

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240717001

2020—2023 年海南省稻谷中镉和无机砷 污染状况评价

符杏夏¹, 毛海梅¹, 陈求欢¹, 吴毓炜^{1*}, 唐闻宁^{1*}, 吴春晓¹, 黄泽蓝¹,
黄庆柏¹, 林琼华², 陈治萃³

(1. 海南省检验检测研究院, 海口 570302; 2. 海口市粮油产品质量监测站, 海口 570105;
3. 海南医科大学热带医学院, 海口 571199)

摘 要: **目的** 调查分析海南省大部分市县稻谷镉和无机砷含量, 评估其污染状况。**方法** 采集 2020—2023 年海南省 14 个市县总共 351 份稻谷样品, 将稻谷脱壳制成糙米粉, 采用石墨炉原子吸收光谱法、液相色谱-原子荧光光谱法(liquid chromatography-atomic fluorescence spectroscopy, LC-AFS)分别测量镉、无机砷的含量, 采用单因子污染指数和内罗梅综合指数对稻谷中镉、无机砷污染程度进行评价。**结果** 2020—2023 年海南省稻谷中镉的检出值均没有超出国家限值, 但是在此期间呈现出逐年升高的趋势, 镉的平均值由 0.046 mg/kg 升高至 0.092 mg/kg; 2020—2023 年稻谷样品中无机砷的超标率分别为 4.4%、5.2%、4.0%、5.6%, 平均值范围为 0.15~0.19 mg/kg。稻谷的镉单因子污染指数 $P_{98.3}$ 等于 0.7, 处于优良水平, 综合污染指数小于 0.7, 污染程度处于安全水平。**结论** 整体来看海南区内稻谷镉和无机砷污染状况保持在一个合理范围内, 但单项无机砷已经出现个别污染的情况, 需保持持续关注。

关键词: 海南稻谷; 镉; 无机砷; 污染状况评价

Evaluation of cadmium and inorganic arsenic pollution in rice in Hainan Province from 2020 to 2023

FU Xing-Xia¹, MAO Hai-Mei¹, CHEN Qiu-Huan¹, WU Yu-Wei^{1*}, TANG Wen-Ning^{1*},
WU Chun-Xiao¹, HUANG Ze-Lan¹, HUANG Qing-Bai¹, LIN Qiong-Hua², CHEN Zhi-Cui³

(1. Hainan Academy of Inspection and Testing, Haikou 570302, China; 2. Haikou Grain and Oil Product Quality
Monitoring Station, Haikou 570105, China 3. Tropical Medical College of Hainan Medical University,
Haikou 571199, China)

ABSTRACT: Objective To investigate and analyze the content of cadmium and inorganic arsenic in most cities and counties in Hainan Province, and evaluate their pollution. **Methods** A total of 351 rice samples were collected from 14 cities and counties in Hainan Province from 2020 to 2023, and brown rice flour was made from shelling rice.

*通信作者: 吴毓炜, 正高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测以及实验室质量管理与质量控制。E-mail: hnwuyuwe@126.com
唐闻宁, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测以及实验室质量管理与质量控制。E-mail: 930246361@qq.com

*Corresponding author: WU Yu-Wei, Professor, Hainan Academy of Inspection and Testing, Haikou 570302, China. E-mail: hnwuyuwe@126.com

TANG Wen-Ning, Senior Engineer, Hainan Academy of Inspection and Testing, Haikou 570302, China. E-mail: 930246361@qq.com

The content of cadmium and inorganic arsenic was measured by graphite furnace atomic absorption spectroscopy and liquid chromatography-atomic fluorescence spectroscopy (LC-AFS) respectively, the pollution degree of cadmium and inorganic arsenic in rice was evaluated by single factor pollution index and comprehensive index of Nemerow.

Results From 2020 to 2023, the detected value of cadmium in rice in Hainan Province did not exceed the national limit, but showed an increasing trend during this period. The average value of cadmium rose from 0.046 mg/kg to 0.092 mg/kg; the excess rate of inorganic arsenic in rice samples from 2020 to 2023 was 4.4%, 5.2%, 4.0% and 5.6% respectively, and the average range was 0.15–0.19 mg/kg. The cadmium single-factor pollution index of rice was less than 0.7, which was at an excellent level, the comprehensive pollution index was less than 0.7, and the degree of pollution was at a safe level. **Conclusion** On the whole, the cadmium and inorganic arsenic pollution of rice in Hainan should be kept within a reasonable range, but individual inorganic arsenic pollution has occurred, which needs continuous attention.

