

潘荣庆, 何卿姮, 韦昌江, 等. 不同叶面肥及水稻品种对水稻糙米重金属累积的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (6): 712-719.
PAN R Q, HE Q H, WEI C J, et al. Heavy Metal Accumulation in Husk-removed Grains as Affected by Foliar Fertilizer Application and Rice Variety [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (6): 712-719.

不同叶面肥及水稻品种对水稻糙米重金属累积的影响

潘荣庆, 何卿姮, 韦昌江, 黄智刚*

(广西大学农学院/广西农业环境与农产品安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:【目的】研究不同水稻品种和叶面肥对水稻糙米富集多种重金属的影响。【方法】采用田间试验的方法, 选用 10 个广西当地主要种植的晚稻品种, 每个品种设置喷施硒肥 (Se)、硅肥 (Si) 和 CK 施肥处理。测定和分析水稻糙米重金属 As、Cd、Pb、Cr 含量差异, 比较不同晚稻品种 As、Cd、Pb、Cr 累积特性, 筛选出适合广西当地种植的重金属低累积晚稻品种, 同时分析出两种叶面肥对水稻糙米累积重金属的影响。【结果】不同水稻品种糙米对 As、Cd、Pb、Cr 的累积存在明显差异。其中桂育 12 糙米 Cd 含量最低, 裕丰优 158 糙米 As 含量最低, 茎香优 822 糙米 Cr 含量最低; 10 个水稻品种中, 仅有华浙优 1 号检测出 Pb 含量。4 种重金属在水稻糙米中富集能力大小依次为: Cd>As>Cr>Pb。喷施硒肥 (Se) 和硅肥 (Si) 后水稻糙米 Cd 含量分别下降了 44.8% 和 44.2%。富集系数分别降低了 47.2% 和 47.4%。喷施硅肥 (Si) 后, 水稻糙米 As 含量及富集系数相较于对照处理分别降低了 30.0% 和 19.0%。喷施叶面肥后对水稻糙米 Pb 含量影响较小。【结论】选用品种桂育 12 在广西当地种植可以很好地降低糙米重金属中 Cd 的累积, 选用裕丰优 158 可以很好地降低糙米中重金属 As 的累积, 施用硅肥 (Si) 可显著降低 As 在水稻糙米中的累积, 叶面喷施硒肥 (Se) 和硅肥 (Si) 均可以很好地阻控在水稻糙米中 Cd 的富集。

关键词: 晚稻品种; 糙米; 重金属; 叶面肥

中图分类号: S 511

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 06-0712-08

Heavy Metal Accumulation in Husk-removed Grains as Affected by Foliar Fertilizer Application and Rice Variety

PAN Rongqing, HE Qingheng, WEI Changjiang, HUANG Zhigang*

(Agriculture College, Guangxi University/Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Guangxi University,
Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: 【Objective】Effects of rice variety and applied foliar fertilizers on the accumulation of heavy metals in the husk-removed grains were studied. 【Method】In a field experimentation, 10 major local late-season rice cultivars in Guangxi Province were sprayed with selenium (Se), silicon (Si), or water as CK. Contents of As, Cd, Pb, and Cr in the husk-removed grains were determined to identify the rice varieties with lower potential to retain heavy metals. 【Result】Significant differences were found in the pollutants accumulation of rice grains. Among the 10 cultivars, Guiyu 12 was the lowest on Cd, Yufengyou 158 the lowest on As, Quanxiangyou 822 the lowest on Cr, and only Huazheyong No.1 detected with Pb. The greatest to the least heavy metal accumulated was in the order of Cd>As>Cr>Pb. On average, the application of Se foliar fertilizer reduced the Cd accumulation in grains by 44.8%, and that of Si by 44.2% with the enrichment coefficients decreased by 47.2% and 47.4%, respectively. Si application lowered the As content by 30.0% with an enrichment coefficient by 19.0% over CK, but less effective on Pb reduction. 【Conclusion】The accumulation of Cd in the grains of Guiyu 12 could be significantly minimized, and also that of As in Yufengyou 158 rice, for the cultivation in Guangxi. Application of Si fertilizer on the leaves of a rice plant could decrease As accumulation and that of either Se or Si reduce Cd in the grains.

Key words: Late-season rice; husk-removed rice grains; heavy metals; foliar fertilizer

收稿日期: 2022-01-08 初稿; 2022-03-05 修改稿

作者简介: 潘荣庆 (1997-), 男, 硕士, 研究方向: 农业面源污染与生态治理 (E-mail: 1524395275@qq.com)

* 通信作者: 黄智刚 (1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农业资源利用 (E-mail: 19950048@gxu.edu.cn)

基金项目: 广西创新驱动发展专项 (桂科 AA17204078)

