

陈昂, 陈武瑛, 熊浩, 等. 不同调控措施对土壤-水稻系统中镉累积与转运的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (2): 240–246.
CHEN A, CHEN W Y, XIONG H, et al. Effects of Control Methods on Bioconcentration and Translocation of Cadmium between Soil and Rice Plants [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (2): 240–246.

不同调控措施对土壤-水稻系统中镉累积与转运的影响

陈 昂, 陈武瑛, 熊 浩, 罗香文, 李凯龙, 罗 杰, 李宗云

(湖南省植物保护研究所, 湖南 长沙 410125)

摘 要:【目的】探讨不同调控措施对稻田土壤-水稻系统中重金属镉的累积与转运的影响。【方法】通过田间试验对几种污染源控制措施(沉降截源、清洁水灌溉、稻草还田/离田)及施用石灰对污染区醴陵及益阳农田系统中重金属的影响进行研究。【结果】与稻草还田对照处理相比,除施用石灰外,其他处理对土壤中镉的有效性影响并不显著。施用石灰能明显降低污染土壤中镉的有效态含量和水稻中镉的累积量。与对照相比,石灰处理下土壤中镉的弱酸提取态含量最低,而秸秆离田处理下土壤中弱酸提取态镉含量最高,且可还原态镉向弱酸提取态镉进行了转化。分析水稻各部位的镉富集与转运系数表明,施用石灰、沉降截源及清洁水灌溉等调控措施可降低水稻地上部位镉的富集系数,减少水稻对重金属的累积量,且施用石灰处理与截断大气源处理最高可分别降低水稻籽粒中镉含量40%与8%。【结论】在污染区农田施用石灰、控制大气源、净化农田灌溉水,同时将污染秸秆移除农田等措施,可有效降低水稻镉的积累量,有助于实现污染农田土壤安全利用和水稻的安全生产。

关键词: 土壤; 水稻; 镉; 控源措施; 石灰

中图分类号: X 53

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 02-0240-07

Effects of Control Methods on Bioconcentration and Translocation of Cadmium between Soil and Rice Plants

CHEN Ang, CHEN Wuying, XIONG Hao, LUO Xiangwen, LI Kailong, LUO Jie, LI Zongyun

(Plant Protection Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: 【Objective】 Effects of various pollution control methods on Cd accumulation and transport between contaminated soil and rice plants grown on the land were analyzed. 【Method】 Field experiments were conducted on the contaminated lots at Liling and Yiyang of Hunan Province to investigate the effects of various control measures, including eliminating atmospheric Cd deposition, cleansing land by irrigation, and removing contaminated spent straws from field, as well as applying lime on soil, along with returning cut rice straws to land as control (CK). 【Result】 Other than the lime application, the tested methods yielded no significant effects on Cd in soil in comparison to CK. Lime significantly neutralized Cd in soil and reduced the heavy metal content in rice grown on the lot. Compared with CK, the acid-extractable Cd in soil was lowest under the lime treatment and highest with straws removal, which also resulted in partial conversion of the reducible Cd to the acid-extractable fractions. The lime application, atmospheric pollution cutoff, or irrigation with groundwater could lower the Cd bioconcentration and accumulation in the aboveground rice tissues. For instance, a reduction on Cd in rice grains of approximately 40% by the lime application or 8% by the atmospheric interception was achieved. 【Conclusion】 The treatments on Cd contaminated soil by lime application, deposition prevention, water cleansing, or straw removal could reduce in varying degrees of heavy metal accumulation in rice improving safety of the food consumption.

Key words: Soil; rice; cadmium; heavy metal pollution control measures; lime

0 引言

【研究意义】随着现代工业的发展,大量含有

镉(Cd)的废气、废水因冶炼、采矿等进入环境中。通过食物链的富集作用,Cd在人体内蓄积并对人体造成危害,引发癌症、痛痛病和糖尿病等病症^[1]。

收稿日期: 2021-08-16 初稿; 2021-10-23 修改稿

作者简介: 陈昂(1985-),男,硕士,主要从事农业生态学研究(Email: angchen2006@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31701765)

因湖南的镉大米事件，水稻镉污染超标事件备受关注。而早在 21 世纪初期就有报告指出我国生产的水稻中约有 10% 存在 Cd 含量超标的问题^[2]。2013 年广西地区镉污染超标 1.3 倍，贺江流域鱼群大量死亡^[3]。2013 年广东省食品药品监督管理局多次批评报道了稻米产品中 Cd 含量高于国家食品安全标准限制^[2]。直至目前，大米中 Cd 含量超标问题依旧没有得到有效解决，稻米 Cd 超标已经成为我国粮食安全的大问题^[4]。

