

联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 李懋松, 熊润忠, 秦太峰

引用本文:

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 等. 联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2217–2226.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0573>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面肥与不同类型钝化材料组合施用对水稻累积镉效应研究

李嘉琳, 梁金明, 陈波华, 李永涛, 王进进

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2338–2345 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0306>

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143–2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>

坡缕石钝化与喷施叶面硅肥联合对水稻吸收累积镉效应影响研究

徐奕, 李剑睿, 黄青青, 梁学峰, 彭亮, 徐应明

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1633–1641 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0838>

水分管理、铁硅材料与生物炭对不同水稻品种吸收镉的影响及其机制

罗小丽, 鞠琳, 姚爱军, 刘冲, 杨燕花, 曹健, 汤叶涛, 仇荣亮

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1506–1513 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1319>

翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥对水稻Cu吸收转运的影响

喻成龙, 汤建, 喻惟, 倪国荣, 谢志坚, 康丽春, 荣勤雷, 周春火

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2095–2102 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0549>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 等. 联合施肥对复合污染农田水稻 As、Cd 吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2217–2226.

LU Wei-hong, ZHANG Nai-ming, SU You-bo, et al. Effects of combined fertilization on the absorption of As and Cd in rice from polluted farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2217–2226.



开放科学 OSID

联合施肥对复合污染农田水稻 As、Cd 吸收的影响

卢维宏^{1,2,3}, 张乃明^{1,2,4*}, 苏友波^{2,4}, 李懋松^{2,4}, 熊润忠^{2,4}, 秦太峰²

(1. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 3. 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南 新乡 453700; 4. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 探究不同施肥模式与土壤调理剂联合措施对 As–Cd 复合污染农田水稻生长及水稻不同部位吸收转运重金属的影响, 为轻度复合污染农田的安全利用提供科学依据。在 As–Cd 复合污染农田上, 分别设置农民常规施肥(尿素+过磷酸钙+氯化钾)、碱性复合肥料、水稻专用肥 3 种施肥模式以及分别与硅钙土壤调理剂联合配施的试验处理, 测定了不同处理对水稻长势及产量水平、不同器官(根、茎、叶、籽粒)As、Cd 的累积量, 以及土壤重金属有效态、pH 和有机质, 重点分析了硅钙调理剂对水稻籽粒 As、Cd 含量及转运的影响因子和作用效应。结果表明: 在 As–Cd 复合污染农田上, 与对应单一化肥相比, 仅碱性肥料与硅钙调理剂的联合施用下水稻的茎粗、穗长、穗粒数、产量 4 项指标分别提高了 18.4%、7.8%、24.9%、16.1%, 且均达到了显著差异 ($P < 0.05$), 而常规施肥和水稻专用肥模式下的联合施肥对水稻包括产量在内的各农艺指标起到了部分抑制或无显著影响的效果; 3 种施肥模式下, 以碱性肥料与硅钙调理剂的联合措施对水稻各器官中 As、Cd 的吸收累积抑制效果最好, 其中对籽粒、叶片、茎秆、根系中 As 的累积抑制率分别为 32.1%、19.8%、21.8%、32.7%, 对籽粒、根系 Cd 的累积抑制率分别为 43.8%、10.3%, 且均达到了显著性差异水平 ($P < 0.05$); 碱性肥料+硅钙土壤调理剂联合措施在降低根系对土壤 As、Cd 吸收同时, 对通过根系进入到茎秆的重金属 As、Cd 的再分配进行了调控, 即促进了茎秆 As、Cd 向叶片转运, 抑制了其向籽粒转运。3 种联合施肥措施中, 以碱性肥料+硅钙土壤调理剂对 As–Cd 复合污染农田安全利用的效果最佳, 不仅降低了水稻(尤其是籽粒)对 As、Cd 的吸收转运, 还提高了水稻的产量水平。

关键词: 联合施肥; 硅钙调理剂; 复合污染农田; 水稻; As; Cd

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672–2043(2020)10–2217–10 doi:10.11654/jaes.2020–0573

Effects of combined fertilization on the absorption of As and Cd in rice from polluted farmland

LU Wei-hong^{1,2,3}, ZHANG Nai-ming^{1,2,4*}, SU You-bo^{2,4}, LI Mao-song^{2,4}, XIONG Run-zhong^{2,4}, QIN Tai-feng²

(1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Soil Fertilizer and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming 650201, China; 3. Henan Xinlianxin Chemical Industry Group Co., Ltd., Xinxiang 453700, China; 4. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: This study investigated the effects of the combined measures of different fertilization modes and soil conditioners on rice growth and the absorption and transportation of heavy metals in different parts of As–Cd compound-contaminated farmland, which helped to provide a scientific basis for the safe use of moderately and slightly contaminated farmland. In this study, three single chemical fertilizer application models were set up on the As–Cd compound-contaminated paddy field soil, including conventional fertilizer (urea + superphosphate+potassium chloride), alkaline compound fertilizers, and rice-specific fertilizers. Treatments with the combined application of a silicon-calcium soil conditioner were also conducted. The effects of different treatments on the rice growth and yield levels, the accumulation and transportation of As and Cd in different organs (including roots, stems, leaves, and grains), and the availability of soil

收稿日期: 2020–05–21 录用日期: 2020–07–10

作者简介: 卢维宏(1984—), 男, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事土壤环境与植物营养研究。E-mail: luweihong_002@163.com

*通信作者: 张乃明 E-mail: zhangnaiming@sina.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800603); 云南省重点研发计划项目(2018BC003)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFD0800603); The Key R&D Program of Yunnan Province(2018BC003)

heavy metals, pH, and organic matter were measured. The key influencing factors on the As and Cd contents of the rice grains under the combined fertilizer treatments were analyzed. The results showed that in the As-Cd compound-contaminated farmland, compared with the corresponding single fertilizer treatment, the combined application of only alkaline fertilizer and silicon-calcium conditioner improved the four indicators of rice stem diameter, spike length, seeds per spike, and yield by 18.4%, 7.8%, 24.9%, and 16.1%, respectively, which all showed significant differences ($P < 0.05$), while the combined fertilization under the conventional fertilization and rice-specific fertilizer mode had a variety of agronomic growth indicators including partial suppression of the rice yield or no significant effect. Under the conditions of the three fertilization measures, combined fertilization under the mode of alkaline fertilizer had the best inhibitory effect on the absorption and accumulation of As and Cd in rice organs, among which the inhibition rates of As accumulation in the stems and roots reached 32.1%, 19.8%, 21.8%, and 32.7%, respectively, and the cumulative inhibition rates of Cd in the grains and roots reached 43.8% and 10.3%, respectively, with both reaching significant levels ($P < 0.05$). The combined measures of alkaline fertilizer+silicon-calcium soil conditioner not only reduced the absorption of As and Cd in the soil by the roots, but also regulated the redistribution of As and Cd that entered the stem through the roots. In other words, the transport of As and Cd to the leaves was promoted, while the transport to the grains was inhibited. Among the three combined fertilization measures, the alkaline fertilizer+silicon-calcium soil conditioner showed the best application effect on the As-Cd compound-contaminated farmland, which not only reduced the absorption and transportation of As and Cd by the rice (especially the grains), but also promoted the rice agronomic growth indicators and yield.

