

薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 农艺强化措施治理稻田镉污染的效果评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1537–1544.

XUE Tao, LIAO Xiao-yong, WANG Ling-qing, et al. Evaluation on effect of strengthening agronomic measures in cadmium-contaminated paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1537–1544.

## 农艺强化措施治理稻田镉污染的效果评价

薛涛<sup>1,2</sup>, 廖晓勇<sup>2\*</sup>, 王凌青<sup>2</sup>, 张扬珠<sup>1\*</sup>

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 为了缓解农田重金属污染状况, 探索适宜的重金属污染治理方法, 于2017年6月和10月分别采集治理前后具有区域代表性田块的混合土壤和稻谷样品进行分析, 利用生态危害指数法等方法分析和评价湖南某地农田重金属污染状况, 并利用分区的方法对治理效果进行评价。结果显示, 农田土壤存在Cd、As、Hg的复合污染, 尤以Cd最为严重, 平均含量达 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其潜在生态危害系数IV级(很强)和V级(极强)占98.51%, 存在很高的潜在生态风险, 糙米中仅存在Cd污染, 平均含量达 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 超标率高达85.07%。针对研究区污染状况, 采用品种替代、土壤钝化和多种农艺措施综合调控的手段进行重金属污染调控治理研究, 经过一季晚稻调控治理后, 发现轻、中、重三类污染区糙米降Cd率分别为34.58%、30.03%和24.16%, 降Cd效果明显。同时, 本研究所用材料安全、廉价、易得, 且实施过程符合当地水稻种植和农田管理习惯, 因此, 这种综合的农艺强化措施可用于大规模轻、中度Cd污染农田的防治。

**关键词:** 农田; 土壤; 糙米; 重金属; Cd; 调控

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)07-1537-08 doi:10.11654/jaes.2018-0729

### Evaluation on effect of strengthening agronomic measures in cadmium-contaminated paddy field

XUE Tao<sup>1,2</sup>, LIAO Xiao-yong<sup>2\*</sup>, WANG Ling-qing<sup>2</sup>, ZHANG Yang-zhu<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to alleviate the heavy metal pollution in paddy field and explore appropriate measures for the treatment of heavy metal pollution, the mixed soils and rice samples with representative regional blocks before and after treatment were collected in June and October 2017 for analysis, and were analyzed using methods such as the ecological hazard index method. And evaluate the status of heavy metal pollution in farmland in Hunan, and use the method of zoning to evaluate the effect of restoration. The results showed that farmland soil contains Cd, As and Hg combined pollution, especially Cd is the most serious. With an average content of  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , the potential ecological risk factors of level IV (very strong) and level V (extremely strong) accounted for 98.51%. There is a high potential ecological risk. There is only Cd pollution in brown rice, and the average content is up to  $0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , with exceeding standard rate of 85.07%. In view of the pollution status in the study area, this article adopted the methods of joint substitution, soil passivation and various agronomic measures to control heavy metal pollution. After one season of late rice regulation and control, reduction rate of Cd in brown rice in light, medium, and heavy pollution areas were 34.58%, 30.03%, and 24.16%, respectively. The effect of decreasing Cd was obvious. At the same time, the restoration materials used in this study are safe, cheap and accessible, and the implementation process is in line with the local rice cultivation and farmland management habits. Therefore, this measure can be used for the prevention and control of large-scale light-to-moderate Cd-contaminated paddy fields.

**Keywords:** farmland; soil; brown rice; heavy metal; Cd; regulation

收稿日期: 2018-06-02 录用日期: 2018-06-11

作者简介: 薛涛(1984—), 男, 宁夏中卫人, 博士研究生, 从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: xuetao\_igsnr@163.com

\*通信作者: 廖晓勇 E-mail: liaoxy@igsnr.ac.cn; 张扬珠 E-mail: zhangyangzhu2006@163.com

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403015); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800900)

**Project supported:** Special Fund for Scientific Research on Public Causes of China (201403015); National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800900)

近年来,工业矿业活动和城市化加快了环境污染的速度,农药、化肥生产以及采矿和冶炼等人类活动造成重金属的过量排放,导致的重金属污染成为全球关注的问题<sup>[1]</sup>。目前,包括物理、化学、生物学及农艺措施在内的诸多方法被广泛应用于农田重金属污染治理领域,但很多治理措施存在着成本高、操作复杂、对土壤肥力有损伤、存在二次污染等诸多问题,难以实现大面积推广<sup>[2-5]</sup>。针对这一现状,开展农田重金属污染治理并探索具有可推广性的治理方法具有重要的意义。

