

李 心, 林大松, 刘 岩, 等. 不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1511–1520.

LI Xin, LIN Da-song, LIU Yan, et al. Effects of different soil conditioners on cadmium control in cadmium-contaminated paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1511–1520.

不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究

李 心^{1,2}, 林大松^{2*}, 刘 岩², 焦位雄², 张 丽²

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要: 选用森美思纳米陶瓷材料、楚戈、袁梦牌土壤调理剂、土调1号、改性海泡石五种土壤重金属调理剂, 分别在湖南湘潭、湖北大冶、广东韶关、广西河池受重金属镉(Cd)污染水稻田开展大田控镉试验, 探讨五种调理剂对不同类型土壤中Cd有效态含量、土壤pH值及稻米Cd含量的影响, 结果表明: Cd污染稻田土加入不同土壤调理剂后, 土壤pH值提高了0.54~2.06个单位, 土壤有效态Cd含量显著降低($P<0.05$), 与对照处理相比, 有效态Cd含量下降11.4%~31.8%; 施用土壤调理剂, 可有效降低稻米Cd含量, 与对照相比, 森美思纳米陶瓷材料处理中稻米Cd降低了17.1%~44.2%, 楚戈处理中降低了14.3%~66.1%, 袁梦牌土壤调理剂处理中降低了43.6%~76.8%, 土调1号处理中降低了18.2%~80.8%, 改性海泡石处理中降低了72.2%~82.7%; 施用五种土壤调理剂后水稻产量均未显著减少。

关键词: 土壤调理剂; 镉污染; 水稻田; 控镉效应

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)07-1511-10 doi:10.11654/jaes.2018-0802

Effects of different soil conditioners on cadmium control in cadmium-contaminated paddy fields

LI Xin^{1,2}, LIN Da-song^{2*}, LIU Yan², JIAO Wei-xiong², ZHANG Li²

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: This paper selected five soil heavy metal conditioners SAMMNS Nano-ceramic materials, Chuge, Yuanmeng soil conditioner, Soil conditioning No.1, Modified sepiolite. The effects of five conditioners on Cd availability, soil pH and Cd content in different types of soils were investigated by Field-controlled cadmium tests conducted in cadmium-contaminated paddy fields in Xiangtan, Hubei Daye, Guangdong Shaoguan and Guangxi Hechi. The results showed that: After adding different soil conditioners to Cd-contaminated paddy soils, the soil pH values increased by 0.54 to 2.06 units and the soil available Cd content decreased significantly ($P<0.05$). Compared with the control, the available states were effective. The content of Cd decreased by 11.4%~31.8%. The application of soil conditioner can effectively reduce the Cd content of rice. Compared with the control, the rice Cd of the SAMMNS Nano-ceramic materials treatment decreased by 17.1% to 44.2%, the rice Cd of the Chuge treatment decreased by 14.3% to 66.1% and the rice Cd of the Yuanmeng soil conditioner treatment decreased by 43.6%~76.8%, the rice Cd decreased by 18.2%~80.8% in the Soil conditioning No. 1 treatment and the rice Cd decreased by 72.2%~82.7% in the Modified sepiolite treatment. The effect of applying soil conditioners on rice yield found that the application of the five soil conditioners did not produce a significant reduction in rice yield.

Keywords: soil conditioner; cadmium pollution; rice field; cadmium control effect

收稿日期: 2018-05-20 录用日期: 2018-06-05

作者简介: 李 心(1993—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 从事重金属污染修复研究。E-mail: 1026692528@qq.com

*通信作者: 林大松 E-mail: lindasong608@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200397)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31200397)

近年来,土壤镉(Cd)污染问题一直备受关注,Cd在植物生长过程中为非必需元素,当植物体内累积到一定量后便会对植物产生毒害作用,从而抑制植物的生长^[1-2]。土壤Cd主要来源是成土母质发育而来以及随各种工农业活动进入农田。Cd可以通过根的吸收在水稻的各个器官里迁移累积,从而影响水稻产量和品质,稻米进入食物链,进而危害人类健康^[3-5]。因此水稻Cd污染的风险问题越来越成为社会关注的热点以及农产品质量安全监管的重点。土壤重金属污染修复主要基于两种策略:一是将重金属从土壤中去掉,达到清洁土壤的目的;二是将重金属固定在土壤中降低其迁移性和生物有效性,从而降低其风险^[6]。当前,我国耕地重金属污染修复实践要求既不能破坏土壤肥力和生态环境功能,又不能导致二次污染的发生。同时还要求与农业生产紧密结合、能大面积应用、安全、成本可控、环境友好,实现边修复边生产,以保障农产品安全和生态安全^[7-8]。以农艺措施为主的耕地Cd综合调控技术是一种经济有效、易于实施的方法,其目标是阻断或最大程度减少农作物对Cd的吸收累积,从而控制土壤Cd经农作物吸收进入食物链^[9-11]。而选择调控效果好或钝化效率高、持续性强的土壤调理剂是该技术在实际应用中的关键^[12-15]。

针对我国南方酸性水稻土区,土壤Cd活性高、迁移性强,易于在水稻植株和稻米中累积,造成稻米Cd含量超标问题。本文基于国内从事土壤污染修复的5家企业(分别用企业A、企业B、企业C、企业D、企业E来表示)所提供的材料,开展土壤Cd污染综合调控技术异地效果验证试验;项目组分别在湖南湘潭、湖北大冶、广东韶关、广西河池等水稻种植区域,选取土壤Cd为中度污染程度且田间分布相对均匀的地块,通过施用5家企业的土壤调理剂,监测同类材料在不同地区以及同一地区不同材料对稻田土壤Cd有效态含量、土壤pH值变化、稻米Cd含量的变化情况,旨在通过多年多点大田验证试验,能够筛选出适宜当地土壤Cd污染条件和农业种植习惯的土壤修复材料,为

