

赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响

方雅瑜^{1,2}, 邹慧玲^{2,3}, 尹晓辉^{1,2}, 陈楠^{1,2}, 杨登^{1,2}, 魏祥东^{1,2*}

(1.湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128; 2.南方稻田重金属污染防治协同创新中心, 湖南长沙 410128; 3.湖南农业大学图书馆, 湖南长沙 410128)

摘要:通过大田正交试验,研究添加赤泥和有机肥对Cd、Pb在土壤-水稻系统中分布规律的影响。结果表明,添加赤泥或有机肥后,水稻根际土壤pH值升高0.36~1.90个单位,根际土壤中Cd、Pb含量分别降低2.73%~26.25%和7.15%~34.26%,糙米中Cd和Pb含量分别降低23.24%~55.90%和11.76%~29.41%,其中单施赤泥效果最好,其次是配施,单施有机肥最差。添加赤泥和有机肥后,水稻各器官中Cd和Pb含量显著降低,不同生育期Cd和Pb的贡献率明显改变,且添加量及施肥方式(单施、配施)也有显著影响。与CK相比,降Cd效果最好的是单施赤泥4 000 kg·hm⁻²,降幅为55.90%;降Pb效果最好的是赤泥(4 000 kg·hm⁻²)与有机肥(1 000 kg·hm⁻²)配施,降幅为29.41%。由于土壤中Cd(超标65倍)、Pb(超标7倍)污染程度较高,糙米中Cd、Pb含量仍超过食品污染物限量(GB 2762—2012)。因此,在重金属污染程度较高的稻田,仅通过添加土壤调理剂不能达到安全生产的目的。

关键词:镉;铅;水稻;赤泥;有机肥;正交试验

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)05-0466-11 doi: 10.13254/j.jare.2016.0080

引用格式:

方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 等. 赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5):466-476.

FANG Ya-yu, ZOU Hui-ling, YIN Xiao-hui, et al. Effects of Red-mud and Organic Fertilizer on Cadmium and Lead Absorption and Distribution in Rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5):466-476.

Effects of Red-mud and Organic Fertilizer on Cadmium and Lead Absorption and Distribution in Rice

FANG Ya-yu^{1,2}, ZOU Hui-ling^{2,3}, YIN Xiao-hui^{1,2}, CHEN Nan^{1,2}, YANG Deng^{1,2}, WEI Xiang-dong^{1,2*}

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.South Regional Collaborative Innovation Center for Heavy Metals Control in Rice Fields, Changsha 410128, China; 3.Library of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Effects of red mud and organic fertilizer on distribution of cadmium(Cd) and lead(Pb) in soil-rice system were studied in field by orthogonal test. Results showed that after red mud and organic fertilizer added including single and combined, the soil pH value increased 0.36~1.90 units, contents of Cd and Pb in rice rhizosphere soil decreased 2.73%~26.25% and 7.15%~34.26% respectively and contents of Cd and Pb in brown rice decreased 23.24%~55.90% and 11.76%~29.41% respectively. In all treatments, single red mud was best, followed by red mud and organic fertilizer combined, single organic fertilizer was worst. The content of Cd and Pb in different rice organs with addition of red mud and organic fertilizer decreased significantly, the contribution rate of Cd and Pb at different stages changed obviously, and influences of adding quantity and fertilizing method were also significant. Different treatments had different effects on contents of Cd and Pb in brown rice. Compared with CK, red mud(4 000 kg·hm⁻²) was the best for Cd, combination of red mud(4 000 kg·hm⁻²) and organic fertilizer(1 000 kg·hm⁻²) was the best for Pb, the contents of which were 55.90% and 29.41% less than the control respectively. Although contents of Cd and Pb in brown rice decreased significantly after red mud and organic fertilizer added, contents of Cd and Pb in brown rice were still higher than national food safety standards(GB 2762—2012) because of high polluted degree of Cd(65 times than standard) and Pb(7 times than standard) in soil. All results showed it was ineffective to control heavy metal pollution in brown rice only by red mud and organic fertilizer addition in high polluted degree soils.

Keywords: Cd; Pb; rice; red mud; organic fertilizer; orthogonal experiment

收稿日期:2015-12-18

基金项目:国家自然科学基金(4121511);湖南省自然科学基金(08JJ6018);湖南省教育厅青年基金(12B059);湖南省农业厅项目(2014137)

作者简介:方雅瑜(1991—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为环境污染检测与治理。E-mail:330422365@qq.com

*通信作者:魏祥东 E-mail:xiangdongw@126.com

粮食安全是关系到我国国民经济发展、社会和谐稳定、国家安全自立的全局性重大战略问题^[1-2]。稻米作为我国第二大粮食作物、南方地区第一大粮食作物,其质量安全在我国粮食安全中的地位举足轻重。然而,随着工矿业迅速发展及各种农用化学品广泛使用,我国耕地和稻米中重金属污染日益加重,尤其是稻米 Cd、Pb 超标问题越来越严重。统计资料显示^[3-5],全国 1/6 国土存在重金属污染,我国受污染耕地超标率达 19.4%,Cd 和 Pb 的点位超标率达 7.0%和 1.5%;耕地重金属污染加重直接导致粮食重金属超标,全国每年因重金属污染的粮食高达 1 200 万 t,南方稻米 Cd 超标达 10%以上。近 20 多年来,有关耕地和稻米 Cd 超标问题日益突出,特别在 2011 年和 2013 年媒体曝光并炒作湖南米 Cd 超标问题后,耕地和稻米 Cd 超标问题更是引发了全社会的高度关注^[6-7]。因此,找到一种能有效降低稻米中 Cd、Pb 的含量,实现湖南省水稻安全生产的技术措施尤为迫切。

近年来,国内外学者一直在探索利用添加外源土壤调理剂来降低稻米 Cd、Pb 含量,常见的土壤调理剂有生物炭、海泡石、石灰、硅肥、蒙脱土、重钙、钙镁磷肥、磷矿石和普钙等^[8-10],也有学者研究了赤泥或有机肥对土壤中 Cd、Pb 形态的影响及其降低稻米中 Cd 和 Pb 含量的可能性^[11-13]。范美蓉等^[14]研究发现,赤泥、石灰和海泡石对 Cd 污染土壤有改良效果,能有效稳定土壤交换态 Cd,加强固定土壤中 Cd,其中赤泥对 Cd 的钝化效果较好。郝晓伟等^[15]试验发现不同添加量的赤泥均可显著降低污染土壤中 Pb 的 HOAc 提取态含量;刘秀珍等^[16]研究发现,有机肥可通过改变污染土壤中的 Cd 形态而降低其生物有效性;谢运河等^[17]研究表明施用不同有机肥能降低水稻植株对土壤 Cd 的富集能力。尽管很多学者研究发现赤泥和有机肥对土壤中 Cd、Pb 有钝化效果,但相关研究主要集中在单施赤泥和有机肥的盆栽试验,大田试验结果相对缺乏,且赤泥与有机肥配施对 Cd、Pb 在水稻植株中分布规律影响的研究更少。本文通过正交试验,研究赤泥和有机肥单施和互作对 Cd、Pb 在水稻植株中分布规律的影响,以期为湖南 Cd、Pb 污染农田提供合理有效的治理措施,并为探讨其对阻抗水稻 Cd、Pb 污染机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