Keywords: combined fertilization; silicon-calcium conditioning agent; compound contaminated farmland; rice; arsenic; cadmium

土壤重金属污染是影响农产品质量和农田生态系统健康的重要因素^[1-2],目前已受到广泛关注^[3-4],特别是由于采矿、冶炼、电镀等工业“三废”的排放以及生产中农药化肥的过量施用导致农田重金属污染日趋严重。据统计,我国农用地土壤重金属污染点位超标率高达19.4%,污染耕地总面积达到 $2.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[5],且大多属于伴生性、复杂性和综合性的复合污染^[6],As、Cd是土壤中共存的I类致癌物^[7-8],点位超标率分别达到了7.0%、2.7%。“十三五”期间,“农业面源污染和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”专项中设置了14个农田As和Cd污染防治领域项目,将As和Cd的防治列为重点研究内容^[9]。目前常见的重金属污染土壤修复技术主要包括物理、化学或物化联合以及生物法^[10-11],在农田土壤修复技术中,以原位钝化技术周期短、见效快、效果稳定,被认为是土壤重金属修复中最为经济有效的方法。水稻是我国种植面积最大、单产最高的粮食作物^[12],也是重金属Cd、Pb、Hg、As等元素吸收最强的大宗谷类作物,尤其是Cd最为严重^[1,13]。施肥是水稻种植中重要的农业措施,也是持续影响土壤环境的重要因素,畜禽粪便等有机肥中的Cu、Zn、Pb、Cd重金属含量一般高于化肥^[14-16]。研究表明,不同的施肥措施对土壤重金属及生物有效性具有不同的影响^[17-20],然而,单一使用化肥(尤其是N、P)存在农业面源污染^[21]和重金属钝化效率不稳定^[22-23]等问题,且同一区域的水稻施肥亦存在较大差异。以往水稻重金属污染及修复研究中以Cd为主^[24-25],As-Cd复合污染的研究相对较

少,在修复技术上也主要集中于使用单一的土壤调理剂或钝化剂的效果^[25-27]。农田土壤As-Cd复合污染在生产实际中具有普遍存在、修复难度大、钝化效果不稳定等特点,因此,有必要从经济、有效、可操作性强的联合调理技术的角度,对重金属复合污染农田土壤修复特性及作物关键部位(尤其是籽粒等可食用部位)的吸收累积效应进行探索,为我国普遍存在的轻度复合污染农田土壤的安全利用提供借鉴意义。本研究以云南水稻种植过程中常用的3种化肥施用模式为基础,分别联合硅钙土壤调理剂,研究其对As、Cd复合污染稻田土壤中重金属向水稻地上各器官(尤其是籽粒)吸收富集和转运的影响,探索一种经济有效的As、Cd复合污染农田土壤安全利用方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地点位于云南省红河州个旧市($23^{\circ}25'26.21''\text{N}$, $103^{\circ}14'49.67''\text{E}$),海拔1 288.9 m,亚热带气候,年平均气温19.39 $^{\circ}\text{C}$,平均降水量637.00 mm,具有典型As、Cd复合污染特征。试验田土壤基本理化性质为:碱解N 177.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效P 98.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效K 167.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 32.8 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 7.20,As 91.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd 2.06 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018),土壤中As、Cd含量均超出了风险筛选值,分别达到了对应风险筛选值的3.65、3.43倍,未超出风险管制值。

供试肥料:尿素($N \geq 46.0\%$, As $0.028 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.025 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、过磷酸钙($P_2O_5 \geq 16\%$, As $14.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、氯化钾($K_2O \geq 60\%$, As $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、碱性肥料($N:P_2O_5:K_2O$ 15:15:15, pH 8.0 ± 1.0 , As $1.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、水稻专用肥($N:P_2O_5:K_2O$ 18:8:10, As $1.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、硅钙土壤调理剂($CaO \geq 30\%$, $SiO_2 \geq 10\%$, As $5.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。供试水稻品种为当地主栽品种滇屯502。

1.2 试验设计

试验共设置3种施肥模式6个处理,其中,处理T1为农民常规施肥,尿素 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ +过磷酸钙 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ +氯化钾 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理T2为农民常规施肥的基础上施用硅钙土壤调理剂 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理T3为施用碱性肥料 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理T4为施用碱性肥料的基础上施用硅钙土壤调理剂 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理T5为施用水稻专用肥 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理T6为施用水稻专用肥的基础上施用硅钙土壤调理剂 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

每个处理3次重复,共计18个小区,每个小区面积 150 m^2 ,小区设置采用随机区组排列方式。水稻先育苗后移栽,株距×行距为 $50 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$,各处理设置独立灌溉沟渠。先将肥料和土壤调理剂均匀撒到各小区土壤表面,旋耕至 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中混合均匀,再灌水。供试水稻于5月5日移栽,5月17日施用分蘖肥,7月5日施用穗肥。分蘖期施用尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,穗肥施用 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其余田间管理均按照大田常规操作进行。

1.3 样品采集与处理

土壤、植株样品采集于2019年8月下旬(水稻成熟期),每个小区按照3点取样法分别对18个小区取样,每个点取1 m双行,先全部剪取水稻穗,之后全株连根挖取,抖落根围土作为供试土壤样品,编号后带回实验室。植株先用自来水洗净根系泥土,然后用蒸馏水清洗整个植株,将植株的根、茎、叶分离,稻穗先晒干再脱粒至糙米并除杂后,均在 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min , $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量,磨碎过 0.425 mm 孔径筛。穗头带回实验室后先调查穗长、穗粒数, $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量后调查千粒重,之后磨碎过 0.425 mm 孔径筛。土壤样品风干碾碎后,分别过 0.149 mm 和 2.0 mm 孔径筛,分别保存备用。

