

天津市主要栽种水稻品种对镉的累积差异研究

殷萍^{1,2*}, 陈秋生^{1,2}, 张强^{1,2}, 刘烨潼^{1,2}, 张奎^{1,2}

(1. 天津市农业质量标准与检测技术研究所, 天津 300381;

2. 农业部农产品质量安全风险评估实验室(天津), 天津 300381)

摘要: 目的 研究天津本地主栽品种水稻对镉的累积特性差异。**方法** 选取天津市水稻品种津原 47, 津原 11 及津原 E28 在不同镉添加浓度的盆栽土壤中进行种植, 待成熟后采收地上部分并测定镉含量。**结果** 各品种籽粒重量及生物量随镉添加浓度升高而降低。水稻的茎叶、稻壳及糙米镉含量则随镉添加浓度升高而升高, 且符合茎叶>稻壳>糙米的规律。各部位富集系数: 津原 47 为 1.56~6.99, 津原 11 为 1.20~7.37, 津原 E28 为 1.11~13.0。根据实验数据建立了 3 个水稻品种糙米镉含量预测模型, 并计算出安全临界值, 分别是 12.20、11.01 及 12.65 mg/kg。**结论** 通过比较产量及富集系数表明品种间及水稻各部位对镉的累积特性存在差异。当土壤中的污染浓度超过该临界值时, 糙米中镉含量有可能超出安全限量标准, 存在风险。

关键词: 天津市; 水稻; 镉; 累积特性; 预测模型

Study on the differences in the accumulated characteristics of cadmium in mainly planted rice of Tianjin

YIN Ping^{1,2*}, CHEN Qiu-Sheng^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, LIU Ye-Tong^{1,2}, ZHANG Xi^{1,2}

(1. Tianjin Institute of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Tianjin 300381, China;

2. Laboratory of MOA for Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products, Tianjin 300381, China)

ABSTRACT: Objective To study the difference of cadmium accumulation characteristics of Tianjin main rice varieties. **Methods** Rice varieties of Tianjin Jinyuan 47, Jinyuan 11 and Jinyuan E28 were planted in potting soil with different cadmium concentrations. After maturity, the above-ground parts were harvested and the cadmium content was determined. **Results** The weight and biomass of all varieties of grain decreased with the increase of adding concentration of cadmium. The contents of cadmium in stem, leaf, rice husk and brown rice increased with the increase of cadmium concentration. Furthermore, the rules of accumulation of cadmium were the concentration of cadmium in stem and leaf was higher than that in rice husk, and that in brown rice was lowest. The enrichment coefficient in different parts were 1.56–6.99 for Jinyuan 47, 1.20–7.37 for Jinyuan 11, and 1.11–13.0 for Jinyuan E28. The models of cadmium content in brown rice for three rice varieties were established according to the experimental data, through that the safety critical values were calculated as follow: 12.20, 11.01, 12.65 mg/kg, respectively. **Conclusion** By comparison of the yields and enrichment factors, it can be found that there are differences of accumulated characteristics of cadmium in different rice varieties and different parts of rice. When the polluted concentration exceeds the safety critical value, the contents of cadmium in brown rice will probably exceed the Safety

基金项目: 天津市农业科学院院长基金项目(14011)

Fund: Supported by Tianjin Academy of Agricultural Sciences (14011)

*通讯作者: 殷萍, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全检测技术。E-mail: jasly78@163.com

*Corresponding author: YIN Ping, Master, Assistant Professor, Laboratory of MOA for Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products, Tianjin Institute of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Tianjin 300381, China. E-mail: jasly78@163.com.

Limitation Standard, which has risks.

KEY WORDS: Tianjin; rice; cadmium; absorption and accumulation; prediction model

1 引言

镉是一种对人体有害的环境污染元素, 镉通过食物链进入人体, 超过一定限量后, 即对人体造成健康危害^[1,2], 如引起疼痛病, 影响肾脏功能, 甚至会损害泌尿系统等。据统计全世界每年向环境中释放的镉达 30000 吨左右, 其中 82%~94% 的镉会进入到土壤中^[3]。2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》中指出, 全国耕地有近五分之一受到重金属污染^[4]。2015 年, 我国耕地总面积为 1.35 亿 hm^2 , 据此估算, 我国耕地受污染面积有近 2700 万 hm^2 。尽管造成大米镉超标问题的原因并不完全是土壤污染引起的, 但是土壤作为水稻的种植环境, 其镉含量超标仍然是大米镉超标的主要原因^[5]。美国农业部的一项研究表明, 水稻是对镉吸收最强的大宗谷类作物^[6], 其籽粒镉水平仅次于生菜。此外, 水稻是一种对镉敏感的作物。稻米对土壤中镉的吸收能力较明显的高于铜、锌、汞、砷、铅等重金属^[7]。目前, 针对不同水稻品种对镉的累积特性及水稻体内镉与种植环境镉含量相关性的研究较多。研究结果表明, 镉污染可导致大多数水稻品种的总生物量和籽粒产量明显下降, 并且不同品种水稻对镉的累积特性也存在较为明显的差异^[8-11]。与此同时, 水稻体内的镉与土壤中镉含量具有相关性^[12-14]。