在湖南省株洲市霞湾村某重金属污染稻田(北纬

27°48′3.6″,东经 113°01′1.3″)进行田间试验。试验区位于亚热带季风湿润气候,年平均降雨量 1 412.7 mm,年平均气温为 16.8 ℃,无霜期 286 d 以上,年日照时间约 1 700 h。试验土壤为红壤,试验前土壤耕层(0~20 cm)基本理化性质及重金属含量为:pH 5.00,有机质 31.99 g·kg⁻¹,全氮 1.97 g·kg⁻¹,全磷 0.62 g·kg⁻¹,全钾 25.81 g·kg⁻¹,全量 Cd 16.16 mg·kg⁻¹,全量 Pb 562.64 mg·kg⁻¹,全量 Zn 1 244.09 mg·kg⁻¹,全量 Cu 81.71 mg·kg⁻¹。试验土壤 Cd、Pb 和 Zn 含量均超过土壤环境质量标准 II 级标准(GB 15618—2008),Cd、Pb 和 Zn 分别超标 65、7 倍和 8 倍,属于重金属复合污染稻田,且污染程度较高。由于 Cd 和 Pb 的毒性大、活性强,且食品污染物限量(GB 2762—2012)已不考虑 Zn,故本文只分析添加赤泥和有机肥对 Cd 和 Pb 在土壤-水稻系统中分布规律的影响。

1.2 供试材料

供试赤泥由河南长兴实业有限公司提供,为拜耳-烧结联合法赤泥,其基本理化性质:pH 11.25,有机质含量 5.0 g·kg⁻¹,Cu 含量 27.58 mg·kg⁻¹,Zn 含量 31.13 mg·kg⁻¹,Pb 含量 36.75 mg·kg⁻¹,Cd 含量 0.13 mg·kg⁻¹。

供试有机肥由德人牧业有限公司提供,其基本理化性质:pH 8.38,有机质含量 368.3 g·kg⁻¹,全氮含量 15.1 g·kg⁻¹,全钾含量 79.8 g·kg⁻¹,全磷含量 30.6 g·kg⁻¹,Cu 含量 14.92 mg·kg⁻¹,Zn 含量 76.48 mg·kg⁻¹,Pb 含量 4.49 mg·kg⁻¹,Cd 含量 0.14 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计

采用两因素正交法进行野外大田试验,每个小区面积为 2 m×5 m,共个 46 小区。小区随机区组排列,小区用田埂隔开;田埂覆盖一层薄膜,以防串水,并采用单排单灌,以防止添加物互相影响。添加物为赤泥和有机肥。其中赤泥添加量为 0、2 000、4 000、6 000 kg·hm⁻²,有机肥添加量为 0、1 000、2 000 kg·hm⁻²。同时,设置 4 个对照,设计处理见表 1。水稻品种为两优 5218,全生育期 135 d 左右。种植时间为 2014 年 6 月 6 日,收割时间为 2014 年 9 月 25 日,按当地种植习惯进行田间管理(如追肥、除草、除虫、灌溉等)。

1.4 样品采集与预处理

分别在水稻分蘖期、抽穗期、灌浆期和成熟期采集水稻和土壤样品。在每个小区内随机选取 3~5 兜植株(分蘖期 10~15 兜),并将根际土壤取出混合均匀后,采用四分法保留 2 kg 土壤样品并装于样品袋中,立即带回实验室并放置于阴凉、通风处自然风干后,

表 1 试验组合设计(kg·hm⁻²)
Table 1 Orthogonal design of the experiment(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	CK	R1	R2	R3	O1	O2	R1O1	R2O1	R3O1	R1O2	R2O2	R3O2
赤泥 Red mud	0	2 000	4 000	6 000	0	0	2 000	4 000	6 000	2 000	4 000	6 000
有机肥 Organic fertilizer	0	0	0	0	1 000	2 000	1 000	2 000	1 000	2 000	1 000	2 000

注:处理中“R”代表赤泥;“O”代表有机肥。下同。

Note: “R” indicates red mud; “O” indicates organic fertilizer. The same below.

研碎、过筛(10 目及 100 目),并保存于干燥器中备用。采集的植物样品洗净后装于样品袋内运回实验室后,再用自来水洗干净后,用去离子水冲洗 3 次,并将其分为根、茎、叶、果实 4 个部分。其中根、茎、叶分别切碎混匀后,用四分法保留 1 kg 样品。所有植物样品装入牛皮纸信封中,90 ℃杀青 2 h,然后 65 ℃烘干至恒重,并用植物破碎机粉碎、过筛 100 目后,保存于干燥器中备用。

1.5 植物重金属总量分析与测定

植物样品经混合酸(HNO₃:HClO₄=4:1)消化、土壤样品经王水:高氯酸(5:1)消化,再进行定容、过滤,保存于 4 ℃冰箱中备用。消煮液中 Pb 及 Cd 含量在 0.1 mg·kg⁻¹ 以上的样品经 ICP-OES(PerkinElmer, Optima 8300),Cd 含量在 0.1 mg·kg⁻¹ 以下的样品经石墨炉原子吸收分光光度计(VARIAN, AA240FS+GTA120)进行分析检测^[18]。

1.6 数据分析

试验数据均以烘干计,并应用 SPSS19.0 进行相关统计分析,用 Microsoft Excel 2013 处理试验数据和绘制图表。

2 结果与分析

2.1 赤泥和有机肥对水稻根际土壤 pH 值及 Cd、Pb 含量的影响

2.1.1 赤泥和有机肥对水稻根际土壤 pH 值的影响

随着水稻生长,所有处理根际土壤 pH 值逐渐下降(表 2)。添加赤泥和有机肥能显著提升根际土壤 pH 值,且不同添加量影响显著不同。从成熟期土壤 pH 值变化来看,添加赤泥和有机肥后,土壤 pH 值提升 0.36~1.90 个单位。其中,单施赤泥提升幅度最大,提升 1.57~1.90 个单位;其次是配施(提升 0.88~1.30 个单位),单施有机肥最低,提升 0.36~0.90 个单位。

随着赤泥和有机肥添加量增加,水稻根际土壤 pH 值提升幅度增加(无论单施和配施)。其中,赤泥添加量为 6 000 kg·hm⁻² 时,土壤 pH 值提升 0.89~1.90 个单位,比 2 000 kg·hm⁻² 高约 1 倍;有机肥添加

量为 2 000 kg·hm⁻² 时,土壤 pH 值提升 0.74~1.74 个单位,比 1 000 kg·hm⁻² 高约 1 倍。

2.1.2 赤泥和有机肥对水稻根际土壤 Cd、Pb 含量的影响

与 CK 相比,添加赤泥和有机肥后,水稻根际土壤中 Cd、Pb 含量分别降低 2.73%~26.25% 和 7.15%~34.26%。与单施相比,赤泥和有机肥配施时,根际土壤中 Cd、Pb 含量降幅更高(Cd、Pb 的降幅分别为 4.68%~26.25% 和 6.13%~28.95%),分别比单施赤泥和单施有机肥降低 0.76~1.42 倍和 1.23~11.79 倍。

