

刘兰英, 陈丽华, 黄薇, 等. 镉污染下稻谷不同部位重金属含量及迁移特征 [J]. 福建农业学报, 2018, 33 (7): 717-723.
LIU L Y, CHEN L H, HUANG W, et al. Contents and Transport of Heavy Metals in Grain Parts of Rice Grown on Cd-Contaminated Soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33 (7): 717-723.

镉污染下稻谷不同部位重金属含量及迁移特征

刘兰英¹, 陈丽华¹, 黄薇¹, 吕新¹, 上官亮¹, 涂杰峰^{1*}, 谢亚兴²

(1. 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 福建 福州 350003;
2. 中纺检测有限公司, 福建 泉州 362000)

摘 要: 为了解镉污染土壤中稻谷各部位重金属的含量及其迁移特征, 以闽西矿区周边种植的水稻为研究对象, 测定稻谷各部位的 Cd、Pb、Cu、Zn 含量, 分析这 4 种重金属在稻谷各部位的分布及迁移规律, 结果表明: 在无镉污染、轻度镉污染、中度镉污染、重度镉污染环境种植的水稻, 其 Cd、Cu、Zn 在稻谷中不同部位的含量基本呈糠粉>糙米>精米>稻壳的趋势, 即镉污染及其程度不会影响 Cd、Cu、Zn 在稻谷中不同部位的分布, 而 Pb 在稻谷各部位的含量呈稻壳>糠粉>糙米>精米或糠粉>稻壳>精米>糙米的趋势; 稻壳中的 Cd 较易被迁移到糙米中, 糙米中的 Pb、Cu、Zn 极易积累到糠粉中, 而糠粉中积累的 Cd、Pb、Cu、Zn 较难被迁移到精米中; 糙米从去掉糠粉加工成精米的过程中, Cd、Pb、Cu、Zn 含量最大程度可分别减少 70.2%、95.0%、97.1% 和 81.4%; 重金属在稻谷各部位间的迁移能力与各部位重金属含量有一定的相关性。说明糠粉对这 4 种重金属有较强的吸收力, 稻谷加工过程尽可能去除糠粉部位可以减少食用部分的重金属含量。

关键词: 镉污染; 稻谷; 重金属; 分配能力; 迁移规律

中图分类号: S 511

文献标识码: A

文章编号: 1008-0384 (2018) 07-717-07

Contents and Transport of Heavy Metals in Grain Parts of Rice Grown on Cd-Contaminated Soil

LIU Lan-ying¹, CHEN Li-hua¹, HUANG Wei¹, LV Xin¹, SHANG GUAN Liang¹,
TU Jie-feng^{1*}, XIE Ya-xing²

(1. *Institute for Agricultural Standards and Testing Technology, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou, Fujian 350003, China*; 2. *Textile Inspection company limited, Quanzhou, Fujian 362000, China*)

Abstract: Contents and transport of heavy metals in various parts of a grain from the rice grown on Cd-contaminated soil were determined. The contents of Cd, Pb, Cu and Zn in specimens collected from the mining regions in western Fujian were analyzed to study the distribution and transport characteristics of these heavy metals in the parts of the grain. The results showed that although the metal distribution was not affected by the severity of soil pollution, the Cd, Cu or Zn contained in a grain increased in the order of: bran > brown rice > milled rice > hull, and, the Pb in the order of: hull > bran > brown rice > milled rice or bran > hull > milled rice > brown rice. There seemed a significant correlation between the contents and transport of heavy metals in the grains. And, the bran appeared to absorb the heavy metals more readily than other tissues, as it was easier for Cd in the hull to transport to the brown rice grains, or Pb, Cu and Zn in brown rice to the bran; but more difficult for Cd, Pb, Cu and Zn in the bran to move to the milled grains. As a result, the contents of Cd, Pb, Cu and Zn in the grains could be maximally reduced by 70.2%, 95.0%, 97.1% and 81.4%, respectively, through the milling process with the removal of bran, thereby, an improvement for the safety of rice consumption.

