

罗小丽, 鞠琳, 姚爱军, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1506–1513.

LUO Xiao-li, JU Lin, YAO Ai-jun, et al. Effects of water management and amendments with iron and silicon-rich material and biochar on cadmium uptake of different rice varieties and their preliminary mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1506–1513.

## 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<sup>1</sup>, 鞠琳<sup>1</sup>, 姚爱军<sup>1,4\*</sup>, 刘冲<sup>2</sup>, 杨燕花<sup>2,3</sup>, 曹健<sup>4</sup>, 汤叶涛<sup>2,3,4</sup>, 仇荣亮<sup>2,3,4</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 3. 中山大学广东省环境污染控制与修复重点实验室, 广州 510275; 4. 中山大学-致胜土壤环境修复研究中心, 广州 510275)

**摘要:**通过田间微区试验研究了三种水分管理模式干旱(D)、间歇淹水(IF)、持续淹水(CF)以及水分管理与钝化剂(铁硅材料及生物炭)联合修复模式对不同水稻品种吸收Cd的影响,并探讨其影响的可能机制。结果表明,从分蘖前期到成熟期CF处理各水稻品种糙米Cd的含量比IF处理降低0.20%~45.43%,比D处理降低37.67%~62.11%。三种水分条件下低累积水稻品种G8优2168糙米中Cd的含量比常规品种G8优165低35.03%~54.61%。施加铁硅钝化剂在三种水分(D、IF、CF)条件下,糙米中Cd含量比对应单一水分管理模式依次分别下降64.26%、55.74%、38.14%;施加铁硅+生物炭钝化剂降Cd效应下降。低累积品种+持续淹水联合铁硅钝化剂处理,糙米Cd含量最低。水稻根表铁膜中Cd含量在三种水分条件(D、IF、CF)下依次增加,根系和糙米中Cd含量则依次减少,表明持续淹水可以促进根表铁膜对Cd的固定,同时持续淹水使土壤CaCl<sub>2</sub>提取有效态Cd的含量显著下降,两者共同作用降低了糙米Cd的含量。施加铁硅钝化剂对根系铁膜固定Cd无显著影响,主要通过显著降低土壤有效态Cd使糙米中Cd含量下降。低累积水稻品种+持续淹水水分管理+铁硅钝化剂联合修复技术可以最大限度保障糙米安全生产。种植低累积水稻和在水稻生长关键期持续淹水水分管理对抑制水稻Cd吸收具有重要意义。在水稻缺水季节及缺水地区则更应重视低累积水稻品种和钝化剂的应用。

**关键词:**水分管理;铁硅材料;生物炭;水稻品种;稻米镉

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)07-1506-08 doi:10.11654/jaes.2018-1319

### Effects of water management and amendments with iron and silicon-rich material and biochar on cadmium uptake of different rice varieties and their preliminary mechanisms

LUO Xiao-li<sup>1</sup>, JU Lin<sup>1</sup>, YAO Ai-jun<sup>1,4\*</sup>, LIU Chong<sup>2</sup>, YANG Yan-hua<sup>2,3</sup>, CAO Jian<sup>4</sup>, TANG Ye-tao<sup>2,3,4</sup>, QIU Rong-liang<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Soil Remediation Research Center of SYSU-Zhisheng, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Safe food production on large areas of paddy soils that were polluted with Cd at low to medium levels is crucial for human health. The effects of three water management modes, drought (D), intermittent flooding (IF), and continuous flooding (CF) as well as the combined application of water management and amendments with iron and silicon-rich material (IS) and biochar (B) on Cd uptake by different rice varieties were investigated through a field experiment. The possible phytoexclusion mechanisms involved were discussed. The results

收稿日期:2018-10-23 录用日期:2019-02-22

作者简介:罗小丽(1993—),女,四川达州人,硕士研究生,主要从事重金属污染农田土壤修复研究。E-mail:1356223500@qq.com

\*通信作者:姚爱军 E-mail:yaoaijun@mail.sysu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划重点专项“华南镉铅污染农田修复与安全利用技术示范”(SQ2018YFD0800700);国家科技支撑计划“珠三角镉铅超标农田安全利用技术集成与示范”(2015BAD05B05);国家自然科学基金项目(41877121)

Project supported: The National Key R&D Program of China (SQ2018YFD0800700); The National Key Technologies R&D Program of China (2015BAD05B05); The National Natural Science Foundation of China (41877121)

showed that the Cd content in brown rice treated by CF from tillering to maturity stage was reduced by 0.2%~45.43% compared with IF treatment and by 37.67%~62.11% compared with D treatment. Under the three water management modes, the Cd content in the low cumulative brown rice cultivar G8 2168 was 35.03%~54.61% lower than that in the conventional variety. Under the conditions of the three modes of water management (D, IF, and CF), the contents of Cd in brown rice treated with IS amendment decreased by 64.26%, 55.74% and 38.14%, respectively, compared with that treated with only water management. The effect of the combined amendment IS+B was significantly weaker. The lowest Cd content in brown rice was obtained with the combined application of low cumulative rice varieties, continuous flooding, and IS. Furthermore, the content of Cd in rice root iron plaque varied depending on the water management mode in the following order D<IF<CF, while the content of Cd in root and brown rice showed the inverse pattern (D>IF>CF). This indicated that continuous flooding could promote the fixation of Cd by root iron plaque which acted as a barrier for Cd entering the rice plants. However, continuous flooding also decreased significantly the soil available Cd concentrations (extracted by 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>). Thus, both mechanisms contributed to reducing the Cd uptake by rice. Iron and silicon-rich material addition had no significant effect on the content of Cd fixed by root iron plaque. It reduced the rice Cd uptake mainly by significantly decreasing the Cd availability in the soil. Therefore, the combined application of a low Cd cumulative rice variety, continuous flooding and IS can guarantee safe rice production on paddy soils with low to medium Cd pollution. Planting low Cd-cumulative rice cultivars, coupled with continuous flooding during the critical growth stage are very important to limiting Cd uptake by rice. The application of amendments and low Cd cumulative rice varieties should be favored in seasons or areas with a water shortage.