从不同生育期来看,添加赤泥或有机肥后,Cd 在分蘖期、抽穗期、灌浆期和成熟期降幅分别为 4.68%~25.29%、13.56%~26.25%、9.36%~21.87% 和 2.73%~13.95%;Pb 在分蘖期、抽穗期、灌浆期和成熟期降幅分别为 7.15%~23.82%、9.97%~28.95%、2.95%~28.13% 和 11.24%~25.95%。随着赤泥和有机肥添加量(包括单施和配施)的增加,水稻根际土壤中 Cd、Pb 含量均降低。单施时,赤泥添加量为 4 000 kg·hm⁻² 时土壤中 Cd(降低 9.98%~16.98%)、Pb 含量(降低 14.69%~17.88%)降幅达到最大,分别是添加量为 2 000 kg·hm⁻² 和添加量为 6 000 kg·hm⁻² 的 0.95~3.03 倍和 0.78~1.41 倍;有机肥添加量为 2 000 kg·hm⁻² 是添加量为 1 000 kg·hm⁻² 的 0.82~1.33 倍。配施时,赤泥 4 000 kg·hm⁻² 和有机肥 1 000 kg·hm⁻² 组合对降低水稻根际土壤 Cd、Pb 含量整体效果最佳,分别可达到其他配施处理的 2.32~3.78 倍和 0.79~2.88 倍。

种植一季水稻后,土壤中 Cd 和 Pb 含量分别下降了 0.19%~14.11% 和 2.64%~27.90%。

2.2 赤泥和有机肥对水稻植株中 Cd 和 Pb 分布规律的影响

2.2.1 赤泥和有机肥对不同生育期水稻植株中 Cd 和 Pb 含量的影响

与 CK 相比,添加赤泥与有机肥(包括单施、配施)后,虽然不同生育期水稻根、茎、叶中 Cd 和 Pb 含量都显著降低,但随着水稻生长,其根、茎和叶中 Cd 和 Pb 含量仍逐渐增加(灌浆期 Pb 含量除外)(图 1、

图 2 和表 2)。从所有处理不同生育期水稻根、茎和叶中 Cd、Pb 含量来看,Cd 为成熟期>灌浆期>抽穗期>分蘖期,Pb 为成熟期>分蘖期>灌浆期>抽穗期,且与 CK 一致。

从不同生育期 Cd 和 Pb 贡献率(不同生育期贡献率=某生育期重金属含量/成熟期重金属含量)来看,添加赤泥和有机肥对不同生育期 Cd、Pb 贡献率有显著影响,且施肥方式和施肥量也有显著影响(图 1、图 2 和表 2)。其中赤泥单施影响最大,其次为赤泥和有机肥配施,有机肥单施最小。与 CK 相比,添加赤泥与有机肥(包括单施和配施)后,分蘖期 Cd 贡献率增加 4.62%~18.53%,抽穗期、灌浆期和成熟期 Cd 贡献率分别减少 0.16%~19.12%、1.09%~7.83%和 3.35%~13.82%;分蘖期 Pb 的贡献率增加 1.91%~15.72%,成熟期减少 3.58%~33.83%,抽穗期和灌浆期 Pb 的贡献率无明显变化规律。随着赤泥添加量(包括单施和配施)的增加,不同生育期 Cd、Pb 贡献率先降低后升高;随着有机肥添加量(包括单施和配施)增加,Cd、

Pb 的贡献率均升高。

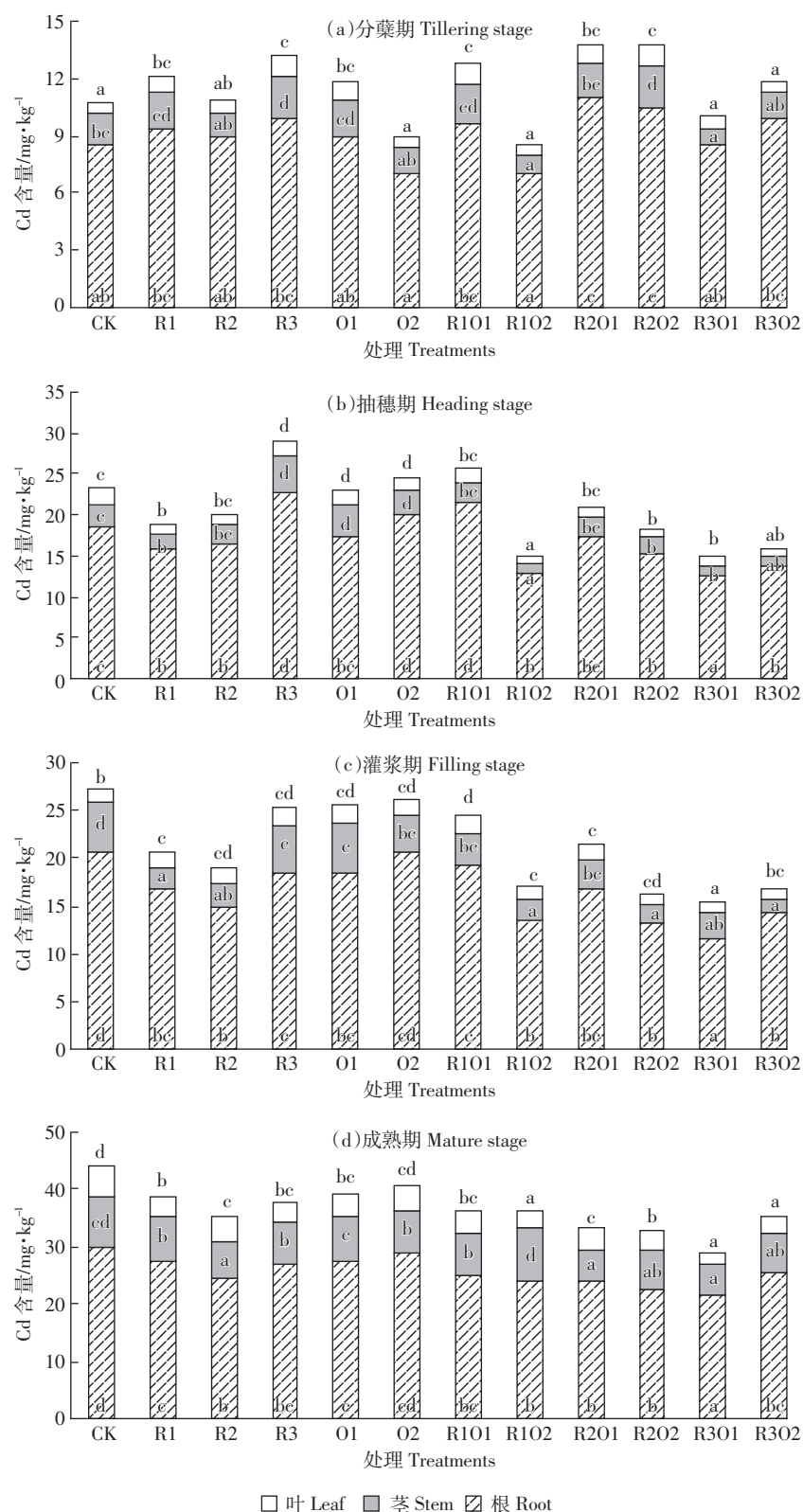
2.2.2 赤泥和有机肥对水稻植株中 Cd 和 Pb 分布规律的影响

添加赤泥与有机肥能显著降低水稻体内 Cd 和 Pb 含量,但不同处理降低幅度显著不同,且不同重金属也显著不同(图 1、图 2 和表 3)。与 CK 相比,添加赤泥与有机肥后,成熟期水稻根、茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量分别降低 2.90%~46.97%、24.76%~56.83%、10.48%~53.91%、16.05%~46.33%和 23.24%~55.90%,Pb 含量分别降低 10.40%~40.32%、2.37%~39.23%、18.19%~64.66%、24.91%~45.55%和 11.76%~29.41%。其中,配施(赤泥和有机肥)降低幅度相对而言最大,对 Cd 的降幅分别是单施赤泥和单施有机肥的 0.85~1.70 倍和 1.90~4.80 倍,对 Pb 的降幅 0.83~1.38 倍和 0.85~2.85 倍。随着赤泥(包括单施和配施)添加量的增加,整株水稻内 Cd 和 Pb 含量先降低后升高;随着有机肥(包括单施和配施)添加量的增加,水稻体内 Cd 和 Pb 含量均升高。