KEY WORDS: Hainan rice; cadmium; inorganic arsenic; pollution assessment

0 引言

稻谷作为我国产量最大的粮食作物,主要含碳水化合物、蛋白质等营养物质。近年来,随着环境的污染以及农药、兽药、杀虫剂等大量使用,再加上重金属有蓄积性强的特点,能通过各种途径(水、大气、土壤),被水稻吸收累积,使得稻谷受到重金属如镉、砷的污染,长期摄入会损害皮肤、引起慢性肝脏病变,对人类身体健康存在潜在的威胁^[1-2]。镉和无机砷含量作为评价水稻被污染程度的重要指标,水稻在自身生长过程中可通过根部吸收农田中的镉,随着运输向顶部迁移,最终镉在稻谷颗粒中富集,造成稻谷镉污染^[3]。水稻对不同重金属的富集能力也有所不同,研究发现,水稻对镉的富集能力最强,最低是砷。稻谷中砷主要有无机砷和有机砷两种形式,不同形态的砷毒性差异各不相同,一般认为其毒性大小为 As^{3+} (亚砷酸盐) $>\text{As}^{5+}$ (砷酸盐) $>$ 一甲基砷酸(monomethylarsonic acid, MMA)(一甲基砷酸) $>$ 二甲基砷酸(dimethylarsinic acid, DMA)(二甲砷酸)^[4-6]。

研究表明稻田中土壤重金属污染的情况层出不穷,例如贵州省典型城市周边水稻种植区的土壤和稻米中镉、汞、砷、铅和铬的超标率较高^[7];湖南省某县稻田土壤受到一定程度的重金属污染,总体处于轻微污染水平,其中镉是该农田生态风险的主要来源^[8]。同时相关研究表明,琼中农产品产地土壤中镉、砷含量较高,表明该地区土壤受到一定程度的污染^[9]。海南岛农用地土壤中镉、铬、铅和砷的平均含量均未超过国家环境质量二级标准,但局部区域仍存在一定的污染风险^[10]。

目前,检测重金属镉主要运用原子吸收光谱法以及电感耦合等离子体质谱法,检测无机砷主要涉及到液相色谱-原子荧光联用法以及液相-电感耦合等离子体质谱联用法,由于涉及电感耦合等离子体质谱法运行期间耗能高的问题且无机砷测试需要长时间的仪器运行,因此对于以上

两种重金属元素,目前实验室比较通用的是原子吸收光谱法、液相色谱-原子荧光联用法。

稻谷是海南省最主要的经济农作物,将其加工成大米后是海南人餐桌上每餐的碳水提供者,为了解海南各稻谷中镉和无机砷的污染状况,本研究采集了 2020—2023 年(上半年)海南省 14 个市县 351 份稻谷样品进行检测分析,依据判定标准 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》镉和无机砷限量值均为 0.2 mg/kg,并根据镉和无机砷的污染状况暴露水平,可以更好地了解海南省稻谷的安全风险,对保障海南省稻谷的安全生产具有实际指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料

稻谷样品选自白沙、临高、陵水、儋州、屯昌、五指山、东方等共 14 个市县。由抽样人员从粮库、农户等地方按照 GB/T 5491—1985《粮食、油料检验 扦样、分样法材料与与方法》进行采样,保证采样的均匀性,每次采样数量为 10 kg,平均分装成两份,每份 5 kg,一份为备用样,一份为待检测样品。采集好的样品密封于样品袋中,黑色塑料膜包裹,于样品室室温下保存。

1.2 试剂与仪器

镉标准溶液(1000 $\mu\text{g/mL}$, GSB 04-1721-2004, 国家有色金属研究院); As^{3+} 标准溶液(T2-AS714976)、 As^{5+} 标准溶液(S2-AS707236) (1000 $\mu\text{g/mL}$, 上海安谱实验科技有限公司); 硝酸(优级纯, 美国 Fisher Chemical 公司); 硼氢化钾(优级纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 高氯酸、盐酸(优级纯, 广州化学试剂厂); 氢氧化钾(优级纯)、甲酸、磷酸氢二铵(分析纯)(国药集团试剂有限公司); 甲醇(色谱纯, 德国默克公司); 阴离子交换柱(汉密尔顿公司)。

