

颜惠君, 王伯勋, 唐仲, 等. 田间水肥管理措施及石灰施用对水稻Cd As积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1448–1455.

YAN Hui-jun, WANG Bo-xun, TANG Zhong, et al. Effects of water management and fertilizer application on cadmium and arsenic accumulation in rice plants under filed condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1448–1455.

田间水肥管理措施及石灰施用对水稻Cd As积累的影响

颜惠君^{1,2}, 王伯勋^{1,2}, 唐仲³, 杨雨萍², 王学东¹, 段桂兰^{2*}, 赵方杰³

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境研究室, 北京 100085; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:通过水肥管理及石灰施用等农艺措施阻控水稻Cd、As的积累被认为是经济、易行和有效的措施,但相关措施仍缺乏大田的验证和优化。为此,本研究在湖南省开展了多年多点水肥及石灰施用等农艺阻控对水稻Cd、As积累影响的田间试验。2014—2016年,连续3年在攸县和湘潭研究了常规灌溉、开花后淹水和全生育期淹水3种管理模式对水稻Cd、As积累的影响。结果均表明淹水能显著降低糙米的Cd浓度,但提高了As浓度,后期淹水和全淹水分别使糙米中的Cd浓度降低了15%~30%和26%~45%,但使As浓度提高了6%~25%和11%~65%。2016—2017年,连续两年在湘潭研究了秸秆、硅肥、硫肥和锰肥及其与石灰联用对水稻Cd、As积累的影响。结果表明硅肥和硫肥对水稻Cd、As积累的阻控效果不稳定,大田条件下单独施硅肥难以达到显著降低糙米中Cd、As浓度的效果,施用高剂量(2250 kg·hm⁻²)的硫肥能显著降低糙米中As浓度。施用生石灰(1500 kg·hm⁻²)对糙米Cd浓度没有产生显著影响,但施用CaCO₃(12 000 kg·hm⁻²)能显著降低糙米和秸秆的Cd浓度,甬优538的糙米Cd浓度降低了54%,可见,施用足够量的CaCO₃是阻控水稻Cd积累的有效措施。该研究的结果表明合理的水肥管理措施能降低水稻Cd、As的积累,施用CaCO₃将土壤pH上调至6.5左右是阻控水稻Cd积累的有效措施。

关键词:水稻;镉(Cd);砷(As);水分管理;硅肥;硫肥;石灰

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)07-1448-08 **doi:**10.11654/jaes.2018-0573

Effects of water management and fertilizer application on cadmium and arsenic accumulation in rice plants under filed condition

YAN Hui-jun^{1,2}, WANG Bo-xun^{1,2}, TANG Zhong³, YANG Yu-ping², WANG Xue-dong¹, DUAN Gui-lan^{2*}, ZHAO Fang-jie³

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Department of Soil Environment Science, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Resources and Environment Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Rice contamination with cadmium (Cd) and/or arsenic (As) is an important environmental issue in South China, which seriously threatens the food safe and people health. Water management, fertilizer application and liming are considered to be economic, feasible and effective strategies for reducing Cd and As accumulation in rice grains, however, this still need to proved under filed condition. This study conducted a series of field trials in Hunan Province to investigate the effects of water management, fertilizer application and liming on Cd and As accumulation in rice plants. From year 2014 to 2016, the effects of three kinds of water managements on the accumulation of Cd and As in rice plants were conducted in Youxian and Xiangtan counties, including normal irrigation, flooding after flowering and flooding in full growth period. The results showed that flooding significantly reduced Cd concentration in brown rice, but increased As concentration. Comparing with normal irrigation, flooding after flowering and flooding in full growth period reduced Cd concentration in brown rice by 15%~30% and 26%~45%, but increased As concentration by 6%~25% and 11%~65%. From year 2016 to 2017, the effects of application of

收稿日期: 2018-05-02 录用日期: 2018-05-28

作者简介: 颜惠君(1992—), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤重金属污染修复。E-mail: 18301157922@163.com

*通信作者: 段桂兰 E-mail: duangl@rcees.ac.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403015); 国家自然科学基金项目(21677157, 41371458)

Project supported: The Special Scientific Research Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201403015); The National Natural Science Foundation of China (21677157, 41371458)

rice straw, silicon, sulfur or manganese, and their combining with lime on Cd and As accumulation in rice plants were studied in Xiangtan County. The results showed that the reduction of Cd and As accumulation by silicon and sulfur application was not stable, there are large variation between replications. Result suggested that, under field conditions, it was difficult to significantly reduce Cd and As in brown rice by single silicon application like in pot experiments. High dose of sulfur application ($2250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) could significantly reduce the As concentration in brown rice. The application of CaO ($1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) had no significant effect on Cd concentration in brown rice. However, the application of CaCO_3 ($12\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) could significantly reduce Cd concentration of brown rice and straw, which decreased Cd concentration in the brown rice of Yongyou 538 by 54%. Thus, the application of CaCO_3 with adequate amount could be an effective strategy for reducing Cd accumulation in rice grain. The results of this study demonstrated that appropriate water management and fertilizer application will significantly reduce As and Cd accumulation in rice grains. This study will provide practical guidance for optimizing the strategies of water and fertilizer managements for reducing Cd and As accumulation in rice grains.