稻米是天津市居民日常消费中最主要的粮食品种之一。调查显示, 天津本地种植的稻米在本地居民消费中占有相当一部分的比例^[15]。然而目前针对天津本地水稻品种的镉累积特性以及与种植环境中镉含量相关性的研究较少。本研究选取天津市的 3 个水稻品种, 津原 47, 津原 11 以及津原 E28, 在 5 组镉添加浓度下进行盆栽试验, 以研究水稻镉累积特性差异, 以及与本地种植环境镉含量的相关性, 并最终建立了预测数学模型, 为天津本地稻米生产的安全管控奠定了理论基础, 为建立更为绿色环保的水稻种植管理规程提供依据, 同时为水稻育种专家在选育天津本地低累积水稻品种提供技术支撑, 在保证优质、高产等基础上, 获得品质更加安全的稻米产品, 保障人民的身体健康。

2 材料与方法

2.1 试剂、仪器

混合标准溶液 Part#5183-4688, 其中 Cd 浓度为 $10 \mu\text{g/mL}$ 用(1+19) HNO_3 溶液将标准贮备液逐级稀释为 5、10、20、50、100、200 ng/mL 6 个浓度梯度, 以(1+19) HNO_3 溶液作为试剂空白(美国 Agilent 公司); 硝酸、盐酸(优级纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 实验用水为 Milli-Q 制备的超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega$)。

国家一级标准参考物质四川大米 GBW10044(GSB-22, 中国地质科学院地球物理地球化学勘察研究所)、国家一级标准参考物质芹菜 GBW10048(GSB-26, 中国地质科学院地球物理地球化学勘察研究所)、国家一级标准参考物质土壤 GBW07425(GSS-11, 中国地质科学院地球物理地球化学勘察研究所)。

Agilent 7500a 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent Technologies 公司), 附带 Babington 高盐雾化器; 雾化室: 石英双通道, Piltier 半导体控温于(2±0.1) $^{\circ}\text{C}$ 。MARS5 微波消解仪(美国 CEM 公司), 带聚四氟乙烯消解罐; DKQ-3C 型智能控温电加热器(上海屹尧分析仪器有限公司)。

2.2 供试土壤

盆栽试验于 2016 年 5 月至 9 月, 在天津市武清区汉沽镇胡柳子村进行, 供试土壤为当地无污染种植土壤。取部分土壤为土样, 按照相关国家标准检测要求进行土壤各参数及重金属含量的测定。测定结果如下表 1。

2.3 供试水稻

盆栽试验所用秧苗品种分别为津原 47, 津原 11 和津原 E28。秧苗由天津市原种场提供。各品种秧苗苗龄为 40 天, 秧苗株高在 15~17 厘米之间。秧苗取回后及时插入供试盆中, 每盆插秧 3 到 4 株。

表 1 盆栽试验土壤参数
Table 1 Parameters of soil for pot-culture experiment

pH	有机质/(g/kg)	速效钾/(mg/kg)	速效氮/(mg/kg)	有效磷/(mg/kg)
7.21	9.8	127	55	48.1
全氮/%	全磷/%	全钾/%	全镉/(mg/kg)	
0.133	0.031	1.56	0.05	

2.4 实验设计

采用直径为 30 cm 的塑料盆装填 6.0 kg 土壤。称取一定量氯化镉, 用去离子水配制成镉溶液, 按照添加浓度分别为 0、10.0、20.0、30.0 mg/kg 及 40.0 mg/kg 计算出体积拌入土壤, 加入 1.0 g 复合肥料作为底肥, 以本地无污染灌溉水浸泡平衡一周。所用复混肥料总氮含量为 25.71%, 有效磷含量为 13.52%, 氧化钾含量为 10.18%, 在盆栽过程中进行追肥。添加浓度每个浓度梯度每个品种做 3 个平行, 共计 45 盆盆栽。在 5 月底进行秧苗移取及插秧操作, 后按照水稻种植程序进行管理, 并于采收前两周停止加水, 并最终于 9 月底籽粒成熟后采收。

2.5 样品采集及测定

2.5.1 供试土壤、水稻采收及样品前处理

水稻成熟后, 采收地上部分并进行茎叶与籽粒的分离。每盆盆栽的籽粒重量记为籽粒产量, 所有地上部分重量记为总生物量。然后分别于 70 °C 条件下进行烘干处理。烘干完成后, 茎叶进一步剪碎, 籽粒进行稻壳与糙米的剥离, 分别进行研磨, 并过 0.25 mm 尼龙筛, 备用。

盆栽土壤样品经风干后, 多次反复研磨至全部通过 100 目(孔径 0.149 mm)尼龙筛, 混匀后备用。

2.5.2 样品中镉含量测定

根据国家标准 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[16]及 HJ 803-2016《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》^[17]进行测定。测定同时, 利用国家有证标准物质作为质控样品, 测定结果见表 2。3 个有证标准物质的测定结果均在证书标示的允许值范围内, 表明以上方法的测定结果准确有效。

表 2 有证标准物质镉含量测定结果

Table 2 Determination results of cadmium in certified reference materials

标准物质名称及编号	测定结果/(mg/kg)	证书值/(mg/kg)
四川大米 GBW10044	0.017	0.018±0.002
芹菜 GBW10048	0.089	0.092±0.006
土壤 GBW07425	0.119	0.125±0.012