AA240Z 石墨炉原子吸收光谱仪(美国 Varian 技术中

国有限公司); MD5576 微波消解仪(美国 CEM 培安公司); VB24UP 赶酸器(北京莱伯泰科仪器有限公司); XS205DU 电子分析天平(精度 0.001 g, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司); JLG-II 砻谷机(中储粮成都粮食储藏科学研究所); AFS 933-SA-50 液相色谱-原子荧光光谱联用仪(北京吉天仪器有限公司); DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); 3K15 离心机(德国 Sigma 公司); BLH-5601 锤式旋风磨(浙江伯利恒仪器设备有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将稻谷按照 GB/T 5491—1985 分样, 称取混合均匀的稻谷样品 200 g, 通过砻谷机脱壳制成糙米混匀, 脱壳的糙米用旋风磨粉碎, 需注意实验室旋风磨使用过程中会发热, 保证实验室温度的情况下少量多次的往旋风磨中添加样品, 磨成粉的样品过 40 目筛之后该糙米粉作为检验待测样品, 干燥器中储存备用。

1.3.2 样品中镉的测定

(1)样品检测

按照 GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》中的石墨炉原子吸收光谱法对试样采用微波消解, 微波消解程序见表 1, 同步处理样品空白, 上机检测并记录相关数据。配制 5 个质量浓度镉标准溶液, 质量浓度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 μg/L。

表 1 稻谷试样微波消解程序

Table 1 Microwave digestion program for rice samples

步骤	设定温度/℃	升温时间/min	恒温时间/min
1	120	5	5
2	160	5	10
3	180	5	10

(2)结果计算

按 GB 5009.15—2014 中的式(1)计算。

$$X = \frac{(c_1 - c_0) \times V}{m \times 1000} \quad (1)$$

式中, X 为试样中镉含量, mg/kg; c_1 为试样消化液中镉含量, ng/mL; c_0 为空白液中镉含量, ng/mL; V 为试样消化液定容总体积, mL; m 为试样质量或体积, g; 1000 为换算系数。

1.3.3 样品中无机砷的测定

(1)样品检测

按照 GB 5009.11—2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》中的液相色谱-原子荧光光谱法对样品进行前处理, 同步做样品空白处理, 上机检测并记录其相关数据^[11]。配制 5 个质量浓度的 As^{3+} 和 As^{5+} 混合标准溶液, 质量浓度分别为 10.0、20.0、30.0、40.0、50.0 μg/L。

(2)结果计算

按 GB 5009.11—2014 中式(2)计算。

$$X' = \frac{(c' - c'_0) \times V' \times 1000}{m' \times 1000 \times 1000} \quad (2)$$

式中, X' 为试样中无机砷含量, mg/kg; c' 为测定溶液中无机砷化合物质量浓度, ng/mL; c'_0 为空白溶液中无机砷化合物质量浓度, ng/mL; V' 为试样消化液体积, mL; m' 为试样质量, g; 1000 为换算系数。

1.3.4 评价方法

依据 GB 2762—2017 中限值要求: 镉、无机砷含量均小于等于 0.2 mg/kg, 评价稻谷中镉、无机砷含量是否超过国家限值标准。采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法评价稻谷中镉、无机砷含量的污染程度^[12]。

单因子污染指数法计算如公式(3):

$$P_i = C_i / S_i \quad (3)$$

式中, P_i 为稻谷中 i 污染物的单项污染指数; C_i 为稻谷中 i 污染物的实测含量平均值, mg/kg; S_i 为评价标准中 i 污染物的限值, mg/kg。

内梅罗综合污染指数法计算如公式(4):

$$P_{\text{综合}} = [(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{imax}}^2) / 2]^{1/2} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_{ave} 为大米中各重金属单因子污染指数平均值; P_{imax} 为大米中各重金属单项污染指数中最大值。 P_i 及 $P_{\text{综合}}$ 分级见表 2。