Keywords: rice; cadmium; arsenic; water management; silicon; sulfur; liming

水稻是我国的主要粮食作物,大米的产量和质量是关系我国国计民生的大事。然而,我国南方水稻主产区有大面积的水稻田受到不同程度的镉(Cd)或砷(As)污染。2014年,中华人民共和国环境保护部与国土资源部联合发布了《全国土壤污染状况调查公报》^[1],该调查结果显示我国土壤污染的点位超标率为16.1%,其中Cd和As的超标率分别为7%和2.7%,说明Cd和As是主要的土壤污染物。由于水稻栽培的水分管理模式、土壤pH条件以及水稻自身的遗传特性,使水稻对Cd和As的吸收转运效率远大于其他农作物^[2-3],导致大米中Cd、As浓度容易超标^[4-6]。近年来频繁报道的“镉米砷米”事件引起了社会各界的广泛关注,还有学者认为,未来中国的农产品安全问题中,重金属污染将取代农药,成为事故多发的源头。有研究表明大米食用已成为东南亚人们摄入Cd、As的主要途径^[7-9]。因此,阻控水稻对Cd和As的吸收及其向籽粒的转运是我国南方实现农业安全生产的重中之重。

近年来,我国在水稻Cd和As污染治理方面加大投入,也取得了一系列的进展,探索了水稻低积累品种、土壤酸碱度调控、稻田水分管理等农艺措施对于稻田土壤中Cd、As迁移转化的机理,及其对阻控水稻Cd、As积累的效应^[10-12]。在水稻灌浆期保持田间淹水能降低大米中Cd的积累,但是淹水会提高大米中As的浓度^[13-15]。施用石灰提高酸化土壤的pH能有效降低土壤中Cd的生物有效性,从而降低稻米Cd的积累^[16]。水稻是喜硅植物,施用硅肥不仅能促进水稻的生长,而且对于As、Cd、Cu、Zn、Pb等多种金属的积累均有阻控效果^[12-13, 17-18]。硫是巯基化合物的组成元素,巯基化合物(例如植络素)能络合Cd、As等元素,并被区隔化在植物的液泡,从而降低向籽粒的转运。

我们前期的栽培结果表明,添加硫肥能显著降低水稻籽粒中As的浓度^[19-21]。

尽管相关的水肥管理措施对于水稻Cd、As的积累已有较多的研究,但绝大多数都是基于条件严格控制的温室盆栽试验,相关试验结果仍缺乏田间试验的验证,阻控技术仍需要优化。因此,本研究针对不同的水肥管理措施,在不同Cd、As污染程度的稻田开展了多年多点的田间试验,研究结果对于我国南方水稻Cd、As污染控制有实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验布置及试验点土壤条件

本试验从2014年开始,连续4年,每年种植中稻一季。2014年和2015年均湖南省攸县大同镇开展($27^{\circ}08'N$, $113^{\circ}22'E$),2016年在湖南省湘潭县河口镇($27^{\circ}44'N$, $112^{\circ}30'E$)开展,两地的土壤均为酸性土壤,两地的土壤As浓度相当,低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,攸县的土壤轻度Cd污染,而湘潭的土壤中度或重度Cd污染,土壤的详细理化性质见表1。2014年和2015年使用的水稻品种均为威优644,2016年使用的水稻品种为深优957和甬优538,其中深优957为低Cd积累品种,而甬优538为高Cd积累品种^[22]。

1.2 水分管理对水稻Cd、As积累的影响

水分管理措施分别在2014—2016年开展了3年试验。实验共设置了3种水分管理方式:常规灌溉、孕穗后期持续淹水、全生育期淹水。常规灌溉即对照,田间水分管理措施(包括灌溉与排水)按照当地常规进行,即遵照高产水稻栽培水分管理“二十四字诀”:浅水栽秧、寸水返青、薄水分蘖、苗够晒田、寸水促穗、湿润壮籽;孕穗后期持续淹水即后期淹水,开花期以前的水分管理与对照一致,但开花以后保持淹水

表1 水稻品种和试验点土壤pH及重金属浓度(mg·kg⁻¹)
Table 1 Rice variety, soil pH and heavy metal concentrations(mg·kg⁻¹)

试验	年份/年	地点	水稻品种	pH值	As	Cd	Zn	Cu	Pb
水分管理	2014	湖南攸县	威优644	4.91	18.75	0.47	137.45	27.20	41.96
	2015	湖南攸县	威优644	5.05	17.35	0.48	112.44	37.98	38.67
	2016	湖南湘潭	甬优538 深优957	5.1	19.3	1.1	108.5	24.7	35.3
施肥、施石灰、 秸秆还田	2016	湖南湘潭	甬优538 深优957	4.9	19.4	1.4	27.4	125.3	39.9
	2017	湖南湘潭	甬优538 深优957	5.8	20.8	0.8	26.1	109.1	31.1