Key words: rice grains; heavy metals; distribution; transfer characteristics; Cd-pollution

收稿日期: 2018-05-10 初稿; 2018-06-30 修改稿

作者简介: 刘兰英 (1987-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 产地环境与农产品质量安全 (E-mail: lly87119@126.com)

* 通讯作者: 涂杰峰 (1960-), 男, 副研究员, 研究方向: 产地环境与农产品质量安全 (E-mail: tujiefeng@hotmail.com)

基金项目: 福建省自然科学基金 (2018J01037); 福建省科技计划项目——省属公益类科研院所基本科研专项 (2018R1018-4); 福建省财政专项——福建省农业科学院创新团队建设项目 (STIT2017-1-12)

由于污水灌溉、污泥使用、工业活动、机动车尾气和固体废弃物排放等原因,使农田土壤重金属污染日益严重^[1-3]。水稻是我国乃至世界上的主要粮食作物,稻米的食品安全问题已经成为专家学者关注的焦点^[4]。水稻种植在重金属污染的土壤中,土壤中的重金属会通过食物链在稻谷中积累,进入人们的餐桌,从而威胁人体健康^[5]。因此,分析稻谷中重金属含量的分布及其迁移特征,并采取有效措施阻控重金属向食物链迁移,对提高稻米的食用安全性具有重要的现实意义。

目前,关于有效降低稻谷中重金属含量的途径已有很多报道,如选育低积累重金属的水稻品种^[6-8]、降低土壤中重金属的生物有效性^[9]、稻米深层加工技术^[10]等。水稻植株的器官大致分为根、茎、叶和稻谷,稻谷又可分为稻壳、糠粉、糙米、精米不同的部位。仲维功等^[11]研究了水稻不同部位对重金属的富集系数,表明水稻不同部位中重金属元素的富集能力呈根>茎叶>稻谷>精米的趋势,根系的富集系数最高。也有研究表明,随着碾米精度的提高,稻谷中的 Cd 含量^[12]和 Pb 含量^[13]呈降低趋势。然而,土壤不同程度的镉污染对稻谷各部位重金属累积量的影响及重金属在稻谷中各部位间迁移特征方面的相关研究少见报道。鉴此,本研究测定、分析了不同程度土壤镉污染(无污染、轻度污染、中度污染、重度污染)环境下水稻样品的 6 种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn、Hg、As)在稻谷不同部位的含量及其迁移特征,本文报道其中前 4 种(Hg 和 As 另文报道)。旨在通过分析土壤镉污染环境下稻谷各部位重金属分布情况,采用迁移系数揭示稻谷中各部位重金属的迁移转化规律,并探讨稻谷不同部位重金属含量与重金属在各部位间迁移能力的相关性,为在稻谷加工环节尽可能去

除重金属累积量高的部位提供理论依据,以期达到降低稻谷食用部位重金属残留量的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

根据前期研究结果,闽西矿区周边农田土壤受到不同程度的镉污染^[14],本研究的试验材料取自在该地区不同镉污染程度农田上种植的水稻样品,品种均为中浙优 1 号。参照《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)^[15]中的分级标准(表 1),分别在无污染、轻度镉污染、中度镉污染和重度镉污染的农田上采集水稻样品,并标记为 Cd0(无污染)、Cd1(轻度污染)、Cd2(中度污染)和 Cd3(重度污染)。采用梅花形取样法,将每块稻田分割成 5 小块,然后在分割后的小田块中取 5 个点,每点取代表性水稻植株 2 株、共 50 株混合为 1 份稻谷样品。供试土壤的基本理化性质见表 2。在水稻生长的全生育期中,除在分蘖末期进行晒田外,其他时期均保持 2~3 cm 的浅水层。插秧后 7~10 d 施尿素 150 kg·hm⁻²,插秧后 15~20 d 施复合肥 225 kg·hm⁻²,抽穗后施氯化钾 150 kg·hm⁻²。

表 1 土壤环境质量分级标准		
Table 1 Criteria for classification of soil quality		
等级	污染指数 (P)	污染程度
I	$P \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)
III	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染
V	$P > 3.0$	重度污染

注:表中资料来源于文献[15]。

表 2 供试土壤样品基本理化性质
Table 2 Physiochemical properties of soil sample collected from paddy field