0 引言

【研究意义】土壤污染是当前我国乃至世界共同存在的环境污染问题，由于经济发展需求，人类的扰动破坏了土地原本的生态平衡，导致环境质量恶化^[1]。通过颁布《土壤污染防治行动计划》，国家明确规定了在 2020 年和 2035 年被污染耕地安全利用率至少达 90% 和 95%^[2]。2014 年，全国土壤环境质量公报显示，我国有 19.4% 的耕地土壤受到 Cd、Pb、As、Cr、Hg 等潜在有毒重金属污染^[3]。水稻是广西主要的粮食作物，目前广西耕地土壤重金属污染严重，而且是多种重金属复合污染^[4-5]。重金属污染土壤上水稻重金属含量状况不容忽视，自治区政府对水稻田土壤重金属污染问题高度重视^[4]。因此，开展水稻重金属低积累技术及重金属污染水稻田修复研究，对实现重金属污染水稻田安全利用和粮食安全生产具有十分重要的意义。【前人研究进展】目前，减少重金属向水稻迁移和累积主要有两种方法，一是通过向土壤施用钝化剂使土壤重金属钝化或者叶面施用阻控剂来减少重金属向水稻迁移；另一种是筛选出适宜在当地种植的重金属低积累水稻品种来减少水稻体内的重金属含量^[6-7]。有研究表明^[8]，不同水稻品种基因型不同，对 As、Zn、Cd 等重金属元素的富集能力存在明显差异。不同水稻品种对 Pb、Hg 的耐性和富集能力存在显著的基因型差异^[9]，通过不同品种水稻对重金属富集的差异，可以筛选出适应于在中低重金属污染稻田种植的低累积型水稻品种^[10]。文典等^[7]通过重金属低积累水稻品种筛选和化学修复手段结合的农田安全利用技术研究发现，采用化学钝化剂联合低积累水稻品种对减少稻米 Cd 含量效果显著，降低率 40%~70%。水稻对土壤主要重金属镉、铅、铜、锌的富集规律研究发现，糙米对镉的富集系数最高，但影响糙米对镉富集的因素较为复杂，铅从土壤到糙米的迁移能力逐渐降低^[11]。施用阻控剂可以有效降低水稻籽粒中的重金属含量^[12-13]。学者研究发现水稻叶面喷施硅肥和硒肥可以显著降低稻米中 Cd 含量^[13]，有研究发现，补施硒肥可有效降低稻米中 Pb、Cd、Cr、Hg 等重金属含量，提高籽粒营养成分，施用适量叶面肥可以有效降低水稻体内重金属的含量，但不同水稻品种施用叶面肥对水稻积累重金属的影响有所不同^[14-16]。【本研究切入点】目前关于不同水稻品种对重金属迁移和积累的差异，主要是以研究筛选水稻 Cd 低累积品种为主，而对于 As、Pb、Cr 低积累水稻品种的报道较少^[14, 16]，而事实上土壤环境中重金属的污染常是多种重金属的复合污染^[17-18]。且目前关于水稻

品种筛选和叶面肥组合处理对多个重金属的影响报道较少^[14, 16]。【拟解决的关键问题】本研究在广西德保县某重金属污染水稻田进行，选用 10 个广西主要种植的水稻品种，以及含有硒元素、硅元素的两种叶面肥，通过大田试验分析水稻糙米 Cd、As、Pb、Cr 等 4 种重金属的影响，了解不同水稻品种对重金属 Cd、As、Pb、Cr 的累积情况，施用叶面肥对水稻糙米累积重金属的影响，为安全利用重金属污染稻田区域提供研究基础，为水稻粮食安全生产提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究在广西德保县某重金属污染水稻田进行。试验选用 10 个（表 1）广西广泛种植的晚稻品种，每个品种设置施用含硒叶面肥（Se）（处理 A）、含硅叶面肥（Si）（处理 B）及 CK 等 3 个处理，完全随机区组试验，一共 30 个处理，120 个小区，每个小区面积为 20 m²。2020 年 7 月 25 日播种前施用复合肥做基肥 [每个小区施用 6 kg，（N+P₂O₅+K₂O）≥48%，质量比为 N:P₂O₅:K₂O=26:10:12]。2020 年 8 月 3 日，进行人工移植。2020 年 9 月 21 日，原液稀释 100 倍后采用人工喷洒的方式喷洒叶面肥，10 月 4 日，按照第一次的浓度进行第二次喷洒。德保试验田土壤 pH 为 7.66，总镉含量为 2.33 mg·kg⁻¹，总砷含量为 10.86 mg·kg⁻¹，总铬含量为 0.35 mg·kg⁻¹，铅含量为 67.32 mg·kg⁻¹。硒肥主要成分为有机硒（有

表 1 供试水稻品种
Table 1 Rice varieties under study

品种 Varieties	编号Number	来源Source
桂育12 Guiyu 12	D-1	当地农资店 Local agricultural materials store
华浙优1号 Huazheyou No.1	D-2	广西农科院提供 Provided by Guangxi Academy of Agricultural Sciences
68优金占 68 Youjinzhang	D-3	
凯丰优158 Kaifengyou 158	D-4	
裕丰优158 Yufengyou 158	D-5	
y两优143 y Lliangyou 143	D-6	
荃香优822 Quanxiangyou 822	D-7	
又香优龙丝苗 Youxiang youlongsimiao	D-8	
又香优雅丝苗 Youxiang youyasimiao	D-9	
野香优明月丝苗 Yexiangyou mingyuesimiao	D-10	

