

# 赤泥颗粒和赤泥对污染土壤镉形态分布及水稻吸收的效应

魏建宏<sup>1</sup>, 罗琳<sup>2\*</sup>, 刘艳<sup>2</sup>, 田杰<sup>2</sup>

(1.湖南农业大学生安学院, 长沙 410128; 2.湖南农业大学资环学院, 长沙 410128)

**摘要:**赤泥能促进土壤中镉形态转化(离子交换态向残渣态转化),但赤泥碱性很强,对土壤的功能有一定的破坏,为此采用盆栽试验研究了赤泥粉和改性赤泥颗粒对酸性潮泥田土壤镉形态分布及水稻生长的影响。结果表明,同比例(5% W/W)赤泥颗粒的 pH 值较赤泥粉下降 2.4 个单位,但随着时间的推移,改性后赤泥颗粒中 OH<sup>-</sup>有缓释的趋势;同比例(5% W/W)赤泥颗粒对镉污染土壤的形态分布影响在修复前期比赤泥粉小,在修复后期与赤泥粉基本相同甚至稍大,但两者对水稻生长影响不同:添加赤泥颗粒导致水稻增产 18.3%,添加赤泥粉导致水稻减产 33.3%;赤泥粉和赤泥颗粒均能抑制水稻对土壤中镉的吸收,添加量越高,抑制效果越明显;添加合适的赤泥颗粒能促进水稻的生长,反之抑制水稻的生长,通过试验,初步确定水稻生长状况最好的赤泥颗粒添加量为 3%(W/W),此时离子交换态最大降幅为 32.1%,残渣态最大增幅为 13.7%,水稻增产 37.35%,糙米镉含量减少 43.8%,低于国家食品卫生标准限值( $Cd \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

**关键词:**赤泥粉;赤泥颗粒;镉;水稻;形态分布

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0318-07

## Effects of Red Mud Granules and Red Mud on the Distribution of Cd Fractions and Cd Uptake by the Paddy Rice in a Contaminated Soil

WEI Jian-hong<sup>1</sup>, LUO Lin<sup>2\*</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, TIAN Jie<sup>2</sup>

(1.College of Biosafety Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Red mud can promote fractions transformation of Cadmium (Cd) in contaminated soil (ion-exchangeable into the residual fraction), however, the function of soil was destructed by its strongly alkaline (pH 12~13). The effects of red mud and modified red mud particles on rice growth and distribution of Cd fractions in acid moist mud field soil by the way of pot experiments was studied in this paper. The results showed that the pH value of granulated red mud decreased 2.4 units in the same proportion (5% W/W) compare to red mud, but as time went on, the OH<sup>-</sup> of modified red mud particles had the slow releasing trend. The effect of granulated red mud on Cd morphology distribution in contaminated soil was less than red mud in earlier repairing stage and equal or more in later stage in the same proportion (5% W/W). The effects between adding granulated red mud and red mud were different that the former increased production of rice by 18.3% and the latter decreased by 33.3%. Cadmium uptake by paddy rice was inhibited by adding granulated red mud and red mud, and the higher addition of granulated red mud, the better effect of the inhibition. Adding the appropriate granulated red mud can promote the growth of rice, on the contrary, inhibit the growth of rice. Thus we could determine initially that the optimal dose of granulated red mud adding to Cd polluted soil was 3%(W/W), at the same time, the decrease of exchangeable, increase of residual and yield were 32.1%, 13.7% and 37.5% respectively. The Cd contents of the unpolished rice decreased 43.8%, which is lower than the maximum permissible concentration of the national food hygiene standards ( $Cd \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

**Keywords:** red mud powder; red mud granules; cadmium; rice; distribution of fractions

收稿日期:2011-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50874046);国家 863 项目

作者简介:魏建宏(1971—),女,湖南长沙人,讲师,主要从事生态环境修复等方面的研究工作。E-mail:weijianhong111666@163.com

\* 通讯作者:罗琳 E-mail:luolinwei0@163.com

镉在环境中具有稳定、积累和不易清除的特点,并可以通过食物链富集使人体产生慢性中毒。2003 年有报道认为我国镉污染耕地面积为 1.33 万  $\text{hm}^2$ ,每年生产“镉米”5 万 t,不仅危害广大人民群众的生命安全,而且威胁到我国社会的稳定发展<sup>[1]</sup>。