理化指标	Cd0	Cd1	Cd2	Cd3
pH	5.20±0.014	5.05±0.007	6.18±0.014	4.85±0.014
有机质/(g·hg ⁻¹)	3.10±0.126	3.48±0.037	2.23±0.026	5.07±0.061
全氮/(g·hg ⁻¹)	0.152±0.002	0.161±0.001	0.125±0.001	0.166±0.002
全磷/(g·hg ⁻¹)	0.029±0.004	0.071±0.003	0.101±0.007	0.131±0.001
全钾/(g·hg ⁻¹)	1.90±0.018	3.81±0.017	4.45±0.060	4.16±0.038
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.089±0.002	1.32±0.001	2.77±0.005	3.14±0.058

1.2 样品的前处理

采集的稻谷经脱壳机(JLG-II,成都粮食仪器

厂)脱壳、精米机(SDJ-100,杭州汇尔仪器公司)脱糠,收集稻壳、糙米、糠粉和精米 4 种样品,分

别用粉碎机 (JSFM-I, 成都粮食仪器厂) 研磨成粉末后贮存于干净塑封袋中备用。

1.3 稻谷不同部位重金属含量测定

稻谷各部位样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解法消解。据样品消解液的 Cd、Pb、Cu、Zn 含量和仪器的最低检测限, 用原子吸收光谱仪 (石墨炉法, PE-900Z) 测定 Cd、Pb 含量, 用原子吸收光谱仪 (火焰法, 岛津 AA-6880) 测定 Cu、Zn 含量, 元素提取进行全程同步试剂空白控制, 分析过程中每个样品均设平行双样, 采用《生物成分分析标准物质》(GBW10044, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所认定、国家质量监督检验检疫总局批准) 作为质控样进行分析质量控制, 且回收率在 90%~111%。

1.4 重金属在稻谷不同部位间的迁移能力分析

用迁移系数反映稻谷各部位间 Cd、Pb、Cu、

Zn 的迁移特征, 可以较好地反映这些重金属元素迁移的难易程度^[16-17]。具体计算方法:

$$TF = (C_c/C_e) \times 100\% \quad (1)$$

式中: TF 为迁移系数; C_e 为稻壳、糙米和糠粉部位某个重金属元素含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_c 为迁入部位某个重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 稻壳、糙米和糠粉的迁入部位分别对应糙米、糠粉和精米。