机硒 $\geq 85 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 其余组分为水不溶物 ($\leq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、Na ($\leq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$); 硅肥主要成分为有机硅 (有机硅 $\geq 120 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 其余组分为 N、 P_2O_5 、 K_2O , ($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) $\geq 170 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。两种阻控剂 Cd 含量均 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Hg 含量均 $< 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 含量均 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 含量均 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr 含量均 $< 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 采样方法与样品分析

2020 年 11 月在水稻进入收获期后, 每个小区采用五点法混合采样 5 株水稻样品, 先用离子水冲洗干净, 在水稻自然风干后, 脱壳成糙米。所有植物样品粉碎后用自封袋保存。在采集植物样品的同时, 每个小组采集一个土壤混合样品, 样品自然风干后, 研磨过 100 目筛装入自封备用。所有样品交由广西西大检测有限公司检测重金属总含量 (As 为无机砷) (对于未检出的数据均采用检出限值 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 表示, 样品中仅重金属 Pb 存在未检出)。重金属的富集按下列公式计算:

$$\text{富集系数 (BCF)} = m_1/m_2$$

式中, m_1 为植株重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); m_2 为土壤重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.3 数据分析

运用 IMB SPSS 19.0 进行数据分析统计, 通过 Duncan 法进行显著差异性分析 (重金属 Cr、Pb 部分通过 Duncan 法和最小显著性差异 LSR 法两种分析方法结合进行显著性分析)。通过 Microsoft Office Excel 2016 进行图的制作。