Cd污染耕地安全利用、保障农产品质量安全提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

大田试验分别于南方4个省区进行,分别是湖南湘潭、湖北大冶、广东韶关、广西河池。种植水稻品种依次是H优518、美香珍、美香占2号、野香优2号。采样时去除表层砾石和植物残体,采用梅花布点法采集0~20 cm表层土样,将土样混合后采用四分法保留土样,根据试验需要采集足够量样品。样品经风干过2 mm筛备用,并取部分土样继续磨细过0.15 mm筛备用。供试土壤的基本理化性质见表1。

1.2 供试材料

企业A产品为森美思纳米陶瓷材料,主要成分为SiO₂;企业B产品为楚戈,其主要成分为40%生石灰(CaO≥85%),30%硅灰石(SiO₂≥20%),20%海泡石,10%沸石;企业C产品为袁梦牌土壤调理剂,其主要成分为层状硅酸盐及焦磷酸盐;企业D产品为土调1号,其主要成分为CaO≥30.0%,MgO≥8.0%,SiO₂≥35.0%;企业E产品为改性海泡石,其主要成分为41.7% CaO,16.8% MgO,7.4% Al₂O₃,32.5% SiO₂。

1.3 试验设计

在湖南湘潭、湖北大冶、广东韶关、广西河池分别选取Cd为中度污染程度且Cd分布相对均匀的水稻田开展大田试验,对试验田块进行编号,以田块为单元,田块面积大小为0.049~0.08 hm²,将每一田块一分为二,一半作为撒施修复材料的试验处理,一半作为不施修复材料的对照处理;每一田块只实施一种修复材料,试验重复3次。田间试验采用常规的水肥管理,确保试验地块条件一致。土壤调理剂具体使用方法如下:

(1)企业A:森美思纳米陶瓷材料

用量为3000 kg·hm⁻²。种植前5~10 d结合整地翻耕一次性撒施,使产品与土壤混合均匀。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

采样点	pH	总Cd/mg·kg ⁻¹	有效态Cd/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	CEC/cmole·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹
湖南湘潭	6.1	0.64	0.250±0.071	31.08	10.3	2.45	118.32	160.0
湖北大冶	6.5	0.43	0.141±0.041	33.56	18.2	16.41	130.15	158.6
广东韶关	5.2	0.45	0.210±0.049	32.70	12.1	80.56	186.50	96.1
广西河池	5.3	0.44	0.179±0.027	36.71	9.6	20.71	66.00	100.2

(2)企业B:楚戈

用量为 2250 kg·hm⁻²。种植前 5~10 d 结合整地翻耕一次性撒施,使产品与土壤混合均匀。

(3)企业C:袁梦牌土壤调理剂

用量为 4500 kg·hm⁻²。种植前 5~10 d 结合整地翻耕一次性撒施,使产品与土壤混合均匀。

(4)企业D:土调1号

土调1号微生物菌剂用量为 1500 kg·hm⁻²。种植前 5~10 d 结合整地翻耕一次性撒施,使产品与土壤混合均匀。

(5)企业E:改性海泡石

用量为 4500 kg·hm⁻²。种植前 5~10 d 结合整地翻耕一次性撒施,使产品与土壤混合均匀。

1.4 样品的采集与分析

1.4.1 样品的采集

土壤、植株样品于收获前 1~3 d 采集,样品采集采用五点取样法。每点采集 1 株水稻,即每个处理小区采 5 株,装入网袋中保存。同时原位采集土壤样品 2.5 kg。水稻种植及采集时间等见表 2。

采集的水稻植株样品带回实验室风干处理后将水稻籽粒分离出来,70 °C 烘至恒质量,粉碎过 100 目筛备用。土壤样品风干后过 2 mm 尼龙筛,然后装入塑料袋备用。

1.4.2 土壤基本理化性质测定

土壤常规理化性质参照《土壤农化分析》一书中提到的方法测定^[15]。土壤 pH 值用 pH 计(pHs-3C,上海精科)测定(水土比为 5:1);土壤有机质用重铬酸钾外加热法测定;土壤碱解氮用碱解扩散法测定;土壤速效磷用 HCl-H₂SO₄ 浸提-钼蓝比色法测定;土壤速效钾用 NH₄OAC 浸提火焰光度法测定;土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定。

1.4.3 土壤和稻米 Cd 含量测定

将收获的稻米,用自来水充分冲洗以去除黏附于植物样品上的泥土和污物,然后再用去离子水冲洗,在 105 °C 杀青 10 min,然后在 70 °C 下烘干至恒质量,

将植物样品粉碎备用,采用 HNO₃-HClO₄ 法消化(体积比为 3:1),土壤样品采用 HNO₃-HClO₄-HF 消解,原子吸收分光光度计(SOLAAT M6, Thermo Fisher Scientific, USA)测定。

1.5 数据分析

数据采用 Microsoft Office Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析,并采用 Duncan 多重检验法对各个处理进行差异显著性检验,用 Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤调理剂对土壤 pH 值的影响

不同土壤调理剂处理后土壤 pH 值均不同程度升高,如图 1。森美思纳米陶瓷材料处理下(图 1A)广西河池和湖北大冶各处理土壤 pH 值与对照相比无显著差异($P>0.05$),广东韶关和湖南湘潭土壤 pH 值各处理与对照差异性显著($P<0.05$),分别比对照升高 0.96 和 0.64。楚戈与土调 1 号处理(图 1B 和图 1D)均显著提高了广东韶关、广西河池、湖南湘潭土壤 pH 值($P<0.05$),与对照相比,楚戈处理后 pH 分别升高 0.66、1.04 和 0.63;土调 1 号处理后 pH 分别升高 0.55、0.54 和 0.6。袁梦牌土壤调理剂处理下(图 1C)除湖北大冶外各处理土壤 pH 值与对照存在显著性差异($P<0.05$),广东韶关、广西河池、湖南湘潭和湖北大冶土壤 pH 值分别升高 1.45、2.06、1.03 和 0.6。改性海泡石处理(图 1E)显著提高了广东韶关土壤 pH($P<0.05$),pH 值升高 1.75。湖南湘潭 pH 升高 0.61,但无统计学意义($P>0.05$)。