1.5 数据处理

采用 Excel 2007、Origin 9.0 和 SPSS 18.0 软件进行数据分析与统计。

2 结果与分析

2.1 重金属在稻谷不同部位的分布情况

不同镉污染程度稻谷不同部位的 Cd、Pb、Cu、Zn 含量分布情况如图 1 所示。

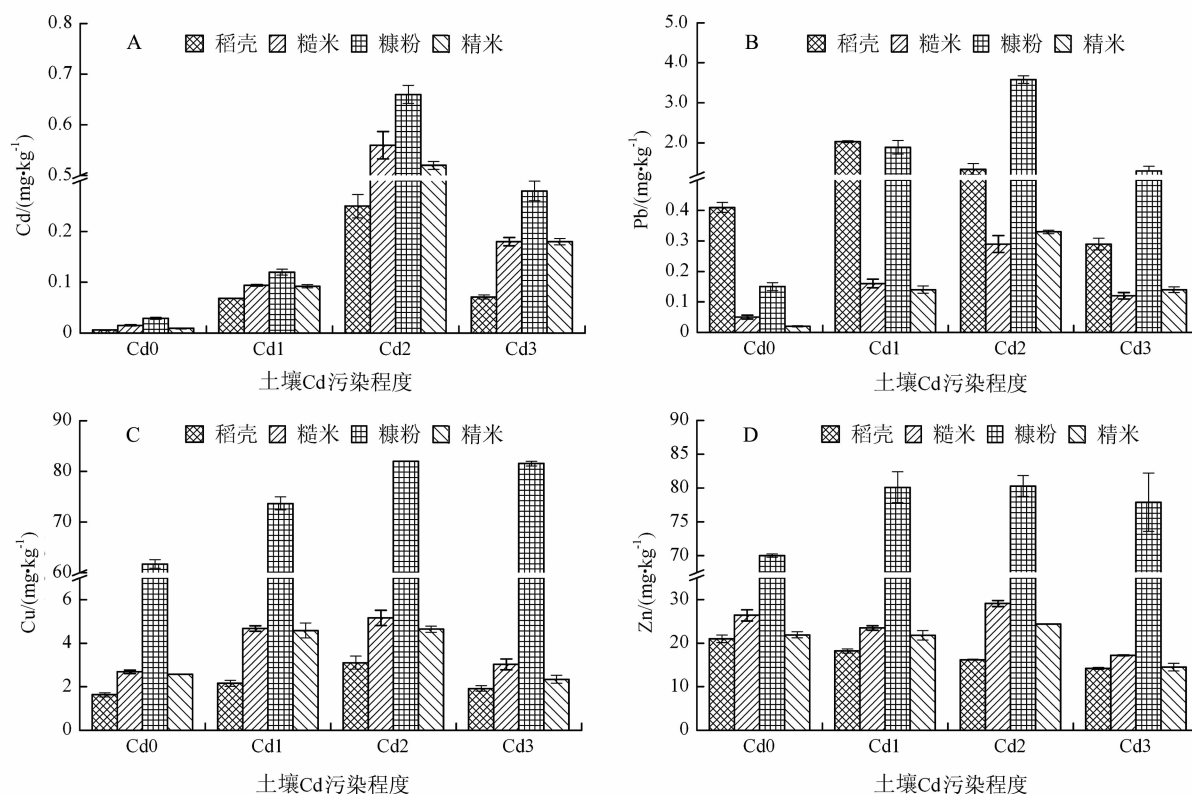


图 1 稻谷不同部位重金属含量

Fig. 1 Heavy metals in parts of rice grain

注: Cd0 为无污染, Cd1 为轻度污染, Cd2 为中度污染, Cd3 为重度污染。图 2 同。

从图 1-A 看出, 随着土壤镉污染程度的增加, 稻谷各部位的 Cd 含量呈先升后降的趋势, 表明土壤镉污染程度会影响稻谷对 Cd 的吸收; 当土壤达中度镉污染时, 稻谷可食部位糙米与精米中的 Cd 含量分别为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超

出国家《食品中污染物限量标准》(GB 2762-2017) 规定的 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标准值^[18]; 不同程度的镉污染, 稻谷不同部位 Cd 含量基本呈糠粉>糙米>精米>稻壳的趋势, 表明土壤的镉污染及其程度不会影响 Cd 在稻谷各部位的分布; 稻谷中稻壳 Cd 含

量最低,说明稻壳部位对 Cd 的吸收力较弱;糠粉 Cd 含量明显高于其他部位,说明通过进一步的去糠可以明显降低精米部位 Cd 的含量。

从图 1-B 看出,随着土壤镉污染程度的增加,稻谷各部位的 Pb 含量呈先升后降的趋势,表明土壤镉污染程度会影响稻谷对 Pb 的吸收;当土壤为中度镉污染时,稻谷可食部位糙米与精米中的 Pb 含量分别是 0.29 和 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均超出国家《食品中污染物限量标准》(GB 2762-2017)规定的 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标准值^[18];在无镉污染和轻度镉污染环境下,稻谷不同部位 Pb 含量呈稻壳>糠粉>糙米>精米的趋势;在中度镉污染和重度镉污染环境下,稻谷不同部位 Pb 含量呈糠粉>稻壳>糙米>精米的趋势。上述结果表明,土壤镉污染程度会影响 Pb 在稻谷各部位的分布;不同程度的镉污染,稻壳和糠粉中的 Pb 含量均高于在糙米和精米的含量,稻谷加工成糙米或精米可以在不同程度上减轻人体通过膳食摄入 Pb 的风险。

从图 1-C 看出,随着土壤镉污染程度的增加,稻谷各部位的 Cu 含量基本呈先升后降的趋势,表明土壤镉污染会影响稻谷对 Cu 的吸收;Cd0、Cd1、Cd2 和 Cd3 的稻谷糠粉中 Cu 含量分别达到

61.7 、 73.7 、 82.0 和 $81.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均大大超出粮食卫生标准 NY 861-2004 规定的 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标准值^[19];不同程度的镉污染,稻谷不同部位 Cu 含量均呈糠粉>糙米>精米>稻壳的趋势,表明土壤镉污染程度不会影响 Cu 在稻谷各部位的分布;糠粉中的 Cu 含量显著高于其他部位,说明糠粉部位对 Cu 具有很强的吸收力。