1.4 土壤样品分析

土壤总As、Cd测定分别采用《土壤质量 总汞、

总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分:土壤中总砷的测定》(GB/T 22105.2—2008)、《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 766—2015)进行提取和测定。土壤有效态As、Cd分别采用《酸性土壤中有效砷、有效汞的测定原子荧光法》(DB35/T 1459—2014)、《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,整个测试过程中加入标准物质GBW07405进行质量控制。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤pH采用1:2.5的土水比,酸度计(Starter-3C,奥豪斯仪器有限公司)测定。

1.5 植株样品分析

在水稻灌浆期,每个小区在预先标定的1 m双行内选连续的5穴,用电子数显游标卡尺测定主茎基部的茎粗,用SPAD仪测定旗叶叶绿素含量,并测定株高等农艺生长指标;乳熟期完成有效穗的调查;收获前用 2 m^2 样框进行取样测产,同时采集各小区1 m双行整株水稻,按照1.4小节完成对各样品的前处理。水稻植株各器官中As、Cd分别按照《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》(GB 5009.11—2014)、《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)中规定的方法进行测定,以国家标准物质[GBW07603(GSV-2)]为内标控制样品分析质量。为研究水稻吸收富集与转运土壤重金属的能力,分别引入生物富集系数(Bioconcentration factor, BCF)和转运系数(Translocation factor, TF)两项评价指标,转运系数的大小表示植物体内转移重金属的能力,生物富集系数则表示植物器官从土壤富集重金属的能力^[28-29],其计算公式分别如下:

转运系数(TF)=植物某器官中重金属浓度/另一器官中的重金属浓度 (1)

生物富集系数(BCF)=植物器官中重金属浓度/土壤中重金属浓度 (2)

1.6 数据处理

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 17.0统计软件进行方差分析,并利用新复极差法(Duncan法)进行差异显著性检验($P < 0.05$),采用OriginPro 9.1软件进行柱形图分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻生长和产量的影响

从表1看出,与不同单一施肥措施相比,各对应联合施肥对水稻的农艺生长特性及产量产生了不同

趋势的影响。在常规施肥条件下,硅钙调理剂配施后对株高、茎粗、产量3项指标产生了显著的影响($P<0.05$),其中株高和产量分别下降了7.1%、9.4%,茎粗增加了14.5%;碱性肥料条件下,联合施肥分别对水稻的茎粗、穗长、穗粒数、产量4项指标产生了显著影响($P<0.05$),分别提高了18.4%、7.8%、24.9%、16.1%;水稻专用肥模式下,联合施肥则对试验中所涉及的8项指标均未产生显著影响。综合来看,分别与水稻对应的3种单一施肥模式相比,仅碱性肥料与硅钙调理剂联合施用,对水稻的农艺生长特性及产量起到了稳定的促进效果。

2.2 不同处理对水稻不同部位中重金属累积的影响

2.2.1 对水稻不同部位As、Cd含量的影响

从表2可见,在3种不同单一施肥模式下,硅钙土壤调理剂的联合施用,对水稻各部位的As、Cd累积含量产生了不同的影响趋势。常规施肥模式下,硅钙土壤调理剂的联合施用对水稻籽粒、叶片、茎秆(除了茎秆中As含量提高了29.2%之外)、根系中As、Cd含量的影响均未达到显著性效果($P>0.05$);碱性施肥模式下,联合施肥对水稻籽粒、叶片、茎秆、根系中的As累积产生了显著的抑制效果($P<0.05$),抑制率分别达到

了32.1%、19.8%、21.8%、32.7%,同时对水稻籽粒、根系中Cd的累积也产生了显著的抑制效果($P<0.05$),抑制率分别达到了43.8%、10.3%;而水稻专用肥模式下,硅钙调理剂的联合施用则仅对籽粒、茎秆、根系中Cd的富集具有显著的抑制效果($P<0.05$),抑制率分别达到了35.0%、6.9%、28.3%,而对水稻各器官中的As富集则无显著影响($P>0.05$)。与各对应单一施肥模式相比,以碱性肥料+硅钙土壤调理剂措施对As-Cd复合污染条件下水稻各器官重金属富集的抑制效果最佳。

2.2.2 对水稻植株体内As、Cd转运的影响

生物富集系数是表征作物从土壤吸收累积重金属的能力。从图1和图2可见,与各对应单一施肥措施相比,不同的联合施肥处理均对土壤As、Cd的富集系数产生了影响。与对应单一施肥措施相比,碱性肥料+硅钙土壤调理剂的联合措施对籽粒As、Cd的富集均产生了显著的抑制效果($P<0.05$),抑制率分别达到了31.9%、43.0%,而水稻专用肥+硅钙调理剂的联合措施仅对水稻籽粒Cd起到了抑制效果($P<0.05$),抑制率为33.7%。根系对As的生物富集效果中,仅碱性肥料+硅钙土壤调理剂的联合措施对根系As的富集