【前人研究进展】在广西、南京、湖南等重金属污染严重的地区，大量关于农田重金属污染的治理研究已经展开，研究结果表明这些地区的 Cd 污染严重超标，应当加强对农田重金属 Cd 污染控制技术的开发和研究^[5-7]。在农田重金属污染状况不容乐观的背景下，重金属污染来源解析已成为研究热点。有研究表明农田重金属 Cd 污染输入的主要途径包括大气沉降、生活污水、商品肥和有机肥料等^[8-12]。刘红恩等的研究表明，污水灌溉区土壤中重金属含量远远高出清洁水灌溉^[13]。Wu 等的田间试验研究表明施用猪粪能增加表层土壤 Cd 浓度，但秸秆还田对土壤中 Cd 含量的影响不显著^[14]。Liu 等的研究表明，新沉降的重金属更容易在土壤中累积^[15]。而在湖南地区，大气沉降是重金属 Cd 的主要来源^[11,16]。【本研究切入点】大多数研究均是针对少量的重金属污染来源对土壤或者植物的影响进行比较，而针对性地利用调控措施系统探讨重金属来源-土壤-水稻中重金属迁移和累积的影响研究较少。【拟解决的关键问题】本研究通过在湖南典型重金属污染区域布设田

间小区，研究沉降截源、施用石灰、清洁水灌溉、秸秆离田以及秸秆还田等措施对土壤-水稻系统重金属 Cd 累积的影响，旨在通过不同污染源控制措施为重金属污染农田土壤治理和农产品安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

醴陵市是高度工业化的区域，该地区重金属污染的来源主要是广泛分布的有色金属矿床和冶炼工厂，该处试验点位于醴陵市的一个村庄（113.22°E，27.58°N），附近有一个铅锌矿藏，污染源主要来自有色金属冶炼产生的废气。益阳试验点位于赫山区的一个小村庄（112.54°E，28.51°N），属于没有明显污染来源的耕地保护区。

采集试验点大田土壤样品及地表地下水样品分析，结果（表 1）发现，益阳属于 Cd 轻度污染区域（0.38 mg·kg⁻¹），而醴陵属于 Cd 中度污染区域，土壤 Cd 质量浓度高达 1.13 mg·kg⁻¹。益阳试验点与醴陵试验点均属于酸性土壤，醴陵土壤的 pH 值（4.82）比益阳土壤耕地 pH 值（5.65）更低，重金属具有更高的活性，醴陵试验田中重金属 Cd 的有效态含量达 0.83 mg·kg⁻¹，远超过益阳土壤（0.14 mg·kg⁻¹）。虽然两个试验点均属 Cd 污染区域，但是两个试验点地下水（清洁水）中的 Cd 含量均非常低，同时灌溉水含量也未超标，但醴陵试验点灌溉水中 Cd 含量较益阳试验点要高得多。

表 1 试验田基本信息及灌溉水与清洁水中镉含量
Table 1 Basic information on test sites and Cd contents of irrigation and clean water

试验点 Experimental site	pH	土壤有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	二乙烯三胺五乙酸-镉 DTPA-Cd/ (mg·kg ⁻¹)	总镉 Total Cd/ (mg·kg ⁻¹)	灌溉水镉含量 Cd in irrigation water / (μg·L ⁻¹)	清洁水镉含量 Cd in clean water / (μg·L ⁻¹)
醴陵 Liling	4.82	41.38	0.83	1.13	0.31	0.012
益阳 Yiyang	5.68	36.44	0.14	0.38	0.13	0.002

1.2 试验设计

分别在醴陵市与益阳市各布设 5 个处理：沉降截源（T1，地表径流水灌溉，秸秆还田，小区用透明胶板做顶，使用镀锌钢架作支柱，100 尼龙纱网作围墙，建成一个高 3 m 的透明简易棚，用来截断大气的干湿沉降）；石灰调控（T2，地表径流水灌溉，秸秆还田，在水稻播种前于小区中施用石灰并翻耕混匀，石灰施用量为 1500 kg·hm⁻²；清洁水灌溉（T3，使用当地地下水进行灌溉，秸秆还田）；秸秆离田（T4，地表径流水灌溉，水稻收获后，水稻