目前,针对农田土壤Cd污染的治理措施主要有工程修复、电动修复、淋洗技术、固化/稳定化技术、生物修复技术等。其中,工程修复技术可彻底解决土壤污染问题,但该方法耗时耗资,不适合大规模农田治理<sup>[2]</sup>;电动修复技术是比较清洁的修复技术,且操作简单、处理效率高,但容易导致土壤理化性质的变化,对农田耕层有一定的损伤<sup>[6]</sup>;淋洗技术是一种快速高效的修复方法,但对于透水性差的南方黏性重的土壤效果较差,且价格过于昂贵<sup>[7-8]</sup>;固化/稳定化修复技术简单易行,但不是一种永久性治理措施;植物修复是目前较合理的农田修复措施,可实现污染物的吸收、转化和运移,成本低廉易操作,不破坏生态环境<sup>[9]</sup>,但大规模种植非粮作物,不符合我国人多地少、粮食自给压力大的基本国情。另外,对于轻度污染的农田,实行单一或两三种联合的治理措施就能将糙米中Cd含量降至安全利用范围内<sup>[10-11]</sup>,而对于中度及以上Cd污染的农田则无法达到理想的效果<sup>[12-13]</sup>,通常需要多种措施联合使用、相互补充才可能会取得预期效果。

湖南是我国重要的重金属矿区之一,二十世纪以来矿产的大量开采引发了严重的环境问题,加上许多矿山长期管理不善,从而对矿区周围环境造成了严重影响,特别是湘江流域污染已经成为污染的重灾区<sup>[14]</sup>。据报道,2006—2007年,湘江流域所设的40个省控水质监测断面中,超标断面分别为56%和50%<sup>[15]</sup>。湖南水稻的播种面积、总产量长年保持全国第一的位置,是我国水稻的主要产地,水稻质量直接决定着粮食安全和人体健康<sup>[16]</sup>。2012—2015年间接连发生的“镉大米”“有色大米”等事件,给湖南粮食生产带来严重影响,亟需进行农田重金属污染的综合治理。

本研究以湖南某地超过330 hm<sup>2</sup>的耕地作为治理对象(包括a和b两个地区),在分析和评估研究区土壤和稻米污染状况的基础上,采取品种替代和农

艺措施的综合调控手段进行农田重金属污染的调控治理研究,以期为大面积水田重金属污染的规模化治理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集与分析

2017年6月采集了67个土壤及水稻样品进行研究区重金属的污染状况调查。2017年10月晚稻成熟收割前,在研究区选取具有区域代表性的区块进行水稻籽粒和对应点土壤样品的取样工作。治理区共设73个采样点和10个对照样点,每个土壤及稻谷样品由周边随机5个样点混合组成。

水稻糙米和土壤中重金属含量检测参照EPA改进的方法,糙米样品利用HNO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>微波消解法,土壤样品用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>湿法消化法。采用ICP-MS测定糙米和土壤中重金属浓度<sup>[17]</sup>。所用试剂均为优级纯,并采用国家标准参比物质(植物:GBW-07603;土壤:GBW-07402、GBW-07404)及空白样进行质量控制,测定偏差控制在10%以内。数据处理利用Excel 2016、Origin 2017及ArcGIS 10.2软件进行。

### 1.2 农田重金属调控措施

针对农田Cd超标严重的问题,在2017年晚稻种植前实行Cd污染农田的综合农艺强化措施进行大田重金属Cd的污染治理工作,同时选取10个具有典型性和代表性的田块作为空白对照点。研究区所采用的调控治理措施包括:种植Cd低积累水稻品种、全生育期淹水灌溉、施撒生石灰、施撒土壤调理剂、喷施叶面阻控剂的联用。具体步骤:在晚稻种植前进行翻耕,随复合底肥将石灰(2250 kg·hm<sup>-2</sup>)和土壤改良剂(3000 kg·hm<sup>-2</sup>)一并翻耕混入土壤当中,将准备好的Cd低积累水稻品种按照当地插秧习惯进行栽植。叶面阻控剂3 kg·hm<sup>-2</sup>(水剂比500:1)在水稻抽穗期喷施。并在整个水稻生长期进行淹水灌溉,保持田间水层3 cm左右,在水稻进入蜡熟期后实现自然落干或在收获前7~10 d内按时排水晒田。空白对照点不采取任何措施,并按照当地传统的种植和耕作方式进行。

治理区域种植的Cd低积累水稻品种为三系杂交中熟晚粳H优159,该品种具有熟期适中、产量高和高感稻瘟病、白叶枯病等特点;空白对照种植的常规水稻品种为当地常年主栽品种。石灰购自当地供应商。土壤调理剂为“中硅牌”粉剂,主要成分为CaO、

SiO<sub>2</sub>等;叶面阻控剂为“真护硅”牌水溶性粉剂,主要以水溶性的偏硅酸钠为主要成分。经检测,所用材料重金属含量均在安全利用范围以内,相关指标如表1所示。