污染指数常用平均值、中位数、较高的百分位数 P_{90} 和 P_{95} 来表示, P_{90} 和 P_{95} 分别表示第 90 百分位数和第 95 百分位数的污染指数, 反映在高百分位数的污染状况^[13]。

1.4 数据处理

采用 WPS Office 2024 对稻谷中镉、无机砷进行数据处理和膳食风险评估, 以及处理相关数据的制表与绘图。对于每一批次的样品进行重复测试 3 次, 取平均值进行汇总。

表 2 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数分级

Table 2 Grade of the single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index

单因子污染指数(P_i)	污染程度分级	综合污染指数($P_{\text{综合}}$)	污染程度分级
$P_i \leq 0.7$	优良	$P_{\text{综合}} \leq 0.7$	安全
$0.7 < P_i \leq 1.0$	安全	$0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1.0$	警戒线
$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	$1.0 < P_{\text{综合}} \leq 2.0$	轻度污染
$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	$2.0 < P_{\text{综合}} \leq 3.0$	中度污染
$P_i > 3.0$	重度污染	$P_{\text{综合}} > 3.0$	重度污染

注: P 越大, 表明受到的重金属污染越严重。

2 结果与分析

2.1 线性关系

5 个浓度镉标准溶液,以质量浓度为横坐标,吸光值为纵坐标,制得曲线如图 1 所示,As³⁺与 As⁵⁺混合标准溶液 5 个浓度与其对应的峰面积绘制成标准工作曲线的线性方程及相关系数如表 3,结果表明方法的标准曲线线性关系良好。

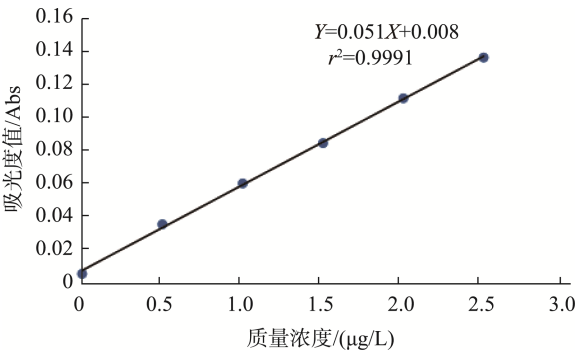


图 1 镉标准曲线
Fig.1 Standard curve of cadmium

表 3 线性方程和相关系数
Table 3 Linear equation and correlation coefficient

项目名称	线性方程	相关系数
As ³⁺ 标准曲线	Y=3815.0X-3246.1	0.9990
As ⁵⁺ 标准曲线	Y=2369.8X-1405.4	0.9992

2.2 精密度和准确度

以镉含量为(0.1690±0.0015) mg/kg 的糙米粉标准物

质 GBW(E)100378 进行 6 次平行测定,其结果见表 4,对标准物质 6 次平行测定的相对标准偏差为 1.8%,测得平均值为 0.168 mg/kg,表明检测镉实验方法的精密度和准确度较好。

对同一份稻谷糙米试样进行 6 次平行测定,并向其样品中加入 0.20 mg/kg 的无机砷混合标准溶液(As³⁺与 As⁵⁺),结果见表 5,对稻谷试样 6 次平行测定的相对标准偏差为 7.8%,无机砷(As³⁺与 As⁵⁺)平均实际加标量为 0.18 mg/kg,加标回收率为 90%,表明检测无机砷实验方法的精密度和准确度良好。

2.3 检测质量控制

检测过程中采取平行样、加标回收以及使用有证标准物质进行质量控制,其中平行样品镉的误差范围为 1%~5%,无机砷的误差范围为 1%~10%。对于超出标准限值的样品采用仪器比对(电感耦合等离子体质谱法与形态分析仪比对、电感耦合等离子体质谱法与原子吸收光谱仪比对)以及人员比对等方式确认实验数据的准确性,以上质控方法在每一批次样品中实施,保证测定的镉、无机砷含量准确可靠^[14-16]。