**Keywords:** water management; iron-silicon material; biochar; rice variety; brown rice Cd

根据《全国土壤污染状况调查公报》(2014年4月)<sup>[1]</sup>,全国耕地土壤的点位超标率达19.4%,其中镉(Cd)点位超标率为7.0%,在污染元素中排第一位。Cd在土壤中生物活性较高,且容易被水稻吸收并转运至籽粒<sup>[2]</sup>。Cd通过土壤-农作物进入到食物链将危及人体健康<sup>[3]</sup>。

为修复中轻度Cd污染农田,亟需寻找高效、低成本、易于推广的修复技术与模式。已有研究发现,农艺调控如全生育期淹水,可大幅降低水稻籽粒中Cd含量,且其操作简单,具有可持续性<sup>[4]</sup>。有研究认为淹水条件有利于Cd<sup>2+</sup>向CdS转化<sup>[5]</sup>,从而降低植物对Cd的吸收。同时也有研究发现水稻等湿地植物在淹水的作用下,根系通过释放氧气从而使根表形成一种红褐色的铁膜<sup>[6]</sup>,能促进<sup>[5]</sup>或抑制<sup>[7]</sup>糙米中某些元素的积累。不同水稻品种对Cd的吸收能力有显著差异<sup>[8]</sup>,相较于常规水稻,在Cd胁迫下杂交稻的籽粒表现出优于常规稻的Cd低积累性<sup>[9]</sup>,通过品种选择可以降低水稻Cd的含量<sup>[10]</sup>,但其在不同水分条件下的表现尚不明确。近年各类钝化剂已被证实可以不同程度调控重金属有效性。铁硅材料是一类新型的碱性富铁硅型的钝化重金属材料,可以提高酸性土壤中的pH,对重金属的修复机制以化学沉淀为主<sup>[11]</sup>。生物炭是生物质在完全或部分缺氧情况下经热解产生的高度芳构化的碳质材料<sup>[12]</sup>,主要呈碱性,具有多孔性结构和巨大的比表面积,对重金属有吸附作用<sup>[13]</sup>。

在中轻度Cd污染条件下,采用单一技术在很多

时候不能将农作物可食部位中Cd的含量降低至安全水平之下,因此,需要采用联合修复技术模式。目前,关于水分管理联合低积累水稻品种技术模式和水分管理联合钝化剂(铁硅材料及生物炭)技术模式的研究较少,其可能机制仍不明确。本研究利用田间微区试验,采用三种水分管理模式联合低累积水稻品种以及水分管理+钝化剂(铁硅材料与生物炭)+低累积水稻品种联合修复模式,比较研究了不同模式下水稻对Cd吸收的差异,并探讨其可能的机理,以期Cd污染农田土壤修复提供依据。

## 1 材料与amp;方法

选择广东省某矿区周边Cd污染农田开展双季稻早稻大田微区试验(2017年4月5日种植,2017年8月8日收获)。供试土壤pH 5.64,为酸性土壤,有机质含量1.04%,碱解氮含量203.76 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量为98 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷含量为0.162%,Cd含量(见表1)是农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)的2.5倍,具有较高的环境风险和农产品超标风险,有必要采取修复措施。

表1 试验农田土壤和钝化剂基本性质

Table 1 Properties of the paddy soil and amendments

供试材料 Material	pH	总Cd Total Cd/mg·kg <sup>-1</sup>
供试土壤 Tested soil	5.64±0.26	1.01±0.17
生物炭 Biochar	8.04±0.31	0.19±0.05
铁硅基材料 IS material	12.24±0.17	0.12±0.03

### 1.1 供试作物

供试作物为水稻(*Oryza sativa* L.),供试水稻品种共3种:常规品种G5(G8优165)、低吸收品种G8(G8优2168)、低吸收品种T6(T优816)。

### 1.2 钝化材料

供试钝化材料:铁硅材料(IS)(专利号:ZL201510602213.6)和生物炭(B)基本理化性质见表1。生物质炭和铁硅材料中镉的含量约为《肥料中砷镉铅铬汞生态指标(GB/T 23349—2009)》<sup>[14]</sup>中肥料允许标准的1/50~1/80,当每年每单位面积施用量不超过肥料用量的50~80倍时,生态风险可控。

### 1.3 试验设计

随机区组试验:

(1)水分管理+水稻品种:3种水分处理前期管理一致,即从幼苗到分蘖初期保持3 cm浅层淹水,水分管理从分蘖初期到成熟期进行,设置(1)干旱处理(D):保持土壤水分分为饱和不淹水状态,土壤含水量约为68%~80%。(2)间歇淹水水分处理(IF):淹水3~5 cm,自然落干至饱和不淹水状态后重新淹水3~5 cm。(3)持续淹水水分处理(CF):持续保持3~5 cm淹水层。每种水分管理模式均种植3种水稻品种G5、G8、T6。所有处理在收获前15 d左右让水分自然落干。