赤泥具有稳定的化学成分、非常细的分散度、高比表面积、较好的吸附性能等特点,含有  $\text{TiO}_2$ 、一定量的  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (硅酸二钙)和无定形铝硅酸盐物质,且廉价易得<sup>[2-7]</sup>,适合作为土壤中 Pb、Zn、Cd 等重金属污染的修复剂<sup>[8-9]</sup>。有关赤泥镉交互作用的研究结果表明,赤泥能提高土壤的 pH 值,减少镉有效态,降低一些植物体内镉含量<sup>[10-15]</sup>,迄今为止,利用赤泥改性为赤泥颗粒修复重金属污染土壤的文献报道较少。本研究发现:赤泥中含有农业生产所需的众多营养元素和微量元素,如 Si、Al、P、Ca、Mg、Fe 等和少量稀土元素,对植物生长有一定的促进作用,但赤泥具有较强的碱性(pH 值为 12~13),修复重金属污染土壤的同时会造成土壤功能一定程度的破坏,不利于作物的生长。利用赤泥添加一些辅助剂改性为赤泥颗粒,能缓释  $\text{OH}^-$ ,降低强碱性赤泥对作物的危害;能最大程度利用赤泥废渣修复镉污染的酸性农田土壤,减少赤泥堆放量;能促进土壤中镉形态的转化,降低土壤中镉有效态;能充分利用赤泥中有利成分(Si、Al、P、Ca、Mg、Fe 等和少量稀土元素),促进作物的生长。

本实验拟在盆栽条件下利用赤泥与赤泥颗粒做对比,研究赤泥与赤泥颗粒对镉污染的酸性农田土壤的修复与对水稻生长的不同影响,为赤泥颗粒的应用和赤泥的深入研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

(1)供试赤泥和土壤:赤泥来源于中国长城铝业集团,为拜耳-烧碱联合法赤泥,赤泥的 pH 值为 12.40,烧失量为 24.55%,二氧化硅为 20.5%,三氧化二铁为 8.1%,氧化铝为 6.9%,氧化钙为 43.1%,氧化钾为 0.5%。供试土壤为河流冲积物发育的酸性潮泥田,取自湘潭市岳塘区竹埠港村(E 112°58'29",N 27°54'46")0~20 cm 耕层土壤。土壤 pH5.32,有机质、速效钾、碱解氮和有效磷含量分别为  $31.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $104.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $374 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $7.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;供试土壤的总镉为  $1.397 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效态为  $0.565 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2)赤泥颗粒:以磨细、过 100 目筛的赤泥为原

料,控制水灰比 0.5,添加辅助剂 A、B、C,利用制粒机制备出赤泥颗粒,自然风干,装袋备用。

(3)实验仪器与设备:超高分辨率场发射扫描电子显微镜(Nova NanoSEM 230);石墨炉原子吸收分光光度计(GTA120,美国瓦里安);颗粒机(湖南中诚制药公司 BY300);离心机(SHZ-85);酸度计(PHS-3C);可调式电热板;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9642A)。

(4)供试作物:水稻(*Oryza sativa* L.),品种为威优 46(全生育期 122 d 左右,湖南利邦种业有限公司)。

### 1.2 水稻盆栽设计

盆栽试验在湖南农业大学资源环境学院开放式玻璃房进行,无日光灯辅助光源。盆栽土壤均过 5 mm 筛,试验用陶瓷盆钵高 32.0 cm,直径 10 cm,每盆装土 10 kg 后添加赤泥颗粒剂混合均匀。试验共设 5 个处理(表 1),每个处理重复 3 次,每盆 3 茛,每茛 2 株,培养时间总共 3 个月,培养期间用蒸馏水浇灌,灌浆之前保持有水状态。土壤采集时间为 2010 年 3 月。

表 1 盆栽试验设计

Table 1 The pot experiment design

| 编号 | a  | b      | c       | d       | e       |
|----|----|--------|---------|---------|---------|
| 处理 | 空白 | 赤泥粉-5% | 赤泥颗粒-1% | 赤泥颗粒-3% | 赤泥颗粒-5% |