从图 1-D 看出,随着土壤镉污染程度的增加,稻壳部位 Zn 含量逐渐降低,糠粉部位 Zn 含量呈先增加后略降的趋势,糙米和精米的 Zn 含量在重度镉污染环境下有下降的趋势,表明土壤镉污染会影响稻谷对 Zn 的吸收;在不同程度镉污染环境下,糠粉中的 Zn 含量分别达到 70.0 、 80.1 、 80.3 和 $77.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均超出粮食卫生标准 NY 861-2004 规定的 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标准值^[19];在不同程度镉污染环境下,稻谷不同部位中 Zn 含量均呈糠粉>糙米>精米>稻壳的趋势,表明土壤镉污染不会影响 Zn 在稻谷各部位的分布;糠粉中的 Zn 含量显著高于其他部位,说明糠粉部位对 Zn 具有很强的吸收力。

2.2 重金属在稻谷不同部位间的迁移能力

采用迁移系数(TF)对重金属元素在稻谷各部位间的迁移转化规律进行分析,结果如图 2 所示。

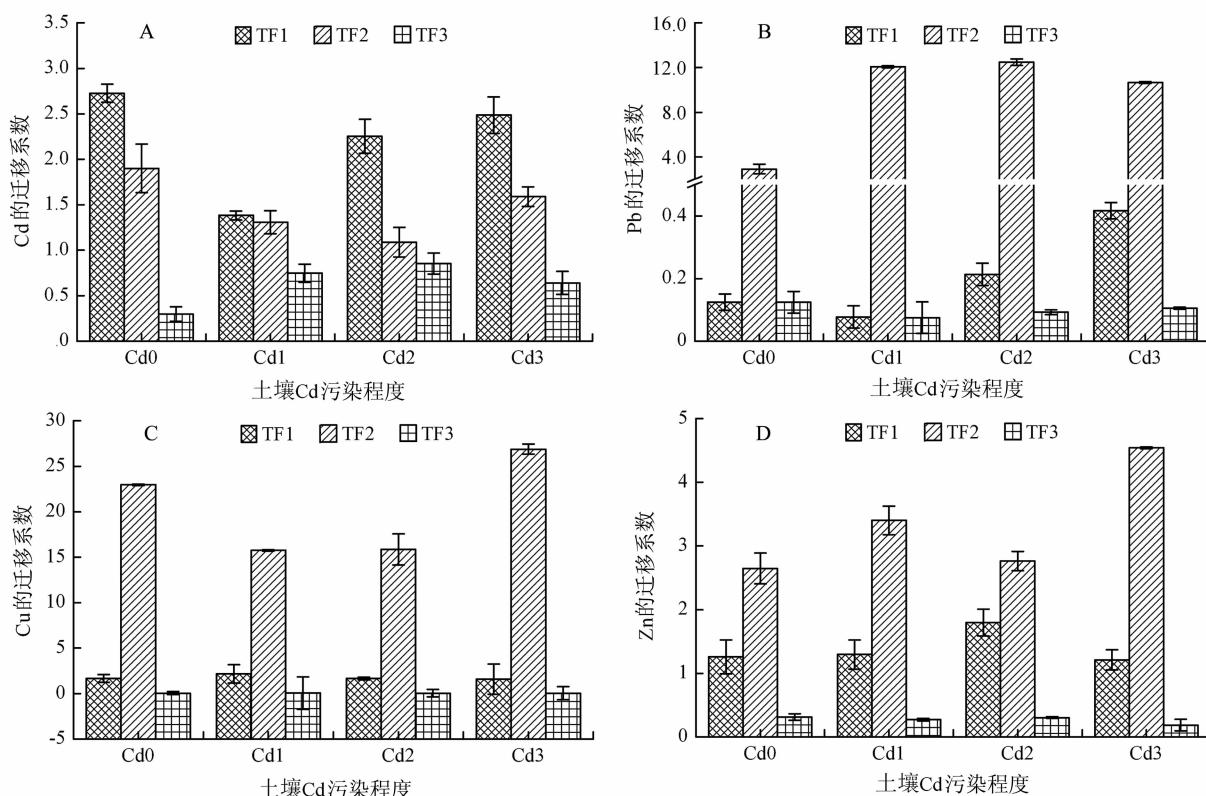


图 2 重金属在稻谷不同部位间的迁移系数

Fig. 2 Heavy metal transport coefficients for parts of rice grain

注: TF1 表示从稻壳到糙米的迁移系数, TF2 表示从糙米到糠粉的迁移系数, TF3 表示从糠粉到精米的迁移系数。

从图 2-A 看出，在不同程度的镉污染环境下，Cd 元素在稻壳→糙米（TF1）的迁移系数均值都为最大，分别为 2.73、1.38、2.25 和 2.49；在糠粉→精米（TF3）的迁移系数均值都为最小，分别为 0.298、0.748、0.854 和 0.642。说明稻壳中的 Cd 较易被转移到糙米中，而糠粉积累的 Cd 较难被转移到精米中。