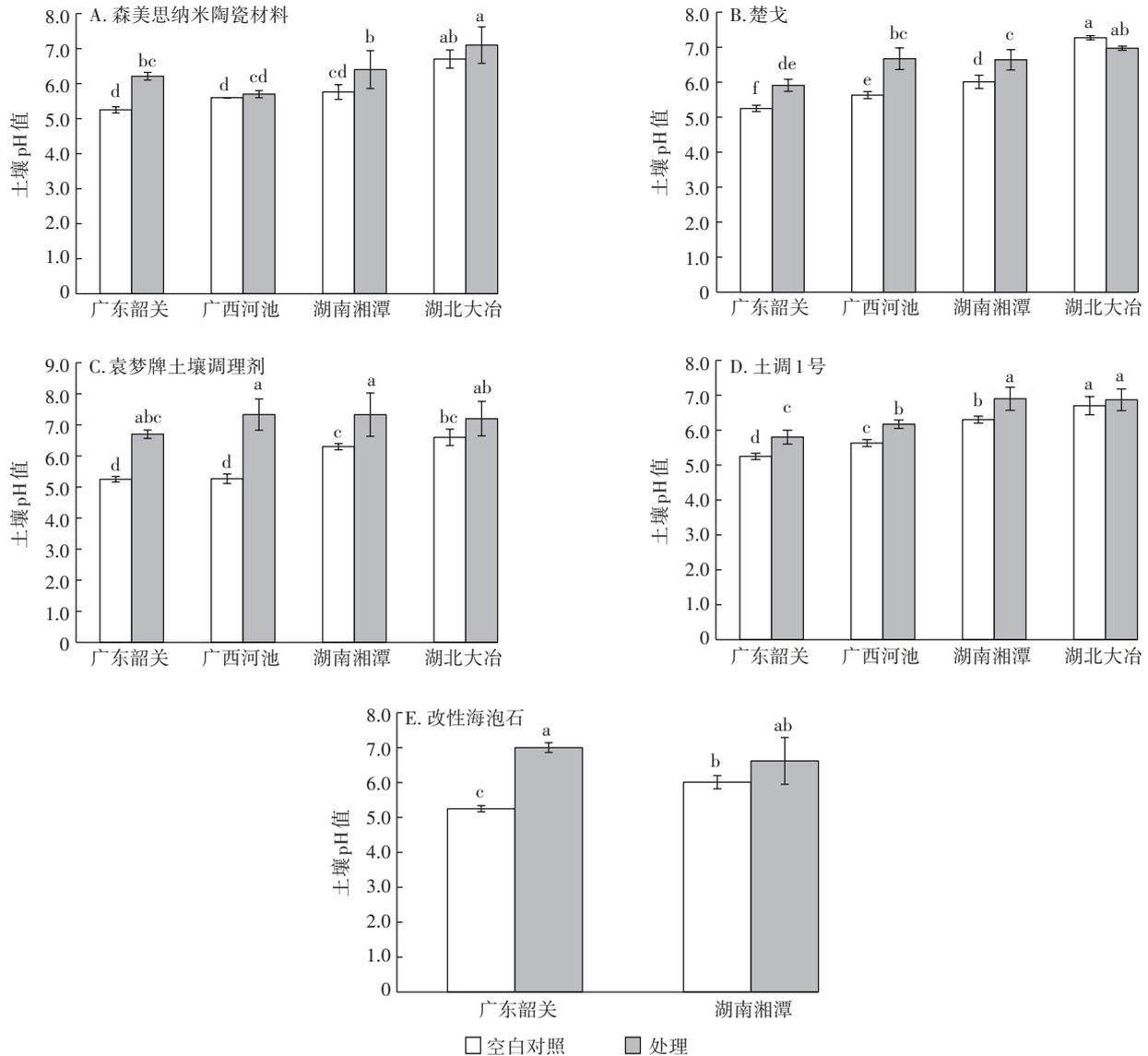
2.2 不同土壤调理剂对土壤 Cd 有效态含量的影响

不同土壤调理剂处理对土壤 Cd 有效态含量的影响如图 2,除个别地区外,加入土壤调理剂后土壤 Cd 有效态含量均有不同程度降低。森美思纳米陶瓷材料和楚戈处理下(图 2A 和图 2B)广东韶关、广西河池和湖北大冶土壤 Cd 有效态含量各处理与对照之间无明显差异($P>0.05$),湖南湘潭各处理与对照存在显著性差异($P<0.05$),土壤 Cd 有效态含量分别降低了

表 2 水稻种植及采集时间

Table 2 Rice planting and collection time

采样点	水稻品种	修复材料撒施时间	水稻移栽时间	水稻收割时间	采样时间
湖南湘潭(XT)	H 优 518	2017-07-22	2017-07-29	2017-11-01	2017-11-01
湖北大冶(DY)	美香珍	2017-06-13	2017-06-20	2017-10-22	2017-10-22
广东韶关(SHG)	美香占 2 号	2017-07-28	2017-08-03	2017-11-03	2017-11-03
广西河池(HCH)	野香优 2 号	2017-07-30	2017-08-06	2017-10-29	2017-10-29



不同小写字母表示各处理组间在0.05水平上存在显著差异。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among the treatment groups at the 0.05 level. The same below