秸秆全部离田处理）与秸秆还田（CK，地表径流水灌溉，与大部分湖南水稻田秸秆处理模式相同，前茬水稻收获后，水稻秸秆全部归还于小区）。除沉降截源处理外，其余 4 个处理均无沉降截源装置。每个处理 3 次重复，2 个试验点总共 30 个小区，每个小区面积约为 4 m²，由塑料膜包裹小区田埂并埋入水稻田中来减弱各个小区之间及其与大田之间的相互影响。小区位于大田之中，与农户合作管理，在水稻整个生长期均按照当地一般农田的管理模式进行管理。农户负责灌溉（T3 处理小区需挑水灌

溉)、施肥、除草及除虫事宜。整个试验从 2016 年 5 月始至 2017 年 10 月止。

试验中所用水稻品种为中早 39 号, 2016 年 5 月中旬种植水稻, 均采用插播种植水稻。水稻种植之前采集土壤样品、地表径流水、地下水。水稻种植前施用复合肥 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 做底肥, 追肥 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。10 月上旬水稻收获后布设试验, 5 个处理随机分布, 将秸秆离田小区的稻草全部离田。其余小区的水稻秸秆全部还田, 冬季歇田。并于 2017 年 5 月开始继续种植水稻, 水稻种植之前采集土壤样品, 种植管理方式同 2016 年。于 2017 年 10 月收获水稻后, 采集成熟期水稻样品。

1.3 样品采集及分析

于 2017 年 10 月份采集成熟期水稻样品。于每个小区中随机采集水稻植株 3 棵并装袋。水稻带回实验室后先用自来水冲洗, 后用超纯水洗净, 将水稻的籽粒、茎、叶和根分离。将水稻各部位放入烘箱中 105°C 杀青 120 min 后 75°C 烘干至恒重。然后将水稻各部位样品用粉碎机粉碎后密封保存。分别采集两个试验点水稻田表层土壤 ($0\sim 20 \text{ cm}$), 自然风干后, 除去杂物, 研磨过 20 目和 100 目尼龙筛后放入聚乙烯封口袋中保存备用。土壤 pH 值采用土水比为 $1:2.5 (m/V)$ 浸提, pH 计 (雷磁, PHS-3C) 测定。土壤有机质含量 (Soil organic matter, SOM) 测定采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法^[17]。植物样品采用硝酸消解, 土壤样品采用盐酸-硝酸-高氯酸消解, 土壤中有有效态镉用二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 提取^[18]。采用 BCR 分布提取步骤提取土壤中重金属各形态分布^[11]。同时收集当地地表灌溉水和地下清洁井水, 使用硝酸消解^[16]。消解液和提取液中镉含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Optima 8300, PerkinElmer) 测定。每批消解样采用空白样品和土壤

标准物质 (GBW07405) 或灌木枝叶标准物质 (GBW07603) 同时消解, 所有样品分析检测过程中每 20 个样品加测一个标准液进行质量控制, 土壤和植物样品镉回收率均高于 95%。

镉的生物富集系数 (BCF) 与转运系数 (TF) 采用以下公式分别计算, 其中 C_t 表示水稻地上部各组织 (茎、叶、籽粒) 中镉含量; C_s 代表土壤中镉总量; C_r 代表水稻根中镉含量。

$$\text{BCF} = \frac{C_t}{C_s}; \quad \text{TF} = \frac{C_t}{C_r}。$$

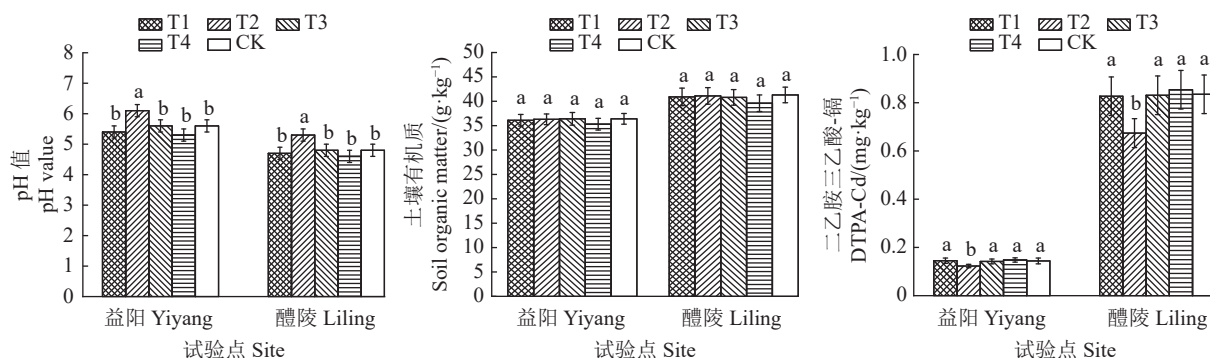
1.4 数据分析

数据统计采用 Microsoft Excel 2007 进行分析, 采用 Origin 8.0 软件作图。单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和相关性分析均采用 SPSS 19.0 完成, $P < 0.05$ 表示处理间存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同调控措施对土壤 pH 值、有机质及有效态 Cd 含量的影响