从图 2-B 看出，在不同程度镉污染环境下，Pb 元素在糙米→糠粉（TF2）的迁移系数均值都为最大，分别为 2.91、12.1、12.5 和 10.6；在糠粉→精米（TF3）的迁移系数均值都为最小，分别为 0.125、0.075、0.093 和 0.106。说明糙米中的 Pb 极易被积累到糠粉中，而糠粉积累的 Pb 较难被转移到精米中。

从图 2-C 看出，在不同程度镉污染环境下，Cu 元素在糙米→糠粉（TF2）的迁移系数均值都为最大，分别为 22.9、15.7、15.9 和 26.9；在糠粉→精米（TF3）的迁移系数均值都为最小，分别为 0.041、0.062、0.057 和 0.029。说明糙米中的 Cu 极易被积累到糠粉中，而糠粉积累的 Cu 较难被转移到精米中。

从图 2-D 看出，在不同程度镉污染环境下，Zn 元素在糙米→糠粉（TF2）的迁移系数均值都为最大，分别为 2.65、3.41、2.77 和 4.54；在糠粉→精米（TF3）的迁移系数均值都为最小，分别为 0.313、0.272、0.304 和 0.186。说明糙米中的 Zn 极易被累积到糠粉中，而糠粉累积的 Zn 较难被转移到精米中。

2.3 重金属含量与重金属迁移系数的相关性

为进一步探讨重金属在稻谷各部位间迁移能力的变化对各部位重金属累积量的影响，采用统计软件对稻谷各部位重金属含量与重金属在各部位间迁移系数的相关性进行了分析，结果如表 3~6 所示。

表 3 稻谷各部位 Cd 含量与 Cd 迁移系数的相关性
Table 3 Correlation between Cd contents and Cd transport coefficients of parts of rice grain

Cd 的迁移	稻谷各部位 Cd 含量			
	稻壳	糙米	糠粉	精米
稻壳→糙米(TF1)	-0.128	0.005	0.038	-0.003
糙米→糠粉(TF2)	-0.865	-0.795	-0.772	-0.800
糠粉→精米(TF3)	0.898*	0.739	0.751	0.753

注：表中数据标有 * 者表示相关达显著水平（ $P<0.05$ ）。表 4~6 同。

从表 3 看出，稻壳 Cd 含量与 Cd 在糠粉→精米迁移系数呈显著正相关（ $r=0.898$ ， $P<0.05$ ），其余的相关性均不显著。说明稻壳 Cd 含量的提高，会显著促进 Cd 从糠粉向精米的迁移。

表 4 稻谷各部位 Pb 含量与 Pb 迁移系数的相关性
Table 4 Correlation between Pb contents and Pb transport coefficients of parts of rice grain

Pb 的迁移	稻谷各部位 Pb 含量			
	稻壳	糙米	糠粉	精米
稻壳→糙米(TF1)	-0.626	0.033	0.048	0.191
糙米→糠粉(TF2)	0.608	0.788	0.825	-0.987*
糠粉→精米(TF3)	-0.906*	-0.618	-0.659	-0.539

从表 4 看出，稻壳 Pb 含量与 Pb 在糠粉→精米迁移系数呈显著负相关（ $r=-0.906$ ， $P<0.05$ ），说明稻壳 Pb 含量的提高，会显著抑制 Pb 在糠粉→精米的迁移，从而显著减少精米中的 Pb 含量；精米 Pb 含量与 Pb 在糙米→糠粉迁移系数也呈显著负相关（ $r=-0.987$ ， $P<0.05$ ），说明 Pb 在糙米中向糠粉累积能力的提高，会显著减少精米中的 Pb 含量。

从表 5 看出，糙米和精米 Cu 含量与 Cu 在糙米→糠粉迁移系数均呈显著负相关（ $r=-0.902$ 和 $r=-0.975$ ， $P<0.05$ ），说明 Cu 从糙米向糠粉累积能力的提高，会显著减少糙米和精米中的 Cu 含量。