2 结果与分析

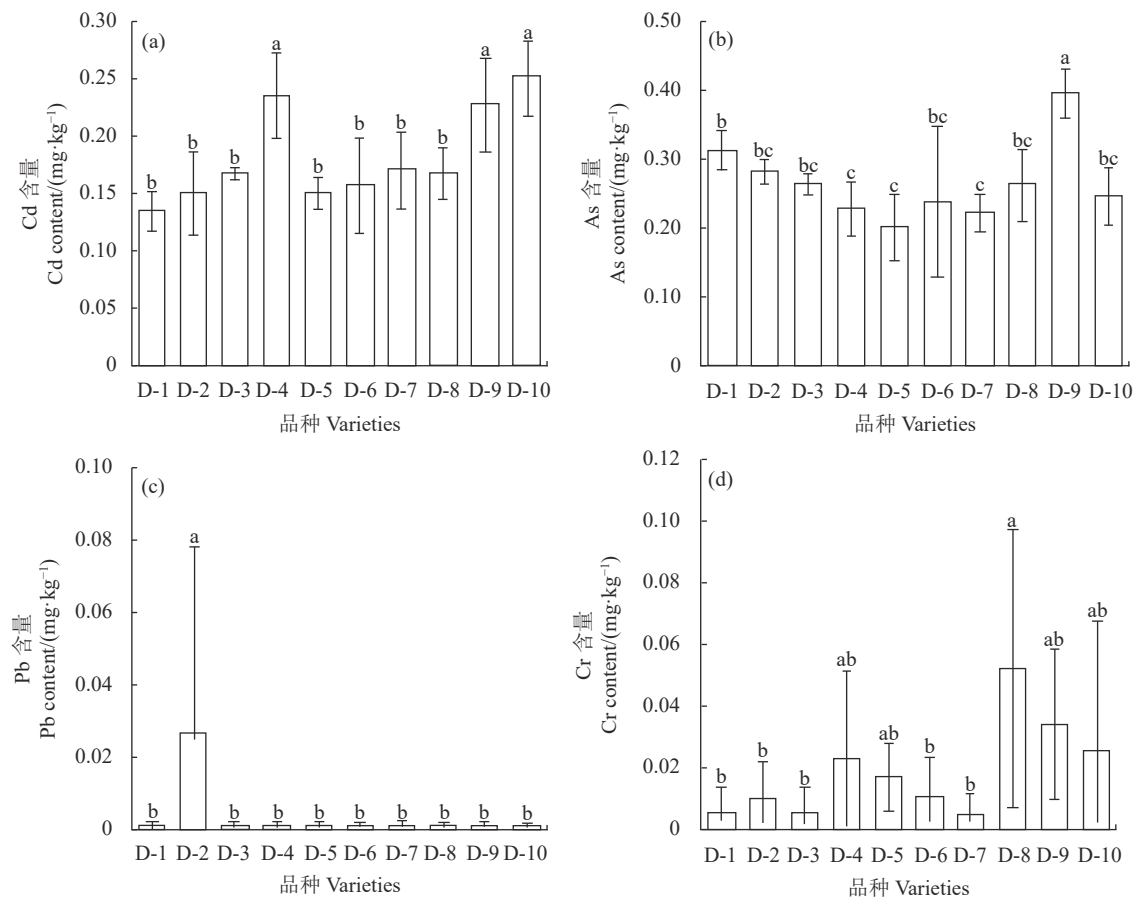
2.1 不同品种水稻糙米重金属含量

图 1 (a) 所示, 10 个品种水稻糙米 Cd 含量在 $0.1350 \sim 0.2520 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $0.1812 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水稻糙米 Cd 含量最低的品种是桂育 12, 含量最高的品种是野香优明月丝苗, 其中凯丰优 158、又香优雅丝苗、野香优明月丝苗 3 个品种水稻糙米 Cd 含量显著高于其他品种。10 个品种水稻中, 共有 3 个水稻品种 Cd 含量超过 GB/T 5009.15-2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。图 1 (b) 所示, 10 个品种水稻糙米 As 含量在 $0.2000 \sim 0.3950 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $0.2643 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水稻糙米 As 含量最低的品种是裕丰优 158, 含量最高的品种是又香优雅丝苗, 其中桂育 12、又香优雅丝苗两个品种水稻糙米 As 含量显著高于凯丰优 158、裕丰优 158、茎香优 822。10 个品种水稻中, 共有 9 个水稻品种 As 含量超过 GB/T 5009.11—2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。图 1 (c) 所示, 10 个品种水稻糙米 Pb 含量在 $0.0010 \sim$

$0.0268 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $0.0036 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 10 个品种水稻中, 仅有华浙优 1 号检测出 Pb 含量, 且 10 个水稻品种 Pb 含量远低于 GB/T 5009.12—2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。图 1 (d) 所示, 10 个品种水稻糙米 Cr 含量在 $0.0046 \sim 0.0521 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $0.0185 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水稻糙米 Cr 含量最低的品种是茎香优 822, 含量最高的品种是又香优龙丝苗, 又香优龙丝苗水稻糙米 Cr 含量显著高于桂育 12、华浙优 1 号、68 优金占、Y 两优 143、茎香优 822 等 5 个品种。10 个品种糙米 Cr 含量均远低于 GB/T 5009.123—2014 ($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.2 不同叶面肥处理对水稻糙米重金属含量的影响

表 2 所示, 经过叶面肥处理后, 10 个品种水稻糙米 Cd 含量均低于对照组, 糙米 Cd 含量均低于国家标准要求 GB/T 5009.15—2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。喷洒硒肥 (Se) 和喷洒硅肥 (Si) 后, 10 个品种水稻糙米 Cd 含量均值分别为 $0.1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.1010 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含量均显著低于对照组 Cd 含量 $0.1812 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除华浙优 1 号和 y 两优 143 两个品种外, 其他品种喷洒硒肥 (Se) 和喷洒硅肥 (Si) 后糙米 Cd 含量均显著低于其对照处理。由表 3 所示, 喷洒硒肥 (Se) 后, 10 个品种水稻糙米 As 含量在 $0.1900 \sim 0.2850 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.2195 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于对照处理 $0.2643 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相较于对照处理含量降低了 17.1%, 其中除裕丰优 158 外, 其他水稻品种糙米 As 含量均低于对照处理, 且桂育 12 糙米 As 含量显著低于其对照处理; 喷洒硒肥 (Se) 后, 仅野香优明月丝苗、茎香优 822、凯丰优 158、Y 两优 143 等 4 个品种糙米 As 含量低于 GB/T 5009.11—2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。喷洒硅肥 (Si) 后, 10 个品种水稻糙米 As 含量在 $0.1425 \sim 0.2650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.1850 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于对照处理 $0.2643 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相较于对照处理含量降低了 30.0%, 10 个品种水稻糙米 As 含量均低于对照组, 且桂育 12 和 68 优金占糙米 As 含量显著低于对照处理。喷洒硅肥 (Si) 后, 除又香优雅丝苗外, 其他 9 个品种糙米 As 含量均低于 GB/T 5009.11—2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。表 4 所示, 经过叶面肥处理后, 10 个品种水稻糙米中仅有喷洒硅肥 (Si) 处理中, 品种桂育 12 检测出 Pb 含量, 且相较于对照处理 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (检出线) 升高了 1580%, 但与对照相比差异不显著。施用硒叶面肥 (Se) (处理 A)、施用硅叶面肥 (Si) (处理 B) 及 CK 等 3 个处理, 10 个水稻品种 Pb 含量均远低于 GB/T 5009.12—2014 ($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。如表 5 所示, 10 个品种喷洒叶面肥后糙米 Cr 含量相较于对照处理有明显差异, 但差异不显著。喷



不同小写字母表示不同品种处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Data with different lowercase letters indicate significant differences between different varieties ($P<0.05$).

图 1 不同品种水稻糙米重金属含量
Fig. 1 Heavy metals in husk-removed grains of different rice varieties