表1 治理材料相关指标

Table 1 The related concentration of the repaired materials used

检测指标 Analysis index	生石灰 Quicklime	土壤调理剂 Soil heavy metal conditioner	叶面阻控剂 Foliar spray inhibitor
pH		10.01	10.8
Hg/mg·kg <sup>-1</sup>	痕量	0.04	痕量
Cd/mg·kg <sup>-1</sup>	0.25	0.05	痕量
As/mg·kg <sup>-1</sup>	1.1	痕量	0.15
Pb/mg·kg <sup>-1</sup>	3.81	1.46	0.66
Cr/mg·kg <sup>-1</sup>	1.39	8.30	0.83
细度	≤10	≤70	
CaO/%	80.0	42.30	
MgO/%		10.80	
水分/%		0.39	
水溶性Si/%		29.90	21.7
水不溶物/%			0.15

### 1.3 重金属污染评估方法

利用1980年瑞典科学家Lars Hakanson提出的潜在生态危害指数法对研究区域措施实施前的土壤进行评价<sup>[18]</sup>,选择湖南省背景值作为参比值,该方法为土壤生态环境的影响潜力的综合反映,是重金属含量及生态效应、环境效应和毒理学的综合。其计算公式为:

$$C_i^r = C_i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_i^r = T_i \times C_i^r \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^r \quad (3)$$

式中: $C_i^r$ 为重金属富集系数; $C_i$ 为重金属*i*的实测值,mg·kg<sup>-1</sup>; $C_n^i$ 为相对应的参比值,mg·kg<sup>-1</sup>; $E_i^r$ 为土壤中*i*元素的潜在生态危害系数; $T_i$ 为*i*元素的毒性系数; $RI$ 为土壤中多种元素的综合生态危害指数。潜在生态危害程度级别如表2所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 治理前研究区土壤重金属含量

研究区土壤重金属含量特征见表3和图1。土壤中重金属含量Pb和Cr远低于国家土壤环境质量二级限量标准值(GB 15618—2008),不存在土壤污染的状况。部分点位的土壤中As、Hg出现了超标的情况,超标率分别为10.45%和2.98%。而超标率最高的为Cd,达98.51%,平均含量1.0 mg·kg<sup>-1</sup>,其最大值达3.3 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤环境质量二级限量标准值的11倍,且Cd的变异系数达49.1%,即研究区Cd含量的区域差异较大。

### 2.2 土壤潜在生态风险评价

农田土壤中的重金属污染对农田生态系统造成危害,并通过食物链积累,对人体健康存在危害。因此,进行调控治理前的农田土壤重金属潜在生态风险评价,对于掌握污染状况,控制土壤污染,指导调控治

表2 潜在生态危害程度

Table 2 The degree of potential ecological risk

级别 Level	$E_i^r$ 值 $E_i^r$ value	$E_i^r$ 危害程度 The degree of the potential hazards of an element	$RI$ 值 $RI$ value	$RI$ 危害程度 The degree of the potential hazards of comprehensive pollution
I	$E_i^r < 40$	轻微生态危害	$RI < 150$	轻微生态危害
II	$40 \leq E_i^r < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
III	$80 \leq E_i^r < 160$	强生态危害	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
IV	$160 \leq E_i^r < 320$	很强生态危害	$RI \geq 600$	很强生态危害
V	$E_i^r \geq 320$	极强生态危害		

表3 研究区土壤重金属含量特征

Table 3 The characteristics of soil heavy metal concentration in the study area

重金属 Heavy metals	背景值 Background/ mg·kg <sup>-1</sup>	最小值 Minimum/ mg·kg <sup>-1</sup>	最大值 Maximum/ mg·kg <sup>-1</sup>	均值 Average/ mg·kg <sup>-1</sup>	中位数 Median/ mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数 Coefficient of variation/%
Cd	0.081 <sup>[19]</sup>	0.2	3.3	1.0	0.8	49.1
As	18.6 <sup>[19]</sup>	10.1	166.1	23.5	17.2	101.5
Cr	57.3 <sup>[20]</sup>	40.3	112.7	76.5	78.6	20.5
Pb	26.0 <sup>[19]</sup>	35.2	111.2	62.0	59.8	25.9
Hg	0.11 <sup>[19]</sup>	0.1	0.7	0.3	0.2	37.8