直到收获前1周排水,即在分蘖期晒田,但灌浆期不排水;全生育期淹水即田面一直保持淹水状态,从插秧直到收获前1周排水。每个处理设4个重复,选择平整并排水系统良好的田块,将田块分成12小区,小区面积20 m²,各小区之间作田埂分隔,且田埂用塑料薄膜包裹,以防止处理间水分渗漏,各处理在田间的分布随机安排。施肥及其他管理按当地习惯。土壤样品在插秧前采集,按照梅花采样方式从每个小区采集5个样品混合成一个待测样品,土壤样品经风干、去除杂质、研磨、过2 mm筛,室温保存待分析。待水稻成熟后,按照梅花采样方式从每个小区采集5个样品混合成一个待测样品,采样时收割水稻,茎叶(地上部10 cm至穗梗基部)用自来水冲洗干净,再用去离子水清洗3遍,擦干水分,放入70℃烘箱烘干。手工将稻谷从稻穗上脱落下来,装入网袋,于室内通风处自然风干。自然风干后用糙米机将稻谷分成谷壳和糙米两部分,其中2015年水分管理的糙米样品进一步脱糠,分离出精米和米糠。最后茎叶、糙米、谷壳等样品用不锈钢粉碎机粉碎成粉,室温保存待分析。

1.3 施肥、秸秆还田及施石灰对水稻Cd、As积累的影响

2016年在湖南省湘潭县河口镇(与上述水分管理地点一致)开展施肥管理对水稻Cd、As积累影响

的田间施用,包括秸秆、硫肥(石膏)、硅肥及其与生石灰配套施用,共9个处理(表2)。试验所用秸秆为本试验田前茬所生产的水稻秸秆,添加的生石灰、石膏和硅肥均从当地购买,生石灰、石膏、秸秆的Cd含量分别为0.03、0.42、0.47 mg·kg⁻¹。水稻品种选用低Cd品种(深优957)和高Cd品种(甬优538)。每个处理设4个重复,选择平整并排水系统良好的田块,将田块分成36个小区,小区面积20 m²,各小区之间作田埂分隔,田埂用塑料薄膜包裹,各处理在田间的分布随机安排。水分及其他管理按当地习惯。土壤及水稻采样、样品分析与上述水分管理试验一致。

为验证并优化施肥对水稻Cd、As积累的阻控效果,2017年在湘潭县河口镇的另一田块再次开展了施肥管理的田间试验,包括3种不同的叶面硅肥、1种土施硅肥、硫肥、锰肥,以及硫肥与石灰同时添加,共8个处理(表3)。试验所用石膏与2016年一致,但用量提高到上一年高剂量的2倍,石灰由2016年的生石灰改为碳酸钙(CaCO₃),根据石灰用量预测模型,计算将土壤pH调整到6.5的CaCO₃用量约为12 000 kg·hm⁻²[23]。叶面硅肥1与2016年使用的硅肥一致,叶面硅肥2为当地商品叶面肥,叶面硅肥3为某实验室提供的未上市硅肥,肥料的使用方法与用量如表3。

表2 2016年施肥处理方式与用量(kg·hm⁻²)
Table 2 Treatments of fertilization in 2016(kg·hm⁻²)

处理	秸秆用量	硅/硫肥用量	生石灰用量
对照	0	0	0
秸秆	7500		0
生石灰/秸秆	7500		1500
硫肥1(石膏)	0	562.5(含硫素105 kg)	0
硫肥2(石膏)	0	1125(含硫素210 kg)	0
生石灰/硫肥1(石膏)	0	600	1500
生石灰/硫肥2(石膏)	0	1200	1500
硅肥	0	拔节期、抽穗期和灌浆期各喷施一次	
生石灰/硅肥	0	拔节期、抽穗期和灌浆期各喷施一次	1500

表3 2017年施肥处理方式与用量
Table 3 Treatments of fertilization in 2017

处理	具体操作
CK	施肥管理措施按照当地常规进行
叶面硅肥1	参考说明书,从拔节开始,每隔7~10 d喷施一次,每次叶面喷施 2250 mL·hm ⁻²
叶面硅肥2	参考说明书,在拔节期及抽穗期各喷一次,每次叶面喷施 4500 mL·hm ⁻²
叶面硅肥3	参考说明书,在拔节期及抽穗期各喷一次,每次叶面喷施 4500 mL·hm ⁻²
土施硅肥	硅肥每公顷用量为 90 kg,于移栽前 2 d 均匀撒施
硫肥(石膏)	石膏每公顷 2250 kg(含硫 420 kg),于移栽前 5 d 撒施
硫肥(石膏)+石灰	石膏每公顷 2250 kg,石灰用 CaCO ₃ ,每公顷 12 000 kg,移栽前 5 d 均匀撒施
锰肥	锰肥(MnSO ₄)每公顷用量为 67.5 kg,兑水于移栽前 5 d 泼洒施

水稻品种及其栽培、样品采集、处理方法与2016年一致。

1.4 样品的消解与测定

称取茎叶、糙米、谷壳等植物样品的粉末各0.2 g到50 mL聚丙烯消化管中,向离心管底部加入2 mL优质纯硝酸,浸泡过夜。浸泡后,使用微波消解炉(MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. Matthews, 美国)对样品进行消化,消煮程序是55 ℃, 10 min; 75 ℃, 10 min; 95 ℃, 30 min。消解结束后将消化管转移至通风橱中开盖赶酸,待消解液冷却后,用2%的硝酸溶液稀释至40 mL,过0.45 μm滤膜,4 ℃保存待测。