由图 1 可知, 经过各处理 1 年之后土壤中各指标发生变化, 无论是高污染土壤还是低污染土壤, 与秸秆还田相比, 秸秆离田处理后土壤 pH 值最低, 但没有显著差异。T1 处理土壤 pH 值也稍有下降, T2 处理的土壤 pH 值最高, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 而使用 T3 处理的农田土壤 pH 与 CK 相比没有明显变化。各处理中, 秸秆离田处理土壤的有机质含量最低, 但差异不显著; 其他各处理间有机质含量并没有明显差异; 益阳土壤与醴陵土壤具有相同的变化趋势。各处理中 Cd 的有效态含量除 T2 处理外, 无显著差异, T2 处理下 Cd 的有效态含量显著降低。



注: 图中不同字母表示不同水平处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Data with different letters on same row indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$). Same for the following figures.

图 1 不同处理下土壤 pH、SOM 以及 DTPA-Cd 的含量

Fig. 1 pH and contents of SOM- and DTPA-Cd in soil under different treatments

2.2 不同调控措施对水稻植株 Cd 含量的影响

结果（图 2）显示，无论是低污染区还是高污染区，水稻各部位重金属镉含量表现出根>茎>叶>籽粒的规律。各处理在两个试验点中水稻各部位 Cd 含量与对照相比均有一定程度下降，其中以施用石灰效果最佳。与对照相比，两个试验点 T2 处理下水稻

根中 Cd 含量均有下降趋势，但醴陵水稻根 Cd 含量下降不显著，而益阳水稻根中 Cd 含量下降达到显著水平，两个试验点水稻根中 Cd 含量降幅分别为 29% 和 8%。T2 处理中茎、叶以及籽粒中 Cd 含量都有较大下降，其中醴陵与益阳试验田籽粒中 Cd 含量的降幅分别为 40% 与 24%，均达到显著水平。

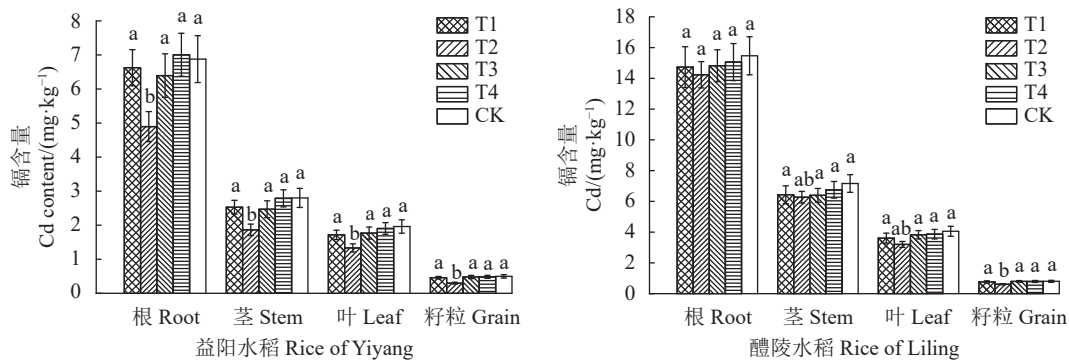
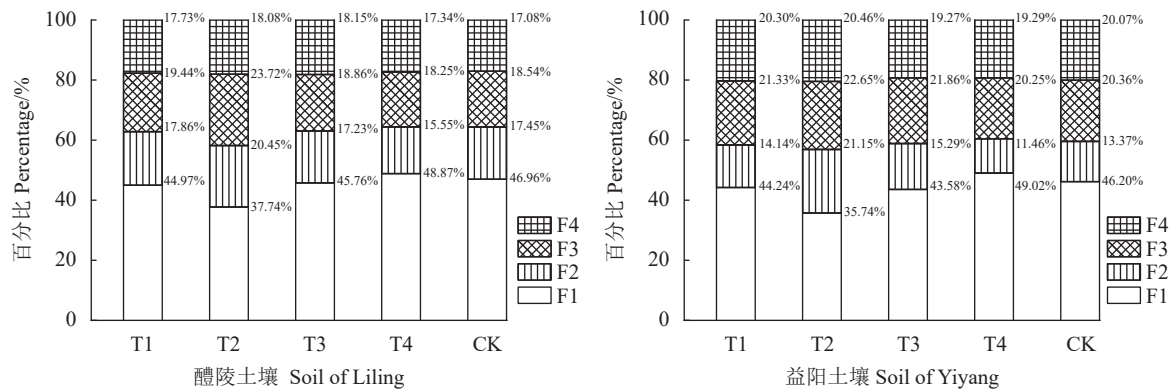


