

## 不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响

李阳, 尹英杰, 朱司航, 张新, 黄益宗, 王喆, 商建英

引用本文:

李阳, 尹英杰, 朱司航, 等. 不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 247–255.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0918>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 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>

### 全生育期淹水联合钝化材料对重度Cd污染下水稻生长和镉富集的影响

曹云清, 徐晓燕, 韩磊, 王瑞刚, 冯人伟, 徐应明

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2498–2506 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0348>

### 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究

袁兴超, 李博, 朱仁凤, 药栋, 湛方栋, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 807–817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0672>

### 钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

### 硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响

贺敏杰, 蔡昆争, 王维, 黄飞, 蔡一霞

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1651–1659 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0131>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李 阳, 尹英杰, 朱司航, 等. 不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 247–255.

LI Yang, YIN Ying-jie, ZHU Si-hang, et al. Effects of different combined amendments on Cd uptake and accumulation by rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 247–255.

## 不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响

李 阳<sup>1</sup>, 尹英杰<sup>1</sup>, 朱司航<sup>1,2,3</sup>, 张 新<sup>1</sup>, 黄益宗<sup>4</sup>, 王 喆<sup>1</sup>, 商建英<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100193; 3. 农业部华北耕地保育重点开放实验室, 北京 100193; 4. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘 要:**将石灰、赤泥和高岭土按不同比例混合(施用总量为 4500 kg·hm<sup>-2</sup>)施加于Cd污染稻田土壤,根据混合比例不同设置CK(常规种植)、T1(1:7:4)、T2(3:5:4)、T3(4:4:4)和T4(6:2:4)共5个处理,探究不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响。结果表明:4种混施处理能够显著降低土壤有效态Cd含量,较CK相比依次降低了28.0%、40.9%、43.4%和57.4%。4种混施处理能够不同程度地降低水稻各部位对Cd的吸收累积,籽粒的Cd含量依次降低47.1%、49.2%、55.5%和81.6%,T2、T3和T4处理水稻籽粒中Cd含量达到了食品安全国家标准(GB 2762—2017, Cd≤0.2 mg·kg<sup>-1</sup>)。土壤有效态Cd含量与水稻根、茎、叶和籽粒中Cd含量的Pearson相关系数分别为0.826、0.709、0.778和0.532,均达到显著相关。不同处理根系富集系数依次为5.03、1.83、2.22、1.32和0.90,钝化处理显著降低了水稻根系对Cd的富集能力。各处理水稻产量以及籽粒K、Mg元素含量没有显著差异,T1到T4处理Ca元素含量依次增加。综合分析,T4处理对于降低土壤中有有效态Cd含量以及水稻籽粒中Cd含量效果最佳,且没有降低水稻产量和与稻米品质密切相关的K、Mg和Ca元素含量。

**关键词:**镉污染;混施钝化剂;水稻;吸收;累积

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)02-0247-09 doi:10.11654/jaes.2019-0918

### Effects of different combined amendments on Cd uptake and accumulation by rice

LI Yang<sup>1</sup>, YIN Ying-jie<sup>1</sup>, ZHU Si-hang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, HUANG Yi-zong<sup>4</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>, SHANG Jian-ying<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, Beijing 100193, China; 3. Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China; 4. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the effect of different combined amendments on Cd uptake and accumulation by rice plants. In this study, lime, red mud, and kaolin were mixed in different proportions (the total application amount was 4500 kg·hm<sup>-2</sup>) and the mixtures were applied to Cd-contaminated paddy soil. According to the different mixing ratios of the three materials (lime, red mud, and kaolin), five treatments were designed: CK (control treatment), T1 (1:7:4), T2 (3:5:4), T3 (4:4:4), and T4 (6:2:4). The results showed that the four combined amendment treatments could significantly reduce the available Cd content of the soil and the Cd accumulation in different parts of the rice plant. Compared with that of the CK, the available Cd contents in soil were decreased by 28.0%, 40.9%, 43.4%, and 57.4%, and the Cd contents in rice grain were decreased by 47.1%, 49.2%, 55.5%, and 81.6% for the four treatments with combined amendments, respectively. The Cd contents of rice grain in T2, T3, and T4 treatments met the National Food Safety Standard value (GB 2762—2017, Cd≤0.2 mg·kg<sup>-1</sup>). The correlation analysis showed that the available Cd content of the soil were significantly related to the Cd contents in various parts of the rice plant (roots, stems, leaves, and grain), and the Pearson correlation coefficient values were 0.826,

收稿日期:2019-08-21 录用日期:2019-11-27

作者简介:李 阳(1995—),男,江苏南京人,硕士研究生,从事土壤和地下水污染修复研究。E-mail:ly996961@126.com

\*通信作者:商建英 E-mail:jyshang@cau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801503)

Project supported: The National K&D Program of China (2017YFD0801503)

0.709, 0.778, and 0.532, respectively. The root bioaccumulation factors of the five treatments were 5.03, 1.83, 2.22, 1.32 and 0.90, respectively; thus, amendment treatments significantly reduced the bioaccumulation capacity of rice roots for Cd. There was no significant difference in the yield of rice or the K and Mg contents of grain in each treatment, and the Ca content of grains was in the order of T1 > T2 > T3 > T4. Based on a comprehensive analysis, the T4 treatment was the best in the five treatments for reducing the available Cd content in soils and the Cd content in rice grains. Furthermore, it did not reduce rice yield or the K, Mg, and Ca contents that are closely related to rice quality.