土壤、石灰等样品用开放式消煮炉消解,具体消解方法是:称取0.2 g样品于石英玻璃管,加入5 mL王水(HCl:HNO₃=3:1, V/V),混匀后室温下平衡过夜。用开放式消煮炉消解,消解程序是100 ℃, 1 h; 120 ℃, 1 h,然后保持在140 ℃直到消解溶液清澈。消解后的样品置于通风橱挥发酸,待消解液冷却后,用2%的硝酸溶液稀释至40 mL,过0.45 μm滤膜,4 ℃保存待测。

为确保消煮和测定过程的准确度,每批消解样品中均包含空白对照和标准物质,植物标准物质用GBW08502(大米粉成分分析标准物质,国家标准物质研究中心),土壤标准物质用GBW07405(土壤成分分析标准物质,国家标准物质研究中心),通过回收率的计算来评价消煮和测定过程的准确度。

植物消解溶液中Cd、As等重金属的浓度用电感耦合等离子体质谱系统(ICP~MS 7500,安捷伦科技,美国)测定,土壤消解溶液中重金属的浓度用ICP~OES(Optima 2000 DV,Perkin Elmer,美国)进行测定。

土壤pH测定:在室温下,以土水比1:2.5配制土壤悬浮液,于恒温振荡器上振荡1 h后静置30 min,

用pH仪测定。

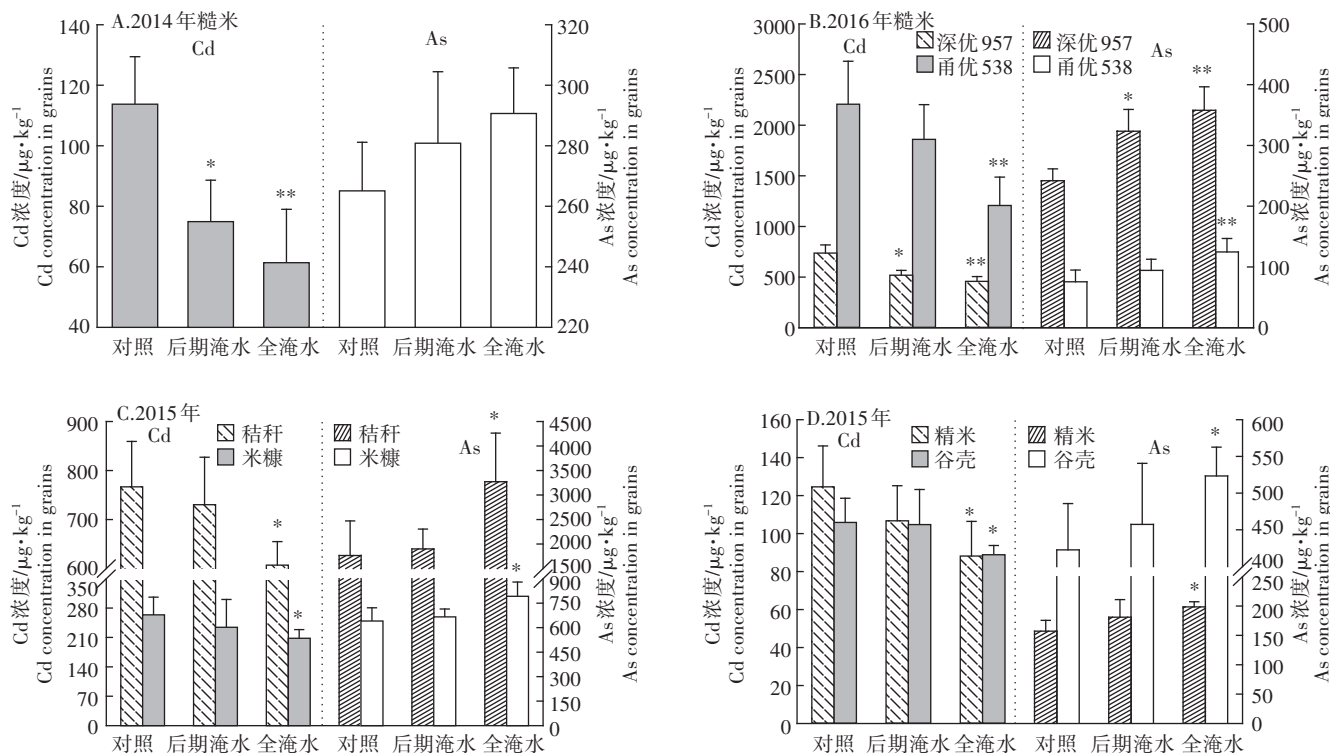
1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2007 和SPSS 13.0 软件进行统计分析,并采用One-Way ANOVA 进行显著性检验,采用Excel 2007 和Sigma-Plot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水分管理对水稻不同部位中Cd、As积累的影响