(2)水分管理+钝化剂(铁硅材料和生物炭)处理:钝化剂处理包括铁硅材料(IS)和铁硅材料(IS)+生物炭(B)(ISB)两种处理,每种钝化剂处理均在水稻插秧前3~7 d施入土壤并耙田混匀。每种钝化剂处理在水稻分蘖初期到成熟期分别设置干旱(D),间歇淹水(IF),持续淹水(CF)3种水分管理模式,各钝化剂处理均种植低吸收水稻品种G8。钝化剂添加量为:铁硅材料+生物炭复合处理:铁硅材料 $675 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ +生物炭 $225 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,铁硅材料处理: $675 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

由于试验处理较多,按常规设计,大田面积过大,为尽量减少大田污染状况分布变异给试验结果带来的影响,使各个处理之间具有可比性,采用田间微区试验的方法,3种水分管理模式+水稻品种处理每个微区的面积为 $1 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ (每个水分处理微区均种植3种水稻品种,每个水稻品种面积为 $2 \text{ m}^2$ ,品种之间间隔一行,为保证水分条件一致性,同一水分管理模式微区内不同水稻品种间不用田埂间隔),3种水分处理各重复3次,共9个微区。水分管理+钝化剂处理每个微区的面积为 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ,均种植低累积水稻G8,两种钝化剂处理均分别设置3种水分管理模式,共6个处理,重复3次,共18个微区。相邻微区间隔为

$1.0 \text{ m}$ (两个 $0.3 \text{ m}$ 宽、 $0.2 \text{ m}$ 高的田埂,一条 $0.4 \text{ m}$ 宽、 $0.2 \text{ m}$ 深的沟)。各小区独立灌排。随机区组排列。各处理按常规施肥,在秧苗移栽后7 d和14 d分别施用NPK复合肥(15:15:15)  $11.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $22.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从幼苗到分蘖初期保持3 cm浅层淹水,从分蘖初期到成熟期进行3种水分管理,在收获前15 d左右让水分自然落干。在水稻分蘖前期和孕穗中期分别测定各处理田间土壤pH和Eh(pH300 pH/Eh仪)。水稻成熟后收获,于每个 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 微区使用五点采样法采集5株水稻植株包括根系及根系周围0~20 cm土壤,每1微区采集1个土壤和植物混合样。在每个 $1 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 微区不同水稻品种分别以五点采样法采集5株水稻植株包括根系及根系周围0~20 cm土壤,每一微区每个水稻品种采集一个土壤和植物混合样。保持每个处理收集的水稻根系及土壤的一致性。土壤样品自然风干后以四分法取500 g研磨并过20、60目和100目尼龙筛,备用。水稻新鲜根系用自来水冲洗干净后再用去离子水冲洗,吸干水分备用。稻穗脱粒后烘干,称质量,脱壳。分别测定新鲜根表铁膜、根系、糙米中Cd的含量。土壤测定有效态和全量Cd。

### 1.4 样品分析

#### 1.4.1 土壤理化性质测定

田间土壤Eh、pH测定:分别在水稻分蘖前期和孕穗中期用手持式Eh计在田间实地测试土壤Eh和pH,测试时先将Eh计探头用去离子水冲洗干净,垂直插入田间5 cm深度处,待读数稳定后记录数据。

风干土pH测定:电位法测定(土:水为1:2.5)。

土壤有机质、碱解N、全P、速效K采用常规法测定<sup>[15]</sup>。

#### 1.4.2 土壤和植物重金属Cd全量分析

土壤Cd全量以王水-HClO<sub>4</sub>法消解(GB/T 17141—1997)<sup>[16]</sup>;水稻根及糙米样品Cd含量以HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>法消解(NY/T 1100—2006)<sup>[17]</sup>。

#### 1.4.3 根表铁膜提取

采用Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O-NaHCO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(DCB)法<sup>[18]</sup>提取根表铁膜,将经自来水和去离子水清洗过的根,用滤纸吸干水分,剪断成约1 cm长,称根重约1.0 g,将根装入100 mL离心管中,然后依次加入 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O 40 mL, $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaHCO<sub>3</sub> 5 mL,最后加入3 g Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,摇匀后在室温(25 ℃)下振荡3 h,然后将根取出并用蒸馏水淋洗3次以上,将淋洗液和提取液转入100 mL容量瓶中,最后定容到刻度,过滤后滤液测Cd。

#### 1.4.4 土壤有效态Cd提取(0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>提取态)

准确称取过20目的风干土2.000 g样品于100 mL离心管中,加入20 mL 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液,在150 r·min<sup>-1</sup>下室温振荡1.5 h,离心机离心(4000 r·min<sup>-1</sup>)5 min,上清液过滤测Cd<sup>[19]</sup>。

所有溶液中Cd用石墨炉原子吸收分光光度计(HITACHI,Z-5000,JAPAN)测定。溶液中其他离子用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PE 5300DV, USA)测定。

#### 1.5 分析质量控制

所有样品测定均设置两个平行样,平行相对误差≤20%;测定植物、土样中的重金属时,以标准样品[土壤标准物质GBW07443(GSF-3),植物标准物质GBW10052(GSB-30)]进行质量控制,标样回收率在85%~110%。样品测定同时设置空白实验确定试剂背景含量。实验过程中使用的玻璃仪器全部经10%的硝酸溶液浸泡过夜,用自来水和去离子水清洗后干燥备用。