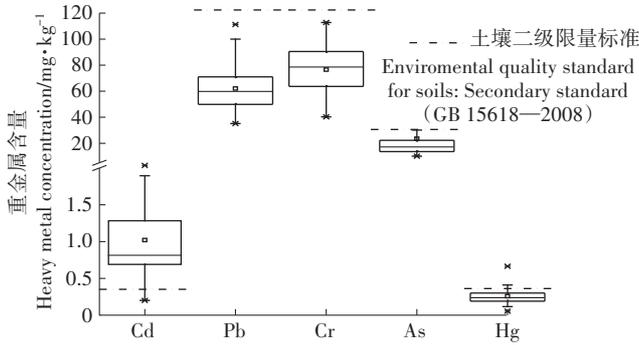


图1 研究区土壤重金属含量状况

Figure 1 The investigation of heavy metal concentration condition of soil in the study area

理工作有着关键的作用。参比值采用表3中背景值,毒性系数为Hg=40、Cd=30、As=10、Cu=5、Pb=5、Ni=5、Cr=2、Zn=1<sup>[21]</sup>。

从表4中可知,各元素的潜在生态风险程度大小顺序为Cd>Hg>As>Pb>Cr。Cd的潜在生态危害系数范围为74.1~1212,IV级(很强)和V级(极强)生态危害系数占98.51%,存在很高的生态危害;Hg的潜在生态危害系数范围为20.0~242,轻微、中等、强、很强的生态风险频数分别为1.49%、32.84%、62.69%和2.99%,II级(中等)和III级(强)的频率占到了95.53%,即农田土壤中的Hg含量存在较高生态危害;

As的潜在生态风险系数范围为5.43~89.3,I级(轻微)占95.52%,大多区域存在轻微的生态危害;Pb和Cr的生态危害系数均在25以内,生态风险很低。研究区域内土壤重金属存在Cd、Hg、As形成的复合污染,潜在综合生态危害指数(RI)范围在185~1330,均值499,III级(强)占76.12%,IV级(很强)占22.39%。其中Cd污染最严重,其风险系数占5种重金属污染风险系数总量的75.75%。

因此,研究区土壤存在以Cd为主要污染物的生态危害,需要在评估水稻糙米中的重金属含量后,综合治理农田重金属污染。

2.3 糙米重金属含量

研究区水稻糙米重金属含量特征见表5和图2。水稻糙米中重金属仅有Cd超标,其他4种重金属均未超过相关国家食品卫生标准(GB 2762—2017)。糙米中Cd平均含量达到0.81 mg·kg<sup>-1</sup>,点位超标率高达85.07%,含量范围在0.09~2.00 mg·kg<sup>-1</sup>之间,变异系数为67.7%,说明研究区存在较严重的Cd污染,且区域污染程度差异较大。

2.4 调控治理效果评价

根据前期调查和评估(包括a和b两个地区),研究区土壤中存在Cd、As、Hg的复合污染,而由土壤进入水稻糙米中的重金属只有Cd含量超过了0.2 mg·

表4 潜在生态危害级别与频率分布

Table 4 The level of potential ecological risk and frequency distribution

生态危害级别 The level of potential ecological hazard	频率分布 Frequency distribution/%					
	Cd	Pb	Cr	As	Hg	RI
I		100	100	95.52	1.49	
II	1.49			2.99	32.84	1.49
III				1.49	62.69	76.12
IV	50.75				2.99	22.39
V	47.76					—
危害系数范围 The range of the hazard coefficient	74.1~1212	6.76~21.4	1.41~3.93	5.43~89.3	20.0~242	185~1330
危害系数均值 The average of the hazard coefficient	378	11.9	2.67	12.6	93.8	499

表5 研究区糙米重金属含量描述性统计

Table 5 The characteristics of heavy metal concentration in brown rice in the study area

重金属 Heavy metals	最小值 Minimum/ mg·kg <sup>-1</sup>	最大值 Maximum/ mg·kg <sup>-1</sup>	均值 Average/ mg·kg <sup>-1</sup>	中位数 Median/ mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数 Coefficient of variation/%
Cd	0.09	2.00	0.81	0.82	67.7
无机 As	0.08	0.54	0.17	0.16	40.2
Cr	0	1.06	0.13	0.07	144.9
Pb	0	0.77	0.07	0.04	168.7
Hg	0	0.007	0.002	0.002	75.9

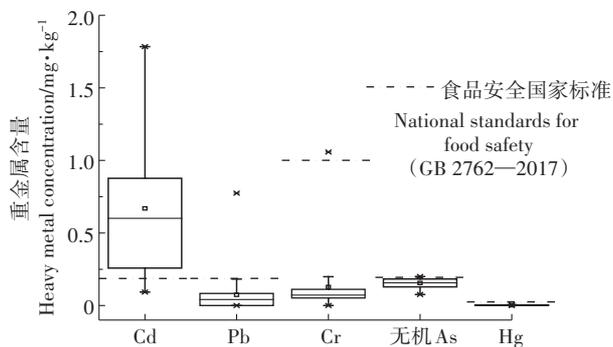


图2 研究区糙米重金属含量状况

Figure 2 The investigation of heavy metal concentration condition of brown rice in the study area