2.5.3 数据计算

各部位富集系数=(水稻各部位积累的镉含量/生长介质中的镉含量)×100

富集系数总和=糙米富集系数+稻壳富集系数+茎叶富集系数

2.5.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 软件计算测定结果的平均值及标准偏差, 并采用 LSD 法及 Duncan 法对数据的差异性

进行分析。采用 Excel 建立镉污染预测模型的建立以及曲线绘制。

3 结果与分析

3.1 不同镉处理对水稻籽粒产量及总生物量的影响

各品种水稻籽粒产量及总生物量如表 3 所示。随镉添加浓度升高, 各品种的籽粒产量和总生物量均呈下降趋势, 表明镉对水稻生长存在抑制作用, 抑制率随添加浓度升高而增加, 最高可达 19.6%。有研究指出, 随着镉胁迫浓度升高, 水稻各个生长发育阶段都受到抑制, 并且最终产量也随镉胁迫浓度升高而下降^[18], 这与本研究得到结果一致。黄冬芬等^[19]采用不同浓度镉胁迫浓度处理了 3 个不同水稻品种的盆栽试验结果表明, 当土壤镉胁迫浓度较低时, 水稻产量未收到明显的影响, 但当土壤镉胁迫浓度升高, 水稻产量显著降低。

籽粒产量及生物量差异性分析表明(表 3), 津原 47 和津原 E28 在添加浓度提升至 20.0 mg/kg 时开始呈现显著性降低, 津原 11 则在添加浓度提升至 30.0 mg/kg 时呈现显著性降低($P<0.05$)。在各添加浓度下, 津原 47 的两项数据均高于其他品种, 表明不同品种间对镉的耐受能力存在差异。在镉胁迫条件下, 水稻的根系生长受到抑制, 叶片总氮含量减少; 同时, 净光合速率、蒸腾速率以及气孔导度都呈下降趋势, 叶绿素含量下降, 使得植物体内单位养分的干物质生产量降低^[20], 最终导致水稻产量的下降。在长期受到镉胁迫时, 水稻会产生抗性, 从而使植株适应这种逆境并进行生长补偿, 最终毒害作用相对减轻^[21], 此种现象是否与水稻品种有关, 镉污染浓度是否与产量之间存在相关性, 应在今后做进一步研究。

3.2 各品种水稻营养器官内镉累积特性

不同镉添加浓度下水稻各部位累积量, 如图 1、图 2 及图 3 所示。在各镉污染处理浓度下, 3 个品种水稻的茎叶、稻壳及糙米中镉含量均随处理浓度增加而呈现上升趋势。并且在每一个梯度下, 镉累积效应都呈现了茎叶>稻壳>糙米的趋势, 这与文献报道的研究结论一致^[22-24]。根据 GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[25]规定, 大米中镉的限量值为 0.2 mg/kg, 当镉添加浓度高于 10.0 mg/kg, 3 个品种糙米镉含量均超出国标安全限量, 存在健康风险。研究表明, 在多种重金属元素共存时, 水稻籽实能选择性地“优先”吸收镉^[26]。表 4 列出了不同镉添加浓度下, 各品种糙米镉含量对比。比较表明, 当添加浓度 ≤30.0 mg/kg 时, 津原 E28 的糙米镉含量与其他两个品种对比差异显著($P<0.05$); 当添加浓度为 40.0 mg/kg, 3 个品种糙米镉含量差异显著($P<0.05$), 表明品种间糙米对于镉的吸收累积特性不尽相同。有研究表明, 水稻籽粒重金属含量与同化产物积累的多少密切相关, 并可能受到库源关系和灌浆特性的影响^[27]。

表 3 各品种水稻籽粒产量及总生物量($n=3$)
Table 3 Grain yield and total biomass of each rice variety ($n=3$)

镉添加浓度 (mg/kg)	津原 47/(g/盆)		津原 11/(g/盆)		津原 E28/(g/盆)	
	籽粒产量	总生物量	籽粒产量	总生物量	籽粒产量	总生物量
0.0	68.3±0.6a	228.7±1.9a	66.0±0.5a	221.0±1.8a	61.8±0.5a	207.2±1.7a
10.0	66.8±0.7a	223.8±2.2a	64.6±0.6a	216.3±2.1a	60.5±0.6a	202.7±2.0a
20.0	62.7±1.1b	209.9±3.6b	63.8±1.7a	213.7±5.7a	53.3±0.9b	178.5±2.9b
30.0	56.8±2.1c	190.4±6.9c	54.9±2.0b	184.0±6.6b	51.5±1.9b	172.5±6.2b
40.0	54.9±2.0c	184.0±6.6c	53.1±1.9b	177.9±6.3b	49.8±1.8c	166.7±5.9c

注: 同一列中, 数据后不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

测定结果表明水稻糙米镉含量与种植土壤中镉含量存在相关性。文献报道, 土壤镉和铅含量与叶片、茎鞘和糙米中镉和铅的含量呈显著相关关系, 茎鞘和叶片镉和铅的含量与糙米中镉和铅的含量也呈极显著的正相关关系。这说明水稻地上部器官镉和铅的含量与土壤镉和铅含量紧密相关^[28]。因此可建立预测模型, 计算出土壤中镉含量的安全临界值, 并可根据种植土壤中总镉含量预测糙米的镉含量, 为稻米品质安全管控提供依据。