表1 不同施肥处理对水稻生长和产量的影响

Table 1 Effects of different fertilization treatments on rice growth and yield

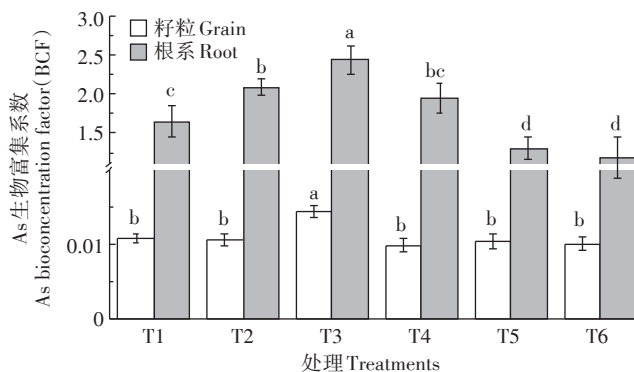
处理 Treatments	株高 Plant height/cm	SPAD值 SPAD value	茎粗 Stem diameter/ mm	穗长 Spike length/cm	有效穗数 Effective spike number/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Seeds per spike	千粒重 Thousand seed weight/g	产量 Grain yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
T1	112.33±6.54a	28.14±4.62d	5.59±0.99b	24.79±1.78c	336.38±72.82b	88.80±8.95a	30.48±2.81a	9 110.46±65.00c
T2	104.33±7.98bc	30.77±6.08cd	6.40±0.71a	26.36±2.63abc	336.17±76.44b	80.83±18.94a	30.37±1.44a	8 257.41±34.60d
T3	104.93±8.92bc	30.66±4.00cd	5.34±1.05b	25.61±2.18bc	415.48±106.27a	65.34±11.28b	30.70±1.91a	8 329.42±45.97d
T4	107.80±2.37ab	32.16±4.78bc	6.32±0.97a	27.62±3.31a	377.29±54.48ab	81.58±17.43a	31.42±1.72a	9 667.15±104.09b
T5	99.60±8.82c	36.03±5.19a	5.21±0.93b	25.42±1.09bc	411.38±59.45a	76.17±13.20ab	31.81±1.66a	9 968.83±75.89ab
T6	100.07±5.84c	34.89±4.89ab	5.77±0.50ab	27.13±2.45ab	405.47±69.30ab	83.14±14.83a	30.64±1.58a	10 310.52±606.43a

注:同列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

表2 不同施肥处理对水稻各部位重金属As、Cd含量的影响($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Effects of different fertilization treatments on As and Cd contents of various parts of rice($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	籽粒 Grain		叶片 Leaf		茎秆 Stalk		根系 Root	
	As	Cd	As	Cd	As	Cd	As	Cd
T1	0.98±0.06b	0.12±0.03bc	10.59±0.55b	0.44±0.07a	3.42±0.42c	0.38±0.02c	150.67±18.15bc	1.76±0.07b
T2	0.97±0.07b	0.10±0.02bc	11.83±1.60b	0.41±0.05a	4.42±0.47b	0.36±0.08c	190.67±50.30b	1.69±0.35bc
T3	1.31±0.08a	0.16±0.01ab	14.87±1.36a	0.51±0.04a	5.55±0.14a	0.50±0.06c	265.00±37.40a	1.84±0.30b
T4	0.89±0.08b	0.09±0.02c	11.93±1.11b	0.44±0.09a	4.34±0.39b	0.38±0.04c	178.33±63.04bc	1.65±0.39c
T5	0.94±0.09b	0.20±0.06a	9.72±1.54b	0.53±0.06a	3.45±0.14c	1.02±0.25a	119.27±31.96bc	2.58±0.80a
T6	0.91±0.08b	0.13±0.04bc	10.28±1.18b	0.49±0.05a	3.31±0.25c	0.95±0.13b	108.87±22.94c	1.85±0.40b



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$).The same below

图1 不同联合施肥处理对水稻籽粒、根系As富集系数的影响
Figure 1 Effects of different combined fertilization treatments on As bioconcentration factor in rice grains and roots

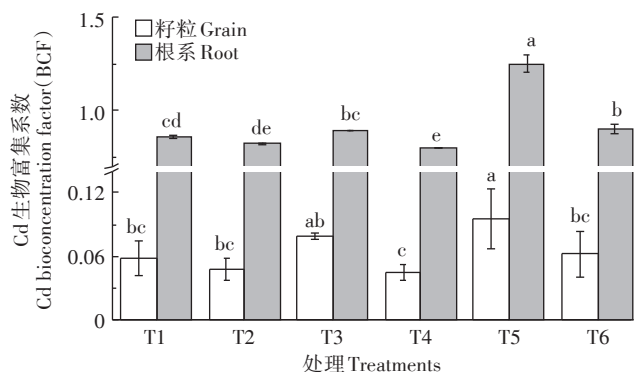


图2 不同联合施肥处理对水稻籽粒、根系Cd富集系数的影响
Figure 2 Effects of different combined fertilization treatments on Cd bioconcentration factor in rice grains and roots

系数产生了显著的抑制作用,而常规施肥条件下的联合措施却对根系As的富集产生了显著的刺激效果($P<0.05$);根系Cd的生物富集效果中,碱性肥料+硅钙土壤调理剂、水稻专用肥+硅钙土壤调理剂两种联合措施均对根系Cd的富集产生了显著的抑制效果($P<0.05$)。

转运系数是表征植物组织或者器官内的元素运输和富集能力。从图3可见,与对应单一施肥相比,3种联合施肥对水稻植株中As从根系向茎秆的转运系数不存在显著差异($P<0.05$),常规施肥条件下联合硅钙土壤调理剂措施分别对植株中As从茎到叶、茎到籽粒的转运均起到了抑制作用,抑制率分别达到了12.2%、24.1%,而碱性肥料条件下,联合施肥则增加了水稻植株中As从茎到叶的转运,提高了14.1%;从图4可见,与对应单一施肥相比,碱性肥料的联合措施降低了水稻植株中Cd从根向茎转运系数(18.5%),

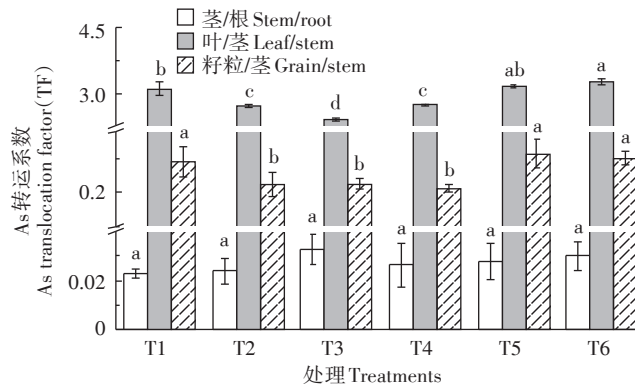


图3 不同联合施肥处理对水稻地上各器官中As转运系数的影响

Figure 3 Effects of different combined fertilization treatments on As translocation factor in aboveground various organs of rice

提高了从茎秆向叶片的转运系数(47.7%),降低了从茎秆向籽粒的转运系数(11.8%),而水稻专用肥联合措施则降低了水稻Cd从茎秆向籽粒的转运系数(40.0%)。结果说明,3种联合施肥措施中,碱性肥料+硅钙调理剂的联合措施均提高了水稻植株中As、Cd从茎到叶的转运,降低了从茎秆向籽粒的转运,且除As由茎秆到籽粒的转运外均达到了显著性差异($P<0.05$)。