$\text{kg}^{-1}$ 的食品重金属污染限量标准(GB 2762—2017),因此,在研究区进行综合的农艺强化措施调控治理手段以减少水稻糙米中Cd含量,以期达到粮食安全生产的目的。

按照前期水稻污染调查,将糙米中Cd含量小于 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域划为轻度污染区, $0.4\sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域划分为中度污染区,大于 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域划分为重度污染区,进行治理分区评价(图3)。本研究轻、中、重三个污染区所在区域和空白对照(CK)比对结果显示,轻度污染区降Cd率为34.58%,中度污染区为30.03%,重度污染区降Cd率仅为24.16%,总体降Cd率为31.62%(图4),治理效果明显。经过2017年晚稻季的调控治理,有6个点位降至 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 限量标准(GB 2762—2017)以下。同时,按照污染程度和治理效率估算,至少需要连续4季的措施实施,才能使研究区水稻质量达到国家粮食安全标准。

本研究调控治理效果与其他学者的室内模拟研究和田间小区试验存在一定的差异。Sriprachote等<sup>[22]</sup>在泰国德克省进行水稻品种重金属积累调查试验,发现Cd低积累水稻品种晚稻降Cd率高达66.67%~83.33%。Honma等<sup>[23]</sup>通过田间小区实验研究发现淹水灌溉条件下糙米中Cd含量仅为 $(0.15 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,雨水灌溉下的高达 $(0.92 \pm 0.70) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;而朱奇宏等<sup>[24]</sup>通过田间实验发现,施撒石灰使得水稻地上部分Cd含量降低50%;Rehman等<sup>[25]</sup>和Okazaki等<sup>[26]</sup>则分别利用 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{MgO}$ 的矿质材料作为土壤改良剂,糙米中Cd含量下降了85.5%和50%,喷施叶面硅肥也可将水稻糙米中Cd含量降低30.56%<sup>[27]</sup>。此外,王蜜安等<sup>[28]</sup>和杨小粉等<sup>[29]</sup>分别在湖南多地进行田间Cd低积累水稻品种、水分管理和施撒石灰等综合措施治理,可使糙米降Cd率最高可达40%以上。

### 3 讨论

目前,关于农田重金属Cd污染治理的研究有很多,但大多为室内研究和农田小区实验研究,治理环境变量是可控的或变异较小,因此治理效果可观。在农田治理实践过程中,由于土壤状况复杂,受外界环境和人为因素等影响较大,治理效果与室内和小区模拟实验存在一定的差距<sup>[22-30]</sup>。同时,调控治理措施中其他因素,如不同材料来源等,也会导致治理结果的不确定性,在不同研究区实施的治理效果也不尽相同<sup>[23,30-32]</sup>。本研究治理区域面积大,污染程度有较大差异,导致调控治理效果差异的原因比较复杂。