连续3年在不同地点开展了田间试验,结果表明水分管理能显著影响水稻各部位的Cd、As浓度(图1)。2014年,与对照相比,后期淹水和全生育期淹水分别使糙米中Cd浓度降低34%和46%,但As浓度分别提高了6%和11%。2015年,3种水分管理模式对水稻秸秆、谷壳、米糠和精米中Cd、As浓度的影响趋势是一致的,即后期淹水和全淹水能使水稻各组织中的Cd浓度显著降低,但As浓度显著提高;与对照相比,后期淹水和全生育期淹水分别使精米中的Cd浓度降低了15%和30%,但使As浓度提高了15%和26%。2016年,水分管理对两种水稻品种的糙米Cd、As浓度产生相似的影响,即淹水降低糙米Cd浓度,但提高As浓度;与对照相比,后期淹水和全生育期淹水分别使深优957的糙米Cd浓度降低了30%和38%,使As浓度提高了34%和48%,使甬优538的糙米Cd浓度降低了16%和45%,使As浓度提高了25%和65%。经过多年多点、不同水稻品种的试验,结果均表明:在3种水分管理模式下水稻糙米中的Cd浓度变化规律均为对照(即当地习惯管理方式)>后期淹水>全淹水,而As浓度变化规律为全淹水>后期淹水>对照。在各种水分管理条件下,高Cd积累品种甬优538的糙米Cd浓度显著高于低Cd积累品种深优957,但As浓度却相反。由此可见,不管是水分管理还是水稻品种,其对糙米中Cd浓度和As浓度的影响均呈现



数据为平均值+标准误差, $n=4$; *表示与对照存在显著差异 ($P<0.05$), **表示与对照存在极显著差异 ($P<0.01$), 下同

图1 不同水分管理措施对水稻Cd、As积累的影响

Figure 1 The effects of water managements on Cd and As accumulation in rice plants

相反的效果,即淹水降低了Cd的浓度,但提高了As的浓度,低Cd积累品种的糙米Cd浓度较低,但As浓度却较高。

2.2 施肥管理对水稻不同部位中Cd、As积累的影响

2016年,开展了秸秆还田、不同剂量硫肥(石膏)、硅肥(叶面硅肥)及其与生石灰联合施用对水稻糙米、秸秆中Cd、As浓度的影响(图2)。与上面水分管理试验一致,高Cd积累品种甬优538的糙米Cd浓度在各个处理(除硅肥处理)条件下均显著高于低Cd积累品种深优957的Cd浓度(图2A)。不同处理之间,深优957的糙米Cd浓度在秸秆与生石灰同时施用显著低于对照,其他各处理与对照没有显著差异;甬优538的糙米Cd浓度在喷施硅肥时显著低于对照,其他各处理与对照没有显著差异。与Cd浓度相反,深优957的糙米As浓度在各个处理条件下均显著高于甬优538的糙米As浓度(图2B)。不同处理之间,仅有深优957的糙米As在叶面喷施硅肥的条件下显著低于对照,其他处理的糙米As浓度与对照没有显著差异;甬优538的糙米As浓度在所有处理条件下均与对照没有显著差异。

高Cd品种甬优538的秸秆Cd浓度也显著高于低

Cd品种深优957的秸秆Cd浓度,两个品种的秸秆Cd浓度和As浓度在所有施肥处理条件下均与对照没有显著差异(图2C和图2D)。大田试验条件下相同处理、相同品种的糙米和秸秆中的Cd、As浓度均有较大的重复间的误差(图2),从而导致不同处理之间水稻Cd、As浓度差异不显著。

不同施肥处理条件下,是否添加生石灰($1500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)对糙米或秸秆中的Cd浓度和As浓度均没有显著影响。

2017年,根据2016年的试验结果,对硫肥、硅肥和石灰处理进行了优化,硫肥的使用量提高到2016年高剂量处理的2倍,增加了2种叶面硅肥和1种土施硅肥,2016年的生石灰改为 CaCO_3 ,使用量增加为 $12\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各施肥处理的糙米Cd浓度如图3A所示,与2016年结果一致,高Cd积累品种甬优538的糙米Cd浓度在各个处理条件下均显著高于低Cd积累品种深优957的糙米Cd浓度;不同处理之间,甬优538的糙米Cd浓度在石膏与石灰同时施用显著低于对照,其他处理与对照没有显著差异;深优957的糙米Cd浓度在所有处理条件下均与对照没有显著差异,这可能是深优957为低Cd积累品种,且对照处理