### 1.3 分析方法

土壤中 Cd 不同形态采用 Tessier 连续提取法<sup>[16]</sup>进行提取,水稻植株及糙米中 Cd 采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  (4:1)湿法消煮,标准物质为大米(GBW10010),镉回收率为 93%。具体操作如下:准确称取磨碎过筛后混和均匀的水稻根部、茎叶部和糙米样品  $0.5000 \text{ g}$ (精确至  $0.0001 \text{ g}$ ),置于 150 mL 的锥形瓶中,加 15 mL 的混合酸( $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4$  为 4:1),放数粒玻璃珠,加盖浸泡过夜,锥形瓶上放一小漏斗,然后置于电热板上加热,若液体变棕黑色,再加少量混合酸,直至冒白烟,消化液呈无色透明或略带黄色为止,取下自然冷却,再加 10 mL 水继续加热,直至白烟不再冒出后取下放冷,同时做试剂空白试验。将试样消化液移入 50 mL 的容量瓶中,用超纯水少量多次洗涤锥形瓶,洗液合并于容量瓶中并定容至刻度,混匀后用石墨炉原子吸收分光光度计测试;水稻存活率于移栽后 20 d 测定,水稻株高、结实率和产量于收割时测定。

土壤 pH、有机质含量、碱解氮、速效钾、有效磷均采用国家标准测量方法,SEM 测定在中南大学冶金院完成。所用试剂均为优级纯,分析器皿均用 5%硝酸溶液浸泡过夜,用去离子水洗净。

## 1.4 数据处理

应用 Excel 2007 和 SPSS 软件进行统计和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 赤泥粉和赤泥颗粒的微观形貌及 OH<sup>-</sup> 释放

#### 2.1.1 赤泥粉和赤泥颗粒的 SEM 照片

图 1 和图 2 分别为赤泥粉和赤泥颗粒表面的扫描电镜图。图 1(a)和图 1(b)分别为赤泥粉表面放大 1 000 倍和 10 000 倍的 SEM 照片,可以看出,赤泥粉表面存在杂乱无章的细小碎片,且分散着一些晶体;细小碎片和晶体的粒径较小,为 $<5\ \mu\text{m}$ 。图 2(a)是改性后赤泥颗粒表面放大 1 000 倍的 SEM 照片,可以看出,赤泥颗粒表面具有丰富的孔隙结构,但是粒径较大,约为  $120\ \mu\text{m}$ 。图 2(b)是改性赤泥颗粒表面放大 10 000 倍的 SEM 图,可以明显地看出赤泥颗粒表面成块状,其间分散着一些孔隙。

#### 2.1.2 赤泥粉和赤泥颗粒的 OH<sup>-</sup> 释放

本实验对赤泥粉和赤泥颗粒在水中的 OH<sup>-</sup> 的释

放进行了研究,具体结果见图 3。

根据图 3 可知,在第 1 d 时,赤泥粉的 pH 值为 12.47,而赤泥颗粒的 pH 值为 10.07。随着时间的延长,赤泥粉的 pH 值维持在 12.7 左右,赤泥颗粒的 pH 值在 30 d 前有明显的上下振荡,30 d 后有不明显的上下波动。

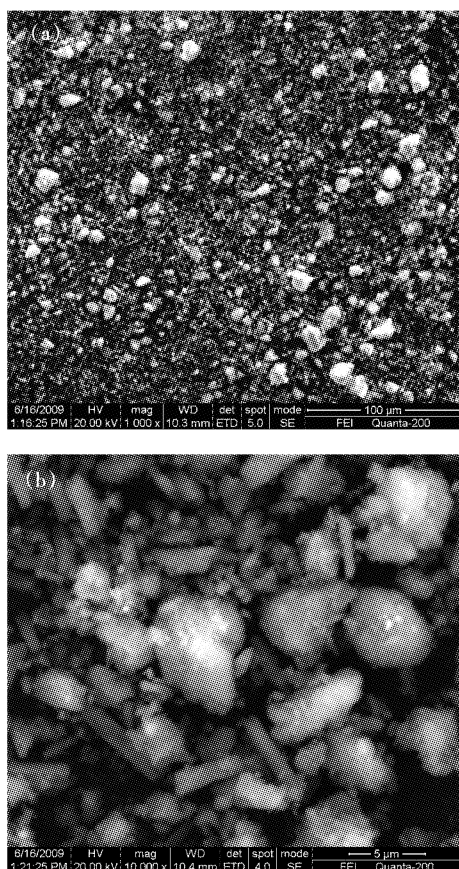


图 1 赤泥粉表面在扫描电镜下的特征

Figure 1 The surface morphology of the red mud under scanning electron microscope

