. *Geoderma*, 1998, 84: 121-134.
- [19] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. Sorption and desorption of cadmium from some New Zealand soils: Effect of pH and contact time[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 199-216.
- [20] 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: 419-429.
- [21] Dong D, Nelson Y M, Lion L W, et al. Adsorption of Pb and Cd onto metal oxides and organic material in natural surface coatings as determined by selective extractions: New evidence for the importance of Mn and Fe oxides[J]. *Water Research*, 2000, 34(2): 427-436.
- [22] Machado W, Gueiros B, Lisboa-Filho S, et al. Trace metals in man-grove seedlings: Role of iron plaque formation[J]. *Wetlands Ecol Manag*, 2005, 13(2): 199-206.
- [23] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 水分管理模式对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 908-914.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects and action mechanisms of different water management modes on rice Cd absorption and accumulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 908-914.