首先,农田土壤Cd污染水平不同,会导致水稻对

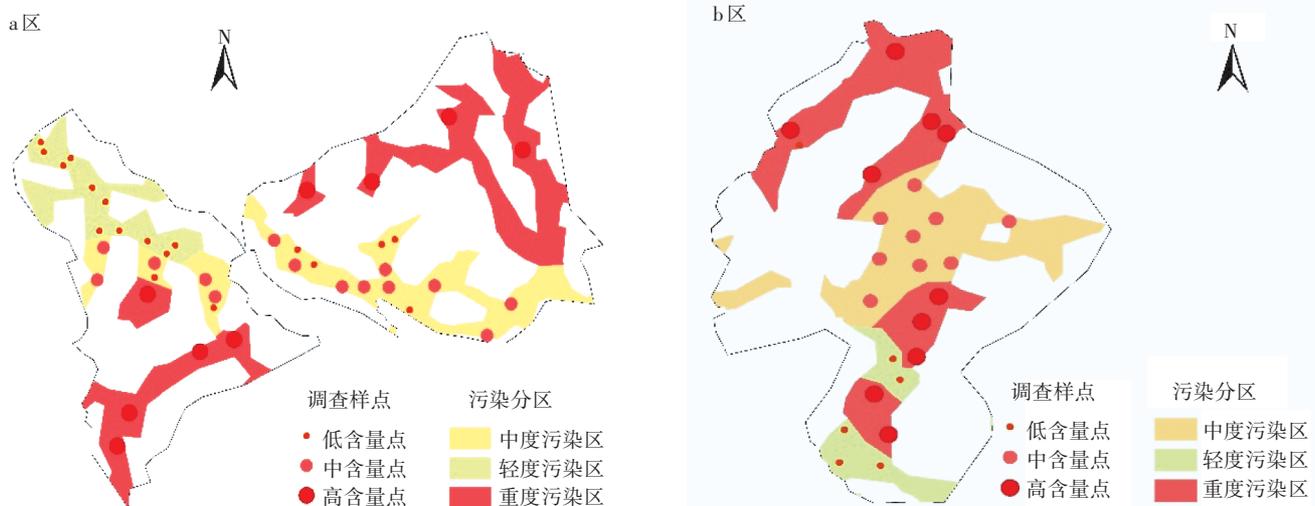


图3 研究区糙米Cd污染程度分区图

Figure 3 Division of pollution degree of cadmium of brown rice in the study area

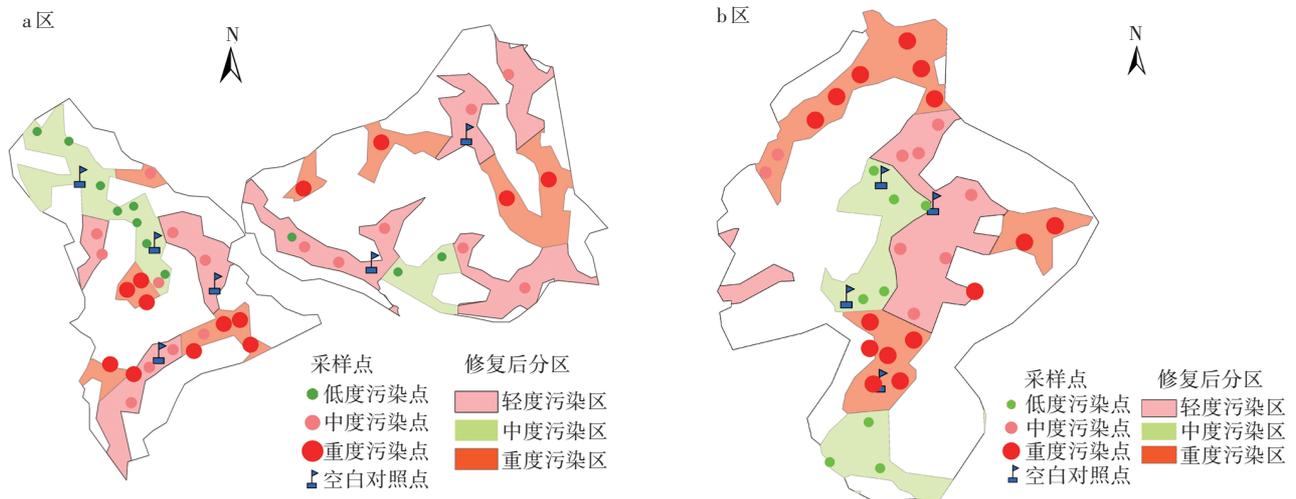


图4 治理后研究区糙米Cd含量分区图

Figure 4 Division of pollution degree of cadmium of brown rice after amendment in the study area

Cd的吸收存在差异,研究发现高Cd土壤环境中水稻籽粒中Cd含量比低Cd土壤环境中高10.5倍<sup>[13]</sup>。本研究区土壤Cd污染空间差异较大,最高的污染点位达 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最低的仅为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,变异系数49.1%,加上土壤性质多样,导致Cd低积累水稻品种的降Cd率也不同。污染源的治理也是决定治理效果好坏的主要因素。研究区大面积灌溉水源来自于湘江水,目前湘江治理“一号工程”仍在进行<sup>[33]</sup>,污染源的问题未得到彻底解决,因此仍然有污水进入农田,导致调控治理效果反弹,甚至会出现Cd含量上升的情况。

其次,水稻品种是水稻积累Cd的重要影响因素<sup>[34-35]</sup>。水稻极易吸收和累积Cd元素并形成积累<sup>[36-40]</sup>,不同水稻品种对Cd的吸收和积累存在很大差异<sup>[41-42]</sup>。因此栽种Cd低积累品种是降低糙米Cd积累的有效手段。该区长期种植丰源优299和金优207等常规水稻品种,Cd富集能力较强,在重度污染区,稻穗中的Cd可达 $8.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[27]</sup>,而Cd低积累水稻品种能明显抑制Cd向地上部及籽粒中的运移<sup>[34]</sup>,因此建议在该地区推广Cd低积累水稻品种的种植。

同时,治理过程中的农艺措施,如水分管理、操作方式等,也会导致治理效果的区域差异<sup>[23,30-31]</sup>。研究区实施的淹水灌溉措施需要严格控制水层覆田,但2017年雨季较短,研究区内农田灌溉能力不足,部分地区无法达到全生育期淹水条件,直接影响了调控治理效果。并且,水分管理对石灰、土壤调理剂等治理措施也会产生负面影响<sup>[43]</sup>,进而影响水稻吸收和累积