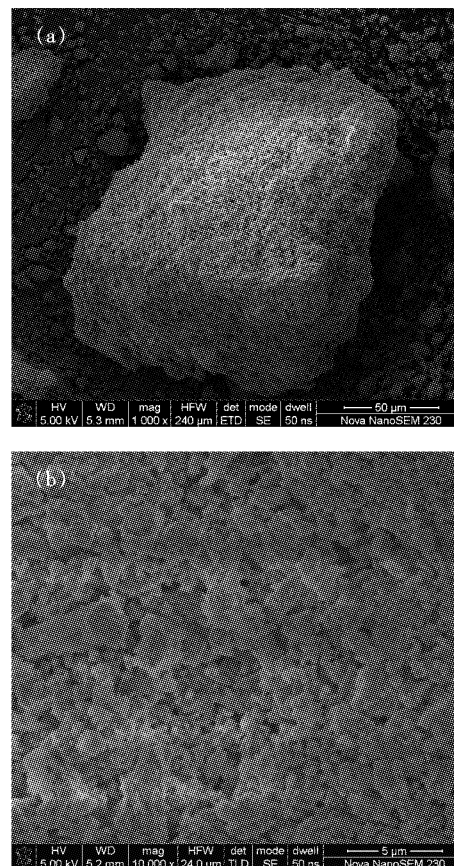


图 2 赤泥颗粒表面在扫描电镜下的特征

Figure The surface morphology of the granulated red mud under scanning electron microscope

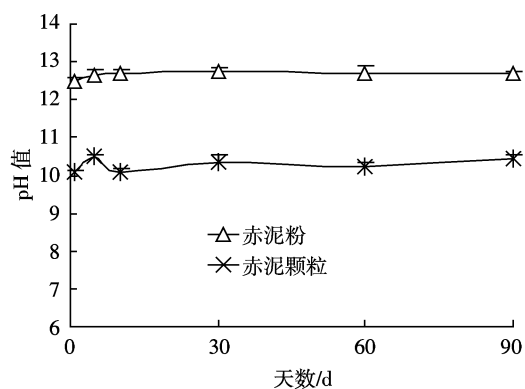


图 3 赤泥粉和赤泥颗粒的 OH<sup>-</sup> 释放

Figure 3 The release of OH<sup>-</sup> from red mud and granulated red mud

## 2.2 赤泥颗粒剂对土壤 pH 值的影响

赤泥是一种强碱性固体废渣,其 pH 值为 12.40,与供试土壤混合后,混合土壤的 pH 值发生了一定的变化,其变化趋势如图 4 所示。

由图 4 可知,酸性潮泥田土壤在添加赤泥颗粒剂后,其 pH 值发生了不同程度的改变。a 处理为空白,其 pH 值维持在 5.32 的水平;b 处理 pH 值变化最大,5 d 时 pH 值已上升至 8.88;c、d 和 e 处理 pH 值也有所升高,5 d 时 pH 值分别上升至 6.37、6.85 和 7.27。随着时间的延长(5~90 d),b 处理 pH 值呈现出先下降后稳定的趋势;c、d 和 e 处理则呈现出先缓慢上升后稳定的趋势;a 处理基本保持 pH 值不变的趋势。

## 2.3 赤泥颗粒剂对镉形态分布的影响

研究发现单一指标——土壤镉总量很难反映重金属的毒性、迁移性以及生物有效性,而重金属在环境中存在的形态能够有效地用于评价其化学行为<sup>[17,19]</sup>,本试验按不同时间对污染土壤中镉的 5 种形态——离子交换态(EXC)、碳酸盐态(CA)、铁锰氧化态(Fe-

Mn)、有机物结合态(OM)和残渣态(RES)进行了提取与分析,其结果如图 5 所示。从镉形态分布来看,主要集中在离子交换态、铁锰氧化态和残渣态;从镉形态变化来看,b 处理形态变化最为显著。

水稻盆栽培养 5 d 时,除 a 处理外,其他处理的离子交换态均有所降低,其中 b 处理降低 27.7%,c、d 和 e(降低 20.6%)处理降幅依次增加;碳酸盐态有所增加,其中 b 处理增加 15.8%,c、d 和 e(增加 10.8%)处理依次增加;铁锰氧化态有所增加,其中 b 处理增加 19%,c、d 和 e(16%)处理依次增加;有机物结合态基本不变;残渣态有所增加,其中 b 处理增加 7.7%,c、d 和 e(5.4%)处理依次增加。随着培养时间的延长,b 处理离子交换态呈现先逐渐降低后稍微增加的趋势,其中 b 处理最大降幅为 32.7%,c、d 和 e(32.1%)则呈现先逐渐降低后保持稳定的趋势;各处理碳酸盐态、铁锰氧化态基本保持不变;各处理残渣态呈现先增加后基本不变的趋势,其中 b 处理最大增幅为 11.1%,e 处理最大增幅为 13.7%。