2.3 不同处理对土壤重金属有效态、pH和有机质的影响

从表3可见,与各单一施肥处理相比,硅钙土壤调理剂的联合施用均未对土壤有效态As、Cd、pH、有机质产生显著影响,但也引起了一定程度的变化趋势。常规施肥条件下联合硅钙土壤调理剂后,土壤pH和有机质分别提升了0.27%、5.20%,土壤有效态As下降了1.22%,而有效态Cd则提高了9.52%;碱性肥料条件下联合硅钙土壤调理剂后,土壤pH和有机

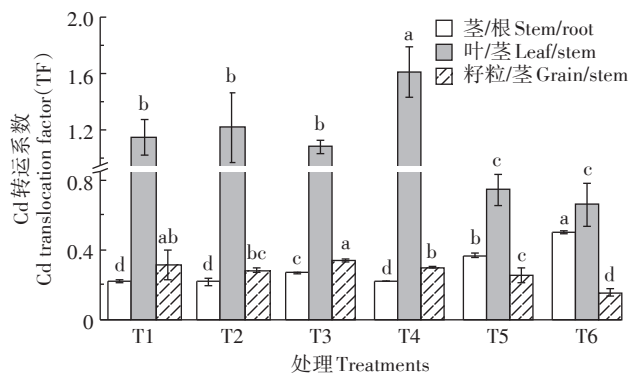


图4 不同联合施肥处理对水稻地上各器官中Cd转运系数的影响

Figure 4 Effects of different combined fertilization treatments on Cd translocation factor in aboveground various organs of rice

质均分别提升了1.22%、6.28%，土壤有效态As、Cd则分别下降了5.72%、12.00%；水稻专用肥条件下联合硅钙土壤调理剂后，土壤pH和有机质分别下降了0.96%、13.06%，土壤有效态As、Cd含量均分别下降了3.68%、1.33%。综合来看，以碱性肥料条件下的联合施肥在提升土壤pH和有机质、降低重金属有效态含量的趋势上具有相对稳定的效果。

2.4 水稻籽粒中重金属含量的影响因素分析

2.4.1 水稻籽粒As含量的影响因素分析

对水稻各部位中As含量与土壤pH、有机质、有效态As含量进行Pearson相关性分析(表4)，结果可知，水稻籽粒As含量与土壤pH、水稻茎秆、叶片、根系中As含量均呈显著相关，相关系数分别为0.35($P<0.05$)、0.49($P<0.01$)、0.48($P<0.01$)、0.63($P<0.01$)；水稻根系中As含量与土壤有效态As含量之间呈显著相关性，相关系数0.47($P<0.01$)。结果表明，土壤As主要是通过有效态As含量来影响水稻组织器官中As经根系、茎秆向籽粒中的转运，适度降低土壤有效态As，有助于降低根系对As的富集，继而调节根系As经过茎秆进入叶片和籽粒的分配，降低对水稻籽粒As含量的影响。

2.4.2 水稻籽粒Cd含量的影响因素分析

对水稻各部位Cd含量与土壤pH、有机质、土壤有效态Cd含量进行Pearson相关性分析(表5)，结果表明，水稻茎秆中Cd含量与土壤有效态Cd含量呈显著相关，相关系数为-0.34($P<0.05$)；土壤有效态Cd含量分别与土壤pH、有机质含量呈相关关系，相关系数分别为0.34($P<0.01$)、0.44($P<0.05$)；水稻籽粒Cd含量与水稻茎秆、叶片、根系中Cd含量呈显著相关关系($P<0.01$)，相关系数分别为0.64、0.63、0.65。综合表明，土壤pH、有机质含量会通过影响土壤有效态Cd含量，进而影响土壤Cd经茎秆向籽粒中的转运。

3 讨论

3.1 联合措施对水稻籽粒As、Cd的阻控机制的分析

重金属污染土壤安全利用的关键是在化学原理上降低土壤重金属的移动性，或组织器官中重金属元素向可食用部分的转移^[30]，从而提高农作物(尤其可食用部分的籽粒)的安全性^[31-33]。大量的研究通过生物炭、海泡石、蒙脱石、蛭石、硅藻土、硫酸盐矿物、碳酸盐及磷酸盐等^[14, 30, 34]单一材料来实现土壤重金属的

表3 不同处理对土壤As、Cd有效态含量及pH、有机质的影响

Table 3 Effects of different treatments on the soil available As, Cd, pH and organic matter

处理 Treatments	有效态 As Available As/(mg·kg ⁻¹)	有效态 Cd Available Cd/(mg·kg ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)
T1	13.12±1.32a	0.84±0.14ab	7.29±0.12ab	35.22±3.53bc
T2	12.96±1.39a	0.92±0.08ab	7.31±0.18ab	37.05±3.23ab
T3	13.64±1.50a	1.03±0.29a	7.36±0.15ab	36.73±2.17ab
T4	12.86±2.26a	0.96±0.25ab	7.45±0.12a	41.14±1.73a
T5	12.49±0.93a	0.75±0.10b	7.26±0.10b	35.84±8.44abc
T6	12.03±1.15a	0.74±0.09b	7.19±0.10b	31.16±2.50c

表4 水稻各部位As含量与其影响因子间的Pearson相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis of As content in various parts of rice and its influencing factors

影响因子 Influencing factors	水稻不同部位As含量 As content in different parts of rice				土壤特性 Soil properties		
	籽粒 Grain	茎秆 Stalk	叶片 Leaf	根系 Root	pH	有机质 Organic matter	有效态 As Available As
籽粒 As Grain As	1	0.49**	0.48**	0.63**	0.35*	-0.01	0.20
茎秆 As Stalk As		1	0.58**	0.59**	0.21	0.08	0.06
叶片 As Leaf As			1	0.42**	0.35*	0.20	0.32
根系 As Root As				1	0.06	0.22	0.47**
土壤 pH Soil pH					1	0.34*	-0.25
有机质 Organic matter						1	0.19
有效态 As Available As							1

注：*表示 $P<0.05$ ；**表示 $P<0.01$ 。下同。
Note: * means $P<0.05$; ** means $P<0.01$. The same below.