#### 1.6 数据处理

本论文所有结果均以平均值±标准差表示,统计分析由Microsoft Excel 2013以及SPSS 20软件完成,处理间差异用Duncan多重比较法进行检验,当P<0.05时为差异显著。使用Origin 9.0作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水分管理和钝化剂处理对稻田pH、Eh的影响

由图1可知,未施钝化剂的情况下,孕穗期三种水分管理模式D、IF、CF随着土壤水分含量的增加,土壤pH在逐步下降,这可能是淹水条件下土壤中有有机

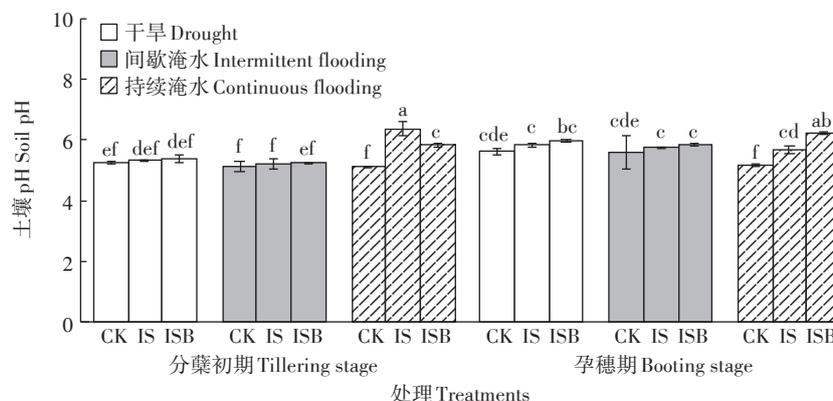
物厌氧分解生成有机酸导致。施加钝化剂后,土壤pH比对照增加0.12~0.72个单位,且在持续淹水条件下,具有显著性差异。不同钝化剂、不同时期表现不一致。

由图2可知,在水稻不同生长时期,土壤Eh总体上分蘖初期Eh>0,孕穗期Eh<0。持续淹水处理土壤Eh均比其他两种水分状况Eh降低。分蘖前期钝化剂对Eh未见显著影响(除淹水条件下IS处理有显著降低),孕穗期无论是单施铁硅钝化剂(IS)还是铁硅材料+生物炭复合钝化剂(ISB),均促使土壤的氧化还原电位显著下降。

### 2.2 水分管理对糙米Cd、根表铁膜Cd、根系Cd的影响

#### 2.2.1 水分管理对糙米Cd的影响

不同水分管理方式糙米Cd含量见图3。供试农田是某矿区中下游受污染农田,Cd污染水平达到1.0 mg·kg<sup>-1</sup>,是农用地土壤污染风险筛选值的2.5倍,具有较高的环境风险。试验中糙米中Cd的含量均未超过国家食品安全限量标准,这可能与试验地区早稻季节降雨非常多,以及供试地块全P含量高达0.162%有利于Cd的固定有关<sup>[20]</sup>。受很多因素如水稻品种、季节性降水及土壤性质影响,中低污染稻田稻米Cd是否超标有很大不确定性。所以在较高污染风险条件下采取安全、低成本、易于推广的修复措施是必要的。在三种水分管理方式下所有水稻品种糙米中Cd的含量顺序均为:干旱(D)>间歇淹水(IF)>持续淹水(CF),持续淹水比间歇水分和干旱水分管理方式糙米中Cd的含量分别下降0.20%~45.43%和37.67%~62.11%,表明关键生育期持续淹水能够显著降低水稻糙米中Cd的含量。在相同水分管理方式



CK: 无钝化剂 No amendment; IS: 铁硅材料 IS material; ISB: 铁硅材料+生物炭钝化剂 IS and biochar. 不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ ) Bars not sharing the same lowercase letter are significantly different from each other ( $P<0.05$ ). 下同 The same below

图1 不同生育时期水分管理和钝化剂对土壤pH的影响

Figure 1 Effects of water management and amendments on soil pH in two different growth stages

下,低累积水稻品种糙米中Cd含量与常规品种存在显著性差异( $P<0.05$ )。三种水分条件下低累积水稻品种G8糙米中Cd的含量比常规品种G5糙米中Cd的含量低35.03%~54.61%,表明水稻品种对糙米Cd的吸收影响显著,低累积水稻品种有利于阻控Cd的吸收。

2.2.2 水分管理对根表铁膜Cd含量的影响

由图4可知,所有水稻品种根表铁膜中Cd的含量在干旱、间歇淹水、持续淹水三种水分处理中均依次逐渐增加,持续淹水条件下水稻根表铁膜中Cd的含量比干旱、间歇淹水水分管理方式分别升高91.11%~94.85%和66.80%~93.30%,达到显著差异水平( $P<0.05$ )。

2.2.3 水分管理对根系Cd含量的影响

三种水分管理方式根系Cd含量见图5。对低累积品种T6总体上表现为干旱>间歇淹水>持续淹水,常规品种G5和低累积品种G8则未表现显著差异。钝化剂处理在干旱水分管理条件下水稻根系Cd含量比间歇和持续性淹水处理有显著提高。