图 2 不同处理下试验区水稻各部位 Cd 含量
Fig. 2 Cd content in parts of rice plant at sites under different treatments

2.3 不同调控措施对土壤 Cd 形态分布的影响

为进一步探讨各处理对农田系统中土壤的影响，分别对两个试验点的土壤进行了 BCR 分布提取试验，其结果如图 3 所示。两处试验点土壤中 Cd 的弱酸提取态含量约为 40% 左右，不同的是益阳土壤中 Cd 的残渣态含量约为 20%，高于醴陵土壤（约

17%）。与 CK 相比，两个试验点土壤 T2 处理中 Cd 的 F1 形态含量较其他处理低。T4 处理下，各试验点土壤中 F1 形态含量均最高，但未达到显著水平。两处试验田 T1、T3 处理中土壤与 CK 相比，其 Cd 形态并没有明显变化。



注：F1：弱酸提取态，F2：可还原态，F3：可氧化态，F4：残渣态。
Note: F1: acid-extractable; F2: reducible fraction; F3: oxidizable fraction; F4: residual fraction.

图 3 各处理下土壤中 Cd 的形态分布
Fig. 3 Distribution of varied fractions of Cd in soils under different treatments

2.4 不同措施对水稻地上部 Cd 累积与转运的影响

为进一步探讨各处理对水稻富集与转运镉的影响，计算水稻各部位对 Cd 的富集系数与转运系数。从表 2 可看出，各处理下水稻茎、叶和籽粒对 Cd 的富集系数较 CK 相比均有不同程度地降低。其中 T2 处理下水稻叶片及籽粒中 Cd 的富集系数显著下降。同时，T2 处理下茎、叶及籽粒的转运系数也较低，

但是其差异并不明显。此外，T1 与 T3 处理中，水稻各部位 BCF 值较 CK 相比均有所降低，但不显著。除 T2 处理中水稻籽粒的转运系数与 CK 相比显著下降外，水稻其他部位镉的转运系数并无明显差异。T4 处理下，两个试验点中水稻茎、叶及籽粒对 Cd 的富集系数与转运系数均有所下降，但差异并不明显。

表 2 水稻各部位镉的富集系数与转运系数
Table 2 Bioconcentration and translocation coefficients of Cd in rice tissues

试验点 Site	处理 Treatments	富集系数 Bioconcentration factors				转运系数 Translocation factors		
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain
益阳 Yiyang	T1	17.253±1.380 a	6.583±0.527 a	4.469±0.358 a	1.195±0.096 a	0.382±0.031 a	0.259±0.021 a	0.069±0.006 ab
	T2	12.750±1.148 b	4.854±0.437 b	3.469±0.312 b	0.776±0.070 b	0.381±0.034 a	0.272±0.024 a	0.061±0.005 b
	T3	16.651±1.565 a	6.430±0.604 a	4.604±0.433 a	1.244±0.117 a	0.386±0.039 a	0.277±0.028 a	0.075±0.007 a
	T4	18.245±1.642 a	7.263±0.654 a	4.958±0.446 a	1.260±0.113 a	0.398±0.036 a	0.272±0.024 a	0.069±0.006 ab
	CK	17.911±1.684 a	7.294±0.686 a	5.109±0.480 a	1.297±0.122 a	0.407±0.041 a	0.285±0.029 a	0.072±0.007 ab
醴陵 Liling	T1	13.082±1.177 a	5.711±0.514 a	3.206±0.289 ab	0.679±0.061 a	0.437±0.039 a	0.245±0.022 a	0.052±0.005 a
	T2	12.642±0.758 a	5.570±0.334 a	2.844±0.171 b	0.545±0.033 b	0.441±0.026 a	0.225±0.013 a	0.043±0.003 b
	T3	13.164±0.921 a	5.678±0.397 a	3.401±0.238 a	0.707±0.049 a	0.431±0.030 a	0.258±0.018 a	0.054±0.004 a
	T4	13.373±1.070 a	5.998±0.480 a	3.435±0.275 a	0.704±0.056 a	0.448±0.036 a	0.257±0.021 a	0.053±0.004 a
	CK	13.737±1.099 a	6.361±0.509 a	3.602±0.288 a	0.714±0.057 a	0.463±0.037 a	0.262±0.021 a	0.052±0.004 a