表 2 不同生育期水稻根际土壤 pH 值和 Cd、Pb 含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 pH, Cd and Pb content of root soils in different growth stages(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage			抽穗期 Heading stage			灌浆期 Filling stage			成熟期 Mature stage		
	pH 值	Cd	Pb	pH 值	Cd	Pb	pH 值	Cd	Pb	pH 值	Cd	Pb
CK	5.16a	16.07± 0.21d	578.01± 19.44d	5.11a	16.00± 0.13d	569.98± 29.45d	5.10a	16.14± 0.24d	558.24± 16.26d	5.07a	16.13± 0.31d	547.19± 29.93c
R1	6.76cd	14.57± 0.27c	526.93± 17.85c	6.22bc	13.17± 0.24bc	501.35± 32.93bc	6.07b	13.95± 0.12bc	512.99± 17.58bc	5.75b	15.60± 0.26c	485.70± 24.87b
R2	6.73cd	14.34± 0.11bc	474.83± 22.54b	6.49c	12.89± 0.08b	468.09± 26.34b	6.18c	13.00± 0.27ab	476.23± 14.54b	6.01b	14.52± 0.40ab	463.56± 40.21b
R3	7.06d	14.13± 0.30bc	487.09± 29.72b	6.49c	12.69± 0.16b	496.31± 33.30bc	6.04b	12.61± 0.33a	434.48± 13.41b	6.35c	14.65± 0.17b	471.46± 35.73b
O1	5.95b	13.83± 0.15b	529.55± 20.09c	5.92b	13.45± 0.21bc	513.14± 29.93bc	5.81ab	12.69± 0.06a	539.70± 19.51c	5.43a	15.69± 0.25c	485.51± 24.08b
O2	6.00b	14.23± 0.09bc	536.67± 23.59c	6.15bc	13.83± 0.07c	567.01± 13.74c	5.91ab	14.51± 0.23c	541.76± 23.07c	5.81b	15.48± 0.19bc	464.96± 44.01b
R1O1	6.48bc	14.32± 0.14bc	504.97± 35.14bc	5.98b	12.37± 0.12ab	486.26± 31.45b	5.95b	14.63± 0.11c	524.04± 10.84bc	5.68b	15.06± 0.10b	463.60± 35.59b
R1O2	6.90cd	13.98± 0.21b	524.87± 34.27c	6.04bc	11.80± 0.31a	492.91± 12.93bc	6.19c	14.30± 0.09bc	471.49± 15.37b	5.55ab	14.47± 0.08ab	451.31± 25.80ab
R2O1	6.26bc	12.43± 0.06a	492.03± 13.96b	5.88ab	12.37± 0.20ab	434.89± 27.63ab	6.03b	13.91± 0.21b	459.51± 11.40b	6.01b	14.63± 0.24b	460.34± 29.68b
R2O2	6.71cd	13.89± 0.07b	524.99± 22.86c	6.11bc	12.11± 0.18a	445.53± 23.75ab	6.09bc	13.04± 0.01b	401.22± 20.12a	6.07bc	14.62± 0.22b	442.75± 37.50ab
R3O1	6.78cd	12.01± 0.17a	528.11± 12.75c	6.14bc	12.94± 0.13b	431.21± 10.70a	6.1bc	13.55± 0.43b	429.21± 13.74ab	6.09c	13.93± 0.18a	416.56± 34.16ab
R3O2	6.82cd	12.22± 0.29a	440.33± 10.57a	6.20bc	12.78± 0.25b	404.95± 12.28a	6.12bc	14.63± 0.24c	431.51± 12.83ab	6.11c	13.88± 0.31a	405.22± 20.72a

注:同一列不同小写字母表示显著差异(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters within a column mean significant difference between different treatments(P<0.05). The same below.



试验处理中“R”代表赤泥;“O”代表有机肥;不同小写字母表示显著差异($P < 0.05$)。下同
 “R” indicates red mud; “O” indicates organic fertilizer; Different lowercase letters mean significant difference
 between different treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 不同生育期水稻各器官中 Cd 含量