2.2.4 根表铁膜、根系、糙米Cd的富集系数

富集系数是指作物某一部位元素含量与土壤中相应元素含量(指实际测量值)之比,它在一定程度上标志着土壤-植物系统中元素迁移的难易程度<sup>[21]</sup>。图6中,三个水稻品种铁膜Cd的富集系数均按干旱、间歇淹水、持续淹水依次出现显著上升,根系(G5除外)和糙米富集系数则出现降低的变化趋势,与Honma等<sup>[22]</sup>的研究结果相同。结果表明,持续淹水条件下促进水稻根表铁膜富集了大量Cd,仅有少部分通过根表铁膜进入水稻根系和籽粒,根系根表铁膜对水稻吸收土壤Cd转运至籽粒起到屏障作用。推测持续淹水条件促进土壤铁还原形成 $Fe^{2+}$ ,由于根表泌氧作用, $Fe^{2+}$ 在根表氧化形成新鲜的活性较高的无定形铁,有

利于对Cd的专性吸附固定,起到阻碍Cd进入植物体的屏障作用,降低进入根系和籽粒的Cd含量。纪雄辉等<sup>[5]</sup>、Liu等<sup>[23]</sup>研究结果表明糙米中Cd含量与根表

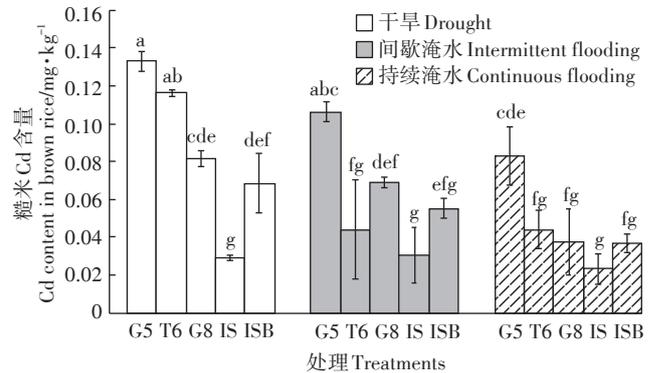


图3 不同水分管理和钝化剂对糙米Cd含量的影响  
Figure 3 Cd content in brown rice treated with different water management patterns and amendments

Figure 3 Cd content in brown rice treated with different water management patterns and amendments

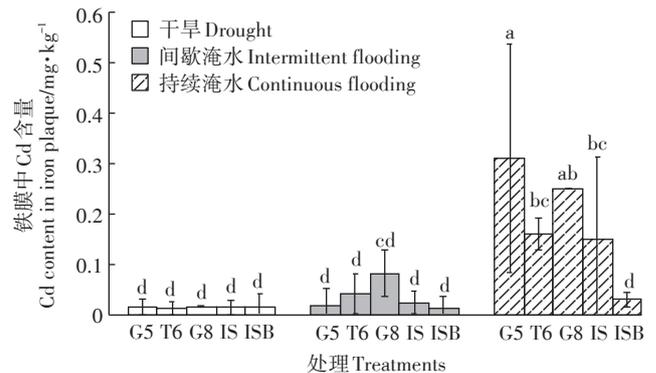


图4 不同水分管理和钝化剂处理水稻根系铁膜Cd的含量  
Figure 4 Cd content in rice root iron plaque treated with different water management patterns and amendments

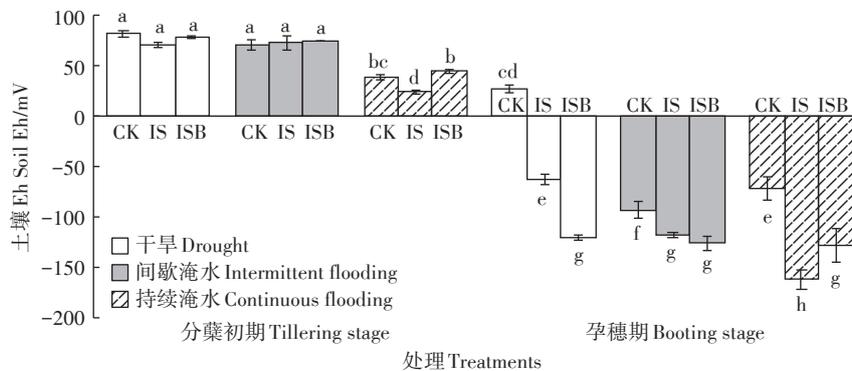


图2 不同生育时期水分管理和钝化剂对土壤Eh的影响  
Figure 2 Effects of water management and amendments on soil Eh in two different growth stages

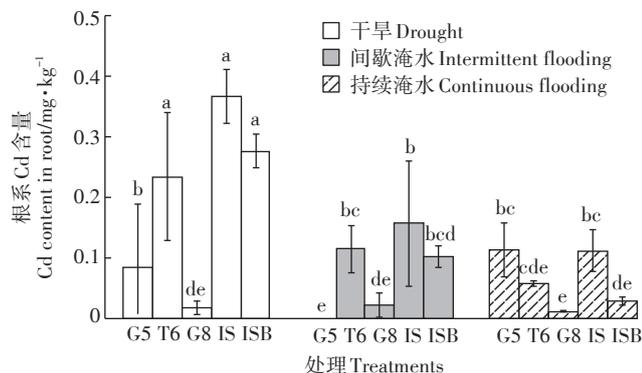


图5 不同水分管理和钝化处理水稻根系Cd的含量  
Figure 5 Cd content in root treated with different water management patterns and amendments