表 4 各品种水稻糙米镉累积含量($n=3, \mu\text{g/kg}$)
Table 4 Cadmium contents in unpolished rice of each rice variety ($n=3, \mu\text{g/kg}$)

水稻品种	镉处理浓度			
	10.0 mg/kg	20.0 mg/kg	30.0 mg/kg	40.0 mg/kg
津原 47	154±9.4b	273±16.6b	336±20.4b	462±28.1c
津原 11	153±9.7b	243±15.5b	368±23.4b	667±42.5b
津原 E28	179±10.7a	355±21.2a	782±46.6a	1304±77.7a

注: 同一列中, 数据后不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

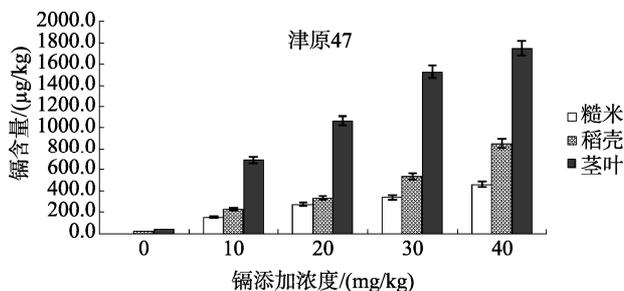


图 1 津原 47 各器官镉累积差异比较($n=3$)

Fig.1 Comparison of cadmium accumulation differences in various organs of Jinyuan 47 ($n=3$)

3.3 不同镉添加浓度对水稻各部位富集系数影响

富集系数是表征水稻对镉累积吸收能力的重要指标。表 5 列出了 3 个品种水稻各部位对镉的富集系数, 津原 47 为 1.56~6.99, 津原 11 为 1.20~7.37, 津原 E28 为 1.11~13.0。

在不同添加浓度下, 各品种各部位的富集系数完全符合茎叶>稻壳>糙米的趋势, 且产量及糙米镉富集能力并不影响这一规律性, 说明糙米 Cd 富集能力对水稻镉器官富集系数影响要比产量的影响重要得多^[24]。

比较糙米的富集系数(表 5)表明, 津原 47 的富集系数随镉添加浓度升高而升高, 且在添加浓度达到 20.0 mg/kg 时, 津原 47 显著高于与其他品种($P<0.05$); 在稻壳及茎叶的富集系数比较中, 津原 E28 和津原 47 在各添加浓度下, 总体呈现高于津原 47 的趋势, 并且存在显著性差异($P<0.05$); 从地上部分富集系数的总和来看, 津原 E28 的富集能力在各添加浓度下显著高于其他品种, 表明水稻品种间以及各部位间对镉的富集能力都存在差异。根据文献报道, 水稻糙米中的镉积累几乎完全由韧皮部介导分配, 在茎节中存在的转运子参与将镉转运至韧皮部, 最终积累到谷粒中。水稻品种间累积差异可能是中柱中负责木质部镉装载的镉转运子装载转运能力不同造成的^[23]。也有研究指出, 植株籽粒镉含量与根系的吸收能力和镉在植株体内的分配有关, 但与根系的吸收能力相比, 植株籽粒的镉含量在更大程度上取决于镉在植株体内的分配^[29]。鉴于水稻整体对镉的富集能力与糙米的富集能力存在不同变化趋势, 在筛选安全种植品种时应优先考虑糙米对镉富集能力低的品种。

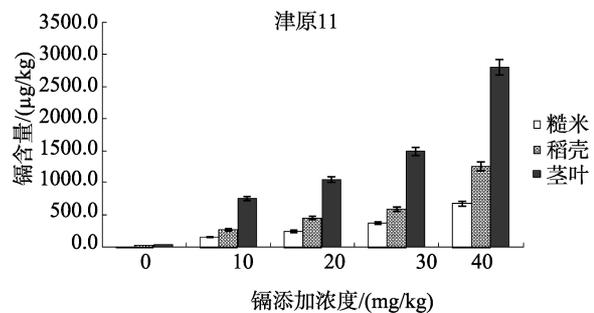


图 2 津原 11 各器官镉累积差异比较($n=3$)

Fig.2 Comparison of cadmium accumulation differences in various organs of Jinyuan 11 ($n=3$)

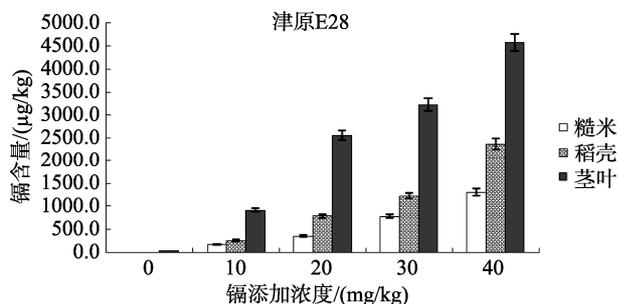


图 3 津原 E28 各器官镉累积差异比较(n=3)

Fig.3 Comparison of cadmium accumulation differences in various organs of Jinyuan E28 (n=3)