**Keywords:** Cd contamination; combined amendment; rice; uptake; accumulation

湖南省矿产资源丰富,被称为“有色金属之乡”,随着人类不合理的采矿活动加剧,当地农田土壤正受到日益严重的污染。据第二次全国土壤普查统计,湖南省矿毒污染型稻田面积达到 $6.7 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,1998年增加到 $1.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (湖南省水田面积的0.45%)<sup>[1]</sup>。刘小诗<sup>[2]</sup>测得湖南石门地区及株洲地区土壤中Cd平均含量均高于土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)<sup>[3]</sup>,雷鸣等<sup>[4]</sup>研究发现湖南郴州柿竹园矿区的水稻土中Cd的污染指数达到重污染指标。水稻作为湖南地区的主要粮食作物,农田中的Cd通过在水稻中的累积会直接威胁农产品质量以及人类健康安全。相关研究表明,由于水稻田的淹水条件以及水稻自身的性质,重金属Cd在水稻体内的富集较多<sup>[5-6]</sup>。长期食用重金属超标的稻米易引起健康问题。

降低水稻对重金属Cd的富集成为一个亟需解决的问题。周莉等<sup>[7]</sup>总结出几种农田污染Cd防控措施:污染源源头防控;水分管理抑制作物Cd吸收;原位钝化修复抑制作物Cd吸收;叶面调理抑制Cd吸收等。本试验采用的原位钝化修复技术成本低、见效快、对土壤破坏小。该方法是指向土壤中添加化学物质,通过改变土壤理化性质和重金属污染物化学形态,降低重金属污染物在土壤中的有效性和迁移性,从而抑制作物对重金属污染物的吸收<sup>[8]</sup>。目前的原位钝化修复研究一般使用单一钝化材料修复受污染的土壤,但单一钝化材料易破坏土壤结构,可能造成土壤二次污染<sup>[9]</sup>。例如,施用石灰可以提高土壤pH从而降低土壤Cd的有效性<sup>[10]</sup>,但石灰的持效性较短,宁皎莹等<sup>[11]</sup>研究表明施用石灰对降低玉米籽粒中Cd含量的效应只能持续一年半左右,且大量施用易造成土壤板结。赤泥中的铁铝氧化物可以与土壤Cd结合,通过其多孔结构吸附Cd以及提高土壤pH值来降低土壤Cd的有效性<sup>[12-13]</sup>,但赤泥中可能含有少量重金属和放射性元素,大量施用会引起环境污染风险<sup>[14]</sup>。高岭土属于黏土矿物类钝化材料,对土壤中Cd具有一定的吸附作用,效果并非十分显著,但其价格低廉,在环境中具有

较好的自净能力<sup>[15-16]</sup>。单一钝化剂会存在不足之处,将其混合施用可以弥补这一缺点,研究表明,合理混施钝化剂对于治理土壤重金属污染效果显著。顾巧浓等<sup>[17]</sup>发现腐殖质和石灰复配处理对土壤重金属的处理效果较好。郭晓方等<sup>[18]</sup>选用石灰与过磷酸钙混施处理显著降低了玉米籽粒Cd、Zn和Cu的含量。

因此,本文本着固废资源利用、价格低廉的原则,选取了石灰、赤泥和高岭土3种常用钝化材料,通过土壤培养试验和大田试验,研究不同钝化材料混施对南方酸性土壤Cd有效性的影响,并在大田试验中探究不同混施处理下水稻各部位对Cd的吸收累积特征。通过田间试验筛选出降低土壤Cd有效性和植物Cd含量的混施钝化剂,为我国农田Cd污染防治提供实际田间验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤与水稻

试验田位于湖南省株洲市株洲县马洲村(27°55'N, 113°08'E),属亚热带季风湿润气候,夏季高温多雨,冬季温和湿润,年平均降水1389 mm,降水多集中在每年的4—7月,适合水稻等喜热喜水的作物生长。当地土壤基本性质详见表1,其中土壤总Cd含量 $1.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超过土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)<sup>[3]</sup>,属于Cd污染土壤。

供试水稻品种为湘菲优8118,该品种属籼型三系杂交水稻,作双季晚稻种植,由株洲县当地农民提供。

表1 供试土壤基本理化性质及重金属含量  
Table 1 Physical, chemical properties and heavy metal content of the tested soil

| 机械组成 Mechanical composition/% |            |           | pH   | 有机质                                                | 总Cd/<br>$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|-------------------------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 2~0.05 mm                     | 0.05~0.002 | <0.002 mm |      | Organic matter/<br>$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ |                                          |
| 20.95                         | 73.82      | 5.23      | 5.52 | 32.34                                              | 1.28                                     |

## 1.2 钝化材料的土壤培养试验

为比较混施钝化剂和单一钝化材料对土壤钝化效果的差异,分别对4种混施钝化剂(T1、T2、T3和T4)和3种单一钝化材料(石灰L、赤泥R、高岭土K)进行土壤培养试验。将大田试验前采回的土壤样品自然风干,混匀,过2 mm筛。准确称取20 g土壤样品于50 mL玻璃瓶中,每个玻璃瓶中添加一种钝化材料,添加量为土壤质量的0.16%,充分混匀后按土水比1:1加入去离子水,使得土壤达到淹水状态,模拟水稻土田间水分情况。室温下培养7 d,测定土壤有效态Cd含量。每种钝化材料土壤培养试验重复3次。

## 1.3 大田试验布置与管理

试验共设5个处理:CK为常规种植处理;T1、T2、T3和T4为混施处理,4种混施处理均由石灰(醴陵市马恋永红石灰厂)、赤泥(山东魏桥创业集团)和高岭土(长沙有信化工贸易有限公司)3种材料(单一钝化剂)混合而成,其混合比例见表2。每个处理设3个重复,共15个小区,小区面积为 $5\text{ m}\times 6\text{ m}=30\text{ m}^2$ 。单一钝化剂采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF}$ 完全消解,ICP-OES(Avio 200,珀金埃尔默仪器有限公司,美国)测定,成分详见表3,3种材料几乎不含Cd元素。如图1所示,通过粉末X射线衍射仪(X-Pert3 Powder,荷兰帕纳科公司,荷兰)分析所得,石灰主要由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{CaCO}_3$ 组成,赤泥主要由 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 组成,高岭土主要由 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和