Cd含量的效应<sup>[44]</sup>。研究区域内农民的水稻栽植方式不同,有的是插秧,有的为抛秧,而且种植间距和种植质量也存在差异,会或多或少的影响到治理效果;加上研究区面积大,施撒石灰和土壤调理剂工作量较大,且实施时间短,不同人员施撒方式存在差异,也会在一定程度上影响治理效果,因此仍需要通过连续多季实施来检验此措施的稳定性和长效性。

本研究表明,农艺强化措施对大规模农田糙米具有较明显的降Cd效果。在所进行的调控治理措施中,施撒石灰和土壤改良剂是在水稻移栽前农田翻耕时进行,Cd低积累品种水稻的育苗和移栽工作与之前的常规稻种植基本一致,喷施叶面硅肥和喷施防治病虫害农药同步混合进行,水分管理则依据当地的灌溉习惯适当调整即可。因此农艺强化措施实施和当地的耕作种植习惯基本保持一致,减少了人力和时间成本;另外,这些调控治理措施在农田种植实践中容易实现,所用材料都为天然矿质材料或者常用肥料,对环境不会造成二次污染,且调控治理措施经济成本降低,具有良好的操作性和推广性。

#### 4 结论

本研究针对湖南重金属污染农田土壤和稻米Cd污染现状,采用品种替代、重金属钝化等综合的农艺强化措施进行重金属污染调控。结果显示,轻度、中度污染区的糙米降Cd率分别达到了34.58%和30.03%,调控治理效果较明显。此种综合的农艺强化措施可用于大规模轻、中度Cd污染稻田的防治。

## 参考文献:

- [1] Lu K P, Yang X, Shen J J, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to sedum plumbizincicola[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 191(1):124-132.
- [2] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(6):130-135.  
YANG Hai-lin. Remediation of heavy metal polluted soil[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(6):130-135.
- [3] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(10):1727-1736.  
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10):1727-1736.
- [4] Hong C O, Dougyoung C, Lee D K, et al. Comparison of phosphate materials for immobilizing cadmium in soil[J]. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 2010, 58(2):268-274.
- [5] Toshimitsu H, Ayako K, Hiroto O, et al. Effect of application of molasses to paddy soil on the concentration of cadmium and arsenic in rice grain[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2012, 58(2):255-260.
- [6] Yeung A T, Gu Y Y. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 195(52):11-28.
- [7] 李玉双, 胡晓钧, 孙铁珩, 等. 污染土壤淋洗修复技术研究进展[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(3):596-602.  
LI Yu-shuang, HU Xiao-jun, SUN Tie-heng, et al. Soil washing/flushing of contaminated soil: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(3):596-602.
- [8] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(1):1-31.
- [9] Chaney R L, Baklanov I A. Phytoremediation and phytomining: Status and promise[J]. *Advances in Botanical Research*, 2017, 83(1):189-221.
- [10] Liao G J, Wu Q H, Feng R W, et al. Efficiency evaluation for remediating paddy soil contaminated with cadmium and arsenic using water management, variety screening and foliage dressing technologies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170:116-122.
- [11] Hu P J, Ouyang Y N, Wu L H, et al. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27(1):225-231.
- [12] Cattani I, Romani M, Boccelli R. Effect of cultivation practices on cadmium concentration in rice grain[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(2):265-271.
- [13] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2/3):302-309.
- [14] 雷丹. 湖南重金属污染现状分析及其修复对策[J]. *湖南有色金属*, 2012, 28(1):57-60.  
LEI Dan. Analysis on heavy metals pollution status in Hunan Province and its remediation strategy[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2012, 28(1):57-60.
- [15] 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 Bo-qing. The current status and analysis of heavy metal pollution in Xiangjiang River Basin in Hunan Province[J]. *Agro-Environment Development*, 2010, 27(2):62-65.
- [16] 何俊黎. 湖南水稻产业发展问题研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.  
HE Jun-li. Research on Hunan rice industry[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.
- [17] Chen T B, Huang Z C, Huang Y Y, et al. Distributions of arsenic and essential elements in pinna of arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Science in China*, 2005, 48(1):18-24.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [19] Wang Y, Wei F S. Chemistry of soil environmental elements[M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 1995.
- [20] 魏复盛, 陈静生. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1991, 12(4):12-19.  
WEI Fu-sheng, CHEN Jing-sheng. Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. *Environmental Science*, 1991, 12(4):12-19.
- [21] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2):112-115.  
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [22] Sriprachote A, Kanyawongha P, Pantuwan G, et al. Evaluation of Thai rice cultivars with low-grain cadmium[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2012, 58(5):568-572.
- [23] Honma T, Ohba H, Kaneko A, et al. Effects of soil amendments on arsenic and cadmium uptake by rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) under different water management practices[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2016, 62(4):1-8.
- [24] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4):847-851.  
ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, LIU Guo-sheng, et al. Effects and mechanisms of amendments on remediation of cadmium-contaminated acid paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4):847-851.
- [25] Rehaman M, Khalid H, Akmal F, et al. Effect of limestone, lignite and biochar applied alone and combined on cadmium uptake in wheat and rice under rotation in an effluent irrigated field[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227:560-568.
- [26] Okazaki M, Kimura S D, Kikuchi T, et al. Suppressive effects of magnesium oxide materials on cadmium uptake and accumulation into rice grains: II: Suppression of cadmium uptake and accumulation into rice grains due to application of magnesium oxide materials[J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 154(1):294-299.
- [27] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(7):2762-2770.  
CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental*