表 2 不同处理水稻糙米 Cd 含量
Table 2 Cd content of brown rice under treatments

品种 Varieties	CK	处理A Treatment A		处理B Treatment B	
	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%
D-1	0.1350±0.0173 a	0.0900±0.0141 b	-33.3	0.0825±0.0150 b	-38.9
D-2	0.1500±0.0365 a	0.0950±0.0054 a	-36.7	0.0975±0.0450 a	-35.0
D-3	0.1675±0.005 a	0.0975±0.025 b	-41.8	0.0975±0.0125 b	-41.8
D-4	0.2350±0.0369 a	0.1025±0.0095 b	-56.4	0.1025±0.020 b	-56.4
D-5	0.1500±0.0141 a	0.0975±0.0325 b	-35.0	0.0950±0.0173 b	-36.7
D-6	0.1575±0.0411 a	0.1275±0.0530 a	-19.0	0.1400±0.0315 a	-11.1
D-7	0.1700±0.0336 a	0.1000±0.0291 b	-41.2	0.0850±0.0054 b	-50.0
D-8	0.1675±0.0221 a	0.1050±0.0253 b	-37.3	0.0975±0.0170 b	-41.8
D-9	0.2275±0.0403 a	0.0825±0.0093 b	-63.7	0.0950±0.0191 b	-58.2
D-10	0.2520±0.0346 a	0.1025±0.0184 b	-59.3	0.1175±0.0330 b	-53.4
平均值 Average	0.1812±0.047 a	0.1000±0.0254 b	-44.8	0.1010±0.0264 b	-44.3

同行数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。
Data with different letters on the same column indicate significant difference between different varieties ($P<0.05$). Same for the following tables.

表 3 不同处理水稻糙米 As 含量

Table 3 As content of brown rice from different treatment groups

品种 Varieties	CK	处理A Treatment A		处理B Treatment B	
	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%
D-1	0.3125±0.0298 a	0.2250±0.0443 b	-28.0	0.1425±0.0614 c	-54.4
D-2	0.2800±0.0182 a	0.2450±0.0732 a	-12.5	0.1950±0.0983 a	-30.4
D-3	0.2625±0.015 a	0.2025±0.0222 ab	-22.9	0.1725±0.0670 b	-34.3
D-4	0.2275±0.0394 a	0.1925±0.0355 a	-15.4	0.1675±0.1092 a	-26.4
D-5	0.2000±0.0483 a	0.2325±0.0386 a	16.3	0.1800±0.0680 a	-10.0
D-6	0.2375±0.1105 a	0.1900±0.0495 a	-20.0	0.1675±0.0570 a	-29.5
D-7	0.2200±0.0270 a	0.1950±0.0793 a	-11.4	0.1800±0.0742 a	-18.2
D-8	0.2625±0.0531 a	0.2250±0.0544 a	-14.3	0.1825±0.0680 a	-30.5
D-9	0.3950±0.0369 a	0.2850±0.0420 a	-27.8	0.2650±0.1283 a	-32.9
D-10	0.2450±0.0412 a	0.1975±0.0872 a	-19.4	0.1975±0.0580 a	-19.4
平均值 Average	0.2643±0.068 a	0.2195±0.0572 b	-17.1	0.1850±0.07845 c	-30.0

洒硒肥 (Se) 后, 10 个品种水稻糙米 Cr 含量在 0.0076~0.0741 mg·kg⁻¹, 平均值为 0.0257 mg·kg⁻¹, 相较于对照处理 0.0185 mg·kg⁻¹ 含量增加了 39.1%, 但差异不显著。喷洒硅肥 (Si) 后, 10 个品种水稻糙米 Cr 含量在 0.0039~0.0361 mg·kg⁻¹, 平均值为 0.0183 mg·kg⁻¹, 相较于对照处理 0.0185 mg·kg⁻¹, 含量降低了 1.2%。施用硒叶面肥 (Se) (处理 A)、施用硅叶面肥 (Si) (处理 B) 及 CK 等 3 个处理, 10 个水稻品种 Cr 含量均远低于 GB/T 5009.123—2014 (≤1.0 mg·kg⁻¹)。

2.3 不同处理对水稻糙米重金属富集的影响

如表 6 所示, 10 个品种水稻中, 水稻糙米 Cd、

As、Pb、Cr 的平均富集系数分别为 0.0884、0.0195、0.00012、0.0003, 水稻糙米对 Cd 的富集系数明显高于 As、Pb、Cr, 水稻糙米对 As 的富集系数明显高于 Pb、Cr 两种重金属, 水稻糙米对 Cr 的富集系数高于 Pb。

如表 7 所示, 经过叶面肥处理后水稻糙米 Pb、Cr 的富集系数差异不显著。硒肥 (Se)、硅肥 (Si) 2 个处理水稻糙米 Cd 的富集系数分别为 0.0446、0.0444, 较于对照组 (CK) 处理 Cd 的富集系数分别降低了 47.2% 和 47.4%, 差异显著。硒肥 (Se)、硅肥 (Si) 处理水稻糙米 As 的富集系数分别为 0.0186、0.0158, 较于对照组 (CK) 处理 As 的富集系数分别降低了

表 4 不同处理水稻糙米 Pb 含量

Table 4 Pb content of brown rice from different treatment groups

品种 Varieties	CK	处理A Treatment A		处理B Treatment B	
	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%
D-1	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0168±0.031 a	1580.0
D-2	0.0268±0.0516 a	0.0010±0 a	-96.3	0.0010±0 a	-96.3
D-3	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-4	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-5	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-6	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-7	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-8	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-9	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
D-10	0.0010±0 a	0.0010±0 a	0	0.0010±0 a	0.0
平均值 Average	0.0035±0.016 a	0.0010±0 a	-72.1	0.0025±0.010 a	-27.9