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

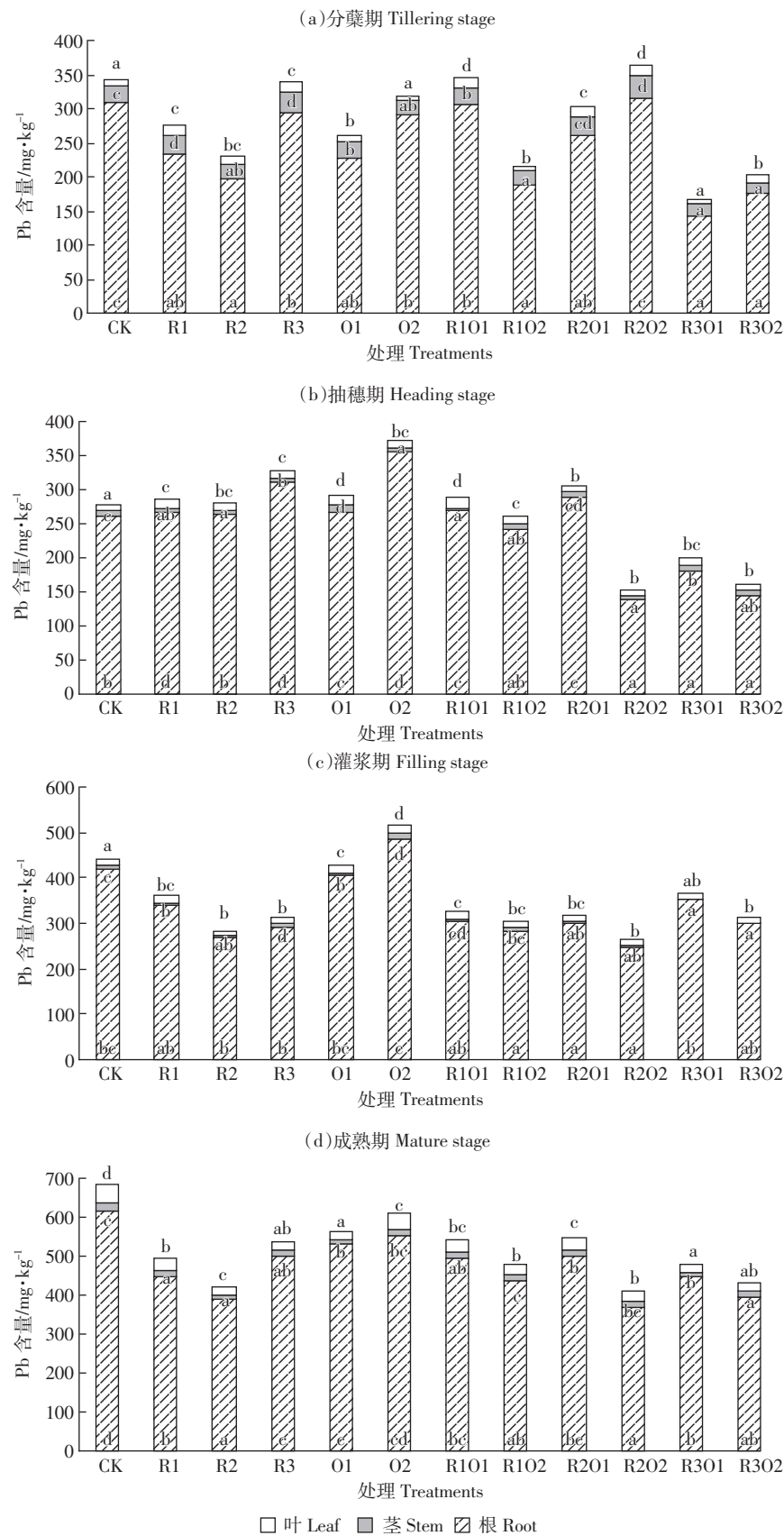


图 2 不同生育期水稻各器官中 Pb 含量

Figure 2 Concentrations of Pb in rice organs in different growth stages

表 3 不同处理对水稻成熟期籽实部分吸收 Cd 和 Pb 的影响

Table 3 Impact of different treatments on fruit Cd and Pb uptake

处理 Treatment	谷壳 Shell				糙米 Rice			
	Cd/mg·kg ⁻¹	降幅 Decline range %	Pb/mg·kg ⁻¹	降幅 Decline range/%	Cd/mg·kg ⁻¹	降幅 Decline range/%	Pb/mg·kg ⁻¹	降幅 Decline range/%
CK	1.18±0.24e	0.00	7.53±0.52c	0.00	1.14±0.18c	0.00	0.51±0.10c	0.00
R1	0.86±0.18c	27.15	5.44 ±0.39b	27.72	0.62±0.20ab	45.44	0.43±0.04ab	15.69
R2	0.78±0.14bc	34.11	4.10 ±0.29a	45.55	0.50±0.11a	55.90	0.39±0.11ab	23.53
R3	0.73±0.15b	37.83	4.18 ±0.22ab	44.54	0.63±0.14ab	44.81	0.41±0.12ab	19.61
O1	0.99±0.19d	16.05	3.60 ±0.19a	52.17	0.87±0.19b	23.47	0.38±0.14a	25.49
O2	0.84±0.17c	29.00	5.65 ±0.15b	24.91	0.88±0.33c	23.24	0.45±0.05c	11.76
R1O1	0.80±0.09bc	31.94	5.29 ±0.27b	29.74	0.66±0.15b	42.11	0.44±0.05b	13.05
R1O2	0.98±0.11d	17.14	4.19 ±0.31ab	44.40	0.63±0.22b	44.40	0.39±0.01ab	23.53
R2O1	0.79±0.23bc	33.02	5.61 ±0.22b	25.45	0.59±0.13a	47.85	0.42±0.07ab	17.65
R2O2	0.73±0.14bc	32.04	4.31 ±0.16ab	42.71	0.61±0.17a	46.90	0.37±0.21a	27.45
R3O1	0.87±0.20c	26.27	4.30 ±0.14ab	42.85	0.63±0.14ab	44.73	0.36±0.03a	29.41
R3O2	0.63±0.24a	46.33	5.23 ±0.21ab	30.53	0.64±0.18b	44.20	0.44±0.04b	13.73

从糙米 Cd 和 Pb 含量降低幅度来看,单施赤泥降 Cd 效果最好(降幅为 44.81%~55.90%),其次赤泥和有机肥配施(降幅为 42.11%~47.85%),单施有机肥效果最差(降幅为 23.47%~25.49%)。赤泥和有机肥配施降 Pb 效果最好(降幅为 42.11%~47.85%),其次为单施赤泥(降幅为 19.61%~23.53%),单施有机肥效果最差(降幅为 11.76%~23.24%)。随着有机肥添加量(包括单施和配施)增加,糙米中 Cd、Pb 含量降低。赤泥与有机肥不同,当赤泥单施时,随着添加量增加,糙米中 Cd、Pb 含量先增加后降低,即赤泥添加量为 4 000 kg·hm⁻² 时,糙米中 Cd、Pb 降幅最大,分别为 55.90% 和 23.53%。当配施,随着赤泥添加量增加,糙米中 Cd、Pb 含量降低。不同处理糙米中 Cd、Pb 降幅显著不同。在所有处理中,糙米 Cd、Pb 降幅最大的分别为处理 R2(下降 55.90%)和 R3O1(下降 29.41%)。尽管添加赤泥和有机肥能大幅度降低糙米中 Cd 和 Pb 含量,但由于土壤中 Cd 和 Pb 含量较高,糙米中 Cd 和 Pb 含量仍高于食品污染物限量标准(GB 2762—2012),Cd 和 Pb 分别超标 1.51~4.70 倍和 1.80~2.25 倍。

2.3 赤泥和有机肥对 Cd 和 Pb 在土壤-水稻系统中迁移转运规律的影响

添加赤泥和有机肥对 Cd 和 Pb 在土壤-水稻系统中迁移转运规律有显著影响,见表 4 和表 5。从成熟期 6 个迁移转运率来看,添加赤泥或有机肥后,Cd 的茎-壳、茎-米和土-米转运率降低,茎-叶转运率升高,土-根和根-茎转运率变化无规律。Pb 与 Cd 显著不同,添加赤泥或有机肥后,Pb 的土-根、根-茎、茎-

叶和茎-壳转运率下降,茎-米和土-米转运率变化无规律。从成熟期 Cd 的土-米迁移率降低幅度来看,与 CK 相比,赤泥单施降低幅度最大,降低 39.19%~50.80%;其次是赤泥和有机肥配施,降低 35.11%~42.46%;有机肥单施最小,降低 19.96%~21.27%。从成熟期 Pb 的土-米迁移率降低幅度来看,与 CK 相比,赤泥单施降低幅度最大,降低 5.01%~9.73%;赤泥与有机肥配施及单施有机肥土-米迁移率降低幅度无明显规律。

从不同生育期 Cd 和 Pb 在土壤-水稻系统中迁移转运率来看,随着水稻生长,土-根、根-茎、茎-叶 3 个转运率均呈逐渐升高趋势。从 Cd 和 Pb 在水稻成熟期时土壤-水稻系统中迁移转运规律来看,Cd 为:土-根>茎-叶>根-茎>茎-壳>茎-米>土-米,Pb 为:茎-叶>土-根>茎-壳>根-茎>茎-米>土-米(表 4 和表 5)。在 6 个迁移转运率中,Cd、Pb 的根-茎迁移转运率相对较低,而土-根和茎-叶迁移转运率相对较高,这表明 Cd、Pb 都主要积累在水稻的根和叶片中。Pb 的茎-叶和茎-壳转运率分别是 Cd 的 2.60~6.92 倍和 1.86~4.05 倍,土-根、根-茎、茎-米和土-米转运率分别为 Cd 的 46.29%~65.36%、13.31%~26.80%、21.46%~47.72% 和 7.00%~10.79%。这表明水稻地上部分的 Pb 主要储存在叶、壳等不可食部分,而 Cd 转运至可食部分的量比 Pb 多。与 CK 相比,添加赤泥或有机肥虽然对 Cd 和 Pb 在土壤-水稻体系中迁移转运率有影响,但对不同生育期各转运率变化规律几乎没有影响,即添加赤泥或有机肥后,不同生育期各转运率变