## 2.4 赤泥颗粒剂对作物吸收镉的影响

土壤中部分形态镉能被水稻植株吸收,从而进入食物链危害人类健康。本试验在镉污染土壤中加入赤泥颗粒剂能显著降低镉生物有效态,导致糙米中镉含量减少,具体见图 6 和图 7。

由图 6 可知,添加赤泥颗粒剂能不同程度抑制水稻对镉的吸收,其中赤泥颗粒随着添加量增加抑制效果增强。各处理水稻植株中镉含量均为根>茎叶>糙米。a 处理的根、茎叶和糙米镉含量为最高,b、c、d 和 e 处理的根、茎叶和糙米镉含量均有所减少,其中 b 处理的根、茎叶和糙米镉含量减少最多,分别减少了 26.9%、30.1%和 40.6%,c、d 和 e 处理减少量依次增

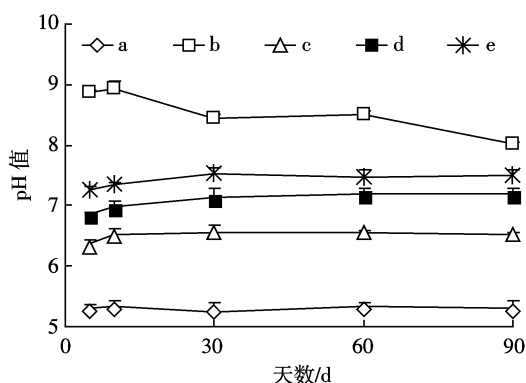


图 4 赤泥粉和赤泥颗粒剂对土壤 pH 值的影响

Figure 4 The effect of red mud and red mud granules on soil pH

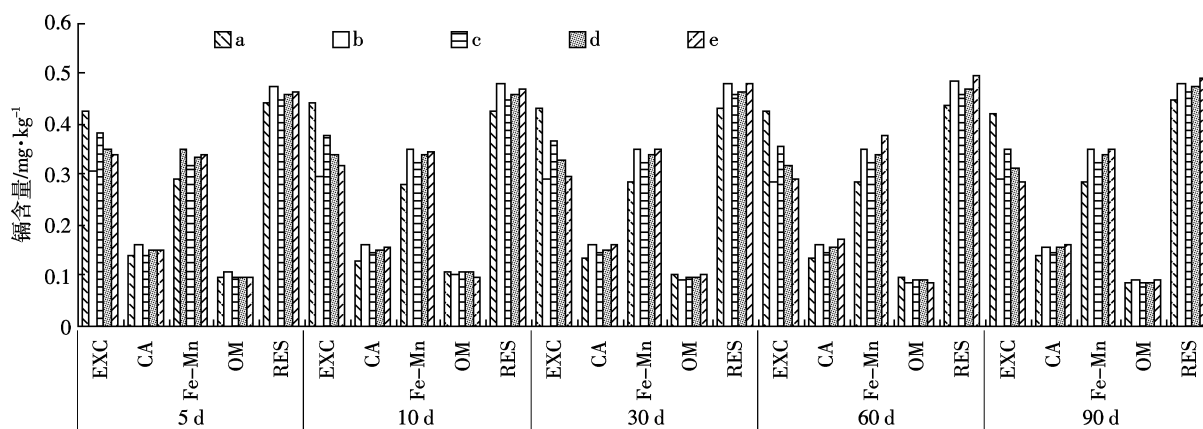


图 5 污染土中镉形态分布

Figure 5 The distribution of Cd fractions in polluted soil

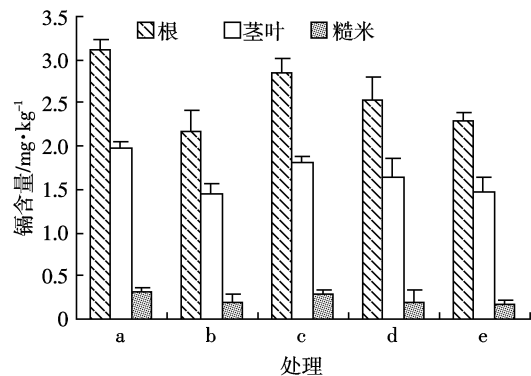


图 6 赤泥颗粒剂对水稻各部位镉含量影响

Figure 6 Effect of red mud granules on Cd content in different organs of rice

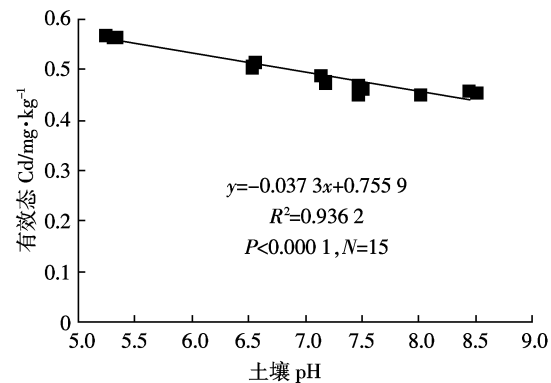


图 7 各处理土壤有效态 Cd 与土壤 pH 的回归分析

Figure 7 Regression analysis on available Cd and pH value in soil under treatments

加,由数据分析可知,b、d 和 e 处理中糙米镉含量均低于国家食品卫生标准限值( $Cd \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

由图 7 可知,有效态 Cd 与 pH 值呈负相关。

2.5 赤泥颗粒剂对水稻生长的影响

为了针对赤泥颗粒剂对镉污染土壤的钝化效果进行研究,在水稻盆栽实验中设计了 5 个处理,均不添加底肥,因此其整体长势较弱,具体生长指标见表 2。

由表 2 可知,水稻在镉污染土壤中生长情况最佳的为 c 和 d 处理,其存活率均达到 100%,株高约为 73.5 cm,结实率约为 88.1%,产量约为  $10.13 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ ;其次是 e 和 a 处理;生长情况最差的为 b 处理,其存活率仅为 33.3%,株高为 47 cm,结实率约为 31.2%,产量约为  $4.93 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。根据数据分析,与 a 处理(空白)相比较,水稻最高产量(d 处理)增产 37.35%;最低产量(b 处理)减产 33.3%。

3 讨论