表 5 不同处理水稻糙米 Cr 含量
Table 5 Cr content of brown rice from different treatment groups

品种 Varieties	CK	处理A Treatment A		处理B Treatment B	
	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%	含量 Content/ (mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline/%
D-1	0.005 1±0.0082 a	0.0144±0.0149 a	182.4	0.0178±0.0217 a	249.0
D-2	0.009 7±0.0120 a	0.033 5±0.045 a	245.4	0.0070±0.0119 a	-27.8
D-3	0.005 1±0.0081 a	0.034 1±0.0421 a	568.6	0.024 8±0.0307 a	386.3
D-4	0.022 6±0.0284 a	0.074 1±0.1362 a	227.9	0.031 5±0.0523 a	39.4
D-5	0.016 6±0.0109 a	0.022 4±0.0078 a	34.9	0.036 1±0.0512 a	117.5
D-6	0.010 3±0.0127 a	0.007 6±0.0082 a	-26.2	0.017 3±0.0266 a	68.0
D-7	0.004 6±0.0071 a	0.020 1±0.0134 a	337.0	0.004 9±0.0078 a	6.5
D-8	0.052 1±0.0452 a	0.012 3±0.0076 a	-76.4	0.022 7±0.0375 a	-56.4
D-9	0.033 9±0.0241 a	0.010 2±0.0065 a	-69.9	0.017 1±0.0207 a	-49.6
D-10	0.025 3±0.0422 a	0.029 1±0.0504 a	15.0	0.003 9±0.0057 a	-84.6
平均值 Average	0.018 5±0.025 a	0.025 7±0.048 1a	39.1	0.018 3±0.0290a	-1.2

表 6 不同品种水稻糙米重金属的富集系数
Table 6 Enrichment coefficients on heavy metals in brown rice of different varieties

品种 Varieties	Cd	As	Pb	Cr
D-1	0.060 1	0.022 9	0.000 03	0.000 1
D-2	0.068 4	0.020 5	0.000 89	0.000 1
D-3	0.090 1	0.018 7	0.000 04	0.000 1
D-4	0.106 5	0.016 3	0.000 03	0.000 3
D-5	0.067 7	0.015 1	0.000 03	0.000 2
D-6	0.073 3	0.016 9	0.000 03	0.000 1
D-7	0.076 7	0.016 4	0.000 03	0.000 1
D-8	0.078 4	0.020 8	0.000 03	0.000 7
D-9	0.105 6	0.028 6	0.000 04	0.000 5
D-10	0.117 8	0.019 0	0.000 03	0.000 3

表 7 不同处理对水稻糙米重金属富集系数的影响
Table 7 Enrichment coefficients on heavy metals in brown rice from different treatment groups

处理 Treatment	富集系数BCF			
	Cd	As	Pb	Cr
CK	0.0844 a	0.0195 a	0.00012 a	0.0003 a
处理A Treatment A	0.0446 b	0.0186 a	0.00003 a	0.0004 a
处理B Treatment B	0.0444 b	0.0158 b	0.00009 a	0.0003 a

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Data with different letters on same column indicate significant difference at $P<0.05$.

4.6% 和 19.0%，施用硅肥（Si）水稻糙米 As 的富集系数显著低于其他处理。

3 讨论

研究表明，不同水稻品种糙米对重金属 As、Cd、Cr、Pb 的积累不同，不同水稻品种对 As、Cd、Cr、Pb 的吸收富集能力也存在差异^[19-21]。本研究发现 10 个品种水稻糙米对 As、Cd、Cr、Pb 的吸收存在较大差异，凯丰优 158、又香优雅丝苗、野香优明月丝苗 3 个品种水稻糙米 Cd 含量明显高于其他品种，且 3 个品种 Cd 含量均超过 GB/T 5009.15—2014（ $\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。10 个水稻品种中，裕丰优 158 的 As 含量低于其他品种，且仅裕丰优 158 糙米 As 含量低于 GB/T 5009.11—2014（ $\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。另外研究发现 10 个品种水稻中，仅有华浙优 1 号检测出 Pb 含量，10 个品种水稻糙米 Cr 含量虽有差异，但最高值 $0.0521\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 远低于 GB/T 5009.123—2014（ $\leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），仅为标准要求 $\leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 5.21%，可能是由于当地气候及土壤因素影响，10 个品种糙米对 Pb 和 Cr 的累积均不高，具体原因有待进一步探究。

陈慧茹等^[14, 22]在研究土壤 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移特征时发现，Cd 元素在水稻植株中的富集能力最强，其次分别是 Cr 和 Pb。这与本次研究结果一致。10 个品种水稻中，糙米对 Cd 的富集系数均明显高于 As、Pb、Cr，水稻糙米对 As 的富集系数明显高于 Pb、Cr 两种重金属，水稻糙米对 Cr 的富集系数