$\text{Al}(\text{OH})_3$ 组成。4种钝化材料于2018年7月施入土壤,与土壤表层均匀混合,熟化7 d后,将提前培育的秧苗进行移栽。水稻整个生育期的田间管理与当地农业生产保持一致。2018年11月水稻收获,经脱粒机脱粒,实测产量。

## 1.4 大田试验样品采集和测定

土壤样品的采集与测定:每个小区按照五点取样法,采集0~20 cm非根际土壤样品,并均匀混合成混合样品,根际土壤样品从水稻根系上抖落获得。将土壤样品自然风干,除去石块、根系和凋落物等,研磨,分别过20目和100目尼龙网筛,保存待测。土壤pH值、土壤有机质等测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[19]</sup>,全Cd采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF}$ 微波消解-原子吸收光谱仪(PinAAcle 900T,珀金埃尔默仪器有限公司,美国)测定(HJ 832—2017)<sup>[20]</sup>,土壤有效态Cd用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的醋酸铵在室温下浸提,土水比1:10,提取时间为2 h,原子吸收光谱仪测定,以国家标准物质土壤(GBW-07404)进行质量控制,保证分析误差在允许范围内。

植物样品的采集与测定:每个小区按S型取样法采集5蔸水稻,按部位分为根、茎、叶和籽粒,将各部位均匀混合成混合样品。水稻植株用自来水冲洗,去离子水润洗后擦干。植株105℃杀青30 min,65℃烘

表2 钝化剂混合比例

Table 2 Mixing ratios of amendments

| 处理Treatments | 混合比例 Mixing ratios |
|--------------|--------------------|
| CK           | 常规种植               |
| T1           | 石灰、赤泥、高岭土比例为1:7:4  |
| T2           | 石灰、赤泥、高岭土比例为3:5:4  |
| T3           | 石灰、赤泥、高岭土比例为4:4:4  |
| T4           | 石灰、赤泥、高岭土比例为6:2:4  |

注:施入钝化剂总量为 $4500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

Note: The total amount of amendment applied is  $4500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ .

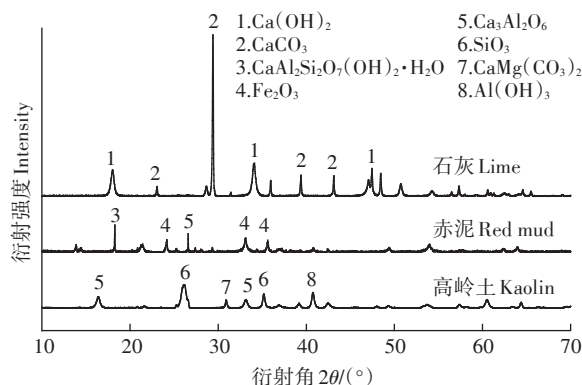


图1 石灰、赤泥和高岭土XRD图

Figure 1 XRD patterns of lime, red mud and kaolin

表3 钝化剂成分

Table 3 Amendment composition

| 钝化剂 Amendment | Ca/g·kg <sup>-1</sup> | Mg/g·kg <sup>-1</sup> | Al/g·kg <sup>-1</sup> | Fe/g·kg <sup>-1</sup> | Cu/mg·kg <sup>-1</sup> | Zn/mg·kg <sup>-1</sup> | Cd/mg·kg <sup>-1</sup> |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 石灰 Lime       | 608.36                | 8.47                  | 1.43                  | 1.59                  | 0.96                   | 8.53                   | —                      |
| 赤泥 Red mud    | 4.04                  | 0.32                  | 24.21                 | 589.50                | 0.13                   | —                      | —                      |
| 高岭土 Kaolin    | 4.28                  | 3.05                  | 22.23                 | 8.43                  | 0.29                   | —                      | 0.01                   |

注:“—”表示未检测到。

Note: “—” means not detected.

至恒质量,籽粒脱壳成糙米。根、茎、叶和籽粒用万能粉碎机磨细,过60目尼龙网筛。籽粒营养元素用ICP-OES测定。植物Cd采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解-原子吸收光谱仪测定(GB 5009.15—2014)<sup>[21]</sup>。以国家标准物质植物(GBW-07603)进行质量控制,保证分析误差在允许范围内。

### 1.5 数据处理与分析

为研究不同钝化处理下Cd在水稻体内的富集和转运,采用生物富集系数(Bioaccumulation factor, BAF)和转运系数(Translocation factor, TF)两个指标<sup>[22]</sup>。

$$\text{BAF} = \frac{C_1}{C_2}$$

$$\text{TF} = \frac{C_3}{C_4}$$

式中:  $C_1$ 为水稻根系中重金属含量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C_2$ 为土壤中重金属含量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C_3$ 为水稻后一部位重金属含量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C_4$ 为水稻前一部位重金属含量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

利用Microsoft Excel 2016处理数据,SPSS 24进行Duncan差异显著性检验和Pearson相关性分析, Sigmaplot 12.5作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有效态Cd含量、pH值和有机质含量

图2为钝化材料土壤培养试验中土壤有效态Cd含量,其范围是 $0.51\sim 1.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,从大到小依次为 $\text{CK}>\text{K}>\text{R}>\text{T1}>\text{T2}>\text{T3}>\text{L}>\text{T4}$ 。仅石灰(L)、T2、T3和T4混施钝化剂处理的土壤有效态Cd含量与CK处理存在显著差异( $P<0.05$ ),分别降低了50.5%、29.1%、32.8%和51.7%。