从图 1 和图 2 中的表面结构特征可以推断出赤泥粉表面 OH<sup>-</sup>活性点位较多,颗粒细小且分散,因此其碱性和吸附能力较强;而改性后的赤泥颗粒粒径较大,且成块状,同时具有一定的孔隙,因此赤泥颗粒也

具有一定的吸附能力,但 OH<sup>-</sup>活性点位较少,碱性有所降低(图 3),但是随着时间的推移,OH<sup>-</sup>缓慢释放,这表面结构所反映出的特性与试验结果是相符合的。

图 4 中结果显示,添加赤泥和赤泥颗粒的土壤 pH 值都升高了( $P > 0.05$ ),这是由于赤泥含有 Al(OH)<sub>3</sub>、NaOH、CaCO<sub>3</sub> 等碱性物质,其 pH 值可达 10~13,施入土壤后可提高土壤的 pH 值<sup>[20]</sup>,这与 Lombi 等以及 Gray 等的研究结论一致<sup>[10,21]</sup>。但是试验中添加 5% 赤泥粉的 b 处理,其 OH<sup>-</sup>在水中释放大,而在 5 d 时,水稻盆栽土为水淹状态,因此赤泥粉中的碱性基团在培养前期几乎全部释放出来;c、d 和 e 处理分别为 1%、3% 和 5% 赤泥颗粒,赤泥颗粒是由赤泥粉通过添加辅助剂制备而成,能使 OH<sup>-</sup>重新组合在晶格或者晶格间隙中,从而缓释 OH<sup>-</sup><sup>[22]</sup>,导致 5 d 时 e 处理 pH 值较 b 处理低,且随着时间的变化,c、d 和 e 处理 pH 值缓慢上升。以上现象表明:赤泥粉和赤泥颗粒均可用来中和酸性土壤,但与赤泥粉相比,赤泥颗粒缓释 pH 值的特性有助于降低赤泥强碱性对土壤功能的破坏。

由图 5 可以看出,添加赤泥颗粒剂均能降低镉离子交换态,影响镉在土壤中形态分布,这是由于添加赤泥颗粒剂提高了土壤的 pH 值,改变了土壤的理化

表 2 赤泥颗粒剂对水稻生长的影响

Table 2 The effect of red mud granules on rice plant growth

| 处理 | 生长指标         |              |                |                      |
|----|--------------|--------------|----------------|----------------------|
|    | 存活率/%        | 株高/cm        | 结实率/%          | 产量/g·盆 <sup>-1</sup> |
| a  | 66.70±2.038c | 62.00±2.000b | 49.40±0.755 0c | 7.390±0.108 00c      |
| b  | 33.30±1.354d | 47.00±1.732c | 31.20±1.852 0d | 4.930±0.114 00d      |
| c  | 100.00±0a    | 72.00±2.000a | 88.30±2.287 0a | 10.020±0.078 00a     |
| d  | 100.00±0a    | 75.00±2.646a | 87.90±0.985 0a | 10.150±0.036 00a     |
| e  | 88.90±2.051b | 64.00±3.000b | 76.20±0.520 0b | 8.740±0.476 00b      |