图1 不同土壤调理剂处理后各地区土壤pH

Figure 1 Soil pH of each region after treatment with different soil conditioners

21.2%和35.7%。袁梦牌土壤调理剂处理下(图2C)广西河池、湖南湘潭和湖北大冶土壤Cd有效态含量各处理与对照之间无明显差异($P>0.05$),但使广东韶关土壤Cd有效态含量降低了25.3%。土调1号处理下(图2D)广东韶关和湖南湘潭土壤Cd有效态含量分别降低了16.8%和11.4%,但差异无统计学意义($P>0.05$)。改性海泡石处理下(图2E)湖南湘潭土壤Cd有效态含量与对照之间存在显著性差异($P<0.05$),土壤Cd有效态含量分别降低了22.3%。

2.3 不同土壤调理剂对稻米Cd含量的影响

不同土壤调理剂处理后稻米Cd含量均降低,如

图3。森美思纳米陶瓷材料处理下(图3A)广东韶关稻米Cd含量与对照相比有显著性差异($P<0.05$),稻米Cd含量降低了44.2%。楚戈、袁梦牌土壤调理剂和土调1号处理下(图3B至图3D)广东韶关、广西河池和湖南湘潭稻米Cd含量各处理与对照呈显著差异($P<0.05$),这三个地区楚戈处理下稻米Cd含量降低了60.6%、77%、66.1%,袁梦牌土壤调理剂和土调1号处理下稻米Cd含量分别降低了76.8%、58.7%、80.9%和50.2%、56.8%、78.9%。改性海泡石处理(图3E)显著降低了广东韶关和湖南湘潭稻米Cd含量($P<0.05$),分别降低了82.7%和72.2%。

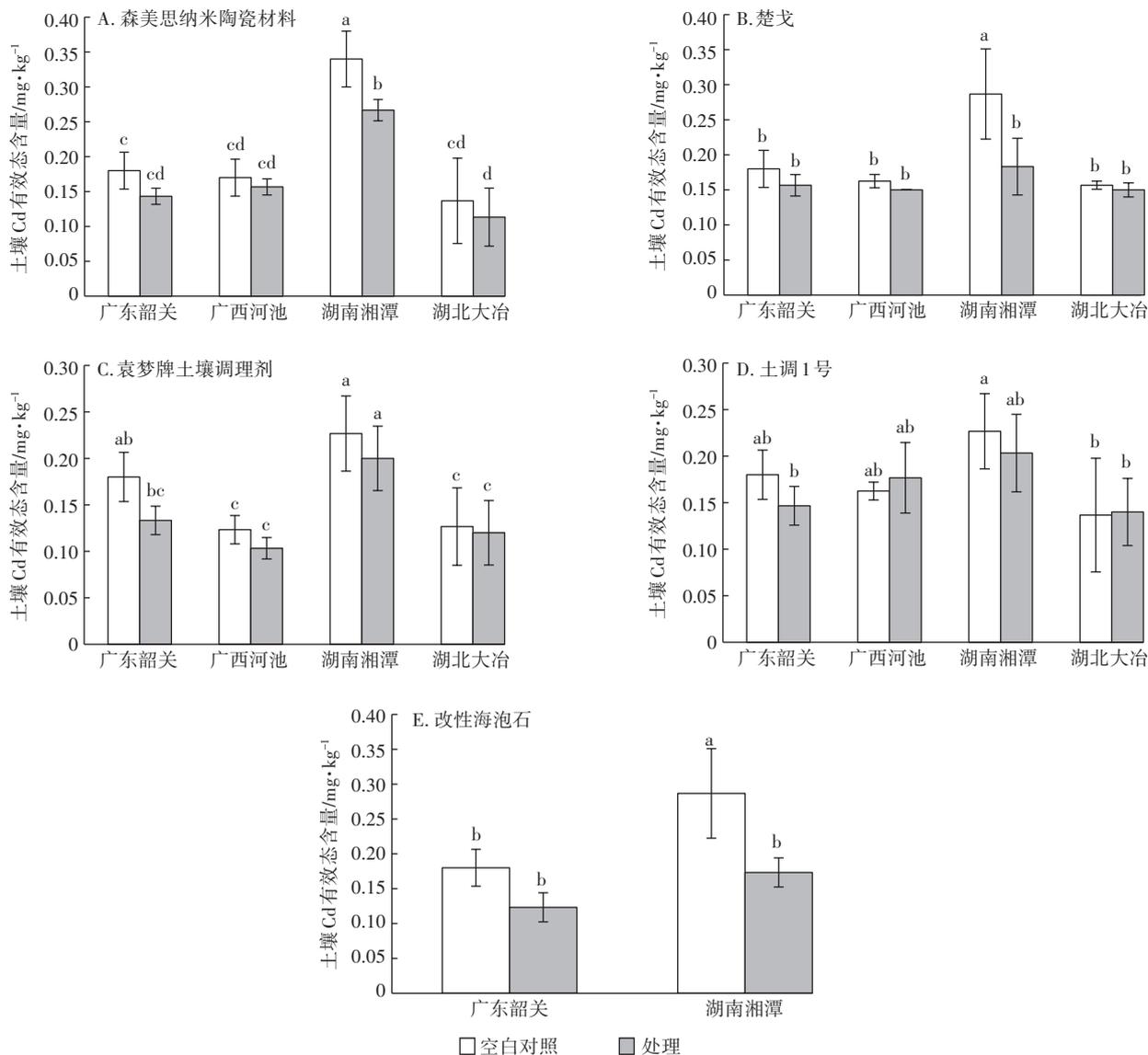


图2 不同土壤调理剂处理后各地区土壤Cd有效态含量

Figure 2 Soil available Cd contents of each region after treatment with different soil conditioners