表 5 稻谷各部位 Cu 含量与 Cu 迁移系数的相关性
Table 5 Correlation between Cu contents and Cu transport coefficients of parts of rice grain

Cu 的迁移	稻谷各部位 Cu 含量			
	稻壳	糙米	糠粉	精米
稻壳→糙米(TF1)	0.020	0.492	-0.120	0.633
糙米→糠粉(TF2)	-0.683	-0.902*	-0.110	-0.975*
糠粉→精米(TF3)	0.562	0.841	-0.002	0.945

从表 6 看出，糙米 Zn 含量与 Zn 在糙米→糠粉和糠粉→精米间的迁移系数相关性显著，其中与糙米→糠粉间的迁移系数呈显著负相关（ $r=-0.963$ ， $P<0.05$ ），与糠粉→精米间的迁移系数呈显著正相关（ $r=0.954$ ， $P<0.05$ ），说明糙米 Zn 含量的提高，会显著抑制糙米中的 Zn 向糠粉的累积，同时会显著促进 Zn 在糠粉→精米间的迁移；

精米 Zn 含量与 Zn 在糙米→糠粉间的迁移系数呈显著负相关 ($r = -0.930$, $P < 0.05$), 说明在糙米中 Zn 在糠粉中累积能力的提高, 会显著降低精米中的 Zn 含量。

表 6 稻谷各部位 Zn 含量与 Zn 迁移系数的相关性

Table 6 Correlation between Zn contents and Zn transport coefficients of parts of rice grain

Zn 的迁移	稻谷各部位 Zn 含量			
	稻壳	糙米	糠粉	精米
稻壳→糙米(TF1)	-0.195	0.723	0.456	0.673
糙米→糠粉(TF2)	-0.741	-0.963*	0.336	-0.930*
糠粉→精米(TF3)	0.764	0.954*	-0.309	0.942

3 讨 论

试验结果表明, Cd、Cu、Zn 和 Pb 等 4 种重金属在稻谷各部位含量高低顺序如下: Cd、Cu、Zn 表现为糠粉>糙米>精米>稻壳, Pb 则表现为稻壳>糠粉>糙米>精米或糠粉>稻壳>精米>糙米。由此可见, 糠粉对重金属具有很强的吸收能力, 稻谷加工成精米能有效减少食用部位中重金属的含量, 这与前人的研究结果一致^[20-21]。在糠粉中积累的 Cd、Cu、Zn、Pb 量明显多于其他部位, 也较难被转移到精米中, 因此对糠粉中的重金属进行去除是十分必要的。从稻谷加工成精米, Cd 含量最大程度可减少 70.2%, Pb 含量最大程度可减少 95.0%, Cu 含量最大程度可减少 97.1%, Zn 含量最大程度可减少 81.4%。这可能是由于稻谷加工精度越高, 富含蛋白质的米胚和皮层去得越多, 而重金属易于集中在蛋白质含量较高的部位, 另外谷物中的重金属含量除了与蛋白质含量有关外, 还与纤维素含量密切相关^[22]。值得一提的是, 本试验材料是在野外大田环境中采集的水稻样品, 虽然研究结果更贴近生产实际, 但会受到天气等不可控因素的影响, 因此在今后研究中应考虑采取盆栽试验的方法进行补充验证。

4 结 论

4.1 重金属在稻谷中的分布存在差异性

不同程度的镉污染均不会影响 Cd、Cu、Zn 在稻谷各部位的分布, 三者在稻谷中的含量基本呈糠粉>糙米>精米>稻壳的趋势; Pb 在稻谷各部位的含量受土壤镉污染程度影响较明显, 呈稻壳>糠粉>糙米>精米或糠粉>稻壳>精米>糙米的趋

势; 糠粉对重金属具有很强的吸收能力, 稻谷加工成精米能有效减少食用部位的重金属含量。

4.2 重金属在不同部位间的迁移能力存在差异性

稻壳中的 Cd 比较容易被转移到糙米中, Cd 在稻壳→糙米间的迁移系数明显较糙米→糠粉、糠粉→精米间的迁移系数大; 糙米中的 Pb、Cu、Zn 极易被转移到糠粉中, Pb、Cu、Zn 在糙米→糠粉间的迁移系数明显较其他部位大; 糠粉中的 Cd、Pb、Cu、Zn 较难被转移到精米中。因此, 稻谷加工过程尽可能去除糠粉部位可以减少食用部分的重金属含量。