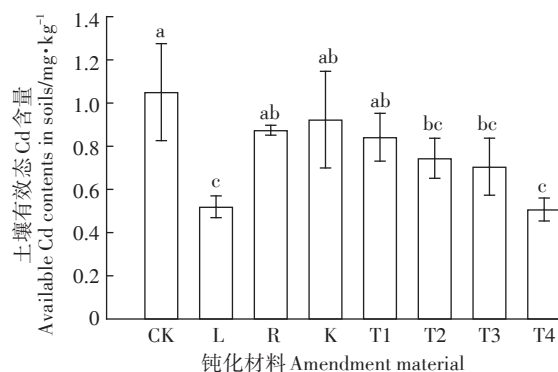
图3为大田试验下不同混施处理土壤有效态Cd含量,4种混施钝化剂处理均能不同程度地固定土壤介质中的Cd元素。与常规种植处理CK相比,T1、T2、T3和T4处理根际土壤有效态Cd含量分别降低了23.7%、35.8%、40.4%和54.7%,非根际土壤有效态Cd含量分别降低了28.0%、40.9%、43.4%和57.4%,T4处理土壤有效态Cd含量降幅最大。无论是根际土壤还是非根际土壤,4种混施处理随着钝化剂中石灰比重的增加、赤泥比重的减小,土壤有效态Cd含量均呈现降低的趋势。CK处理的土壤有效态Cd含量与其他处理相比均存在显著差异( $P<0.05$ ),说明4种混施钝化剂对降低土壤有效态Cd含量效果均显著。

表4为水稻收获后非根际土壤样品的pH值和有机

质含量。从CK到T4处理,土壤pH值从5.48依次增加到6.39。T1和T2处理土壤pH值与CK处理差异不显著,T3和T4处理土壤pH值与CK处理差异显著( $P<0.05$ )。不同处理土壤有机质含量范围为 $31.26\sim 33.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,施用钝化剂后土壤有机质含量并没有显著变化。

### 2.2 植物各部分Cd含量

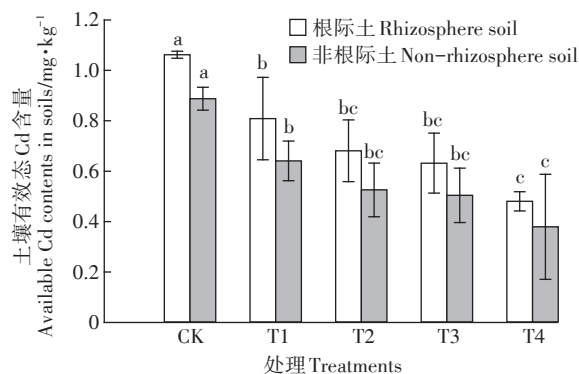
图4表明,各处理根部的Cd含量与CK相比依次降低63.6%、55.8%、73.8%和82.1%,茎部的Cd含量依次降低73.4%、61.5%、78.0%和64.9%,籽粒的Cd含量依次降低47.1%、49.2%、55.5%和81.6%。除了叶部之外,混施处理水稻其余各部位Cd含量与CK处理均存在显著差异( $P<0.05$ ),T2和T4处理叶部的Cd含量与CK处理也存在显著差异( $P<0.05$ ),较CK处理分别下降了43.8%和59.9%。综合比较发现,各混施



不同字母表示不同钝化材料间差异显著( $P<0.05$ )  
Different letters mean significant difference between different amendment materials at 0.05 level

图2 钝化材料培养土壤有效态Cd含量

Figure 2 Available Cd contents in cultivated soils with amendment material



不同字母表示同种土壤的不同处理间差异显著( $P<0.05$ )  
Different letters for the same soil mean significant difference between different treatments at 0.05 level

图3 不同处理土壤有效态Cd含量

Figure 3 Available Cd contents in soils under different treatments

处理均能不同程度地抑制水稻各部位对Cd的吸收累积,且T4处理抑制效果最为显著。籽粒作为水稻的食用部分,其安全问题受到广泛关注。图4中的虚线是食品安全国家标准(GB 2762—2017)<sup>[23]</sup>中规定的糙米中Cd元素限量 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,限量指污染物在食物可食用部分允许存在的最大含量水平,5个处理籽粒的Cd含量依次是限量值的197%、103%、99%、88%和36%。CK和T1处理籽粒中Cd含量超过国家标准;T2、T3和T4处理Cd含量均低于限量值,达到国家标准。

### 2.3 根际土壤有效态Cd含量与水稻各部位Cd含量相关性分析

15个小区水稻各部位Cd含量与根际土壤中有有效态Cd含量的相关分析见图5。水稻各部位Cd含量与根际土壤有效态Cd含量均显著相关,其中根部、茎部和籽粒3个部位Cd含量与根际土壤有效态Cd含量极显著相关( $P<0.01$ ),相关系数依次为0.826、0.709和

0.778,叶部Cd含量与根际土壤有效态Cd含量显著相关( $P<0.05$ ),相关系数为0.532。

### 2.4 水稻Cd富集系数和转运系数

表5中显示,水稻根系对Cd的富集系数为0.90~5.03,与CK处理相比,施用钝化剂能够显著降低根系对Cd的富集系数,且T4处理最低,为0.90。分析Cd的转运系数可知,水稻对Cd的转运系数大小顺序为 $\text{TF}_{\text{根-茎}}>\text{TF}_{\text{叶-籽粒}}>\text{TF}_{\text{茎-籽粒}}$ ,施用钝化剂处理中,T4处理显著增加了根到茎的转运系数,T1和T3处理显著增加了茎到籽粒的转运系数,T1、T3和T4处理显著降低了叶到籽粒的转运系数,降幅依次为28.3%、47.8%和53.4%。

### 2.5 不同混施处理下水稻籽粒产量及其部分营养元素含量

由表6可知,不同处理水稻籽粒产量间均不存在显著差异( $P>0.05$ ),其产量约 $9000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。对于部分营养元素,不同处理水稻籽粒K和Mg含量差异不显著( $P>0.05$ )。对于籽粒Ca含量,混施处理T1、T2、