注:表中同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

性质,一定程度上增加了阳离子在Fe、Mn氧化物上的吸附;其次,赤泥富含钙霞石、碳酸盐-铝硅酸盐等矿物质,这些矿物质表面的活性吸附位点能结合重金属离子交换态,促进重金属从有效态向残渣态转化<sup>[23]</sup>。但从数据分析可知,在修复前期5~30 d,赤泥粉对镉污染土壤的形态分布影响比赤泥颗粒大,但是修复期后期30~60 d,同比比例的赤泥粉和赤泥颗粒对镉污染土壤的形态分布影响基本一致,修复期为90 d时,同比比例赤泥颗粒对镉污染土壤的形态分布影响比赤泥粉大。这是由于赤泥粉OH<sup>-</sup>的释放主要在修复前期(30 d前),赤泥颗粒OH<sup>-</sup>的释放在整个修复期都有释放。

由图6和图7可知,pH值升高是导致土壤Cd活性降低的直接原因,而土壤生物有效态Cd含量降低是导致水稻吸收镉量下降的主要原因。除此之外,赤泥颗粒剂还具有一定的比表面积(经测定,赤泥粉比表面积为122.40 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>,赤泥颗粒比表面积为109.00 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>),能吸附土壤中部分镉使得镉活性降低。因此,在镉污染土壤中添加赤泥颗粒剂能抑制水稻作物镉吸收,减少糙米中镉含量。

由表2可见,不同处理对水稻生长的影响不同,添加3%赤泥颗粒处理的水稻产量最高,而添加5%赤泥处理的水稻产量最低。导致增产的原因可能是赤泥颗粒的添加降低了污染土壤中镉的生物有效态,减少了游离态镉对水稻作物的危害;同时,赤泥颗粒的添加增加了土壤中Fe、Si、Ca等作物所需的微量元素,促进了作物的生长。b处理导致减产的原因是赤泥粉的添加大幅度增加OH<sup>-</sup>,破坏了土壤功能结构,降低了营养元素的有效性,导致水稻生长环境受到严重影响。

## 4 结论

本试验在原有研究的基础上,利用赤泥颗粒缓释pH值的特性来研究赤泥颗粒对轻度镉污染酸性农田土壤的修复,有助于降低赤泥强碱性对土壤功能的破坏。

(1)赤泥颗粒表面的OH<sup>-</sup>活性点位较赤泥粉少,导致同比比例赤泥颗粒的pH值相对赤泥粉降低了2.4个单位,但随着时间的推移,改性后赤泥颗粒中OH<sup>-</sup>有缓释的趋势。

(2)同比比例(5% W/W)赤泥颗粒对镉污染土壤的形态分布影响在修复前期比赤泥粉小,但在修复后期与赤泥粉基本相同甚至稍大,且两者对水稻生长影响

相差较大,前者增产18.3%,后者减产33.3%。

(3)赤泥粉和赤泥颗粒均能抑制水稻对土壤中镉的吸收,添加量越高,抑制效果越明显。

(4)添加合适的赤泥颗粒能促进水稻的生长,反之,会抑制水稻的生长。通过试验,初步确定水稻生长状况最好的赤泥颗粒添加量为3%(W/W)。此时离子交换态最大降幅为32.1%,残渣态最大增幅为13.7%,水稻增产37.35%,糙米镉含量减少43.8%。