表5 水稻籽粒Cd含量与其影响因子间的Pearson相关性分析
Table 5 Pearson correlation analysis between rice grain Cd content and its influencing factors

影响因子 Influencing factors	水稻不同部位Cd含量Cd content in different parts of rice				土壤特性Soil properties		
	籽粒Grain	茎秆Stalk	叶片Leaf	根系Root	pH	有机质Organic matter	有效态Cd Available Cd
籽粒Cd Grain Cd	1	0.64**	0.63**	0.65**	-0.04	-0.06	-0.04
茎秆Cd Stalk Cd		1	0.57**	0.82**	-0.13	-0.14	-0.34*
叶片Cd Leaf Cd			1	0.28	0.00	-0.14	-0.05
根系Cd Root Cd				1	-0.06	0.13	-0.23
土壤pH Soil pH					1	0.34*	0.34**
有机质Organic matter						1	0.44*
有效态Cd Available Cd							1

钝化。农田土壤重金属防控的关键是实现籽粒的安全,如何采用现有的农艺措施或优化组合来实现具有可推广价值的安全利用目标,是本研究的重点。为此,本研究以云南水稻种植中常用的3种单一施肥措施为基础,分别与联合施肥措施下As-Cd复合污染土壤及水稻的安全利用效应进行分析和比对,发现与单施碱性肥料相比,碱性肥料+硅钙土壤调理剂在抑制水稻籽粒As、Cd的生物富集中均表现出显著的效果,这与本研究结果中的联合施肥对水稻各器官间As、Cd转运系数的影响有关,碱性肥料下的联合施肥措施首先降低了水稻根系对土壤As、Cd的富集($P<0.05$),根系对土壤重金属的低富集为地上部分及籽粒中As、Cd含量的下降提供了重要基础条件(表4、表5)。其中,碱性肥料的联合施肥对As从根系向茎秆的转运基本无影响,而显著提高了As从茎秆到叶片的转运($P<0.05$),降低了As从茎秆向籽粒的转运($P<0.05$);而在重金属元素Cd的传导转运中,联合施肥也抑制了从根到茎的转运,提高了从茎秆到叶片的转运,抑制了从茎秆到籽粒的转运。结合本研究中3种单一施肥模式与硅钙调理剂联合施用前后对土壤pH、有机质、重金属有效态含量的影响,初步分析可以得出,碱性肥料+硅钙土壤调理剂联合施用对As-Cd复合污染农田土壤的安全利用机制可能是通过抑制重金属向根系的移动富集,继而抑制其从根系向茎秆的转运(除元素As外),调控茎秆向叶片和籽粒转运的再分配,即促进重金属元素向不可食用的叶片组织转运,减缓向可食用部位籽粒的转运。

碱性肥料+硅钙土壤调理剂之所以在效果上优于其他的两种联合措施,可能一方面与碱性肥料(pH 8.0 ± 1.0)的施用为水稻根系提供了微碱性条件,延缓了根系分泌物对土壤As、Cd向生物可利用的有效态的转化速率^[35-36]有关,本研究结果也证实了单一碱性

肥料及碱性肥料的联合施肥均在提高土壤pH上优于其他施肥处理;另一方面可能与硅钙土壤调理剂联合作用有关,在调理土壤物理性状的基础上,其主要成分Si、Ca对土壤pH和有效态含量影响较小,但可通过调节阻控土壤As、Cd在水稻各器官中的转运系数而降低籽粒中重金属的富集量,这与前人的研究结果相似^[37-40],本研究也证实了碱性肥料+硅钙土壤调理剂的联合措施具有促进土壤有机质提升、降低As、Cd有效态含量的作用。常规施肥、水稻专用肥条件下的硅钙土壤调理剂施用在根系As、籽粒Cd富集上虽然具有一定抑制效果,但在水稻地上部各器官向籽粒转运中的效果缺乏稳定性^[41],这也恰恰说明调控As、Cd转运与再分配是碱性肥料提供的微碱性环境和硅钙土壤调理剂共同作用的结果,正如鄢德梅等^[42]的研究表明,微碱性的钙镁磷肥则是石灰、海泡石在修复Cd污染稻田土壤中的关键因素。

3.2 联合措施对水稻生长及产量的分析

As、Cd均为植物的非必需营养元素,通过根系吸收在植物组织中累积会对植物的生长具有毒害效应。施肥措施作为作物种植过程中必需的农事环节,在水稻的生长及增产稳产中起关键作用。本研究在3种单一施肥措施的基础上,联合硅钙土壤调理剂在增强作物抗逆、补充中微量元素等功能特性,探索联合施肥对As-Cd复合污染下水稻农艺生长特性及产量的影响。研究结果表明,除农民常规施肥(尿素+过磷酸钙+氯化钾)措施外,碱性肥料、水稻专用肥两种施肥措施下联合施用硅钙土壤调理剂后均可不同程度地提高水稻产量,其中以水稻专用肥及其联合施肥下的整体产量水平最高,这可能与水稻专用肥中特有的N、P、K养分配比优势有关。与对应单一施肥措施相比,联合施肥的效果中,以碱性肥料与硅钙土壤调理剂联合施用后对水稻农艺生长指标和产量的促进作

用最为显著,而农民常规施肥下的联合施肥则对包括产量在内的水稻部分指标起到了抑制作用,这与过磷酸钙的微酸特性有关,也说明碱性肥料+硅钙调理剂组合效果的关键在于碱性肥料提供的微碱性的根区土壤环境,降低了土壤有效态 As、Cd 对水稻生长的胁迫效应。

硅钙土壤调理剂中的主要组分 Si 是水稻的第 4 大营养元素^[43],生物有效 Si、Ca 的补充,能增加水稻的结实率、有效穗、穗粒数、千粒重和产量^[44-46]。另外,元素 Si 对重金属胁迫下水稻生长的毒害具有缓解作用,在生理学机制方面, Si 通过参与水稻的生理代谢活动,使其抗氧化系统酶的活性和清除自由基的能力增强^[47],进而抑制 As、Cd 的吸收及在水稻各器官组织中的运输,尤其 Si 还参与 Cd 在水稻体内的螯合和区隔作用,在土壤学机制方面,有效 Si 能改变土壤理化特性,降低土壤中重金属有效态含量,而土壤偏碱性微环境能促进重金属从有效态向残渣态的转化^[39,42,48],减少 As、Cd 对水稻生长的毒害胁迫,进而达到促进生长和增产增效,这与本文的研究结果较为一致。