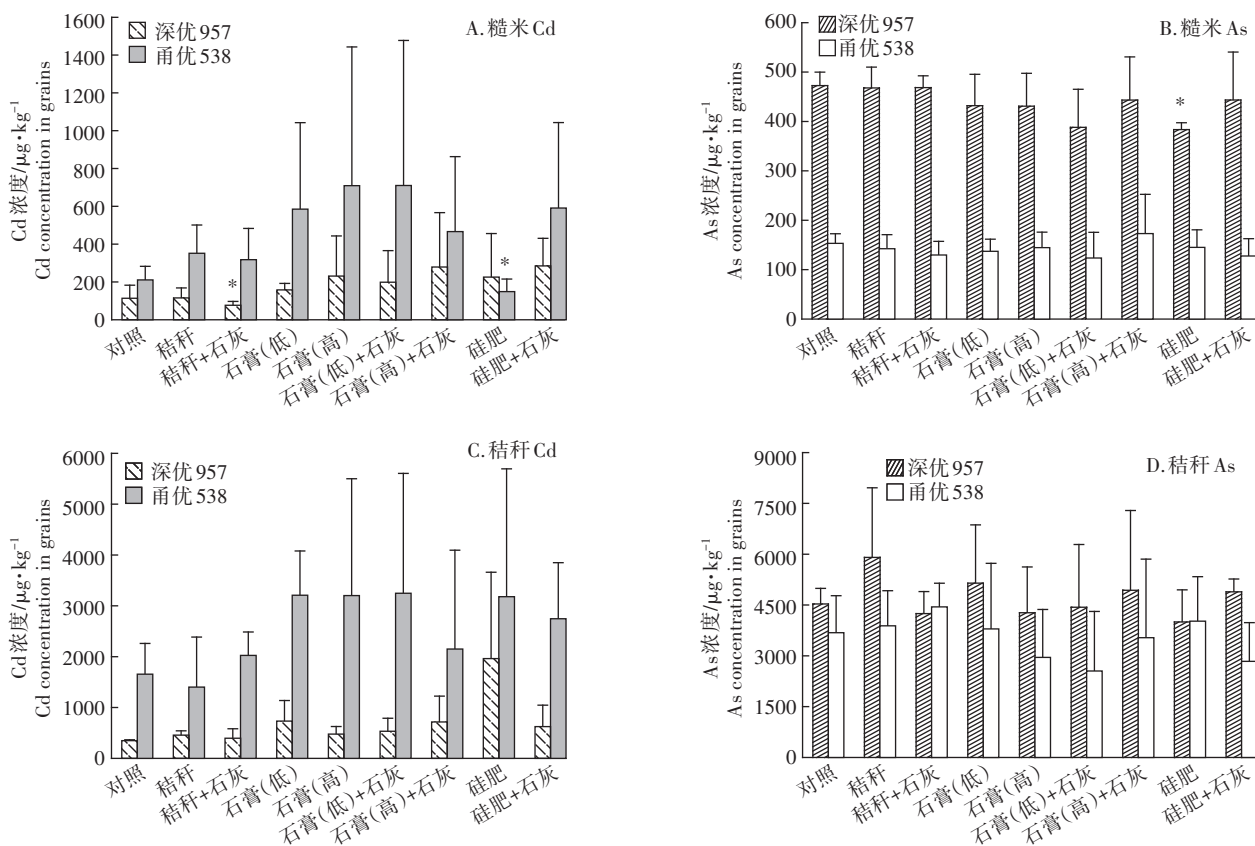


图2 2016年不同施肥管理对水稻Cd、As积累的影响

Figure 2 The effects of fertilization on Cd and As accumulation in rice plants harvested in 2016

的糙米Cd浓度已经比较低的原因。各施肥处理的糙米As浓度如图3B所示,与Cd浓度相反,深优957的糙米As浓度显著高于甬优538的糙米As浓度,与2016年的结果一致。不同处理之间,深优957的糙米As浓度在有硫肥处理下显著低于对照,甬优538的糙米As在叶面喷施硅肥3的条件下显著低于对照,其他各施肥处理的糙米As浓度均与对照没有显著差异。

高Cd积累品种甬优538的秸秆Cd浓度也显著高于深优957的秸秆Cd浓度。甬优538的秸秆Cd浓度在喷施叶面硅肥2的条件下显著低于对照,两个品种的秸秆Cd浓度在石膏与石灰同时施用的条件下均显著低于对照,其他处理条件下与对照没有显著差异(图3C)。两个品种的秸秆As浓度在所有施肥处理条件下均与对照没有显著差异(图3D)。与2016年一样,相同处理的重复间糙米和秸秆中的Cd、As浓度均有较大的误差(图3),从而导致不同处理之间水稻Cd、As浓度差异不显著。

与2016年使用生石灰不同,2017年的CaCO₃处理使糙米和秸秆的Cd浓度都显著低于对照。与对照相比,石膏+石灰处理条件下,深优957糙米和秸秆的

Cd浓度分别降低了8%和70%,甬优538糙米和秸秆的Cd浓度分别降低了54%和58%,而石膏单独处理时,糙米与秸秆的Cd浓度均与对照没有显著差异。石灰处理对糙米或秸秆中As的积累没有显著影响。高剂量石膏处理2250 kg·hm⁻²使糙米中As积累显著降低,但对Cd积累没有显著影响。

与对照相比,施用锰肥使甬优538的糙米Cd浓度显著降低,但对深优957的糙米Cd浓度没有显著影响(图3A),对两个品种的秸秆Cd浓度没有显著影响(图3C),对糙米和秸秆中的As浓度也均没有显著影响(图3B、图3D)。

3 讨论

多年多点以及不同水稻品种的田间试验结果均表明水管理能显著影响水稻糙米中Cd、As的积累: Cd浓度变化规律均为对照>后期淹水>全淹水,而As浓度变化规律为全淹水>后期淹水>对照。该结果与前人报道的试验结果一致,即在水稻灌浆期保持淹水条件能降低大米中Cd的积累,但提高大米中As的浓度^[13-15]。由此可见,合理的水管理是阻控水稻Cd、