表 4 Cd 在土壤-水稻系统中的迁移转运率(%)
Table 4 Transfer rate of Cd in soil-rice system(%)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage			抽穗期 Heading stage			灌浆期 Filling stage			成熟期 Mature stage					
	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	茎-壳 Stem-shell	茎-米 Stem-rice	土-米 Soil-rice
CK	53.01	19.07	38.97	115.35	15.62	30.10	127.83	25.70	23.74	184.13	30.45	57.79	13.02	12.60	7.06
R1	64.40	20.09	48.05	119.30	11.89	65.10	121.22	13.07	70.99	175.45	28.62	43.10	10.97	7.94	3.99
R2	66.88	9.80	58.41	127.19	14.13	57.98	115.24	15.37	70.84	169.35	25.94	70.39	12.19	7.88	3.46
R3	66.75	24.13	48.62	179.38	19.35	44.13	147.18	25.91	41.87	185.53	25.80	50.57	10.46	8.97	4.29
O1	64.22	22.97	44.48	128.28	23.82	42.45	145.56	28.47	33.06	174.82	28.78	48.70	12.55	11.05	5.56
O2	49.61	18.50	48.27	145.96	14.79	45.94	141.43	19.53	41.93	186.30	25.20	64.43	11.53	12.04	5.65
R1O1	63.26	19.41	51.27	173.13	12.43	64.38	132.40	16.15	66.93	165.01	31.00	50.55	10.43	8.57	4.38
R1O2	47.29	12.78	53.18	109.78	8.08	83.88	94.91	15.46	72.74	167.38	37.40	32.55	10.79	7.00	4.38
R2O1	88.43	16.27	52.60	139.99	14.58	48.64	120.96	17.88	52.96	165.69	21.44	77.68	15.21	11.44	4.06
R2O2	75.53	21.02	50.45	125.23	13.70	45.90	100.70	15.16	62.10	154.79	30.62	44.45	11.57	8.74	4.14
R3O1	70.53	10.41	71.35	96.06	11.58	77.25	86.16	23.16	40.27	153.41	25.02	45.09	16.27	11.79	4.52
R3O2	81.58	13.70	37.60	106.72	9.70	62.53	97.96	9.14	98.05	184.15	27.22	39.52	9.10	9.14	4.58

表 5 Pb 在土壤-水稻系统中的迁移转运率(%)
Table 5 Transfer rate of Pb in soil-rice system(%)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage			抽穗期 Heading stage			灌浆期 Filling stage			成熟期 Mature stage					
	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	土-根 Soil-root	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	茎-壳 Stem-shell	茎-米 Stem-rice	土-米 Soil-rice
CK	53.39	8.43	32.25	45.93	3.06	85.55	75.33	1.46	236.56	112.99	7.62	276.32	44.15	2.99	0.093
R1	44.09	12.61	48.74	73.09	2.50	176.77	47.15	1.29	383.99	98.75	7.67	298.13	46.99	3.71	0.089
R2	41.74	10.23	60.97	56.22	2.14	185.29	56.33	1.49	291.70	85.39	5.84	219.54	39.55	3.76	0.084
R3	60.56	10.31	41.69	62.42	2.33	154.05	67.52	2.17	245.70	109.46	4.67	177.79	31.70	3.11	0.087
O1	42.75	11.10	41.72	51.92	4.72	107.15	74.99	1.13	421.42	115.76	3.83	153.49	27.17	2.87	0.078
O2	54.09	7.25	39.31	62.56	1.70	181.16	89.96	1.89	214.21	120.51	6.96	231.51	33.95	2.70	0.097
R1O1	60.70	7.86	60.52	55.43	1.42	423.30	57.67	1.95	318.91	107.88	6.10	242.26	42.26	3.54	0.096
R1O2	35.76	10.67	43.29	49.26	2.72	166.38	60.31	1.68	334.52	94.65	6.08	157.96	24.90	2.32	0.086
R2O1	53.08	10.67	45.21	66.28	3.14	95.93	65.19	1.03	528.27	108.06	6.34	235.59	41.73	3.12	0.091
R2O2	60.29	10.33	48.16	31.44	3.20	198.92	62.10	1.49	322.67	79.58	7.32	176.31	28.17	2.42	0.084
R3O1	26.95	11.82	46.54	42.17	4.04	146.62	81.77	0.79	382.01	95.98	3.73	117.24	30.29	2.53	0.086
R3O2	39.71	9.61	60.56	35.75	4.85	143.80	69.16	0.77	596.32	85.25	5.38	174.85	42.79	3.60	0.109

化规律与 CK 一致。

3 讨论

随着工矿业的发展和各种化学产品的广泛使用,稻田土壤重金属污染越来越重,并直接影响水稻生长和稻米品质,进而影响人体健康。因而,土壤重金属污染治理一直是国内外研究的热点。为了治理稻米重金属污染,国内外学者研究了多种土壤调理剂与叶面阻控剂的降铅镉效果,其中研究发现植物体内的 Cd、Pb 含量一般随土壤 pH 值的升高而呈减少趋势。因此运用碱性土壤调理剂,通过提高土壤

pH 值、降低土壤重金属的生物有效性来减少稻米中重金属含量被证明是一种降低稻米 Cd 和 Pb 污染的有效措施^[8-17,19-23]。本研究发现,添加赤泥和碱性有机肥,不仅能够有效地提升水稻根际土壤 pH 值,而且能大幅度降低稻米中 Cd 和 Pb 含量,这与他人的研究结果一致。

本试验结果表明,添加赤泥或有机肥后,与 CK 相比,水稻根际土壤 pH 值明显升高,并且在水稻生长各时期土壤 pH 值随赤泥或有机肥添加量的增加均有不同程度的提高。添加处理中土壤 pH 值升高主要是因为赤泥和有机肥呈碱性,施入酸性土壤即发生

酸碱中和反应。虽然添加赤泥和有机肥均呈碱性,但单施赤泥土壤 pH 值提升效果高于赤泥与有机肥配施和单施有机肥,这可能是有机肥在土壤中分解后产生有机酸所致^[24]。同时,研究结果发现,随着水稻生长,根际土壤 pH 值逐渐下降,这可能是由于试验区位于酸雨区所致。本研究还发现,种植一季水稻后,土壤中 Cd 和 Pb 含量分别降低 -0.19%~14.11% 和 2.64%~27.90%, 可能是因为水稻吸收了土壤中部分 Cd、Pb 含量,表明可以通过秸秆移除治理土壤中 Cd、Pb 污染。