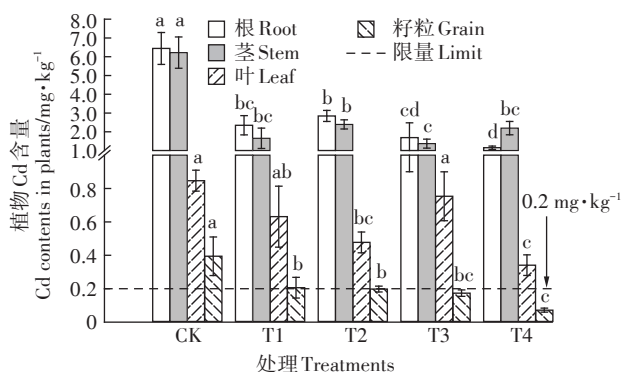
表4 不同处理下土壤pH值和有机质含量

Table 4 Soil pH values and SOM contents under different treatments

| 处理 Treatments | pH                      | 有机质 Organic matter/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
|---------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| CK            | $5.48\pm 0.39\text{c}$  | $31.26\pm 1.02$                                   |
| T1            | $5.62\pm 0.14\text{bc}$ | $32.07\pm 0.78$                                   |
| T2            | $5.77\pm 0.26\text{bc}$ | $32.52\pm 0.97$                                   |
| T3            | $6.10\pm 0.21\text{ab}$ | $33.96\pm 2.04$                                   |
| T4            | $6.39\pm 0.37\text{a}$  | $33.93\pm 1.50$                                   |

注:不同字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

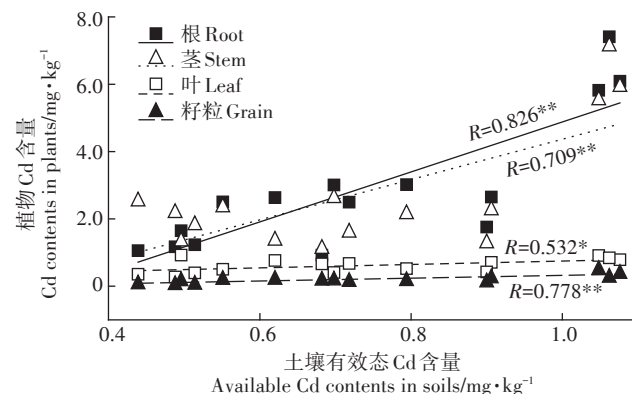
Note: Different letters mean significant difference between different treatments at 0.05 level. The same below.



不同字母表示植物同一部位的不同处理间差异显著( $P<0.05$ )  
Different letters for the same part in plants mean significant difference between different treatments at 0.05 level

图4 不同处理下植物Cd含量

Figure 4 Cd contents in plants under different treatments



R: Pearson 相关系数; \*: 显著相关( $P<0.05$ ); \*\*: 极显著相关( $P<0.01$ )  
R: Pearson correlation; \*: the significance at 95% ( $P<0.05$ ) probability levels; \*\*: the significance at 99% ( $P<0.01$ ) probability levels

图5 植物Cd含量与土壤有效态Cd含量的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis between Cd contents in plants and available Cd contents in soils

表5 Cd在水稻中的富集系数和转运系数

Table 5 The bioaccumulation factors and translocation factors of Cd in rice plant

| 处理 Treatments | BAF                     | $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ | $\text{TF}_{\text{茎-籽粒}}$ | $\text{TF}_{\text{叶-籽粒}}$ |
|---------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| CK            | $5.03\pm 0.66\text{a}$  | $0.97\pm 0.01\text{b}$   | $0.07\pm 0.03\text{cd}$   | $0.46\pm 0.12\text{a}$    |
| T1            | $1.83\pm 0.40\text{bc}$ | $0.71\pm 0.17\text{b}$   | $0.13\pm 0.03\text{ab}$   | $0.33\pm 0.04\text{bc}$   |
| T2            | $2.22\pm 0.23\text{b}$  | $0.85\pm 0.12\text{b}$   | $0.08\pm 0.01\text{bc}$   | $0.42\pm 0.07\text{ab}$   |
| T3            | $1.32\pm 0.62\text{cd}$ | $0.90\pm 0.30\text{b}$   | $0.13\pm 0.04\text{a}$    | $0.24\pm 0.05\text{c}$    |
| T4            | $0.90\pm 0.07\text{d}$  | $1.93\pm 0.46\text{a}$   | $0.03\pm 0.01\text{d}$    | $0.21\pm 0.03\text{c}$    |

T3 和 T4 与常规种植 CK 处理相比均存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 其含量为  $CK<T1<T2<T3<T4$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 混施钝化剂对土壤 Cd 有效性的影响

土壤培养试验表明单一钝化材料对降低土壤有效态 Cd 的能力为石灰>赤泥>高岭土。混施钝化剂土壤培养试验有效态 Cd 含量高低为  $T1>T2>T3>T4$ 。这可能由于 T1~T4 处理钝化剂中石灰比重的增加, 赤泥比重的减小。T4 在所有钝化剂中降低土壤有效态 Cd 效果最佳, 优于所有单一钝化材料; T1 在所有混施钝化剂中降低土壤有效态 Cd 效果最差, 但仍优于单一钝化材料赤泥和高岭土。由此可见, 混施钝化剂在一定配比下对降低有效态 Cd 的效果会优于单一钝化材料, 因此在本研究大田试验中仅针对混施钝化剂, 研究其不同配比对土壤有效态 Cd 的影响。