2.4 不同土壤调理剂对水稻产量的影响

不同土壤调理剂对水稻产量的影响如图4。森美思纳米陶瓷材料、楚戈、袁梦牌土壤调理剂、土调1号、改性海泡石5种土壤调理剂施用后水稻未产生显著减产,有的地区水稻产量还有所增高。广东韶关增产2.2%~2.5%,广西河池增产9.6%~14.7%,湖南湘潭增产2.1%~8.5%,湖北大冶增产2.2%~10.1%。

3 讨论

3.1 pH值与土壤有效态Cd的关系

植物对Cd的吸收受诸多因素影响,例如pH值、CEC、有机质以及离子间的作用等^[17-20]。通常情况下

农作物只吸收土壤中的有效态重金属,不可能吸收全量重金属,而土壤pH值是影响土壤重金属有效性的重要因素之一。土壤pH值不仅影响土壤溶液的离子组成及土壤中的各种化学反应,而且影响土壤重金属的生物有效性、重金属在土壤-植物系统的迁移以及重金属污染的钝化修复效果,对植物生长也十分重要。土壤调理剂可以通过改变这些因素来影响土壤中Cd的有效态,进而影响植物对Cd的吸收。土壤调理剂施用可能会改变土壤pH值。一般来说,土壤pH越高,Cd的有效性越弱。主要原因是pH升高可促进Cd由有效态向络合态与残渣态转化^[21-23],降低了Cd的有效态含量;此外,酸性条件下(pH<6),Cd在

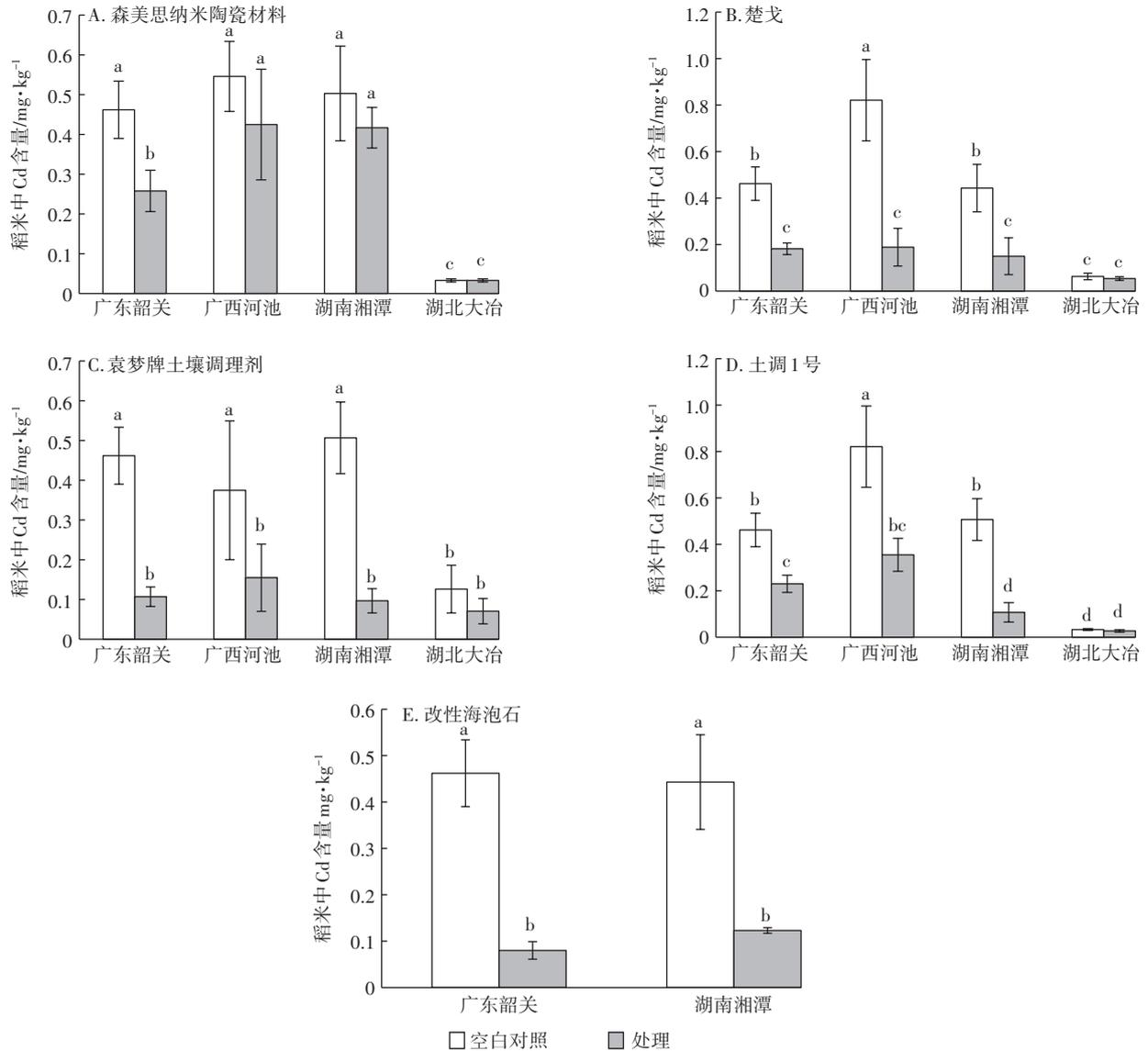


图3 不同土壤调理剂处理后各地区稻米中Cd含量

Figure 3 Cd contents of rice grain of each region after treatment with different soil conditioners

黏土矿物或有机质表面上的吸附为静电吸附,易发生离子交换反应,被土壤溶液中的钙离子、氢离子交换下来,随着pH的增加,静电吸附变为结合力较强的专性吸附,氢离子浓度下降,专性吸附的比例增强,土壤Cd的生物有效性下降^[24]。本实验中在4个地区加入不同土壤调理剂,施用后土壤pH值均有不同程度提高,他们所对应的土壤有效态Cd含量也均有不同程度下降,森美思纳米陶瓷材料和楚戈处理下湖南湘潭土壤pH分别升高0.64和0.63,土壤有效态Cd显著降低21.2%和35.7%;袁梦牌土壤调理剂处理下广东韶关土壤pH升高1.45,土壤有效态Cd显著降低25.3%;土调1号处理下广东韶关和湖南湘潭土壤pH升高