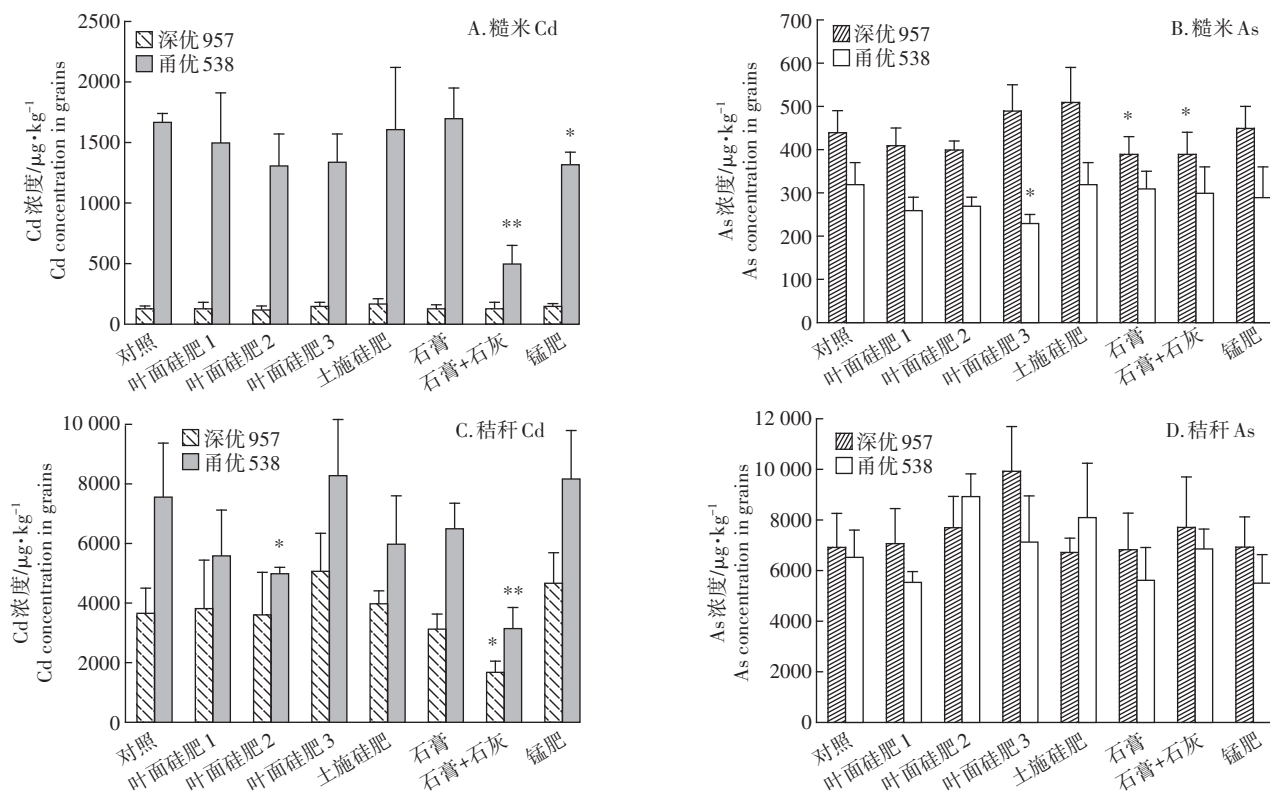


图3 2017年不同施肥管理对水稻Cd、As积累的影响

Figure 3 The effects of fertilization on Cd and As accumulation in rice plants harvested in 2017

As 积累的有效措施。但是 Cd、As 积累是一对矛盾, 在实施水分管理措施阻控水稻 Cd、As 积累时, 要充分了解当地的土壤污染状况, 因为不同的水分管理措施能对水稻 Cd、As 积累产生相反的效果, 在 Cd 污染条件下可采取淹水管理, 但在 As 污染条件下需要采取排水管理。

硅肥被认为是阻控水稻 Cd、As 积累的有效措施, 不仅土施硅肥有明显的阻控效果^[13, 17-18], 叶面喷施硅肥也被证明能显著降低水稻籽粒中 Cd、As 的积累^[24-25]。但在田间的试验条件下, 硅肥对水稻 Cd、As 积累的阻控效果不稳定, 2016 年叶面施硅肥对甬优 538 糙米 Cd 有显著的降低效果, 但 2017 年, 不管是叶面喷施还是土施硅肥都没有显著影响糙米中的 Cd 浓度。由此可见, 田间条件下, 单独施硅肥难以达到显著降低糙米中 Cd、As 浓度的效果(图 2 和图 3), 这可能与实验过程中硅肥施用量较低有关。硫肥也被认为是阻控水稻籽粒 Cd、As 积累的有效措施^[19-21]。在 2016 年的试验中, 石膏用量较低时(石膏用量为 562.5、1125 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 含硫为 105、210 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 石膏施用没有对水稻糙米的 Cd 或 As 积累产生显著影响, 2017 年, 当石膏用量提高到 2250 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 深优 957

糙米中的 As 浓度显著降低, 但对糙米中的 Cd 浓度仍然没有显著影响。大田试验结果与盆栽试验结果存在不一致的原因可能是因为大田条件下环境复杂, 影响水稻籽粒中 Cd、As 积累的因子较多, 使糙米中的 Cd、As 浓度在相同处理的不同重复之间存在较大误差, 从而导致各种施肥措施对糙米中 Cd、As 积累的阻控效果不显著。