- Science*, 2014, 35(7):2762-2770.
- [28] 王蜜安, 尹丽辉, 彭建祥, 等. 综合降镉(VIP)技术对降低糙米镉含量的影响研究[J]. 中国稻米, 2016, 22(1):43-47.  
WANG Mi-an, YIN Li-hui, PENG Jian-xiang, et al. Effects of VIP technology on reducing cadmium content in rice[J]. *China Rice*, 2016, 22(1):43-47.
- [29] 杨小粉, 刘钦云, 袁向红, 等. 综合降镉技术在不同污染程度稻田土壤下的应用效果研究[J]. 中国稻米, 2018, 24(2):37-41.  
YANG Xiao-fen, LIU Qin-yun, YUAN Xiang-hong, et al. Effects of VIP technology on reducing cadmium under different cadmium pollution degree paddy soil[J]. *China Rice*, 2018, 24(2):37-41.
- [30] Hu P J, Huang J X, Ouyang Y N, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2013, 35(6):767-778.
- [31] Li J R, Xu Y M. Evaluation of palygorskite for remediation of Cd-polluted soil with different water conditions[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2017, 18(2):1-8.
- [32] Huang S H, Yang Y, Li Q, et al. Evaluation of the effects of lime-basalt-charcoal amendment on the immobilization of cadmium in contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2017, 98(3):433-438.
- [33] 童潜明. 湘江“污染元素表”之镉[J]. 国土资源导刊, 2012(9):17-17.  
TONG Qian-ming. Cadmium of Xiang jiang "polluting element table" [J]. *Land & Resources Herald*, 2012(9):17-17.
- [34] 唐杰, 徐强, 王昌全, 等. Cd胁迫下不同水稻品种组织细胞中Cd的转运分配研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(12):2014-2020.  
TANG Jie, XU Qiang, WANG Chang-quan, et al. Research of Cd stress on transfer and distribution of Cd in histocyte of different rice varieties[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(12):2014-2020.
- [35] 唐贞. 镉污染土壤中低积累型水稻及其改良效果研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.  
TANG Zhen. Study on the genotype of rice with low accumulation in Cd pollution paddy soil and its amelioration[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.
- [36] Burke F, Hamza S, Naseem S, et al. Impact of cadmium polluted groundwater on human health: Winder, Balochistan[J]. *Sage Open*, 2016, 6(1):1-8.
- [37] Murakami M, Nakagawa F, Ae N, et al. Phytoextraction by rice capable of accumulating Cd at high levels: Reduction of Cd content of rice grain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(15):5878-5883.
- [38] Gill S S, Khan N A, Tuteja N. Differential cadmium stress tolerance in five *Indian mustard* (L.) cultivars[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2011, 6(2):293-300.
- [39] Lux A, Martinka M, Vaculik M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1):21-37.
- [40] Ibaraki T, Fujitomi S I, Ishitsuka A, et al. Phytoextraction by high-Cd-accumulating rice to reduce Cd in wheat grains grown in Cd-polluted fields[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2014, 60(2):266-275.
- [41] 唐皓, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻镉高积累材料的筛选及其镉积累特征研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11):1910-1916.  
TANG Hao, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Screening of rice cultivars with high cadmium accumulation and its cadmium accumulation characteristics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(11):1910-1916.
- [42] Chen J R, Shafi M, Wang Y, et al. Organic acid compounds in root exudation of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its bioactivity as affected by heavy metals[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(20):1-8.
- [43] Li J R, Xu Y M. Erratum to "Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment"[Chemosphere, 122 March 2015, 131-136][J]. *Chemosphere*, 2017, 185:1228.
- [44] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究: 品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1346-1352.  
XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: Cultivars versus types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1346-1352.