3.4 各水稻品种镉污染预测模型的建立

稻米是水稻的主要产品, 其重金属含量直接关系到

品质和食用安全性, 故水稻对重金属的吸收和积累差异是人们关心的重点^[30]。赵雄等的研究表明, 糙米镉含量与土壤总镉含量呈显著正相关关系, 且相关性系数达到 0.9 以上; 郑春荣等将取自辽宁、广西土壤进行盆栽试验结果表明, 稻米镉含量与土壤镉含量均达到极显著相关性, 相关性系数达到 0.9 以上^[31]。因此, 根据土壤镉含量和糙米镉含量建立预测模型是可行的。

不同添加浓度下, 各品种糙米中镉含量与土壤镉含量相关性如图 4 所示。3 个品种的糙米镉含量均与土壤镉污染添加浓度存在相关性。预测模型如表 6 所示, 其中 X 表示土壤镉含量的对数值, Y 表示糙米镉含量的对数值。预测模型表明, 在一定添加浓度范围内, 津原 47 和津原 11 糙米镉含量的对数值均与土壤中总镉含量的对数值呈线性关系, 津原 E28 糙米镉含量的对数值与土壤中总镉含量的对数值呈一元二次线性关系, 各条曲线均拟合性良好。

表 5 各品种水稻地上部分对镉的富集系数(n=3)

Table 5 Cadium enrichment coefficients of various organs in three rice varieties (n=3)

镉添加浓度/(mg/kg)	品种	各部位富集系数			地上部分富集系数总和
		糙米	稻壳	茎叶	
10.0	津原 47	1.56±0.02b	2.31±0.24b	6.99±0.63b	10.8±0.85b
	津原 11	1.51±0.02ab	2.64±0.02a	7.37±0.05b	11.5±0.02ab
	津原 E28	1.60±0.04a	2.30±0.03b	8.17±0.05a	12.1±0.11a
20.0	津原 47	1.80±0.04a	1.61±0.14c	5.16±0.37b	8.09±0.47c
	津原 11	1.22±0.02c	2.25±0.03b	5.22±0.02b	8.69±0.03b
	津原 E28	1.32±0.04b	4.01±0.04a	13.0±0.01a	18.8±0.07a
30.0	津原 47	2.51±0.05a	1.80±0.01c	5.14±0.04b	8.07±0.16b
	津原 11	1.20±0.03b	1.88±0.03b	4.85±0.02c	7.93±0.08b
	津原 E28	1.13±0.13b	3.94±0.03a	10.3±0.01a	16.8±0.06a
40.0	津原 47	3.32±0.06a	2.06±0.21c	4.22±0.36c	7.40±0.55c
	津原 11	1.63±0.05b	3.04±0.06b	6.82±0.04b	11.5±0.14b
	津原 E28	1.11±0.02c	6.04±0.04a	11.6±0.03a	21.0±0.06a

注: 同一列中, 数据后不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

土壤重金属安全临界值可作为作物产地安全适应性评价和农田重金属风险评估的参考依据, 对于作物的安全生产具有重要意义^[32]。表 6 中还列出了根据预测模型计算的土壤全镉安全临界值, 计算标准参照 GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中大米镉限量的规定。当土壤中的污染浓度超过该临界值时, 糙米中镉含量有可能超出安全限量标准, 存在风险。预测模型的建立表明, 糙米中镉含量与土壤中镉呈现相关性。当土壤全镉含量超过安全临界值时, 需要配合提高土壤 pH 值或有机质含量等措施以降低土壤有效态镉含量, 以实现水稻的安全生产^[32]。

4 结 论

通过对 3 个品种水稻盆栽试验的数据分析发现, 受土壤中镉处理浓度增加的影响, 各品种水稻的籽粒产量和总生物量均呈下降趋势, 表明镉对水稻生长存在抑制作用。通过对 3 个品种水稻盆栽试验的数据分析发现, 在不同镉污染添加浓度下, 每个品种水稻的茎叶、稻壳及糙米中镉累积量均随添加浓度增加而增加。且在每个添加浓度下, 镉含量都呈现了茎叶>稻壳>糙米的趋势。根据 GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定, 大米中镉的限量值为 0.2 mg/kg, 当 3 个品种糙米在镉添加浓度高于 10.0 mg/kg 以后, 镉含量均超出国标安全限量, 存在健康风险。