综上所述,与赤泥粉比较,改性赤泥颗粒修复镉污染土壤更具有优势,添加合适的赤泥颗粒不仅能提高土壤的pH值,促进镉形态的转化,降低生物有效态,减少糙米中镉含量,使稻米质量达到国家粮食卫生标准,还能促进水稻的生长,提高水稻的产量。赤泥的利用为重金属污染土壤修复提供了一条可行的途径;赤泥改性成赤泥颗粒,为重金属污染土壤修复结合作物生长效果研究以及后续深入研究提供了一定的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 崔力拓,耿世刚,李志伟.我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J].现代农业科技,2006(11):184-185.
- [2] CUI Li-tuo, GENG Shi-gang, LI Zhi-wei. The current situation and countermeasure of cadmium in farmland soil in China[J]. *Modern Agr-Technology*, 2006(11):184-185.
- [3] 廖春发,卢惠明,邱定蕃,等.从赤泥中综合回收有价值金属工艺的研究进展[J].轻金属,2003(10):18-22.
- [4] LIAO Chun-fa, LU Hui-ming, QIU Ding-fan, et al. Recovering valuable metals from red mud generation during alumina production[J]. *Light Metals*, 2003(10):18-22.
- [5] 何伯泉,周国华,薛玉兰.赤泥在环境保护中的应用[J].轻金属,2001(2):24-26.
- [6] HE Bo-quan, ZHOU Guo-hua, XUE Yu-lan. Application of red mud in environmental protection[J]. *Light Metals*, 2001(2):24-26.
- [7] 董凤芝,刘心中,姚德.粉煤灰和赤泥的综合利用[J].矿产综合利用,2004(6):37-39.
- [8] DONG Feng-zhi, LIU Xin-zhong, YAO De. The comprehensive utilization of fly ash & red mud[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2004(6):37-39.
- [9] 周文献,谢友均,刘宝举.赤泥对粉煤灰激发作用的试验研究[J].混凝土,2002(1):37-40.
- [10] ZHOU Wen-xian, XIE You-jun, LIU Bao-ju. Study on the activation of fly ash by using red mud[J]. *Concrete*, 2002(1):37-40.
- [11] Atasoy A. An Investigation on characterization and thermal analysis of the aughinish red mud[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005, 81:357-361.
- [12] Krishna Pankaj, Raredy M Sudhaka, Patnaik S K. Aspergi-illus tubingen-sis reduces the pH of the bauxite residue (red mud) amended soils[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2005, 167:201-209.

- [8] Gupta V K, Sharma S. Removal of cadmium and zinc from aqueous solutions using red mud[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36: 3612–3617.
- [9] Santona L, Castaldi P, Melis P. Evaluation of the interaction mechanisms between red muds and heavy metals[J]. *Hazard Mater*, 2006, 136: 324–329.
- [10] Lombi E, Zhao F J, Zhang G Y, et al. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: Chemical assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118: 435–443.
- [11] Muller I, Pluquet E. Immobilization of heavy metals in sediment dredged from a seaport by iron bearing materials[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37: 379–386.
- [12] Friesl W, Horak O, Wenzel W W. Immobilization of heavy metals in soils by the application of bauxite residues: Pot experiments under field conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167: 54–59.
- [13] Giovanni Garau, Paola Castaldi, Laura Santona, et al. Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil[J]. *Geoderma*, 2007, 142: 47–57.
- [14] 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, et al. Effect of red-mud on rice growth and cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 692–697.
- [15] 王立群, 罗 磊, 马义兵, 等. 不同钝化剂和培养时间对 Cd 污染土壤中可交换态 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1098–1105.  
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. Effects of different amendments and incubation times on exchangeable cadmium in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1098–1105.
- [16] Shuman L M. Fractionation method for soil microelements[J]. *Soil Science*, 1985, 140: 11–22.
- [17] Szefer P, Giasbyg P, Penpkowiak J, et al. Extraction studies of heavy-metal pollutants in surficial sediments from the Southern Baltic sea of Poland[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 111–126.
- [18] Borovec Z. Evaluation of the concentrations of trace elements in stream sediments by factor and cluster analysis and the sequential extraction procedure[J]. *Science Total Environment*, 1996, 177: 237–250.
- [19] Rauret G. Extraction procedure for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediments[J]. *Talanta*, 1998, 46: 449–455.
- [20] Snars K E, Gilkes R J, Wong M T F. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2004, 42(3): 321–328.
- [21] Gray C W, Dunham S J, Dennis P G, et al. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud[J]. *Environ Pollut*, 2006, 142(3): 530–539.
- [22] 刘 艳, 罗 琳, 罗惠莉, 等. 赤泥颗粒对韭菜吸收污染土壤中铅锌的抑制效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 289–294.  
LIU Yan, LUO Lin, LUO Hui-li, et al. Study on granulated red mud inhibition effect of leeks absorption in lead and zinc polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 289–294.
- [23] Hackbarth K, Gesing T M, Fechtelkord M, et al. Synthesis and crystal structure of carbonate cancrinite  $\text{Na}_4[\text{AlSiO}_4]_6\text{CO}_3(\text{H}_2\text{O})_{3.4}$  grown under low-temperature hydrothermal conditions[J]. *Mesoporous Mater*, 1999, 30: 347–358.