水稻不同生育期吸收重金属的相对含量显著不同,Cd 与 Pb 在不同生育期水稻吸收累积量差异略有不同,这可能与水稻不同时期的生长特征有关^[25-26]。有些研究发现,水稻各器官中 Cd 含量均表现为分蘖期>成熟期>抽穗期,即水稻吸收 Cd 的主要时期是分蘖期和成熟期^[27-31];而另一些研究发现,水稻中 Cd 含量在拔节-灌浆期急剧上升,灌浆期后差异不显著^[32-33]。本研究发现,分蘖期和成熟期的 Cd 贡献率较高,而抽穗期 Cd 的贡献率最低,这表明水稻吸收 Cd 主要集中在幼苗-分蘖期和灌浆-成熟期。有些研究发现,水稻吸收 Pb 的主要时期与 Cd 相同,也在分蘖期和成熟期^[33-35]。本研究发现,分蘖期、灌浆期和成熟期的 Pb 贡献率都较高,且 3 个时期的贡献率都比较接近,这表明水稻吸收 Pb 主要是在分蘖期、灌浆期和成熟期,这与他人的研究结果基本一致。研究还发现,抽穗期时,Cd 和 Pb 的贡献率很低,很多贡献率为负值,这可能由于抽穗期水稻生物量急剧增加使植株体内 Cd、Pb 含量降低或根、茎、叶中的 Cd、Pb 大量转移至穗部所致。很多研究发现,水稻各器官积累 Cd 和 Pb 的能力不同,且水稻吸收 Cd、Pb 大量累积在根、茎、叶中,水稻各器官 Cd、Pb 含量均表现为根>茎、叶>糙米^[25-27,34-36]。本研究发现,虽然水稻各器官 Cd、Pb 含量也表现为根>茎、叶>壳>糙米,但 Cd 主要积累在根和茎,而 Pb 主要积累在根和叶,表明 Cd 和 Pb 在水稻各器官中间累积能力及器官间转运能力不同。虽然土壤中 Cd 和 Pb 污染十分严重(Cd、Pb 含量分别超过土壤环境质量标准 II 级标准 65 倍和 7 倍),但由于迁移转运率及吸收时期差异较大,因而糙米中 Cd、Pb 含量差异较大。与 Cd 相比,Pb 的茎-叶和茎-壳转运率分别是 Cd 的 2.60~6.92 倍和 1.86~4.05 倍,土-根、根-茎、茎-米和土-米转运率分别为 Cd 的 46.29%~65.36%、13.31%~26.80%、21.46%~47.72% 和 7.00%~10.79%,由此可见,水稻吸收转运

到糙米的 Pb 远远低于 Cd (糙米中 Cd 含量约为 Pb 的 1 倍)。

有研究表明,赤泥具有较大的比表面积,在土壤中能与重金属形成金属氢氧化物沉淀和结合性强的金属络合物,对固定重金属的晶格有促进作用,同时赤泥施入土壤后可在一定程度上增强土壤对 Cd、Pb 的吸附能力,从而导致土壤 Cd、Pb 活性降低,减少植物从土壤中吸收重金属 Cd、Pb^[37-38]。有机肥的施加不仅能增加土壤有机质含量、改善土壤理化性质,同时会影响重金属在土壤中的形态;另外,有机物及其分解形成的腐植酸作为配位体可与土壤中 Pb、Cd 络合或螯合,形成有机金属络合(螯合)物,进而影响土壤 Cd、Pb 的活性,从而降低植物对土壤中重金属的吸收^[39-40]。添加赤泥和有机肥后,水稻各器官中 Cd 和 Pb 含量均有不同程度降低,但不同处理对水稻各器官中 Cd 和 Pb 含量的影响显著不同。添加赤泥和有机肥后,糙米中 Cd 和 Pb 含量分别降低 23.24%~55.90% 和 11.76%~29.41%。Cd 降幅最大的处理是单施赤泥 4 000 kg·hm⁻²,而 Pb 降幅最大的处理是 R3O1,可见不同处理对不同重金属治理效果明显不同,因而在治理重金属污染时,应针对不同重金属污染选择适应的钝化剂,以提高治理效果。本研究还发现,添加赤泥和有机肥对 Cd 和 Pb 在土壤-水稻系统的转运率有显著性影响,且对 Cd 与 Pb 的影响明显不同。添加赤泥和有机肥,Cd 的茎-壳、茎-米和土-米转运率明显降低,Pb 的土-根、根-茎、茎-叶和茎-壳转运率下降,这可能是赤泥和有机肥使稻米中 Cd 和 Pb 降低的主要原因。虽然所有处理都能降低糙米中 Cd 和 Pb 含量,但由于土壤中 Cd 和 Pb 含量较高、土壤 pH 值较低等原因,糙米中 Cd 和 Pb 含量仍超过食品安全国家标准(GB 2762—2012),这表明土壤 Cd 和 Pb 含量较高时,仅通过土壤调理剂很难达到安全生产的目的。因而,对于重金属复合污染稻田和重金属污染程度高的稻田,需要运用多种技术集成或通过替代种植进行污染治理,减少其对人类健康的影响。研究还发现,赤泥和有机肥添加量对水稻各器官中 Cd 和 Pb 含量的影响显著不同。随着赤泥添加量增加,水稻各器官中 Cd 和 Pb 含量先降低后增加,这表明利用碱性土壤调理剂来降低糙米中重金属含量是有限的。虽然随着有机肥添加量的增加,水稻各器官中 Cd 和 Pb 含量均下降,但由于本试验只设置了 2 个有机肥添加量,很难确定碱性有机肥的治理效果是否有限,这有待进一步研究。

4 结论

(1)单施及配施赤泥和有机肥后,均能提升水稻根际土壤 pH 值,降低根际土壤中 Pb 和 Cd 含量,其中单施赤泥 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 效果最佳。

(2)与 CK 相比,所有添加处理均能降低稻米中 Cd、Pb 含量,但糙米中 Cd、Pb 含量仍然未达到国家粮食卫生标准($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

(3)不同降低稻米 Cd 和 Pb 的能力不同,其中 Cd 降幅最大的处理是单施赤泥 $4\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, Pb 降幅最大的处理是赤泥($6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)与有机肥($1\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施。

(4)重金属复合污染稻田,污染程度高时仅通过土壤调理剂很难达到安全生产的目的。

参考文献:

- [1] 胡岳岷,刘元胜. 中国粮食安全:价值维度与战略选择[J]. 经济学家, 2013(5):50-56.
HU Yue-min, LIU Yuan-sheng. Chinese food safety: Value dimension and strategic choice[J]. *Economist*, 2013(5):50-56. (in Chinese)
- [2] 吕新业,冀县卿. 关于中国粮食安全问题的再思考[J]. 农业经济问题, 2013(5):16-24.
LV Xin-ye, JI Xian-qing. Think again about China's food safety problem[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2013(5):16-24. (in Chinese)
- [3] 张小敏,张秀英,钟太洋,等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2):692-703.
ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):692-703. (in Chinese)
- [4] 环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014-04-17.
Ministry of Environmental Protection of PRC. Report on the national general survey of soil contamination[R]. 2014-04-17. (in Chinese)
- [5] 王静,林春野,陈瑜琦,等. 中国村镇耕地污染现状原因及对策分析[J]. 中国土地科学, 2012, 26(2):25-30.
WANG Jing, LIN Chun-ye, CHEN Yu-qi, et al. Cultivated land pollution at township level in China: Situation, factors and measures [J]. *China Land Sciences*, 2012, 26(2):25-30. (in Chinese)
- [6] 官靖. 镉米杀机[N]. 新世纪, 2011-02-14(437).
GONG Jing. Cadmium rice murder[N]. *New Century*, 2011-02-14 (437). (in Chinese)
- [7] 贺林平,罗艾桦. 广州抽检大米产品四成镉超标: 超标大米主要来自湖南[N]. 人民日报, 2013-05-19.
HE Lin-ping, LUO Ai-hua. Guangzhou sampling rice products exceeded four percent cadmium exceeded rice mainly from Hunan[N]. *People's Daily*, 2013-05-19. (in Chinese)
- [8] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等. 钝化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. (in Chinese)
- [9] 周利强,吴龙华,骆永明,等. 有机物料对污染土壤上水稻生长和重金属吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2):383-388.
ZHOU Li-qiang, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Effects of organic amendments on the growth and heavy metal uptake of rice on a contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2):383-388. (in Chinese)
- [10] Snarsk E, Gilkes R J. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2004, 54(42):321-328.
- [11] YI Li, HONG Ye-tang, WANG Duo-jun, et al. Effect of red mud on the mobility of heavy metals in mining-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2010, 29(2):191-196.
- [12] Zhou Hang, Zhou Xin, Zeng Min, et al. Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 101:226-232.
- [13] Jin H P, Lamb D, Panerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185:549-574.
- [14] 范美蓉,罗琳,廖育林,等. 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. (in Chinese)
- [15] 郝晓伟,黄益宗,崔岩山,等. 赤泥对污染土壤 Pb、Zn 化学形态和生物可给性的影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6):1431-1435.
HAO Xiao-wei, HUANG Yi-zong, CUI Yan-shan, et al. Effects of red mud addition on fractionation and bio-accessibility of Pb and Zn in contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(6):1431-1435. (in Chinese)
- [16] 刘秀珍,马志宏,赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):243-252.
LIU Xiu-zhen, MA Zhi-hong, ZHAO Xing-jie. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):243-252. (in Chinese)
- [17] 谢运河,纪雄辉,吴家梅,等. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3):826-832.
XIE Yun-he, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Effect of different organic fertilizers on bioavailability of soil Cd and Zn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):826-832. (in Chinese)
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
LU Ru-kun. Agricultural chemical analysis of soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [19] 汪翔,赵玲. 赤泥对水稻植株各部位镉含量及水稻生物量的影响[J]. 现代科学仪器, 2010(4):105-109.
WANG Xiang, ZHAO Ling. Effect of red mud on the cadmium content in different parts of rice and rice biomass[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2010(4):105-109. (in Chinese)
- [20] 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): 167-174.
- 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): 167-174. (in Chinese)
- [21] Viktória Feigl, Attila Anton, Nikolett Uzigner. Red mud as a chemical stabilizer for soil contaminated with toxic metals[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2012, 223: 1237-1247.
- [22] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007(2): 510-515.
- LIN Da-song, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effects of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ by soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007(2): 510-515. (in Chinese)
- [23] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 318-319.
- ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. Remediation of contaminated soils: Principles and methods[M]. Beijing: Science Press, 2004: 318-319. (in Chinese)
- [24] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3496-3504.
- LUO Yong-qing, ZHAO Xue-yong, LI Mei-xia. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3496-3504. (in Chinese)
- [25] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 不同生育期水稻 Cd、Pb 的吸收累积特征及品种差异[J]. 土壤通报, 2011, 45(5): 1125-1129.
- LIU Shao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Characteristics of Cd and Pb absorption and accumulation by rice at different growth stages and the differences between varieties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 45(5): 1125-1129. (in Chinese)
- [26] 刘建国, 李坤权, 张祖建, 等. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. 应用生态学报, 2002, 15(2): 291-294.
- LIU Jian-guo, LI Kun-quan, ZHANG Zu-jian, et al. Difference of lead uptake and distribution in rice cultivars and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 15(2): 291-294. (in Chinese)
- [27] 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 Shao-bing, JI Xiong-hui, WANG Guo-xiang, et al. Effects of red mud on rice growth and cadmium uptake in cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 692-697. (in Chinese)
- [28] 钟来元, 周鸿凯, 叶昌辉, 等. 不同品种水稻全生育期内土壤 Cd 赋存形态及 $\omega(\text{Cd})$ 变化特征[J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 175-181.
- ZHONG Lai-yuan, ZHOU Hong-kai, YE Chang-hui, et al. Characterization of chemical fraction of Cd in soils cultivated with different types of rice during their growth stages[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(3): 175-181. (in Chinese)
- [29] 唐 皓, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻镉高积累材料不同生育期镉积累变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 471-477.
- TANG Hao, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Cadmium accumulation in high cadmium-accumulating rice cultivars at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 471-477. (in Chinese)
- [30] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390: 301-310.
- [31] 史 静, 李正文, 龚伟群, 等. 2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化: 品种、土壤和 Cd 处理的影响 [J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 32-40.
- SHI Jing, LI Zheng-wen, GONG Wei-qun, et al. Uptake and partitioning of Cd and Zn by two non-hybrid rice cultivars in different growth stages: Effect of cultivars, soil type and Cd spike[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1): 32-40. (in Chinese)
- [32] 范中亮, 季 辉, 杨 菲, 等. 不同土壤类型下杂交水稻地上部器官对重金属镉和铅的富集特征[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(21): 183-188.
- FAN Zhong-liang, JI Hui, YANG Fei, et al. Accumulation characteristics of cadmium and lead in above ground organs of indica hybrid rice as affected by different soil types[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(21): 183-188. (in Chinese)
- [33] 刘 苗, 朱宇恩, 李海龙, 等. 腐植酸钾对土壤铅化学形态、生物可给性及健康风险的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1): 17-22.
- LIU Miao, ZHU Yu-en, LI Hai-long, et al. Effect of potassium humate on chemical fractionation, bioaccessibility and the health risk assessment of lead (Pb) in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1): 17-22. (in Chinese)
- [34] Sekara A, Poniedzialek M, Ciura J, et al. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: Implications for phytoremediation[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2005, 14: 509-516.
- [35] Bertocchi A F, Marcello G, Roberto Peretti, et al. Red mud and fly ash for remediation of mine sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 134: 112-119.
- [36] Jun Y A, Sin H K, Kyung Y H. Evaluation of phosphate fertilizers and red mud in reducing plant availability of Cd, Pb, and Zn in mine tailings[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74: 2659-2668.
- [37] Naidu R, Kookana R S, Sumner M E, et al. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1): 602-617.
- [38] 郑宏艳, 刘书田, 米长虹, 等. 土壤-水稻籽粒系统镉富集主要影响因素统计分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1880-1888.
- ZHENG Hong-yan, LIU Shu-tian, MI Chang-hong, et al. Statistical analysis of factors affecting Cd bioaccumulation in soil-rice grain system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10): 1880-1888. (in Chinese)
- [39] Karin H, Holger K. Trace element concentrations in cereal grain of long-term field trials with organic fertilizer in Sweden[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2015, 103: 347-358.
- [40] 江巧君, 周 琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 9-14.
- JIANG Qiao-jun, ZHOU Qin, HAN Liang-liang, et al. Effects of organic manure on uptake and distribution of cadmium in different rice genotypes under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 9-14. (in Chinese)