0.55和0.6,土壤有效态Cd显著降低16.8%和11.4%;改性海泡石处理下广东韶关和湖南湘潭土壤pH升高1.75和0.61,土壤有效态Cd分别降低31.8%和22.3%。这是由于这5种土壤调理剂均呈碱性,且含有丰富的碱性基团,可以降低土壤酸性,通过增加钙、镁等阳离子的含量,使得土壤中的重金属有些被交换吸附,有些被固定,土壤氢离子也由于交换吸附降低了浓度,从而达到调节土壤pH值,改良土壤酸性的效果。其中改性海泡石处理下pH升高,土壤有效态Cd降低,一方面由于它本身有较强的碱性,另一方面是因为它具有较大的比表面积和含有大量可交换阳离子的特殊层状结构,这种结构使它更容易吸附重金属

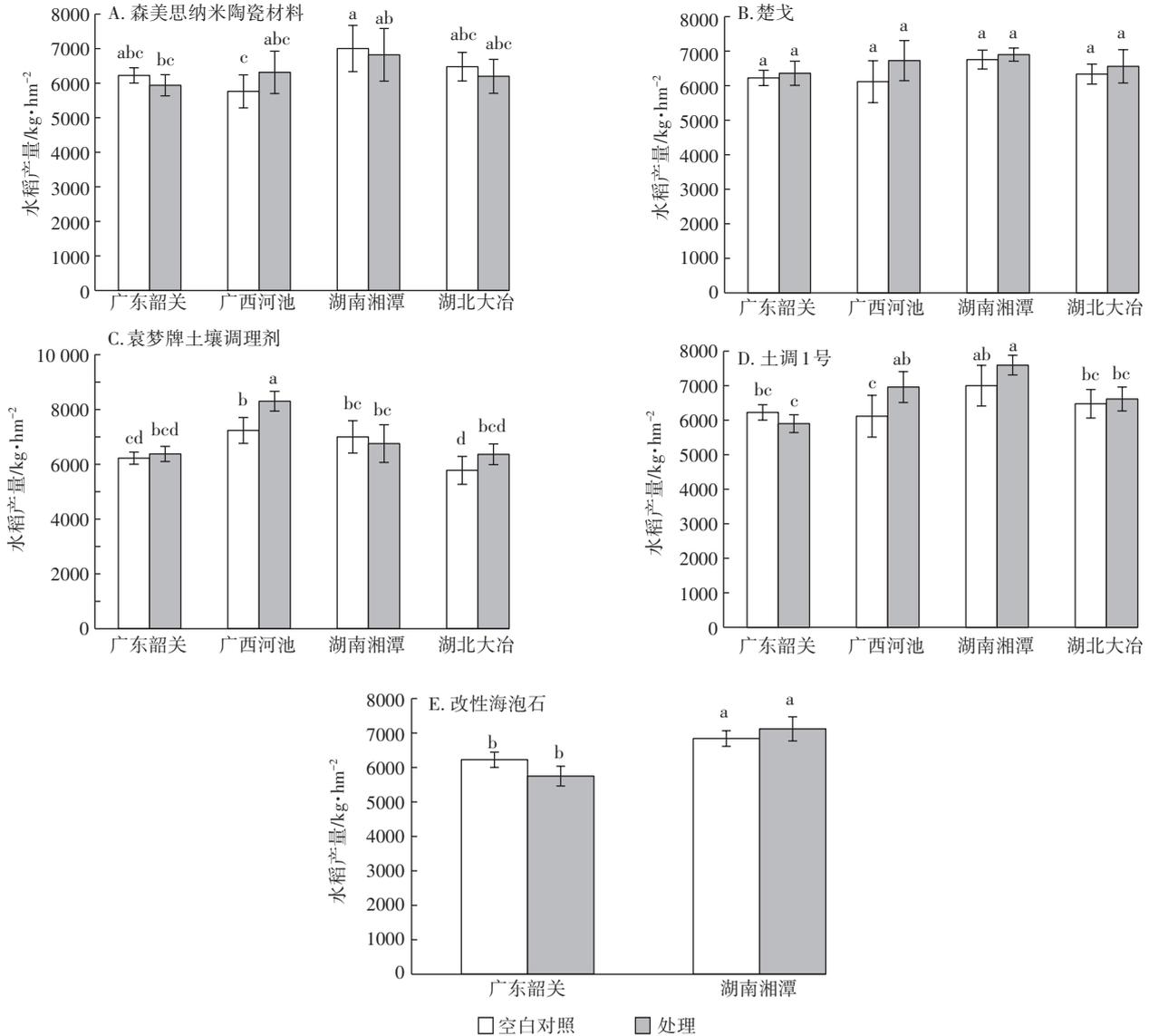


图4 不同土壤调理剂处理后各地区水稻产量

Figure 4 Rice yield of each region after treatment with different soil conditioners

Cd²⁶。随着土壤pH值的升高,土壤氧化物和有机质释放大量质子导致土壤表面的负电荷增多,促进了土壤对Cd的吸附;另外随着土壤pH值的升高,土壤溶液中氢氧根离子和多价阳离子的离子积增大,使生成Cd(OH)₂沉淀的机会增大,这些沉淀增大了土壤对Cd²⁺的吸附力,降低重金属Cd的生物有效性;此外,由于过渡金属和一些重金属离子本身电子层结构的特点^[27-30],容易发生水解反应,在一定的pH范围内,Cd²⁺与OH⁻结合会以水合离子的形式存在,而pH的升高有利于水解反应的进行,当OH⁻存在时,Cd的吸附量就会增加。结果表明,这几种土壤调理剂都能通过提高土壤pH来有效降低污染土壤中的有效态Cd。