大田试验表明 4 种混施钝化剂均能降低土壤有效态 Cd 含量, 且从 T1~T4 处理降低土壤有效态 Cd 效果依次增加, 与土壤培养试验趋势一致。研究表明石灰和赤泥都能通过提高土壤 pH 来降低土壤 Cd 的有效性, 石灰携带的碳酸盐 ( $CO_3^{2-}$ )、磷酸盐 ( $PO_4^{3-}$ ) 等与重金属形成难溶性的化合物可以降低土壤 Cd 有效性<sup>[10]</sup>。高译丹等<sup>[24]</sup>发现, 石灰施用于农田耕作土中使交换态 Cd 含量降低 17.8%~21.7%, 碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 Cd 比例增加, 致使土壤有效态 Cd 含量降低。赤泥富含铁、铝氧化物, 其表面活性吸附位点易与水溶态和交换态的重金属结合, 使土壤中重金属从有效性较高的水溶态和交换态向有效性较低的铁锰氧化物结合态转化, 甚至可以进一步向残渣态转化, 有利于重金属的固定<sup>[25]</sup>。

谢运河等<sup>[26]</sup>在 Cd 污染稻田改制玉米的大田试验中也发现石灰在降低土壤有效态 Cd 的能力上优于赤泥, 这与本研究中土壤培养试验结果一致, 石灰和赤泥比重的变化会影响混施钝化剂的钝化效果。

#### 3.2 混施钝化剂对土壤 pH 值和有机质的影响

土壤 pH 值对土壤微生物的活性、植物生长等都具有重要的影响, 本研究中混施处理均能够提高土壤 pH 值, 且随着石灰比例增加, 赤泥比例减小, 土壤 pH 值依次增加。石灰和赤泥作为高碱性物质<sup>[27-28]</sup>, 施入土壤中均能够有效提高土壤 pH 值, 石灰中含有的大量 CaO, 与土壤水作用也会产生大量的  $OH^-$ 。谢运河等<sup>[26]</sup>研究表明石灰增加土壤 pH 值的效果优于赤泥, 这与本研究一致。土壤 pH 值还对土壤中重金属的形态分布、迁移、转化有重要影响<sup>[29-30]</sup>。土壤 pH 值升高可直接导致土壤 Cd 与  $OH^-$  形成氢氧化物沉淀, 降低土壤 Cd 的有效性。在本研究中土壤 pH 值的升高能够较好地解释土壤有效态 Cd 降低这一现象。土壤有机质是反映土壤肥力的一个重要指标, 与土壤结构、土壤的保肥透水能力密切相关。本研究中混施钝化剂处理并未显著改变土壤有机质含量, 因此土壤有机质对降低土壤 Cd 有效性影响不大。

#### 3.3 混施钝化剂对水稻吸收累积 Cd 的影响

水稻各部位吸收累积 Cd 的含量由高到低基本为根>茎>叶>籽粒。大量研究表明, 重金属在新陈代谢旺盛的器官中积累较多, 在营养器官中积累相对较少, 其累积规律一般为根>茎>叶>籽粒<sup>[31]</sup>, 与本文研究结果一致。首先, 重金属通过根部进入植物, 一部分重金属在根部滞留, 其余部分通过质外体和共质体途径继续向上运输<sup>[32]</sup>。为避免重金属的毒害作用, 植物通过区域化作用和螯合作用两个解毒机制将重金属滞留在细胞质中, 抑制重金属向籽粒中转移<sup>[33]</sup>, 从而降低水稻地上部位重金属含量<sup>[34]</sup>。

影响重金属在植物体内累积的因素有很多, 包括土壤 pH 值、CEC、离子间的相互作用和土壤中重金属有效态含量等<sup>[35]</sup>, 而土壤中重金属有效态含量被认为是主要原因之一。刘维涛等<sup>[36]</sup>研究表明施用钝化材料可以降低土壤有效态 Cd 含量, 从而降低大白菜中 Cd 的含量。杜彩艳等<sup>[35]</sup>也发现不同钝化剂组合降低了土壤中有效态 Pb、Cd 和 Zn 含量, 从而降低了玉

表 6 不同处理下籽粒产量及营养元素含量

Table 6 Grain yield and nutrient element contents under different treatments

| 处理 Treatments | 产量 Yield/kg·hm <sup>-2</sup> | K/mg·kg <sup>-1</sup> | Mg/mg·kg <sup>-1</sup> | Ca/mg·kg <sup>-1</sup> |
|---------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| CK            | 9 315.8±167.9a               | 3 261.3±7.2a          | 800.4±46.3a            | 194.3±23.9c            |
| T1            | 9 393.6±107.2a               | 3 262.7±15.2a         | 762.1±41.5a            | 247.3±26.8b            |
| T2            | 9 393.6±171.1a               | 3 247.9±57.1a         | 766.3±50.8a            | 250.6±15.1b            |
| T3            | 8 982.3±876.2a               | 3 243.5±6.3a          | 769.8±28.6a            | 266.8±22.1ab           |
| T4            | 9 315.8±340.6a               | 3 284.8±114.9a        | 814.7±79.3a            | 304.7±33.1a            |

米籽粒中Pb、Cd和Zn含量。Cheng等<sup>[37]</sup>通过回归方程分析了土壤中多种有效态重金属含量和水稻籽粒中重金属含量的相关关系,结果均达到了显著性水平。因此,本文对15个小区水稻各部位Cd含量与根际土壤中有有效态Cd含量进行了相关分析。

相关性分析表明水稻各部位吸收累积Cd元素与土壤中有有效态Cd含量显著相关。4种混施处理随着石灰成分的增加,土壤有效态Cd含量降低,水稻各部位吸收累积Cd含量大致呈现下降的趋势,T4处理抑制水稻对Cd的吸收累积效果尤为显著,T2、T3和T4处理水稻籽粒中Cd含量均降低到食品安全国家标准以下,这还可能与石灰中大量的Ca与Cd竞争根系位点,从而抑制植物根系对Cd的吸收累积<sup>[38]</sup>有关。