注：同一列中不同字母表示不同水平处理间存在显著差异（ $P<0.05$ ）。
Note: Different letters in the same row indicate significant difference in different treatments ($P<0.05$).

3 讨论

许多研究表明，土壤 pH 值和 SOM 含量对土壤中重金属的生物有效性具有较大影响，并能间接影响到植物对重金属的富集行为^[16,18-20]。本研究结果显示，秸秆还田在一定程度上可提高土壤的 pH 值，这与其他研究相似^[21-22]。pH 值的变化通常会引起土壤中重金属有效态含量的变化^[16-17,21]，本研究结果表明，在 T2 处理中，土壤中 Cd 的有效态含量显著降低，其他处理相较于 CK 则没有明显差异。这是由于施用石灰导致土壤 pH 升高，土壤胶体表面负电荷量增加，增强了土壤胶体对 Cd 的吸附^[23-24]，其有效态含量因而下降。各处理下，土壤中 SOM 的含量并未有显著性变化，但秸秆离田处理下 SOM 含量比其他处理要稍微低一些，这可能是秸秆还田过程中水稻秸秆中有机质归还农田所致。

经各处理后水稻各部位中 Cd 含量均有一定程度下降，其中以 T2 处理水稻 Cd 含量下降最为显著，这与其他研究结果一样^[24-26]。各处理下，水稻籽粒中 Cd 含量较 CK 均有所降低，其中以 T2 处理降低效果最为显著，醴陵试验点水稻籽粒 Cd 含量从 0.71 mg·kg⁻¹ 降低到了 0.55 mg·kg⁻¹，降幅约为 24%，益阳试验点水稻籽粒中 Cd 含量从 0.50 mg·kg⁻¹ 降低到了 0.30 mg·kg⁻¹，降幅高达 40%。说明施用石灰能够显著降低水稻对重金属的累积，这与其他研究结果相一致^[24-26]。虽然益阳水稻籽粒 Cd 含量并未达到国家标准（GB 2762—2017）^[27]，但增加石灰施用量或持

续对土壤施用石灰可能使低污染区域农产品达到安全水平。其次是 T1 处理，醴陵与益阳水稻籽粒中 Cd 含量分别降低为 0.68、0.46 mg·kg⁻¹，降幅分别达到 5% 与 8%。有研究表明，较高的大气沉降量会带来更多的重金属输入通量^[9,11,16]，这是 T1 处理下水稻镉含量相较于 CK 要低的主要原因。而使用清洁水灌溉，对降低水稻镉累积有一定效果但并不明显，可能是清洁水灌溉虽然降低了镉的输入，系统中镉的总通量减少，但灌溉水中镉含量远远低于土壤中镉含量。而秸秆离田处理，将含有高浓度镉的污染秸秆移除小区，增加了小区农田系统中镉的输出通量，虽然在本研究中其对镉的移除效率不高，但长期逐年维持镉的输出通量，将有效降低土壤中镉的污染程度。此外，秸秆还田增加了农田系统镉的输入通量，并增强了水稻对镉的累积。已有不少研究表明秸秆还田会增加农田土壤中重金属有效态的含量，同时使植物体内积累更多的有毒有害的重金属^[28-30]。

两处试验点土壤中镉的 F1 形态约为 40% 左右，而益阳土壤中镉的 F4 形态高于醴陵土壤。这与土壤的 pH 有关，土壤的 pH 值越低，其重金属活性越强，F1+F2+F3 的含量就越高^[16]，因此，醴陵土壤中镉的残渣态含量较益阳的低。石灰处理中土壤镉的 F1 形态含量最低，说明添加石灰对土壤中弱酸提取态镉的影响最大。同时 F1 的含量直接影响植物对镉的累积，F1 含量越低，植物对镉的累积能力就越低，这一结果符合上述水稻各部位中镉含量变化的结果。值得注意的是，秸秆离田处理下，其 F2 含量