3.2 土壤有效态Cd与稻米Cd关系

Cd与其他重金属不同的是,它在土壤中具有较高的植物有效性,并且土壤有效态Cd的浓度在达到毒害植物浓度之前就可以使可食部分Cd含量超过食用标准而危害人类健康^[31-32]。土壤Cd有效态是可浸提态,可浸提态重金属含量与土壤中重金属总量关系密切^[33]。添加土壤调理剂通过影响土壤理化性质,进而影响交换态组分在土壤环境中的移动和转变。在本实验中4个地区施用不同土壤调理剂后,当土壤有效态Cd含量降低时,稻米中Cd含量也随之降低。重金属自由离子的活跃程度决定了土壤中其生物有效性及对生物的毒害性,而交换态的可转移性和生物有

效性是最强的,是评价土壤重金属污染的重要指标之一。本实验施用土壤调理剂主要通过土壤中有效态Cd含量的变化来影响作物对Cd的吸收累积,这5种土壤调理剂中较高的钙含量也可能是影响作物吸收累积Cd的一个重要因素。研究表明,钙与Cd在进入作物的根表细胞时存在竞争作用^[34],由于 Ca^{2+} 与 Cd^{2+} 的竞争作用,土壤中大量 Ca^{2+} 与 Cd^{2+} 竞争作物根细胞膜上的吸收位点,从而导致作物对Cd的吸收累积量减少。研究表明,稻米富集Cd与土壤有效态Cd显著正相关^[35]。森美思纳米陶瓷材料处理下广东韶关和湖南湘潭土壤有效态Cd降低了19.4%、21.2%,稻米中Cd显著降低44.2%和17.1%;楚戈处理下湖南湘潭土壤有效态Cd降低35.7%,稻米中Cd显著降低66.1%;袁梦牌土壤调理剂处理下广东韶关土壤有效态Cd降低25.3%,稻米中Cd显著降低了76.8%;广东韶关和湖南湘潭两地,土调1号和改性海泡石处理下土壤有效态Cd分别降低16.8%、11.4%和31.8%、22.3%,稻米中Cd分别降低了76.8%、80.8%和82.7%、72.2%。土壤调理剂具有独特的结构和性质,可以改变土壤微环境,进而影响土壤中Cd的有效态以及作物吸收。实验中5种土壤调理剂主要组分为 CaO 、 SiO_2 、 MgO ,因此施用这些土壤调理剂后可以形成Cd的碳酸盐、硅酸盐沉淀,降低土壤有效态Cd的迁移性和生物有效性,防止了土壤有效态Cd向水稻中的迁移,从而降低了稻米中的Cd含量。同时,Ca、Si、Mg能促进农作物正常生长,一方面可以增加产量提高作物品质,另一方面还能增强作物抗胁迫的能力,实验中各地区产量不同程度的增加也验证了这一点。不同土壤调理剂对土壤重金属有效态影响不同,对农作物Cd吸收量也存在差异,不同地区适宜施用的土壤调理剂也有所不同,袁梦牌土壤调理剂在广东韶关效果较好;广西河池更适宜施用楚戈,其次是袁梦牌土壤调理剂、森美思纳米陶瓷材料;在湖南湘潭施用效果较好的土壤调理剂依次为楚戈、土调1号和改性海泡石;在湖北大冶施用袁梦牌土壤调理剂更适合。

4 结论

(1)通过田间试验,在耕地Cd污染治理与修复中,施入5种不同土壤调理剂,土壤pH发生显著变化,从而改变土壤Cd的有效性,使土壤有效态Cd的含量显著($P<0.05$)下降。

(2)田间试验表明,不同土壤调理剂的添加可有效降低稻米中Cd含量,森美思纳米陶瓷材料处理降

低了17.1%~44.2%,楚戈处理降低了14.3%~66.1%,袁梦牌土壤调理剂处理降低了43.6%~76.8%,土调1号处理降低了18.2%~80.8%,改性海泡石处理降低了72.2%~82.7%。

(3)施用土壤调理剂对水稻产量的影响表明,5种土壤调理剂对水稻产量均未产生显著影响,部分地区水稻产量还有所提高。

参考文献:

- [1] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4):477-483.
ZHUANG Guo-tai. Current situation of national soil pollution and strategies on prevention and control[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(4):477-483.
- [2] 范芙蓉, 罗琳, 廖育林, 等. 赤泥施用量对镉污染稻田水稻生长和镉形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):390-396.
FAN Mei-rong, LUO Lin, LIAO Yu-lin, et al. Effects of red mud application on rice growth and transformation of cadmium forms in Cd-contaminated paddy soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2):390-396.
- [3] 彭华, 戴金鹏, 纪雄辉, 等. 稻田土壤与稻米中的镉含量关系初探[J]. 湖南农业科学, 2013(7):68-72.
PENG Hua, DAI Jin-peng, JI Xiong-hui, et al. Correlation between cadmium content in paddy soil and in rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(7):68-72.
- [4] 范芙蓉, 罗琳, 廖育林. 不同改良剂对镉污染土壤的改良效果和对水稻光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2012, 38(4):430-434.
FAN Mei-rong, LUO Lin, LIAO Yu-lin, et al. Effects of different soil amendments on the remediation of Cd-contaminated soil and the photosynthetic characteristics of rice plant[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2012, 38(4):430-434.
- [5] 陶雪, 杨璇, 季荣, 等. 固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J]. 土壤, 2016, 48(1):1-11.
TAO Xue, YANG Hu, JI Rong, et al. Stabilizers and their applications in remediation of heavy metal-contaminated soil[J]. *Soil*, 2016, 48(1):1-11.
- [6] 郝汉舟, 陈同斌, 靳孟贵, 等. 重金属污染土壤稳定/固化修复技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3):816-824.
HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, JIN Meng-gui, et al. Recent advance in solidification/stabilization technology for the remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3):816-824.
- [7] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7):1441-1453.
CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, DAI Ge-lian, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(7):1441-1453.