铁膜Cd含量呈极显著正相关,根表面的铁膜对于Cd在植物体内的吸收和转移不是阻碍。Wang等<sup>[24]</sup>则发现较高的根系泌氧量促进了水稻根部铁膜的形成,根表铁膜固定大量重金属离子,抑制了重金属向上运输,从而降低了植株地上部的重金属浓度<sup>[24-25]</sup>,本文中,持续淹水促进根表铁膜对Cd的富集,抑制了Cd向籽粒的转移,与该结果一致。有研究表明<sup>[26]</sup>当根表铁膜较薄时,促进水稻对Cd的吸收,当铁膜数量达到一定程度时促进作用达到最大,之后抑制水稻根系对Cd的吸收。本文中,铁膜数量最大为 $6433 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远小于报道临界值 $20825 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,铁膜仍表现为抑制水稻组织对Cd的吸收。

### 2.2.5 不同水分管理对土壤有效态Cd含量的影响

有研究认为,淹水形成了还原条件,土壤中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 还原为 $\text{S}^{2-}$ ,形成了CdS沉淀,降低了土壤Cd的有效性,从而使籽粒中Cd的含量降低<sup>[27]</sup>。本文研究结果表明持续淹水水分管理使土壤有效态Cd比干旱处理降低29.71%~63.13%,达到显著性差异水平( $P < 0.05$ ),如图7。与史磊等<sup>[28]</sup>研究结果相似,持续淹水可以有效降低土壤有效态Cd的含量。

### 2.3 钝化剂对糙米Cd的影响及机制

施加铁硅钝化剂在三种水分(D、IF、CF)条件下,糙米中Cd含量比对应单一水分管理模式分别下降64.26%、55.75%、38.14%;施加铁硅+生物炭钝化剂在三种水分(D、IF、CF)条件下糙米中Cd依次分别比对应单一水分管理下降15.84%、19.84%、1.86%。

钝化剂处理铁硅材料(IS)、铁硅材料+生物炭(ISB)在不同水分条件下对土壤有效态Cd含量的影响见图7。施加铁硅钝化剂在干旱、间歇淹水、持续淹水水分管理条件下,土壤有效态Cd与未施加处理相比降低43.12%~96.87%,达到显著性差异水平( $P <$

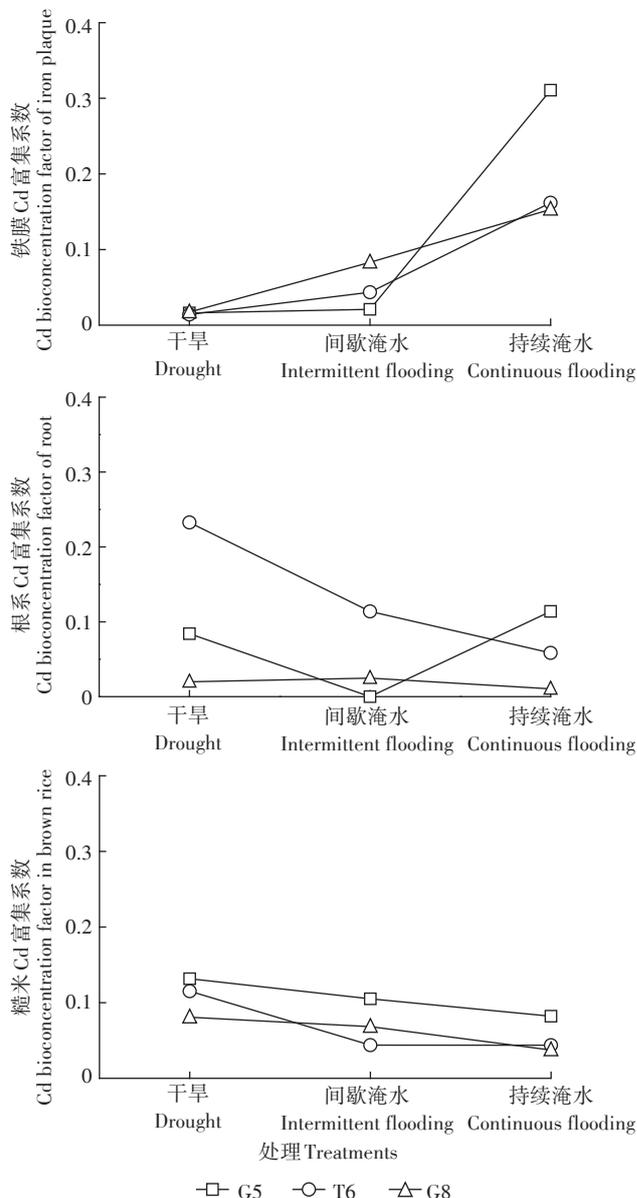


图6 不同水分管理糙米、根系、铁膜中Cd的富集系数  
Figure 6 Cd enrichment factors of brown rice, rice root and root iron plaque with different water management patterns

0.05),与施加钝化剂后糙米Cd变化趋势相似。可见 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 提取有效态Cd可以有效反映修复剂对Cd生物有效性的影响,利用该关系,建立预测修复剂作用下糙米Cd吸收模型,铁硅钝化剂为 $y=0.5368x+0.0213$ , $R^2=0.996$ ;铁硅+生物炭钝化剂为 $y=0.9494x+0.0384$ , $R^2=0.615$ ( $y$ 为糙米中Cd的含量, $x$ 为土壤有效态Cd含量)。钝化剂虽然能够促进根系铁膜的形成,但对铁膜中Cd含量影响与对照相比并不显著(图4),其抑制糙米Cd吸收主要通过显著降低土壤有效态Cd实现。可以看到,与铁硅材料相比,铁硅材料+生物炭钝化剂处理未能进一步降低土壤有效态