均较 CK 有所降低, 这说明, 在秸秆离田处理下, 土壤中 F2 形态向 F1 形态进行了转化。虽然有研究表明秸秆还田将增加土壤中 F3 形态的含量^[22], 但在本研究中并没有发现这一现象, 有可能是短期试验结果不太显著, 需要长期监测考证。

各处理措施下水稻对镉的富集能力较 CK 相比均有不同程度地降低。其中石灰处理下水稻茎、叶及籽粒对镉的富集系数显著下降; 益阳与醴陵水稻样品中茎、叶及水稻籽粒富集系数分别下降 33%、32%、40% 与 12%、20%、23%。表明施用石灰能够有效降低植物对 Cd 的富集, 这与多数研究结果一致^[22,24-26]。而石灰处理下茎、叶及籽粒的转运系数虽然也较低, 但是其差异并不明显, 这可能是受水稻品种自身对重金属的转运能力所影响。此外, T1 与 T3 处理中, 试验田水稻中 BCF 值较 CK 相比均有所降低, 说明截断大气沉降或使用清洁水灌溉处理可能会减少镉在水稻植株体内积累, 这可能是因为隔绝大气沉降与使用清洁水灌溉, 是对镉的输入源头进行了控制, 降低了整个土壤-水稻系统中镉的输入通量, 减少了水稻对镉的吸收, 但有待长期试验考证。T1 处理中水稻叶片的转运系数与 CK 相比显著下降是由于其他处理水稻叶片没有隔绝大气沉降颗粒物, 从而导致水稻叶片接触大量的含有镉的颗粒物^[15-16,31], 从而使水稻叶片具有较高的转运系数。而 T4 处理下, 两个试验点水稻对镉的富集系数与转运系数变化差异不明显, 这说明秸秆离田更多的是影响农田体系中 Cd 的输入输出平衡, 在短期内对后茬作物的影响程度有限。

4 结论

(1) 在本研究的几种农艺措施中, 施用石灰处理能有效降低土壤中有效态镉的含量。此外, 沉降截源处理与施用石灰及清洁水灌溉均能降低水稻茎叶及籽粒对镉的累积。表明水稻各部位所积累的镉并不仅仅只是来源于土壤, 还与周边空气质量和灌溉水有较大关联, 说明土壤的安全利用与农产品的安全生产不能仅考虑土壤一个因素。

(2) 沉降截源、施用石灰、清洁水灌溉及秸秆离田处理下糙米中镉含量均有不同程度的降低。其中以添加石灰与沉降截源效果较好, 在低污染区益阳与高污染区醴陵, 添加石灰处理下水稻籽粒中镉含量分别下降了 40% 与 24%; 而沉降截源处理下水稻籽粒中镉含量分别下降了 8% 与 5%。虽然各处理在低污染区及高污染区均未能使水稻籽粒中镉含量达标, 但是添加石灰与秸秆离田处理改变了土壤中

镉的形态分布, 其长期作用下应能逐渐改善土壤环境质量。因此, 污染农田的治理应采取相应的控源措施, 如施用石灰与秸秆离田等, 同时还可结合植物修复等技术, 在闲田的时候进行修复, 以保证农产品的安全生产。

参考文献:

- [1] ZHOU H, ZHOU X, ZENG M, et al. Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 101: 226-232.
- [2] LIU X J, TIAN G J, JIANG D, et al. Cadmium (Cd) distribution and contamination in Chinese paddy soils on national scale [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23 (18): 17941-17952.
- [3] 童克难. 镉污染事件暴露出了什么?[N]. 中国环境报, 2013-07-29(001).
- [4] 李鹏. 镉米解码[N]. 北京科技报, 2017-12-18(23).
- [5] ZHUANG P, MCBRIDE M B, XIA H P, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407 (5): 1551-1561.
- [6] WILLIAMS P N, LEI M, SUN G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 (3): 637-642.
- [7] WANG M E, CHEN W P, PENG C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 346-351.
- [8] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区农业生态系统土壤镉通量研究 [J]. *地质通报*, 2007, 26 (7): 869-877.
TANG Q F, YANG Z F, ZHANG B R, et al. Cadmium flux in soils of the agroecosystem in the Chengdu economic region, Sichuan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (7): 869-877. (in Chinese)
- [9] LUO L, MA Y B, ZHANG S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90 (8): 2524-2530.
- [10] SALMANZADEH M, HARTLAND A, STIRLING C H, et al. Isotope tracing of long-term cadmium fluxes in an agricultural soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (13): 7369-7377.
- [11] YI K X, FAN W, CHEN J Y, et al. Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 67-76.
- [12] ZHOU J, DU B Y, LIU H L, et al. The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121285.
- [13] 刘红恩, 聂兆君, 刘世亮, 等. 养殖污水灌溉对土壤养分和重金属含量的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39 (S1): 47-51.
LIU H E, NIE Z J, LIU S L, et al. Effects of livestock wastewater irrigation on soil nutrient and copper, zinc and arsenic concentrations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,