2.4 稻谷中镉、无机砷的检测结果分析

综合 2020—2023 年共 4 年的检测数据,每组数据均在重复条件下测定,每组数据的绝对差值不超过算术平均值的 10%,不同年份稻谷中镉和无机砷含量检测结果详见表 6。稻谷中镉含量的合格率为 100%,在测定的 351 份样品中无机砷最大值为 0.40 mg/kg,为标准限值的 2 倍。在 2020—2023 年期间,无机砷在 2023 年的超标率最高为 5.6%。在此期间,镉、无机砷的均值含量呈现每年递增的情况,无机砷每年的平均值均大于镉平均值。351 个样品中有 17 个样品的无机砷超出国家限值,不合格率为 4.8%。

表 4 镉的精密度和准确度
Table 4 Precisions and accuracies of cadmium

平行测定次数	1	2	3	4	5	6
镉含量/(mg/kg)	0.164	0.172	0.165	0.170	0.168	0.168
平均值/(mg/kg)	0.168					
相对标准偏差/%	1.8					
回收率/%	99.4					

表 5 无机砷的精密度与准确度
Table 5 Precisions and accuracies of inorganic arsenic

样品类别	实验结果/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	相对标准偏差/%	回收率/%
实验样品	0.180、0.190、0.200、0.180、0.170、0.210	0.189	7.8	90
加标平行样	0.367、0.369、0.371	0.369	0.5	

表 6 2020—2023 年海南省稻谷中镉和无机砷检测结果
Table 6 Results of cadmium and inorganic arsenic detection in rice in Hainan from 2020 to 2023

年份	样品数 /个	镉				无机砷			
		含量范围 /(mg/kg)	平均值 /(mg/kg)	超标数 /个	超标率 /%	含量范围 /(mg/kg)	平均值 /(mg/kg)	超标数 /个	超标率 /%
2020	90	ND~0.14	0.046	0	0.0	0.10~0.32	0.15	4	4.4
2021	115	ND~0.18	0.072	0	0.0	ND~0.40	0.16	6	5.2
2022	75	0.01~0.19	0.080	0	0.0	ND~0.28	0.18	3	4.0
2023	71	0.02~0.19	0.092	0	0.0	0.10~0.30	0.19	4	5.6

注: ND 代表未检出, 表示其检测值含量范围在检出限以下。

2.5 稻谷中镉、无机砷污染状况评价

2.5.1 稻谷中镉、无机砷单项评价

由表 7 可见, 稻谷的镉单因子污染指数 $P_{98.3}$ 等于 0.70, 处于优良水平。无机砷的单因子污染指数含量在安全范围内, 但是出现个别样品处于轻度污染范围的情况。

2.5.2 稻谷中镉、无机砷含量综合评价

在以上单因子评价的基础上, 采用内罗梅综合污染指数进行综合评价, 结果见表 8。在 351 个样品中, 综合评价为安全、处于清洁水平的样品 334 件, 占总数的 95.2%, 处于尚清洁水平的样品 15 件, 占总数的 4.2%, 有两个样品存在轻度污染的状态。综合污染指数小于 0.7, 污染程度处于安全水平。

表 7 稻谷中镉、无机砷含量与单因子污染指数
Table 7 Cadmium and inorganic arsenic content in rice and single factor pollution index

污染物	镉	无机砷
检测含量范围/(mg/kg)	ND~0.19	ND~0.40
污染指数范围/(mg/kg)	ND~0.95	ND~2.0
平均值/(mg/kg)	0.072	0.17
中位数/(mg/kg)	0.084	0.16
最大值	0.19	0.40
P_{90} /(mg/kg)	0.13	0.18
P_{95} /(mg/kg)	0.14	0.19
$P_{98.3}$ /(mg/kg)	0.14	0.20
P_{90} 污染指数	0.65	0.90
P_{95} 污染指数	0.70	0.95
$P_{98.3}$ 污染指数	0.70	1.00

表 8 稻谷中镉与无机砷污染综合评价
Table 8 Comprehensive evaluation of cadmium and inorganic arsenic pollution in rice

$P_{\text{综合}}$ 范围	P_N 平均	P_{N90}	P_{N95}	$P_N \leq 0.7$ 样品量/%	$0.7 < P_N \leq 1.0$ 样品量/%	$1.0 < P_N \leq 2.0$ 样品量/%
0.14~0.43	0.28	0.30	0.36	95.2 (334/351)	4.2 (15/351)	0.6 (2/351)