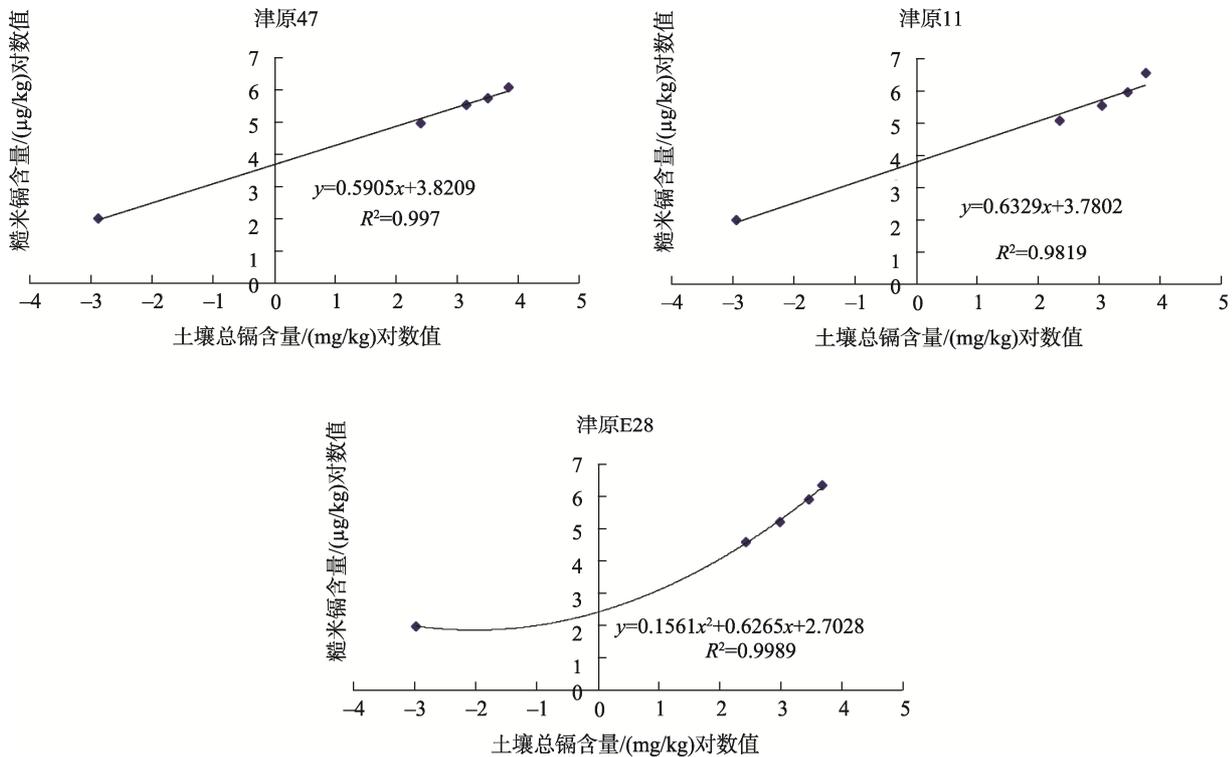


图 4 镉污染添加浓度与各品种糙米镉含量相关性

Fig.4 Correlation between cadmium pollution gradients and cadmium contents of three rice varieties

表 6 3 个品种水稻糙米镉污染预测模型及阈值

Table 6 Prediction models and threshold values of cadmium pollution for three rice varieties

水稻品种	镉污染预测模型	限量标准/(mg/kg)	安全临界值/(mg/kg)
津原 47	$\ln Y=0.5905\ln X+3.8209; r^2=0.997$	0.2	12.20
津原 11	$\ln Y=0.6329\ln X+3.7802; r^2=0.982$	0.2	11.01
津原 E28	$\ln Y=0.1561(\ln X)^2+0.6265\ln X+2.7028; r^2=0.995$	0.2	12.65

注: 镉限量标准参照标准: GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》。

富集系数是水稻体内镉含量与盆栽土壤中镉含量的比值,能够体现各品种的富集能力差异。本实验中,各部位富集系数为津原 47 为 1.56~6.99,津原 11 为 1.20~7.37,津原 E28 为 1.11~13.0。3 个品种各部位的富集系数完全符合茎叶>稻壳>糙米的趋势。津原 47 糙米的富集系数随镉添加浓度升高而升高,且在添加浓度达到 20.0 mg/kg 时,显著高于与其他品种($P<0.05$);从地上部分富集系数的总和来看,津原 E28 的富集能力显著高于其他品种。表明水稻品种间以及各部位间对镉的富集能力都存在差异。

建立了 3 个品种糙米镉含量的数学预测模型,拟合良好,表明该镉添加浓度范围内,3 个品种糙米镉含量与土壤镉含量存在相关性。根据国家标准限量,计算出不同水稻品种的土壤全镉含量安全临界值。当土壤中的污染浓度超过该临界值时,糙米中镉含量有可能超出安全限量标准,存在风险。

本文中盆栽试验以相同的种植土壤为背景,因此在

研究糙米镉含量与土壤中全镉含量的相关性,并未考虑土壤营养指标的影响。有文献指出,土壤 pH 值与有机质含量均对种植作物镉的累积吸收存在一定影响^[32]。也有研究指出,大量盆栽试验结果表明土壤理化性质及重金属含量与作物重金属含量之间有较好的相关性且相关性系数也较高,但在大田实施相关试验,并不一定存在相关性。在今后的研究中,应将土壤重要营养指标作为变量因素,建立预测模型,并且引入大田试验,对预测模型进行验证和修正,最终将预测模型运用到实际的水稻镉安全管控中。

参考文献

- [1] Paul SK, Sasaki C, Matsuyama N, *et al.* Effect of percolation pattern on yields and accumulation of copper and cadmium in the rice plants with soil dressing models [J]. *J Environ Sci Eng*, 2011, 5: 1464-1473.
- [2] Shan YH, Zhao HT, Wang XZ, *et al.* Enhancement of Cd Solubility and bioavailability induced by straw incorporation in Cd-polluted rice soil [J]. *J Environ Sci Eng*, 2012, (A1): 522-526.