### 3.4 水稻富集系数和转运系数的差异

富集系数是用来评价植物从土壤中吸收重金属的能力,富集系数的大小表示植物富集重金属能力的强弱<sup>[22]</sup>。转运系数是用来评价植物某一部位对于重金属转移的能力,转运系数越大,该部位转移重金属的能力越强<sup>[22]</sup>。从表5可得,施用钝化剂处理均能显著降低水稻根系对Cd的富集能力,从源头减少了土壤中Cd向水稻植株中转移。但对于转运系数,仅有T1、T3和T4处理能够降低水稻叶部到籽粒的转运系数,其余各部位间转运能力较常规种植CK相比均呈现持平或上升的趋势。富集系数和转运系数下降越多,表明钝化剂对于抑制水稻各部位对Cd吸收累积起到的作用越大,本研究中,根系对Cd的富集能力的大幅度下降可能是钝化剂处理能够抑制水稻各部位对Cd吸收累积的原因之一。T4处理根的富集系数最低,导致水稻根部Cd含量最低,尽管T4处理根到茎的转运系数显著高于其他处理,但其茎部Cd含量仍在所有处理中排第三,T4处理茎到籽粒和叶到籽粒的转运系数均为所有处理中最低,有效地减少了Cd向籽粒的转移。富集系数和转运系数的共同效应,使T4处理水稻籽粒Cd含量最低,达到了食品安全国家标准。

### 3.5 水稻产量和营养元素的差异

本文研究重点在于不同混施钝化处理对于水稻Cd吸收累积的影响,但同时也要关注不同处理是否会降低水稻产量和稻米品质。水稻产量主要体现在单位面积土地上收获籽粒的质量,由表6分析可得,4种混施钝化处理并不能显著提高水稻的产量,但也没有显著降低水稻的产量。稻米品质与籽粒中营养元素含量密切相关,本文针对性地选取了3种营养元素

进行测定。相关研究表明,K元素能够提高稻米的外观品质和碾米品质<sup>[39]</sup>,Mg元素能够降低稻米直链淀粉含量,提高稻米蛋白质含量<sup>[39]</sup>,Ca含量与籽粒的长、宽、厚呈极显著或显著相关,Ca含量高,籽粒大且米粒充实<sup>[40]</sup>。5个处理间水稻籽粒K和Mg含量均没有显著差异,CK到T4处理籽粒Ca含量的逐渐增加可能是由于混施处理中石灰用量的依次增加。综上,4种混施钝化处理没有降低水稻产量以及与稻米品质密切相关的籽粒中K、Mg元素含量,反而能够增加籽粒中Ca元素的含量。

## 4 结论

(1)4种混施钝化剂均能显著降低土壤有效态Cd含量,石灰含量越高,效果越好。

(2)水稻各部位吸收累积Cd能力的大致关系为根>茎>叶>籽粒。4种混施钝化剂均能不同程度地抑制水稻各部位对Cd的吸收累积,T4处理抑制Cd吸收效果最显著。

(3)水稻各部位Cd含量与根际土壤有效态Cd含量相关性均显著。

(4)施用钝化剂处理均能显著降低水稻根系对Cd的富集能力。

(5)4种混施钝化剂处理下水稻产量、籽粒K含量、Mg含量没有显著差异,籽粒Ca含量显著增加。

### 参考文献:

- [1] 雷 鸣,秦普丰,铁柏清. 湖南湘江流域重金属污染的现状与分析[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(2):62-65.  
LEI Ming, QIN Pu-feng, TIE Bai-qing. Present situation and analysis of heavy metal pollution in Xiangjiang River Basin of Hunan Province[J]. *Agro-Environment & Development*, 2010, 27(2):62-65.
- [2] 刘小诗. 神镉超标农田钝化剂的筛选及调控效应研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2015.  
LIU Xiao-shi. Research on selection of amendments and the immobilization effects of arsenic and cadmium contaminated farmlands[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [3] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) GB 15618—2018[S]. 北京:中国环境出版社, 2018.  
Ministry of Ecology and Environment. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Press, 2018.
- [4] 雷 鸣,曾 敏,郑袁明,等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6):1212-1220.  
LEI Ming, ZENG Min, ZHENG Yuan-ming, et al. Heavy metals pollutions and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,