土壤酸化被认为是我国南方大米 Cd 超标的关键原因, 因此, 我国南方正在大力推荐施用石灰提高土壤 pH, 降低 Cd 的生物有效性, 阻控水稻 Cd 积累^[12, 16], 但石灰的施用种类和施用量需要充分优化才能达到理想的阻控效果。2016 年, 我们发现在各种处理条件下, 施用生石灰(1500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)均没有对糙米或秸秆中的 Cd 浓度产生显著影响(图 2), 2017 年施用 CaCO_3 (12 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的条件下, 糙米和秸秆的 Cd 浓度都显著降低, 甬优 538 的糙米 Cd 浓度降低了一半以上(图 3)。因为生石灰施入土壤后反应迅速, 容易破坏土壤微生物生态, 导致土壤板结, 但 CaCO_3 施入土壤后, 反应相对温和, 可以大量施入使土壤 pH 一次性调整到 6.5, 从而达到阻控水稻 Cd 积累的效果, 而且, 该用量的 CaCO_3 施用没有对水稻生长产生可见的毒害

症状。该结果表明,施用 CaCO_3 ,而不是生石灰是提高土壤pH、阻控水稻Cd积累的有效措施。

4 结论

(1)多年多点的田间试验证明淹水能显著降低水稻Cd积累,但提高As积累。

(2)硅肥、硫肥对水稻Cd、As积累的阻控效果不稳定,大田条件下单独施硅肥或硫肥难以达到显著降低糙米中Cd、As浓度的效果。

(3)施用较大量 CaCO_3 将土壤pH一次性调整到6.5,是阻控水稻Cd积累的有效措施,而按当地推荐的用量施用生石灰对水稻Cd、As积累的效果不显著。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm. The Ministry of Environmental Protection, The Ministry of Land and Resources. Report on the national soil contamination survey[R]. 2014. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [2] Williams P N, Raab A, Feldmann J, et al. Market basket survey shows elevated levels of As in south central US processed rice compared to California: Consequences for human dietary exposure[J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 41(7):2178-2183.
- [3] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. *Ann Rev Plant Biol*, 2016, 67:489-512.
- [4] Zhu Y G, Sun G X, Lei M, et al. High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and nonimpacted Chinese Rice[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(13):5008-5013.
- [5] Williams P N, Lei M, Sun G, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(3):637-642.
- [6] Du Y, Hu X F, Wu X H, et al. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan Province, central south China[J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(12):9843-9856.
- [7] Li G, Sun G X, Williams P N, et al. Inorganic arsenic in Chinese food and its cancer risk[J]. *Environ Int*, 2011, 37(7):1219-1225.
- [8] Tripathi D K, Singh V P, Kumar D, et al. Rice seedlings under cadmium stress: Effect of silicon on growth, cadmium uptake, oxidative stress, antioxidant capacity and root and leaf structures[J]. *Chemistry and Ecology*, 2012, 28(3):281-291.
- [9] Song Y, Wang Y, Mao W, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population[J]. *Plos One*, 2017, 12(5):e0177978.
- [10] 陈 喆,铁柏清,刘孝利,等.改良-农艺综合措施对水稻镉吸收积累的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(7):1302-1308.
CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LIU Xiao-li, et al. Effect of improved-agronomic comprehensive measures on rice Cd uptake and accumulation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7):1302-1308.
- [11] 沈 欣,朱奇宏,朱捍华,等.农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1449-1454.
SHEN Xin, ZHU Qi-hong, ZHU Han-hua, et al. Effect of agronomic regulation measures on cadmium accumulation in rice and its mechanism study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1449-1454.
- [12] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(2):750-759.
- [13] Li R Y, Stroud J L, Ma J F, et al. Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(10):3778-3783.
- [14] Arai T, Kawasaki A, Baba K, et al. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(24):9361-9367.
- [15] Hu P, Huang J, Ouyang Y, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. *Environ Geochem Health*, 2013, 35(6):767-778.
- [16] Zhu H H, Chen C, Xu C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environ Pollut*, 2016, 219:99-106.
- [17] 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.
- [18] Duan G L, Zhang H M, Shen Y Q, et al. Mitigation of heavy metal accumulation in rice grain with silicon in animal manure fertilized field [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, 15(10):2223-2229.
- [19] Zhang J, Zhao C Y, Liu J, et al. Influence of sulfur on transcription of genes involved in arsenic accumulation in rice grains[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2016, 34(3):556-565.
- [20] Zhang J, Zhao Q Z, Duan G L, et al. Influence of sulphur on arsenic accumulation and metabolism in rice seedlings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 72(1):34-40.
- [21] 王 丹,李 鑫,王代长,等.硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响[J].环境科学,2015,36(5):1877-1887.
WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, et al. Effect of sulphur on the formation of iron-manganese film and uptake of cadmium in rice roots [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5):1877-1887.
- [22] Duan G L, Shao G S, Tang Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10(1):9.
- [23] Goulding K W T, Mcgrath S P, Johnston A E. Predicting the lime requirement of soils under permanent grassland and arable crops[J]. *Soil Use & Management*, 2010, 5(2):54-58.
- [24] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 161(2/3):1466-1472.
- [25] Syu C H, Huang C C, Jiang P Y, et al. Effects of foliar and soil application of sodium silicate on arsenic toxicity and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in As-contaminated paddy soils[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2015(4):1-10.