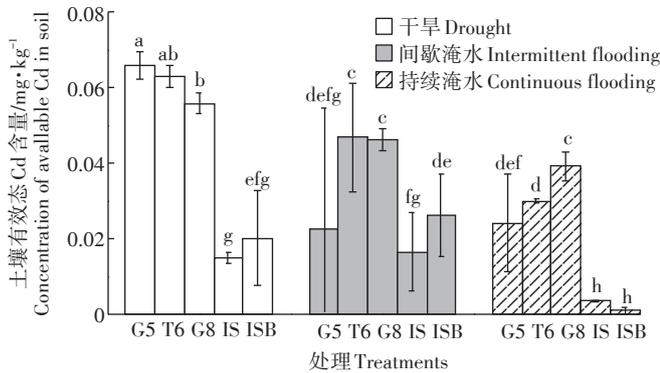


图7 水分管理和钝化剂对土壤有效态Cd含量的影响

Figure 7 Effect of water management patterns and amendments on soil available Cd content

Cd,在干旱和间歇淹水条件下甚至高于铁硅材料,表明两种钝化材料共存,不利于Cd的固定,这可能是铁硅材料+生物炭钝化剂抑制水稻吸收Cd效应下降的原因。

#### 2.4 低累积水稻品种、水分管理和钝化剂三种修复技术对糙米Cd影响比较

三种水分条件下低累积水稻品种G8糙米中Cd的含量比常规品种G5糙米中Cd的含量低35.03%~54.61%,表明水稻品种对糙米Cd的吸收影响显著。

从分蘖初期到成熟期持续淹水处理(CF)糙米Cd的含量比间歇淹水(IF)处理降低0.20%~45.43%,比干旱处理(D)降低37.67%~62.11%。

施加铁硅钝化剂在三种水分(D、IF、CF)条件下,糙米中Cd含量比对应单一水分管理模式分别下降64.26%、55.75%、38.14%;施加铁硅+生物炭钝化剂在三种水分(D、IF、CF)条件下糙米中Cd依次分别比对应单一水分管理下降15.84%、19.84%、1.86%。持续淹水联合铁硅钝化剂处理下糙米Cd含量最低。持续淹水水分管理一方面通过促进根表铁膜对Cd专性吸附,起到阻碍Cd进入水稻根系及地上部籽粒的屏障作用,另一方面则有效降低有效态Cd,从而降低籽粒Cd含量。铁硅钝化剂则主要通过显著降低土壤有效态Cd降低糙米Cd含量。种植低累积水稻+持续淹水+施加铁硅钝化剂联合修复技术可使糙米Cd的下降量达到最大。种植低累积水稻品种联合关键生育期持续淹水管理对抑制水稻重金属吸收具有重要意义。在水稻缺水季节及缺水地区则更应重视低累积品种和钝化剂的应用。

### 3 结论

(1)三种水分管理方式,糙米中的Cd含量依次为

干旱>间歇淹水>持续淹水,关键生育期持续淹水可显著降低糙米中Cd的含量。持续淹水抑Cd主要机制可能是一方面促进根表铁膜对Cd专性吸附和固定,阻碍Cd进入水稻组织,另一方面可显著降低土壤有效态Cd,从而减少土壤Cd向籽粒的转运。施加铁硅钝化剂对根系铁膜固定Cd无显著影响,主要通过降低土壤有效态Cd使糙米中Cd含量下降。

(2)低累积水稻品种+水分管理+铁硅钝化剂联合修复技术降低稻米Cd效应最为显著。低累积水稻品种+关键生育期持续淹水水分管理对抑制水稻Cd吸收具有重要意义。在水稻缺水季节及缺水地区更应重视低累积品种和钝化剂的应用。

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, 36(5): 1689-1692.  
Department of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Soil pollution status of nationwide bulletin[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014, 36(5): 1689-1692.
- [2] 宗良纲,徐晓炎. 水稻对土壤中镉的吸收及其调控措施[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 120-123.  
ZONG Liang-gang, XU Xiao-yan. Cadmium absorption of rice from soils and remediations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3): 120-123.
- [3] 雷鸣,曾敏,王利红,等. 湖南市场和污染区稻米中As、Pb、Cd污染及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2314-2320.  
LEI Ming, ZENG Min, WANG Li-hong, et al. Arsenic, lead and cadmium pollution in rice from human markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2314-2320.
- [4] 张丽娜,宗良纲,付世景,等. 水分管理方式对水稻在Cd污染土壤上生长及其吸收Cd的影响[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 49-52.  
ZHANG Li-na, ZONG Liang-gang, FU Shi-jing, et al. Effects of water control on rice growth and its intake of cadmium on Cd contaminated soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5): 49-52.
- [5] 纪雄辉,梁永超,鲁艳红,等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3930-3939.  
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of up take and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3930-3939.
- [6] 陈江民,杨杰,黄奇娜,等. 持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理[J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3300-3310.  
CHEN Jiang-ming, YANG Yong-jie, HUANG Qi-na, et al. Effects of continuous flooding on cadmium absorption and its regulation mechanisms in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3300-3310.