高于 Pb。As、Cd、Cr、Pb 在水稻糙米中的富集能力为 $Cd > As > Cr > Pb$ 。

相关研究证明^[23], 适当喷洒硅、硒叶面肥可抑制重金属如 Cd、As、Pb 在水稻糙米中的积累。这是由于硒能与镉结合生成一种低毒性、较稳定的复合物, 同时较难被植物根系吸收和积累, 因此植物对镉的吸收量降低; 另一方面硅可促进植株叶片的叶绿素含量增加, 降低细胞膜的透性, 从而提高了水稻的抵抗能力; 植物吸收的硅元素沉积在了地上部进而阻止了 Cd 向地上部的迁移^[24-26]。在张世杰等的研究中, 同样发现在施加叶面硅肥处理中, 水稻地上部的 As 浓度显著降低, 在一定程度上能降低水稻砷毒害作用^[27]。本研究中, 喷洒硒肥 (Se) 和喷洒硅肥 (Si) 后均可以有效降低糙米 Cd 含量, 糙米 Cd 含量分别下降了 44.8% 和 44.2%, 富集系数分别降低了 47.2% 和 47.4%, 叶面肥均可以显著降低糙米对镉的吸收和富集。研究发现两种叶面肥对糙米吸收砷的影响存在明显差异, 喷洒硒肥 (Se) 后 10 个品种水稻糙米 As 含量均有所降低, 但仅有野香优明月丝苗、荃香优 822、凯丰优 158、Y 两优 143 4 个品种糙米 As 含量低于 GB/T 5009.11—2014 (国家标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。与喷洒硒肥 (Se) 后效果不同, 喷洒硅肥 (Si) 后, 除又香优雅丝苗外其他 9 个品种糙米 As 含量均低于 GB/T 5009.11—2014 (国家标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。另外研究发现, 喷洒叶面肥后对水稻糙米 Pb 含量影响较小。不同处理水稻糙米 Cr 含量均远低于 GB/T 5009.123—2014 ($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但相同处理条件下数据误差较大, 且喷洒叶面肥后不仅不会降低糙米的 Cr 含量, 还会出现糙米 Cr 含量增加的情况, 具体原因有待探究。

4 结论

(1) 10 个品种糙米对 As、Cd、Cr 重金属的累积存在明显差异。其中桂育 12 水稻品种糙米 Cd 含量最低, 裕丰优 158 水稻品种糙米 As 含量最低, 荃香优 822 水稻品种糙米 Cr 含量最低, 10 个品种水稻中, 仅有华浙优 1 号检测出 Pb 含量。桂育 12、裕丰优 158、荃香优 822 可分别作为 Cd、As、Cr 低累积品种推广种植。

(2) 10 个水稻品种糙米中 As、Cd、Cr、Pb 在水稻糙米中的富集能力为 $Cd > As > Cr > Pb$ 。

(3) 两种叶面肥均能显著降低水稻糙米镉含量, 降低水稻糙米对 Cd 的富集能力, 但对水稻糙米 Pb 无显著影响。

(4) 两种叶面肥对水稻糙米富集 As 的能力影

响不同, 施用硅肥 (Si) 对水稻糙米 As 含量降低效果更明显。

因此, 选用适合的品种可以减少水稻糙米对重金属的累积, 施用硅肥 (Si) 可显著降低 As 在水稻糙米中的累积, 叶面喷施硒肥 (Se) 和硅肥 (Si) 均可以很好地阻控在水稻糙米中 Cd 的富集。

参考文献:

- [1] 周显, 韩毅, 陈霞, 等. 基于文献计量的土壤污染研究趋势分析 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (12): 53-59.
ZHOU X, HAN Y, CHEN X, et al. Trends of soil pollution research based on bibliometric analysis [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38 (12): 53-59. (in Chinese)
- [2] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状: 关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (8): 1465-1473.
WANG Y J, LIU C, ZHOU D M, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in china: discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33 (8): 1465-1473. (in Chinese)
- [3] 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
Bulletin of the national survey of soil pollution [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5): 10-11. (in Chinese)
- [4] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 [J]. 环境科学, 2018, 39 (4): 1888-1900.
SONG B, YANG Z J, ZHANG Y X, et al. Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage basin in Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (4): 1888-1900. (in Chinese)
- [5] 程菁靓, 赵龙, 杨彦, 等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (1): 70-78.
CHENG J L, ZHAO L, YANG Y, et al. Classification methods for typical lead-contaminated rice production areas of the middle and Lower Yangtze River in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (1): 70-78. (in Chinese)
- [6] WU H P, LAI C, ZENG G M, et al. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: A review [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37 (6): 754-764.
- [7] 文典, 江棋, 李蕾, 等. 重金属污染高风险农用地水稻安全种植技术研究 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (3): 624-628.
WEN D, JIANG Q, LI L, et al. Study on safe planting technology of rice in high risk farmland of heavy metal pollution [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (3): 624-628. (in Chinese)
- [8] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (8): 1818-1826.
XUE T, LIAO X Y, WANG L Q, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (8): 1818-1826. (in Chinese)
- [9] JIANG S L, SHI C H, WU J G. Studies on mineral nutrition and safety