- [8] 黎大荣, 杨惟薇, 黎秋君, 等. 蚕沙和赤泥用于铅镉污染土壤改良的研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 977-984.
LI Da-rong, YANG Wei-wei, LI Qiu-jun, et al. Application of silkworm excrement and red mud for soil remediation contaminated by lead and cadmium[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4): 977-984.
- [9] 李江遐, 吴春林, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.
LI Jiang-xia, WU Chun-lin, ZHANG Jun, et al. Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12): 2075-2081.
- [10] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 不同肥料/改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收及土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 773-781.
CHEN Kun, QIN Yu-sheng, YU Hua, et al. Impacts of different fertilizers/amendments on rice yield and nutrient uptake and soil properties in the waterlogged paddy field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 773-781.
- [11] 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.
- [12] 代允超, 吕家琬, 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.
- [13] Ramírez-Pérez A M, Paradelo M, Nóvoa-Munoz J C, et al. Heavy metal retention in copper mine soil treated with musselshells: Batch and column experiments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 248/249: 122-130.
- [14] Chang Y T, Hsi H C, Hseu Z Y, et al. Chemical stabilization of cadmium in acidic soil using alkaline agronomic and industrial by-products[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2013, 48(13): 1748-1756.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
LU Ru-kun. Method of analysis in soil and agro-chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [16] 王秀斌, 唐枪虎, 荣勤雷, 等. 不同措施改良反酸田及水稻产量效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 404-412.
WANG Xiu-bin, TANG Shuan-hu, RONG Qin-lei, et al. Effects of different ameliorant measures on the chemical and physical properties of soil in acid sulfate paddy field and rice yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 404-412.
- [17] 梁学峰, 徐应明, 王林, 等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 1011-1018.
LIANG Xue-feng, XU Ying-ming, WANG Lin, et al. In-situ immobilization of cadmium and lead in contaminated agricultural field by natural clays combined with phosphate fertilizer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5): 1011-1018.
- [18] 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): 692-697.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, WANG Guo-xiang, Effects of red-mud on rice growth and cadmium uptake in cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 692-697.
- [19] 王林, 徐应明, 孙扬, 等. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2093-2098.
WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Yang, et al. Immobilization of cadmium contaminated soils using sepiolite and its compound materials[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9): 2093-2098.
- [20] 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, HUANG 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.
- [21] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 土壤调理剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 890-897.
LUO Yuan-heng, GU Xue-yuan, WU Yong-gui, et al. In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 890-897.
- [22] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 314-320.
WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(2): 314-320.
- [23] 陈杰, 宋靖珂, 张晶, 等. 不同土壤调理剂对铜污染土壤原位钝化修复[J]. 土壤, 2016, 48(4): 742-747.
CHEN Jie, SONG Jing-ke, ZHANG Jing, et al. In-situ-immobilization by different passivators in copper contaminated soils[J]. *Soil*, 2016, 48(4): 742-747.
- [24] 王宇霞, 郝秀珍, 苏玉红, 等. 不同土壤调理剂对Cu、Cr和Ni复合污染土壤的修复研究[J]. 土壤, 2016, 48(1): 123-130.
WANG Yu-xia, HAO Xiu-zhen, SU Yu-hong, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil with different amendments[J]. *Soil*, 2016, 48(1): 123-130.
- [25] Li C C, Dang F, Cang L, et al. Integration of metal chemical forms and subcellular partitioning to understand metal toxicity in two lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars[J]. *Plant and Soil*, 2014, 384: 201-212.
- [26] Ok Y S, Oh S E, Ahmad M, et al. Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6): 1301-1308.
- [27] 刘维涛, 周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅

- 含量的作用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9):1846-1853.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Effectiveness of different soil ameliorants in reducing concentrations of Cd and Pb in Chinese cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(9):1846-1853.
- [28] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2):437-444.
- ZHOU Hang, ZHOU Xin, ZENG Min, et al. Effects of two combined amendments on heavy metal bioaccumulation in paddy soil[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(2):437-444.
- [29] 孙约兵, 徐应明, 史新, 等. 海泡石对镉污染红壤的钝化效应研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1465-1472.
- SUN Yue-bing, XU Ying-ming, SHI Xin, et al. The effects of sepiolite on immobilization remediation of Cd contaminated red soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(6):1465-1472.
- [30] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):409-417.
- HUANG Yi-zong, HAO Xia-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):409-417.
- [31] Friesl W, Friedl J, Platzer K, et al. Remediation of contaminated agricultural soils near a former Pb/Zn smelter in Austria: Batch, pot and field experiments[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1):40-50.
- [32] 曾卉, 徐超, 周航, 等. 几种固化剂组配修复重金属污染土壤[J]. 环境化学, 2012, 31(9):1368-1374.
- ZENG Hui, XU Chao, ZHOU Hang, et al. Effects of mixed curing agents on the remediation of soils with heavy metal pollution[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(9):1368-1374.
- [33] Xu N, Li Y N, Zheng L, et al. Synthesis and application of magnesium amorphous calcium carbonate for removal of high concentration of phosphate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 251:102-110.
- [34] Roosens N, Verbruggen N P, Ximenez-Embun P, et al. Natural variation in cadmium tolerance and its relationship to metal hyperaccumulation for seven populations of *Thlaspi caerulescens* from western Europe[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 26(10):1657-1672.
- [35] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同土壤调理剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1):309-313.
- WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, et al. Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1):309-313.