3 结论与讨论

本研究共检测了 2020—2023 年(2023 年为上半年)共计 351 份样品, 按照国家标准中规定的限量进行比较。分析结果显示, 镉含量均未超过国家规定的限值, 整体的含量范围是 ND(未检出)~0.19 mg/kg, 超标率为 0%, 但其含量范围在逐年增加。无机砷整体的含量范围是 ND(未检出)~0.40 mg/kg, 这期间均有不同程度的样品超出国家限值的情况。通过污染指数进行综合评价, 稻谷中镉、无机砷 P_{95} 处于安全水平, 可以放心食用。综合以上研究成果, 海南地区内粮库稻谷中镉、无机砷重金属污染处于较低水平。

关于无机砷的分布, 有研究表明稻谷及其制品中无机砷含量的高低按照“稻谷>糙米>大米”进行分布, 无机砷主要集中在糙米皮层中^[17-18]。海南的米饭文化具有丰富的地域特色和深厚的历史背景, 通常将稻谷精加工成精米

食用, 提高稻谷加工精度后, 无机砷含量可减少 66.6%, 这在一定程度上避免了重金属无机砷的摄入, 保障粮食安全^[19-21]。新版 GB 2762—2022 明确指出, 稻谷(以糙米计)无机砷限量值由原来的 0.2 mg/kg 调整为 0.35 mg/kg, 在这标准限值的修改下, 稻谷中无机砷的污染水平由原先的污染指数安全级别变换为优良级别, 而大米中的无机砷限量仍保持在 0.2 mg/kg, 反映了加工过程中可以去除部分稻谷中砷的事实。

这一变化说明制定标准的委员会充分考虑过该污染水平的研究以及影响。

本研究采用石墨炉原子吸收光谱法和液相色谱-原子荧光光谱法对海南省稻谷中镉和无机砷的污染情况进行了调查评价^[22]。逐年检测稻谷中的镉以及无机砷含量不同程度的变化, 说明重金属有蓄积性强的特点, 能通过各种途径(水、大气、土壤), 从而被水稻吸收在体内累积^[23-25]。建议加强监测海南各产地大米中镉和无机砷的含量, 降低

海南省局部地区成人的大米镉、无机砷的膳食暴露风险。为应对稻谷重金属污染问题,研究者们提出了多种检测和治理方法。如通过施用石灰等方法可以降低稻谷中镉的含量。重金属污染不仅影响当前的农业生产,还可能对未来的农业可持续发展造成不利影响^[26-27]。因此为了保障稻谷安全和人体健康,需要采取综合措施,包括改进农业生产实践、选择低重金属积累的水稻品种、实施有效的土壤修复和管理策略等^[28-29]。通过研究稻谷重金属污染,可以探索出更加环保和可持续的农业实践方法^[30]。