- of wild rice (*Oryza L.*) [J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2009, 60 (S1): 139–147.
- [10] BOLAN N S, MAKINO T, KUNHIKRISHNAN A, et al. Cadmium contamination and its risk management in rice ecosystems[M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 183–273.
- [11] 张潮海, 华村章, 邓汉龙, 等. 水稻对污染土壤中镉、铅、铜、锌的富集规律的探讨 [J]. 福建农业学报, 2003, 18 (3): 147–150.
- ZHANG C H, HUA C Z, DENG H L, et al. Investigation on the enrichment of Cd, Pb, Cu and Zn by rice in the field near a smelting plant [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 18 (3): 147–150. (in Chinese)
- [12] YANG Y J, CHEN J M, HUANG Q N, et al. Can Liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils [J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 547–556.
- [13] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔隔潜力研究 [J]. 环境科学, 2014, 35 (7): 2762–2770.
- CHEN Z, TIE B Q, LEI M, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium [J]. *Environmental Science*, 2014, 35 (7): 2762–2770. (in Chinese)
- [14] 谭周敏, 陈嘉勤, 薛海霞. 硒 (Se) 对降低水稻重金属 Pb, Cd, Cr 污染的研究 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000, 23 (3): 80–83.
- TAN Z C, CHEN J Q, XUE H X. Studies on the role of selenium (Se) in decreasing Pb, Cd and Cr pollution to rice [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2000, 23 (3): 80–83. (in Chinese)
- [15] 方勇, 陈曦, 陈悦, 等. 外源硒对水稻籽粒营养品质和重金属含量的影响 [J]. 江苏农业学报, 2013, 29 (4): 760–765.
- FANG Y, CHEN X, CHEN Y, et al. Effects of exogenous selenium on nutritional quality and heavy metal content of rice grain [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29 (4): 760–765. (in Chinese)
- [16] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应 [J]. 生态环境, 2007, 16 (3): 875–878.
- WANG S H, LUO Q S, LIU C P, et al. Effects of leaf application of nanometer silicon to the accumulation of heavy metals in rice grains [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16 (3): 875–878. (in Chinese)
- [17] 周歆, 周航, 胡淼, 等. 不同杂交水稻品种糙米中重金属 Cd、Zn、As 含量的差异研究 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (11): 145–150.
- ZHOU X, ZHOU H, HU M, et al. The difference of Cd, Zn and As accumulation in different hybrid rice cultivars [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29 (11): 145–150. (in Chinese)
- [18] 王林友, 竺朝娜, 王建军, 等. 水稻镉、铅、砷低含量基因型的筛选 [J]. 浙江农业学报, 2012, 24 (1): 133–138.
- WANG L Y, ZHU C N, WANG J J, et al. Screening for rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with lower Cd, Pb and As contents [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24 (1): 133–138. (in Chinese)
- [19] 林小兵, 周利军, 王惠明, 等. 不同水稻品种对重金属的积累特性 [J]. 环境科学, 2018, 39 (11): 5198–5206.
- LIN X B, ZHOU L J, WANG H M, et al. Accumulation of heavy metals in different rice varieties [J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (11): 5198–5206. (in Chinese)
- [20] 唐非, 雷鸣, 唐贞, 等. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (6): 1092–1098.
- TANG F, LEI M, TANG Z, et al. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (6): 1092–1098. (in Chinese)
- [21] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 [J]. 环境科学, 2021, 42 (11): 5545–5553.
- WANG Y H, YANG L, KANG Y C, et al. Characteristics and influencing factors of cadmium accumulation in different rice varieties under cadmium contaminated field conditions [J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (11): 5545–5553. (in Chinese)
- [22] 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 H R, DONG Y L, WANG Q, 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. (in Chinese)
- [23] 李林峰, 王艳红, 李义纯, 等. 调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 [J]. 环境科学, 2022, 43 (1): 472–480.
- LI L F, WANG Y H, LI Y C, et al. Inhibitory effects of soil amendment coupled with water management on the accumulation of Cd and Pb in double-cropping rice [J]. *Environmental Science*, 2022, 43 (1): 472–480. (in Chinese)
- [24] 张宇鹏, 谭笑潇, 陈晓远, 等. 无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (2): 388–393.
- ZHANG Y P, TAN X X, CHEN X Y, et al. Effects of inorganic silicon foliar fertilizer and soil conditioner on plumbum and cadmium absorption in rice [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (2): 388–393. (in Chinese)
- [25] 贾倩, 胡敏, 张洋洋, 等. 硅钙肥对水稻吸收铅、镉的影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (6): 24–30.
- JIA Q, HU M, ZHANG Y Y, et al. Effect of silicon-calcium fertilizer on Pb and Cd absorption by rice in heavy metal polluted farmland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40 (6): 24–30. (in Chinese)
- [26] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (5): 86–92.
- DAI Q Y, LIU D H, WANG D X, et al. A review on silicon: Effect on rice growth and its mechanism of relieving cadmium toxicity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36 (5): 86–92. (in Chinese)
- [27] 张世杰, 付洁, 王晓美, 等. 叶面施硅对水稻吸收和转运无机砷和甲基砷的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (7): 1529–1536.
- ZHANG S J, FU J, WANG X M, et al. Effects of foliar application of silicon on uptake and transport of inorganic and methyl arsenic in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (7): 1529–1536. (in Chinese)