- 39 (S1) : 47–51. (in Chinese)
- [14] WU L H, TAN C Y, LIU L, et al. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure [J]. *Geoderma*, 2012, 173/174: 224–230.
- [15] LIU H L, ZHOU J, LI M, et al. Study of the bioavailability of heavy metals from atmospheric deposition on the soil-pakchoi (*Brassica chinensis* L.) system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 9–16.
- [16] WANG F, PENG L, ZHOU X H, et al. Typical sources of Cd to paddy fields in different contaminated areas and their impacts on Cd accumulation in topsoil and rice in Changzhutan, China [J]. *Environmental Research*, 2021, 193: 110523.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 郭朝晖, 冉洪珍, 封文利, 等. 阻隔主要外源输入重金属对土壤-水稻系统中镉铅累积的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (16): 232–237.
- GUO Z H, RAN H Z, FENG W L, et al. Effect of impeding main exogenous heavy metal input on accumulation of Cd and Pb in paddy soil-rice system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (16): 232–237. (in Chinese)
- [19] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (6): 1083–1087.
- LI T Q, YANG X E. Soil dissolved organic matter and its effect on chemical and biological behaviors of soil heavy metals [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (6): 1083–1087. (in Chinese)
- [20] LIU Z P, ZHANG Q F, HAN T Q, et al. Heavy metal pollution in a soil-rice system in the Yangtze River region of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 13 (1): 63.
- [21] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响 [J]. 生态学报, 2020, 39 (2): 507–516.
- WANG X M, LIU X, HAO L Y, et al. Effects of straw returning in conjunction with different nitrogen fertilizer dosages on corn yield and soil properties [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39 (2): 507–516. (in Chinese)
- [22] 郑顺安, 刘代丽, 章明奎, 等. 长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (2): 354–359.
- ZHENG S N, LIU D L, ZHANG M K, et al. Effects of long-term straw returning on heavy metals of soil and agricultural products in the polluted farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (2): 354–359. (in Chinese)
- [23] 张俊民, 石华, 龚子同, 等. 广东省西部滨海反酸田土壤的初步研究 [J]. 土壤通报, 1958 (1): 19–22.
- ZHANG J M, SHI H, GONG Z T, et al. Preliminary study on the soil of coastal anti-acid field in Western Guangdong [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1958 (1): 19–22. (in Chinese)
- [24] 周歆, 周航, 曾敏, 等. 石灰石和海泡石组配对水稻糙米重金属积累的影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (3): 555–563.
- ZHOU X, ZHOU H, ZENG M, et al. Effects of combined amendment(limestone + sepiolite) on heavy metal accumulation in brown rice [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 555–563. (in Chinese)
- [25] 倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34 (3): 215–225.
- NI Z Y, SHEN Q, ZHANG M K. Effects of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34 (3): 215–225. (in Chinese)
- [26] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41 (3): 1491–1497.
- YAN D M, GUO Z H, HUANG F L, et al. Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite [J]. *Environmental Science*, 2020, 41 (3): 1491–1497. (in Chinese)
- [27] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》[S]. 2017.
- [28] 曹晓玲, 罗尊长, 黄道友, 等. 镉污染稻草还田对土壤镉形态转化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (9): 1786–1792.
- CAO X L, LUO Z C, HUANG D Y, et al. Effects of Cd-contaminated rice straw incorporation on transformation of Cd forms in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (9): 1786–1792. (in Chinese)
- [29] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (10): 1992–1998.
- JIA L, ZHU J Y, SU D C. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (10): 1992–1998. (in Chinese)
- [30] SU Y, KWONG R W M, TANG W L, et al. Straw return enhances the risks of metals in soil? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 207: 111201.
- [31] 龙思斯, 宋正国, 雷鸣, 等. 不同外源镉对水稻生长和富集镉的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (3): 419–424.
- LONG S S, SONG Z G, LEI M, et al. Growth and Cd accumulation of rice(*Oryza sativa* L.)grown in soils amended with Cd from different pollution sources [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (3): 419–424. (in Chinese)

(责任编辑: 张梅)