4 结论

(1)在 As-Cd 复合污染农田上,与对应单一施用化肥相比,碱性肥料与硅钙调理剂的联合施用对水稻的茎粗、穗长、穗粒数、产量 4 项指标分别提高了 18.4%、7.8%、24.9%、16.1%,且均达到了显著差异($P < 0.05$),而常规施肥和水稻专用肥模式下的联合施肥则对水稻包括产量在内的各农艺生长指标起到了部分抑制或无显著影响。

(2)3 种施肥措施条件下,以碱性肥料模式下的联合施肥对水稻各器官中 As、Cd 的吸收累积抑制效果最好,其对籽粒、叶片、茎秆、根系中 As 累积的抑制率分别为 32.1%、19.8%、21.8%、32.7%,对籽粒、根系中 Cd 累积的抑制率分别为 43.8%、10.3%,且均达到了显著性差异水平($P < 0.05$),而专用肥模式下的联合施肥仅对水稻籽粒、茎秆、根系中 Cd 的富集起到了抑制效果($P < 0.05$),常规施肥模式下仅对茎秆中 As 的富集起到了抑制效果,其余均无明显影响或产生负效应。

(3)在 As-Cd 复合污染农田上,碱性肥料+硅钙土壤调理剂的重金属修复机制是在降低根系对土壤 As、Cd 吸收同时,重点对通过根系进入到茎秆的重金属 As、Cd 再分配进行调控,促进茎秆重金属向叶片转

运,抑制其向籽粒转运的比例。

参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [2] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 261-272.
CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 261-272.
- [3] Arao T, Ishikawa S, Murakami M, et al. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan[J]. *Paddy and Water Environment*, 2010, 8(3): 247-257.
- [4] Li X N, Jiao W T, Xiao R B, et al. Soil pollution and site remediation policies in China: A review[J]. *Environmental Reviews*, 2015, 23(3): 263-274.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution survey bulletin[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Research, 2014.
- [6] 张继舟, 王宏韬, 倪红伟, 等. 我国农田土壤重金属污染现状、成因与诊断方法分析[J]. *土壤与作物*, 2012, 1(4): 212-218.
ZHANG Ji-zhou, WANG Hong-tao, NI Hong-wei, et al. Current situation, sources and diagnosis method analysis of heavy metal contamination in agricultural soils[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 212-218.
- [7] Duan G L, Shao G S, Tang Z, et al. Genotype and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10: 9.
- [8] Diacomanolis V, Noller B N, Ng J C. Bioavailability and pharmacokinetics of arsenic are influenced by the presence of cadmium[J]. *Chemosphere*, 2014, 112: 203-209.
- [9] 徐长春, 郑戈, 林友华. “十三五”国家重点研发计划农田镉砷污染防治领域资助情况概述[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7): 1321-1325.
XU Chang-chun, ZHENG Ge, LIN You-hua. Brief introduction to research projects on prevention and control cadmium and arsenic pollution in croplands supported by National Key R&D Program of China in 13th Five-Year Period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1321-1325.
- [10] 周东美, 郝秀珍, 薛艳, 等. 污染土壤的修复技术研究进展[J]. *生态环境*, 2004, 13(2): 234-242.
ZHOU Dong-mei, HAO Xiu-zhen, XUE Yan, et al. Advances in remediation technologies of contaminated soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004, 13(2): 234-242.
- [11] 李跃鹏, 尹华, 叶锦韶, 等. 外源微生物对土壤中镉形态及微生物多样性的影响[J]. *化工学报*, 2012, 63(3): 1850-1858.
LI Yue-peng, YIN Hua, YE Jin-shao, et al. Effects of exogenous microorganisms on speciations of cadmium and microbial diversity in

- soil[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(3):1850-1858.
- [12] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17):3404-3414.
- ZHU De-feng, ZHANG Yu-ping, CHEN Hui-zhe, et al. Innovation and practice of high-yield cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17):3404-3414.
- [13] 杭小帅, 周健民, 王火焰. 常熟市高风险区水稻籽粒重金属污染特征及评价[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2):130-135.
- HANG Xiao-shuai, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan. Heavy metal pollution characteristics and assessment of rice grain from a typical high risk area of Changshu City, Jiangsu Province[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2):130-135.
- [14] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2):153-159.
- XU Jian-ming, MENG Jun, LIU Xing-mei, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):153-159.
- [15] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1):175-181.
- NING Chuan-chuan, WANG Jian-wu, CAI Kun-zheng, et al. The effects of organic fertilizer on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1):175-181.
- [16] 姚佳璇, 俄胜哲, 袁金华, 等. 施肥对灌漠土作物产量、土壤肥力与重金属含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6):813-825.
- YAO Jia-xuan, E Sheng-zhe, YUAN Jin-hua, et al. Effects of different organic matters on crop yields, soil quality and heavy metal content in irrigated desert soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6):813-825.
- [17] 刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰. 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1494-1502.
- LIU Can, QIN Yu-sheng, ZHAO Xiu-lan, et al. Long-term effect of fertilization on accumulation and availability of heavy metal in calcareous paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1494-1502.
- [18] 卢金海, 李博文, 杨志鑫, 等. 不同施肥处理对设施黄瓜生产系统重金属Cd积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4):97-100.
- LU Jin-hai, LI Bo-wen, YANG Zhi-xin, et al. Effects of different fertilization treatments on Cd accumulation in cucumber production system[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(4):97-100.
- [19] Sheppard S C, Grant C A, Sheppard M I, et al. Risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(3):919-932.
- [20] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2020, doi: 10.11766/trxb201909160391.
- WANG Xin-kai, ZHANG Yan-xia, HUANG Biao, et al. Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, doi: 10.11766/trxb201909160391.
- [21] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1500-1510.
- WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1500-1510.
- [22] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2):259-273.
- ZHU Zhao-liang, JIN Ji-yun. Fertilizer use and food security in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2):259-273.
- [23] 聂新星, 段小丽, 张敏敏, 等. 长期不同施肥措施对土壤重金属含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(增刊2):58-62.
- NIE Xin-xing, DUAN Xiao-li, ZHANG Min-min, et al. Effects of long-term fertilization on content of heavy metals in soil[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2018, 57(Suppl 2):58-62.
- [24] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属累积和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2):257-263.
- WANG Teng-fei, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2):257-263.
- [25] 陈少毅, 许超, 张文静, 等. 生物质炭与氮肥配施降低水稻重金属含量的盆栽试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(44):189-197.
- CHEN Shao-yi, XU Chao, ZHANG Wen-jing, et al. Combined application of biochar and nitrogen fertilizers reducing heavy metals contents in potted rice planted in contaminated soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(44):189-197.
- [26] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. 环境科学, 2018(7):3409-3417.
- HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG Liang, et al. Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland[J]. *Environmental Science*, 2018(7):3409-3417.
- [27] 陈立伟, 杨文毅, 周航, 等. 土壤调理剂对土壤-水稻系统Cd、Zn迁移累积的影响及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4):1635-1641.
- CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, et al. Effects of combined amendment on transport and accumulation of Cd and Zn in soil-rice system and the related health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4):1635-1641.
- [28] 张建峰, 廖凯强, 曾红远, 等. 不同土壤调理剂对水稻生长及镉积累的影响[J]. 湖南农业科学, 2018, 12:45-49.
- ZHANG Jian-feng, LIAO Kai-qiang, ZENG Hong-yuan, et al. Effects of different soil conditioners on rice growth and cadmium accumulation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018, 12:45-49.
- [29] 李志贤, 向言词, 李会东, 等. 施氮水平对玉米吸收和富集重金属Cd、Pb的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):143-147.
- LI Zhi-xian, XIANG Yan-ci, LI Hui-dong, et al. Effects on nitrogen application levels on Cd, Pb uptake and accumulation by maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):143-147.