- [3] 崔力拓, 耿世刚, 李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技, 2006, 11: 184-185.
Cui LT, Geng SG, Li ZW. Cadmium pollution situation in farmland soil and control strategy in China [J]. Mod Agric Sci Technol, 2006, 11: 184-185.
- [4] 全国土壤污染调查公报[Z]. [2014-04-17].
The national general survey of soil contamination [Z]. [2014-04-17].
- [5] 易江, 甘平洋, 陈璟玲, 等. 稻米镉污染及其消减技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2018, (3): 110-113.
Yi J, Gan PY, Chen QL, et al. Research progress on pollution of cadmium in rice and its removal technology [J]. Hunan Agric Sci, 2018, (3): 110-113.
- [6] 单天宇, 刘秋辛, 阎秀兰, 等. 镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 1938-1945.
Shan TY, Liu QX, Yan XL, et al. Cd and As absorption and transport characteristics of rice in a paddy field co-contaminated by Cd and As [J]. J Agro-Environ Sci, 2017, 36(10): 1938-1945.
- [7] 严莎, 凌其聪, 严森, 等. 城市工业区周边土壤水稻系统中重金属的迁移累积特征[J]. 环境化学, 2007, 27(2): 226-230.
Yan S, Ling QC, Yan S, et al. Behaviors of heavy metals in the soils - rice system around in industrial area around city [J]. Environ Chem, 2007, 27(2): 226-230.
- [8] 张磊, 杨惟薇, 张超兰, 等. 不同水稻类型对镉的耐性、累积性与转运性质研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2185-2188.
Zhang L, Yang WW, Zhang CL, et al. Cadmium tolerance, accumulation and translocation between 'super' rice, hybrid rice and conventional rice [J]. Southwest China J Agric Sci, 2013, 26(6): 2185-2188.
- [9] 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]. J Agro-Environ Sci, 2013, 32(6): 1092-1098.
- [10] 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 LY, Zhu CN, Wang JJ, et al. Screening for rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with lower Cd, Pb and As contents [J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2012, 24(1): 133-138.
- [11] 佟倩, 张秀双, 魏晓敏, 等. 不同品种水稻对镉累积特性研究[J]. 北方水稻, 2014, 44(5): 1-7.
Tong Q, Zhang XH, Wei XM, et al. Characteristics of diferent rice varieties on cadmium accumulation [J]. North Rice, 2014, 44(5): 1-7.
- [12] 郭晋军, 田渭花, 刘建利, 等. 水稻土中镉污染预测模型的建立与验证[J]. 广州化工, 2011, 39(15): 142-144.
Guo JJ, Tian WH, Liu JL, et al. Validation and build of the cadmium pollution prediction model on the paddy soil [J]. Guangzhou Chem Ind, 2011, 39(15): 142-144.
- [13] 李军, 梁吉哲, 刘侯俊, 等. Cd 对不同品种水稻微量元素累积特性及其相关性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 441-447.
Li J, Liang JZ, Liu HJ, et al. Influence of Cd on microelements accumulation and their correlation in different rice cultivars of northeastern China [J]. J Agro-Environ Sci, 2012, 31(3): 441-447.
- [14] 喻凤莲, 周成明, 邓锐. 水稻籽实及其根系土壤中镉含量的相关性研究——以几个金土地工程土地整理区为例[J]. 四川地质学报, 2012, 32(4): 468-471.
Yu FL, Zhou CM, Deng R. Study of correlation of Cd contents of rice grain and root soil [J]. Acta Geologica Sichuan, 2012, 32(4): 468-471.
- [15] 刘文玫. 天津市稻米生产和消费市场现状分析[J]. 天津农林科技, 2009(5): 33-35.
Liu WM. Analysis of rice production and consumption in Tianjin [J]. Sci Technol Tianjin Agric Forest, 2009, (5): 33-35.
- [16] GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
GB 5009.268-2016 National food safety standard-Determination of multielement in food [S].
- [17] HJ 803-2016 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法[S].
HJ 803-2016 Soil and sediment-Determination of aqua regia extracts of 12 metal elements-Inductively coupled plasma mass spectrometry [S].
- [18] 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 SS, Song ZG, Lei M, et al. Growth and Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) grown in soils amended with Cd from different pollution sources [J]. J Agro-Environ Sci, 2016, 35(3): 419-424.
- [19] 黄冬芬, 王志琴, 刘立军, 等. 镉对水稻产量和品质的影响[J]. 热带作物学报, 2010, 31(1): 19-24.
Huang DF, Wang ZQ, Liu LJ, et al. Effect of cadmium on the rice yield and grain quality [J]. Chin J Trop Crops, 2010, 31(1): 19-24.
- [20] 孙亚莉, 徐庆国, 贾巍. 镉胁迫对水稻的影响及其调控技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(10): 1-6.
Sun YL, Xu QG, Jia W. Advance in cadmium stress on rice and its regulation and control technology [J]. Chin Agric Sci Bull, 2017, 33(10): 1-6.
- [21] 孙聪, 陈世宝, 宋文恩, 等. 不同品种水稻对土壤镉的富集特征及敏感性分析(SSD)[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2384-2394.
Sun C, Chen SB, Song WE, et al. Accumulation characteristics of cadmium by rice cultivars in soils and its species sensitivity distribution [J]. Sci Agric Sin, 2014, 47(12): 2384-2394.
- [22] 陈院华, 李建国, 杨涛, 等. 水稻品种镉积累特征及相关性研究[J]. 江西农业学报, 2017, 29(9): 10-14.
Chen YH, Li JG, Yang T, et al. Research on accumulation characteristic and correlation of cadmium in various rice varieties [J]. Acta Agric Jiangxi, 2017, 29(9): 10-14.
- [23] 叶秋明, 李军, 黄元财, 等. 15 个水稻品种对镉的积累特性[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(8): 1156-1159.
Ye QM, Li J, Huang YC, et al. Characteristics of 15 rice varieties on cadmium accumulation [J]. J Zhejiang Agric Sci, 2015, 56(8): 1156-1159.
- [24] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028-1033.
Cai QL, Lin DS, Wang G, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars [J]. J Agro-Environ Sci, 2016, 35(6): 1028-1033.
- [25] GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
GB 2762-2017 National food safety standard-Maximum content of contaminants in food [S].
- [26] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湖北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 410-420.
Jiang YJ, Hu XF, Shu Y, et al. Accumulation of heavy metals in the soil-rice system and assessment of dietary safety of the rice produced in