- 2008, 28(6):1212-1220.
- [5] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biomaterials*, 2004, 17(5): 549-553.
- [6] Williams P N, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(19):6854-6859.
- [7] 周莉, 郑向群, 丁永祯, 等. 农田镉污染防控与作物安全种植技术探讨[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4):613-619.
- ZHOU Li, ZHENG Xiang-qun, DING Yong-zhen, et al. Probes of prevention and control of farmland pollution by cadmium & arsenic and crop production safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):613-619.
- [8] 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.
- [9] 姜洁如, 林亲铁, 张晓峰, 等. 天然矿物复配腐植酸对农田镉的钝化机理研究[J]. 土壤, 2019, 51(2):338-345.
- JIANG Jie-ru, LIN Qin-tie, ZHANG Xiao-feng, et al. Immobilization of Cd in contaminated farmland by natural minerals combined with humic acid[J]. *Soils*, 2019, 51(2):338-345.
- [10] 代允超. 石灰和有机物料对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- DAI Yun-chao. Effects of lime and organic matters on different types of cadmium contaminated soils[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [11] 宁皎莹, 周根娣, 周春儿, 等. 农田土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2016, 15(2):156-162.
- NING Jiao-ying, ZHOU Gen-di, ZHOU Chun-er, et al. Researches on the passivation of heavy metals in agricultural soils: A review[J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 15(2):156-162.
- [12] 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. 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.
- [13] 史力争, 陈惠康, 吴川, 等. 赤泥及其复合钝化剂对土壤铅、镉和砷的稳定效应[J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(5):617-626.
- SHI Li-zheng, CHEN Hui-kang, WU Chuan, et al. Effects of red mud and the combinations on lead, cadmium, and arsenic availability in contaminated soil[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 35(5):617-626.
- [14] 杨俊兴, 陈世宝, 郭庆军. 赤泥在重金属污染治理中的应用研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7):1937-1944.
- YANG Jun-xing, CHEN Shi-bao, GUO Qing-jun. Application of red mud in the remediation of heavy metals pollution: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(7):1937-1944.
- [15] 任凌伟. 典型矿物材料钝化修复重金属污染农田土壤的作用及机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- REN Ling-wei. The remediation of heavy metal contaminated farmland soils by typical mineral materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [16] 杭小帅, 周健民, 王火焰, 等. 粘土矿物修复重金属污染土壤[J]. 环境工程学报, 2007, 1(9):13-20.
- HANG Xiao-shuai, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils using clay minerals[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(9):13-20.
- [17] 顾巧浓, 金红丽, 周玲玲. 钝化剂对土壤重金属污染修复的实验研究[J]. 能源与节能, 2015(11):105-106.
- GU Qiao-nong, JIN Hong-li, ZHOU Ling-ling. Experimental research on passivator used in soil heavy metal pollution repair[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2015(11):105-106.
- [18] 郭晓方, 卫泽斌, 谢方文, 等. 过磷酸钙与石灰混施对污染农田低累积玉米生长和重金属含量的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4):1374-1380.
- GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, XIE Fang-wen, et al. Effect of lime and superphosphate on maize production and heavy metals uptake by low-accumulating maize[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(4):1374-1380.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:211-214.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1999:211-214.
- [20] 环境保护部. 土壤和沉积物金属元素总量的消解微波消解法 HJ 832—2017[S]. 北京:中国环境出版社, 2017.
- Ministry of Environmental Protection. Soil and sediment—Digestion of total metal elements—Microwave assisted acid digestion method HJ 832—2017[S]. Beijing: China Environmental Press, 2017.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定 GB 5009.15—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- National Health and Family Planning Commission. Food safety national standard Determination of cadmium in foods GB 5009.15—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [22] 辜娇峰, 周航, 贾润语, 等. 三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(4):1910-1917.
- GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, et al. Effects of a tribasic amendment on cadmium and arsenic accumulation and translocation in rice in a field experiment[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4):1910-1917.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量 GB 2762—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission, China Food and Drug Administration. Food safety national standard contaminant limit in food GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

- [24] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 258-261.  
GAO Yi-dan, LIANG Cheng-hua, PEI Zhong-jian, et al. Effect of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 258-261.
- [25] 黄嵩霞, 许超, 吴启堂, 等. 赤泥对重金属污染红壤修复效果及其评价[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 267-272.  
HUANG Ai-xia, XU Chao, WU Qi-tang, et al. Remediation effects and their evaluation of red mud amendment in heavy metal polluted red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 267-272.
- [26] 谢运河, 纪雄辉, 黄涓, 等. 赤泥、石灰对Cd污染稻田改制玉米吸收累积Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2104-2110.  
XIE Yun-he, JI Xiong-hui, HUANG Juan, et al. Effects of red-mud and lime on cadmium uptake of corn in dryland converted from cadmium polluted paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2104-2110.
- [27] Snars K E, Wong M T F, Gilkes R J. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils[J]. *Soil Research*, 2004, 42(3): 321-328.
- [28] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1419-1424.  
CHEN Yuan-qi, ZHANG Yu, CHEN Guo-liang. Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1419-1424.
- [29] Zhu D, Schwab A P, Banks M K. Heavy metal leaching from mine tailings as affected by plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(6): 1727-1732.
- [30] 章明奎, 夏建强. 土壤重金属形态对径流中重金属流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 1-3, 88.  
ZHANG Ming-kui, XIA Jian-qiang. Effects of soil heavy metal fractions on transport of metals in surface runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 1-3, 88.
- [31] 朱晓龙. 湘中某工矿区土壤、水稻镉砷污染特征与迁移规律[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.  
ZHU Xiao-long. Contaminate and transfer characteristics of cadmium and arsenic of soil and rice (*Oryza sativa* L.) in the industrial and mining areas in central Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [32] Kramer U, Smith R D, Wenzel W W, et al. The role of metal transport and tolerance in nickel hyperaccumulation by *Thlaspi goesingense* Halacsy[J]. *Plant Physiol*, 1997, 115(4): 1641-1650.
- [33] Strasdeit H, Duhme A K, Kneer R, et al. Evidence for discrete Cd(SCys)<sub>4</sub> units in cadmium phytochelatins complexes from EXAFS spectroscopy[J]. *Journal of the Chemical Society Chemical Communications*, 1991, 16: 1129-1130.
- [34] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1280-1286.  
WEN Zhi-qi, ZHAO Yan-ling, CUI Guan-nan, et al. Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1280-1286.
- [35] 杜彩艳, 木霖, 王红华, 等. 不同钝化剂及其组合对玉米 (*Zea mays*) 生长和吸收 Pb Cd As Zn 影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1515-1522.  
DU Cai-yan, MU Lin, WANG Hong-hua, et al. Effects of different amendments on growth and Pb, Cd, As, Zn uptake by *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1515-1522.
- [36] 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.
- [37] Cheng W, Zhang G, Yao H, et al. Possibility of predicting heavy-metal contents in rice grains based on DTPA-extracted levels in soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(19/20): 2731-2745.
- [38] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 78-87.  
WANG Hong, ZHOU Wei, LIN Bao. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of maize under Cd stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 78-87.
- [39] 赵洪英. 硅钾镁对水稻生育和品质的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2009.  
ZHAO Hong-ying. Effects of silicon, potassium, magnesium fertilizers on development and quality of rice[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009.
- [40] 蒋淑丽. 稻米矿质元素分析及其近红外测定技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
JIANG Shu-li. The study of determination and the calibration model optimization by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for mineral element contents in rice (*Oryza sativa* L.) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.