- [30] 刘巍, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭对土壤-水稻系统中Cd迁移累积的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 323-327.
LIU Wei, CHEN Xiao-min, JING Feng, et al. Effects of biochar amendment on translocation and accumulation of Cd in soil-rice system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 323-327.
- [31] 李小方. 重金属污染农田安全利用: 目标、可选技术与可推广技术[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 860-866.
LI Xiao-fang. Safe utilization of heavy metal-contaminated farmland: Goals, technical options, and extendable technology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 860-866.
- [32] 刘利军. 太原市小店污灌区农田安全利用技术研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013.
LIU Li-jun. Research on farmland safe utilization in Xiaodian sewage irrigation area, Taiyuan[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [33] 颜晓. 作物阻隔技术的研究与应用——以桂西北某重金属污染农田治理为例[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
YAN Xiao. Application and research of crop barrier technology: A heavy metal pollution of farmland in northwest Guangxi as an example [D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [34] Chen X, He H Z, Chen G K, et al. Effects of biochar and crop straws on the bioavailability of cadmium in contaminated soil[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9528.
- [35] Li X F, Zhou D M. A meta-analysis on phenotypic variation in cadmium accumulation of rice and wheat: Implications for food cadmium risk control[J]. *Pedosphere*, 2019, 29(5): 545-553.
- [36] Li Y Z, Xu L N, Letuma P, et al. Metabolite profiling of rhizosphere soil of different allelopathic potential rice accessions[J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(8): 369-374.
- [37] 黄亚男, 傅志强. 水稻根系分泌物对镉吸收、累积影响机理研究进展[J]. 作物研究, 2018, 32(3): 244-248, 264.
HUANG Ya-nan, FU Zhi-qiang. Study progress about the mechanism of cadmium uptake and accumulation in rice root exudates[J]. *Crop Research*, 2018, 32(3): 244-248, 264.
- [38] 董霞, 李虹呈, 陈齐, 等. 石灰、硅钙镁改良剂对不同土壤-水稻系统Cd吸收累积的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(6): 1298-1306.
DONG Xia, LI Hong-cheng, CHEN Qi, et al. Effects of lime, silicon-calcium-magnesium amendments on Cd absorption and accumulation in different soil-rice systems[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(6): 1298-1306.
- [39] 李仁英, 李苏霞, 谢晓金, 等. 施硅期对砷污染土中水稻体内磷砷含量与分布的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1050-1056.
LI Ren-ying, LI Su-xia, XIE Xiao-jin, et al. Effect of application periods of silicon on concentrations and distributions of arsenic and phosphorus in rice plants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6): 1050-1056.
- [40] 高子翔, 周航, 杨文戮, 等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉的累积效应的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 5299-5307.
GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, et al. Impacts of silicon fertilizer as base manure on cadmium bioavailability in soil and on cadmium accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 5299-5307.
- [41] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 施硅对镉胁迫下水稻镉吸收和转运的调控效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1049-1056.
PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bo-qing, et al. Effects of silicon application on cadmium uptake and translocation of rice under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(4): 1049-1056.
- [42] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1491-1497.
YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, et al. Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1491-1497.
- [43] 何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1734-1740.
HE Ying, DU Ping, SHI Jing, et al. Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation: Field experiment study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1734-1740.
- [44] 任海, 付立东, 王宇, 等. 不同硅肥施入模式对水稻产量及品质的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 13-18, 58.
REN Hai, FU Li-dong, WANG Yu, et al. Effects of different silicon fertilizer application modes on yield and quality of rice[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2019, 44(4): 13-18, 58.
- [45] 李卫国, 任永玲. 氮、磷、钾、硅肥配施对水稻产量及其构成因素的影响[J]. 山西农业科学, 2001, 29(1): 53-58.
LI Wei-guo, REN Yong-ling. The effect of combined N-P-K-Si fertilization on rice yield and component factors[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2001, 29(1): 53-58.
- [46] 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. Effects of applying silicon fertilizer on rice population quality and yield in different periods[J]. *Tillage and Cultivation*, 2001(3): 25-27.
- [47] 吴延寿, 王萍, 熊运华, 等. 钙对盐胁迫水稻生长和营养元素吸收的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(6): 1023-1028.
WU Yan-shou, WANG Ping, XIONG Yun-hua, et al. The effects of calcium on growth and nutrients uptake of rice under salt stress condition[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, 38(6): 1023-1028.
- [48] 郑凯翔, 王旺田, 刘文瑜, 等. 外源硅调控葡萄生理特性对低温胁迫的响应[J]. 分子植物育种, 2020, 18(3): 1013-1019.
ZHENG Kai-xiang, WANG Wang-tian, LIU Wen-yu, et al. Exogenous silicon regulated the physiological characteristics of grapes responses to low temperature stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(3): 1013-1019.