- the paddy fields—A case study of a town in the northern part of Hunan province [J]. *Acta Pedol Sin*, 2017, 54(2): 410–420.
- [27] 陈京都, 何理, 林志成, 等. 不同生育期类型水稻对镉积累的研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(3): 390–393.
Chen JD, He L, Lin ZC, *et al*. Cd accumulation in japonica rice relative to growth type [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2013, 29(3): 390–393.
- [28] 范中亮, 季辉, 杨菲, 等. 不同土壤类型下杂交水稻地上部器官对重金属镉和铅的富集特征[J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(2): 183–188.
Fan ZL, Ji H, Yang F, *et al*. Accumulation characteristics of cadmium and lead in aboveground organs of indica hybrid rice as affected by different soil types [J]. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(2): 183–188.
- [29] 王刚, 孙梦飞, 钟雪梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种镉的累积与产量差异比较[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(17): 76–81.
Wang G, Sun MF, Zhong XM, *et al*. Cadmium accumulation and yield difference of different rice varieties under cadmium stress [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2017, 33(17): 76–81.
- [30] 王小玲, 刘腾云, 幸学俊, 等. 水稻对土壤重金属元素富集差异及农艺调控措施研究进展[J]. *江西科学*, 2016, 34(3): 311–315.
Wang XL, Liu TY, Xing XJ, *et al*. A review of the differential of accumulation of soil heavy metals and agronomic measures in rice [J]. *Jiangxi Sci*, 2016, 34(3): 311–315.
- [31] 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1918–1925.
Wang MM, He MY, Su DC. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains [J]. *Environ Sci*, 2018, 39(4): 1918–1925.
- [32] 黄宇, 廖敏, 叶照金, 等. 两种低镉积累水稻镉含量与土壤镉的剂量-效应关系及调控[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(8): 748–754.
Huang Y, Liao M, Ye ZJ, *et al*. Cd concentrations in two low Cd accumulating varieties of rice and their relationships with soil cd content and their regulation under field conditions [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2017, 33(8): 748–754.
- [33] 潘杨, 赵玉杰, 周其文, 等. 南方稻区土壤 pH 变化对稻米吸收镉的影响[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(16): 235–238.
Pan Y, Zhao YJ, Zhou QW, *et al*. Influence of soil pH on cadmium absorption by rice in main rice production region of south China [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2015, 43(16): 235–238.
- [34] 王凯, 徐世龙, 杨远柱. 水稻镉吸收与转运机理研究进展[J]. *作物研究*, 2014, 28(8): 926–929.
Wang K, Xu SL, Yang YZ. Research progress on mechanism of cadmium absorption and transport in rice [J]. *Crop Res*, 2014, 28(8): 926–929.
- [35] 孙国红, 梁学峰, 徐应明, 等. 铅镉在土壤-青菜系统吸收累积的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(5): 1–6.
Sun GH, Liang XF, Xu YM, *et al*. Numerical simulation of lead and cadmium transfer and accumulation in soil-rape system [J]. *J Saf Environ*, 2010, 10(5): 1–6.
- [36] 王一志, 曹雪莹, 谭长银, 等. 不同土壤 pH 对红壤稻田镉形态及水稻镉积累的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2017, 40(1): 10–16.
Wang YZ, Cao XY, Tan CY, *et al*. Effects of different soil pH on cadmium fractions and cadmium accumulation in rice [J]. *J Nat Sci Human Normal Univ*, 2017, 40(1): 10–16.
- [37] 杨定清, 严俊, 雷绍荣, 等. 稻米重金属含量预警方法研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(3): 124–127.
Yang DQ, Yan J, Lei SR, *et al*. Study on early warning method of cadmium content in rice [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, 32(3): 124–127.
- [38] 刘兰英, 涂杰峰, 吕新, 等. 福建省不同水稻品种稻米镉积累及健康风险评估[J]. *福建农业科技*, 2018, (5): 1–6.
Liu LY, Tu JF, Lv X, *et al*. Cadmium accumulation and health risk assessment of different rice varieties in Fujian province [J]. *Fujian Agric Sci Technol*, 2018, (5): 1–6.
- [39] 周静, 孟桂元, 马国辉, 等. 镉胁迫对超级稻生长及稻米镉积累特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(8): 3191–3198.
Zhou J, Meng GY, Ma GH, *et al*. Effects of Cd stress on growth and Cd accumulation in super hybrid rice [J]. *Mol Plant Breed*, 2017, 15(8): 3191–3198.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



殷萍, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全检测技术研究。
E-mail: jasly78@163.com。