4.3 重金属在各部位间的迁移能力与各部位重金属含量有一定的相关性

稻壳 Cd 含量的提高, 会显著促进 Cd 从糠粉向精米的迁移; 稻壳 Pb 含量的提高, 会显著抑制 Pb 在糠粉→精米的迁移, 从而显著减少精米中的 Pb 含量; Pb 在糙米中向糠粉累积能力的提高, 会显著减少精米中的 Pb 含量; Cu 从糙米向糠粉累积能力的提高, 会显著减少糙米和精米中的 Cu 含量; 糙米 Zn 含量的提高, 会显著抑制糙米中的 Zn 向糠粉的累积, 同时会显著促进 Zn 在糠粉→精米间的迁移; 糙米中 Zn 在糠粉中累积能力的提高, 会显著降低精米中的 Zn 含量。

参考文献:

- [1] SINGH R P, AGRAWAL M. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73 (4): 632-641.
- [2] SINGH A, SHARMA R K, AGRAWAL M, et al. Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India [J]. *Tropical Ecology*, 2010, 51 (2): 375-387.
- [3] MARKOVI M, CUPA S, DUROVI R, et al. Assessment of heavy metal and pesticide levels in soil and plant products from agricultural area of Belgrade, Serbia [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58 (2): 341-351.
- [4] 路子显. 粮食重金属污染对粮食安全, 人体健康的影响 [J]. *粮食科技与经济*, 2011, 36 (4): 14-17.
- [5] 崔玉静, 赵中秋, 刘文菊, 等. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2003, 1 (10): 2133-2143.
- [6] ZENG F, MAO Y, CHENG W, et al. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice [J]. *Environmental pollution*, 2008, 153 (2): 309-314.
- [7] 杨祥田, 周翠, 何贤彪, 等. 田间试验条件下不同基因型水稻对 Cd 和 Pb 的吸收分配特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2013,

- 32 (3): 438—444.
- [8] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (2): 220—227.
- [9] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果 [J]. 中国环境科学, 2014, 34 (2): 437—444.
- [10] 鞠兴荣, 丁哲慧, 高璐琬, 等. 重金属在水稻中的分布及加工过程对其影响的探讨 [J]. 粮食与食品工业, 2016, 23 (3): 1—6.
- [11] 仲维功, 杨杰, 陈志德, 等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异 [J]. 江苏农业学报, 2006, 22 (4): 331—338.
- [12] 田阳. 稻米加工技术对产品镉含量的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [13] 李琛, 章月莹. 不同加工程度对稻米中铅含量的影响 [J]. 粮油仓储科技通讯, 2013, 29 (6): 46—48.
- [14] 刘兰英, 涂杰峰, 黄薇, 等. 福建闽西矿区周边土壤 Cd、Pb、Cr 含量及风险评价 [J]. 福建农业学报, 2017, 32 (1): 68—74.
- [15] 刘凤枝, 马锦秋. 土壤监测分析实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 338—339.
- [16] GUPTA S, NAYEK S, SAHHAR N, et al. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil, and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory [J]. *Environmental geology*, 2008, 55 (4): 731—739.
- [17] SATPATHY D, REDDY M V, DHAL S P. Risk assessment of heavy metals contamination in paddy soil, plants, and grains (*Oryza sativa* L.) at the East Coast of India [J]. *BioMed research international*, 2014, 2014: 545473.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品污染物限量: GB 2762—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 中华人民共和国农业部. 粮食(含谷物, 豆类, 薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量: NY 861—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [20] 莫文莲, 陈祎清, 孙禧华. 石墨炉原子吸收光谱法测定稻米各加工阶段铅含量研究 [J]. 粮食与油脂, 2010 (8): 34—35.
- [21] 倪小英, 许艳霞, 梅广, 等. 主要重金属在污染稻谷籽粒中的分布规律研究 [J]. 中国粮油学报, 2017, 32 (1): 7—11.
- [22] 查燕, 杨居荣. 污染谷物中重金属的分布及加工过程的影响 [J]. 环境科学, 2000, 21 (3): 52—55.
- (责任编辑: 杨小萍)