- [7] 刘敏超,李花粉,夏立江,等.根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸收镉的影响[J].生态学报,2001,21(4):598-602.  
LIU Min-chao, LI Hua-fen, XIA Li-jiang, et al. Effect of Fe, Mn coating formed on roots on Cd uptake by rice varieties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4):598-602.
- [8] Yi H C, Fang B L, Nora F T, et al. Variations in grain cadmium and arsenic concentrations and screening for stable low-accumulating rice cultivars from multi-environment trials[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643:1314-1324.
- [9] 邓刚,王刚,孙梦飞,等.镉胁迫下不同水稻品种镉的累积与分布差异[J].浙江农业科学,2016,57(4):468-471.  
DENG Gang, WANG Gang, SUN Meng-fei, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice varieties under cadmium stress [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(4):468-471.
- [10] Liu J G, Zhu Q S, Zang Z J, et al. Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 85(1):147-153.
- [11] Yao A J, Wang Y N, Ling X D, et al. Effects of an iron-silicon material, a synthetic zeolite and an alkaline clay on vegetable uptake of As and Cd from a polluted agricultural soil and proposed remediation mechanisms[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2017, 39(2):353-367.
- [12] 李力,陆宇超,刘娅,等.玉米秸秆生物炭对Cd(II)的吸附机理研究[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2277-2283.  
LI Li, LU Yu-chao, LIU Ya, et al. Adsorption mechanisms of cadmium(II) on biochars derived from corn straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2277-2283.
- [13] 王林,徐应明,梁学峰,等.生物炭和鸡粪对镉低积累油菜吸收镉的影响[J].中国环境科学,2014,34(11):2851-2858.  
WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Effects of biochar and chicken manure on cadmium uptake in pakchoi cultivars with low cadmium accumulation[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11):2851-2858.
- [14] 中华人民共和国国家标准.肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标 GB/T 23349—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.  
Standard of the People's Republic of China. Ecological index of arsenic, cadmium, lead, chromium and mercury for fertilizers (GB/T 23349—2009)[S]. Beijing:China Standards Press, 2009.
- [15] 李肖开.土壤农化常规分析方法[M].北京:科学出版社,1989:67-116.  
LI Qiu-kai. Soil agro-chemistry conventional analysis methods[M]. Beijing:Science Press, 1989:67-116.
- [16] 国家环境保护总局.土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法 GB/T 17141—1997[S].北京:中国标准出版社,1997.  
State Environmental Protection Administration of China. Soil quality-determination of lead and cadmium-graphite furnace atomic absorption spectrometry GB/T 17141—1997[S]. Beijing:China Standard Press, 1997.
- [17] 中华人民共和国农业部.稻米中铅、镉的测定:石墨炉原子吸收光谱法 NY/T 1100—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of lead and cadmium in rice-graphite furnace atomic absorption spectrometry NY/T 1100—2006[S]. Beijing:China Agriculture Press, 2006.
- [18] Taylor G J, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants[J]. *American Journal of Botany*, 1983, 70(8):1254-1257.
- [19] 肖振林,王果,黄瑞卿,等.酸性土壤中有效态镉提取方法研究[J].农业环境科学学报,2008,27(2):795-800.  
XIAO Zhen-lin, WANG Guo, HUANG Rui-qing, et al. Extraction method for available cadmium in acid soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):795-800.
- [20] 区惠平,周柳强,刘昔辉,等.不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1220-1225.  
OU Hui-ping, ZHOU Liu-qiang, LIU Xi-hui, et al. Effect of phosphate fertilizer on phytoavailability of cadmium in soil-corn system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7):1220-1225.
- [21] 陈慧茹,董亚玲,王琦,等.重金属污染土壤中Cd、Cr、Pb元素向水稻的迁移累积研究[J].中国农学通报,2015,31(12):236-241.  
CHEN Hui-ru, DONG Ya-ling, WANG Qi, et al. Distribution and transportation of Cd, Cr, Pb in rice with contamination in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(12):236-241.
- [22] Honma T, Ohba H, Kaneko K A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. *Environment Science Technology*, 2016, 50(8):4178-4185.
- [23] Liu H J, Zhang J L, Zhang F S. Role of iron plaque in Cd uptake by and translocation within rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in solution culture[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2007, 59(3):314-320.
- [24] Wang X, Yao H X, Wong M H, et al. Dynamic changes in radial oxygen loss and iron plaque formation and their effects on Cd and As accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, 35(6):779-788.
- [25] 胡霁堂,郑绍建.淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J].环境科学学报,1995,15(2):142-147.  
HU Ai-tang, ZHENG Shao-jian. Effects of flooding on the transformation of cadmium fractions in contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(2):142-147.
- [26] Greipsson S. Effect of iron plaque on roots of rice on growth of plants in excess zinc and accumulation of phosphorus in plants in excess copper or nickel[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18(8):1659-1665.
- [27] Connell W E, Jr P W. Sulfate reduction in soil: Effects of redox potential and pH[J]. *Science*, 1968, 159(3810):86-87.
- [28] 史磊,郭朝晖,梁芳,等.水分管理和施用石灰对水稻镉吸收与运移的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):111-117.  
SHI Lei, GUO Zhao-hui, LIANG Fang, et al. Effects of lime and water management on uptake and translocation of cadmium in rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24):111-117.