参考文献

- [1] 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(4): 331-338.
ZHONG WG, YANG J, CHEN ZD, *et al.* Differences in the accumulation of soil heavy metal elements Pb, Cd, Hg and As by rice varieties and their organs [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2006(4): 331-338.
- [2] 王冰, 邵爱梅. 稻谷中 6 种重金属元素的含量分析[J]. 医药前沿, 2020, 10(8): 255-256.
WANG B, SHAO AIM. Analysis of the content of 6 heavy metal elements in rice [J]. Pharm Front, 2020, 10(8): 255-256.
- [3] 房芳, 宁晖, 应美蓉, 等. 稻谷在加工过程中无机砷含量的分布情况[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2093-2097.
FANG F, NING H, YING MR, *et al.* Distribution of inorganic arsenic content in rice processing [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(6): 2093-2097.
- [4] 向西. 稻谷中总砷与无机砷含量关系分析[J]. 食品安全导刊, 2020(12): 112-114.
XIANG X. Analysis of the relationship between total arsenic and inorganic arsenic content in rice [J]. Chin Food Saf Magaz, 2020(12): 112-114.
- [5] 卓秀英. 广东省 M 市土壤-水稻系统重金属污染评价[J]. 广州化工, 2024, 52(13): 112-113, 132.
ZHUO XY. Evaluation of heavy metal pollution in soil-rice system in M City, Guangdong Province [J]. Guangzhou Chem, 2024, 52(13): 112-113, 132.
- [6] 彭海亮, 黄冬, 杨永隆. 电感耦合等离子体质谱法和液相色谱-原子荧光联用法分析广西籼稻谷中砷含量的分布[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2105-2110.
PENG HL, HUANG D, YANG YL. Inductively coupled plasma mass spectrometry and liquid chromatography-atomic fluorescence analysis of the distribution of arsenic content in Indica rice in Guangxi [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(6): 2105-2110.
- [7] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 198-205, 324.
AO M, CHAI GQ, FAN CW, *et al.* Risk assessment and source analysis of potential pollution of heavy metals in rice field soil and rice [J]. J Agric Eng, 2019, 35(6): 198-205, 324.
- [8] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 573-582.
MU L, WANG YH, XU YP, *et al.* Analysis of the characteristics and sources of heavy metal pollution in the soil of rice fields in a county in Hunan Province [J]. J Agric Environ Sci, 2019, 38(3): 573-582.
- [9] 钟惠颜, 黄巧明. 海南省琼中农产品产地土壤重金属污染普查分析[J]. 农业科学, 2018, 8(8): 933-941.
ZHONG HY, HUANG QM. Census and analysis of soil heavy metal pollution in the production area of agricultural products in Qiongzong, Hainan Province [J]. Agric Sci, 2018, 8(8): 933-941.
- [10] 郝丽虹, 张冬明, 吴鹏飞, 等. 海南岛农用地土壤重金属含量的空间分布[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 230-234.
HAO LH, ZHANG DM, WU PF, *et al.* Spatial distribution of soil heavy metal content in agricultural land in Hainan Island [J]. Chin J Ecoll Agric, 2009, 17(2): 230-234.
- [11] 刘冰. 液相色谱-原子荧光光谱法测定稻谷中无机砷有关问题的探讨[J]. 粮食加工, 2017, 42(3): 71-74.
LIU B. Discussion on the determination of inorganic arsenic in rice by liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry [J]. Grain Proc, 2017, 42(3): 71-74.
- [12] 黄飞飞, 王瑛, 张宁. 苏州市地产大米重金属污染状况及人群膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 9039-9045.
HUANG FF, WANG Y, ZHANG N, *et al.* Suzhou real estate rice heavy metal pollution status and population dietary exposure risk assessment [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(23): 9039-9045.
- [13] 石春红, 曹美萍, 胡桂霞. 松江区消费环节大米重金属污染状况及安全评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7240-7244.
SHI CH, CAO MP, HU GX, *et al.* Heavy metal pollution status and safety evaluation of rice in the consumption link in Songjiang District [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(21): 7240-7244.
- [14] 王芹, 徐瑞, 袁爱菊, 等. 淮安市 5 个县稻田土壤-稻谷系统中重金属污染水平及富集特征[J]. 分析仪器, 2023(6): 72-77.
WANG Q, XU R, YUAN AJ, *et al.* The level of heavy metal pollution and enrichment characteristics in the soil-rice system of rice fields in 5 counties in Huai'an City [J]. Anal Instrum, 2023(6): 72-77.
- [15] 黄艳桃, 陈清德, 覃梦琳, 等. 2017—2019 年广西某市大米及稻谷的重金属污染调查[J]. 职业与健康, 2020, 36(16): 2210-2213.
HUANG YT, CHEN QD, QIN ML, *et al.* Heavy metal pollution survey of rice and rice in a city in Guangxi from 2017 to 2019 [J]. Occup Health, 2020, 36(16): 2210-2213.
- [16] 陈娅娅, 林亲录, 罗非君. 稻谷中重金属检测研究的进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(4): 1-4.
CHEN YY, LIN QL, LUO FJ. Progress in the detection of heavy metals in rice [J]. Cere Oils, 2017, 30(4): 1-4.
- [17] 王婧, 吴静, 程梦蓉, 等. 稻谷中无机砷含量的测定及分布规律探讨[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(3): 68-72.
WANG J, WU J, CHENG MR, *et al.* Determination and distribution of inorganic arsenic content in rice [J]. Cere Food Ind, 2023, 30(3): 68-72.
- [18] 刘婧, 安晓宁, 王艺诺, 等. 我国与 CAC 关于稻谷、糙米和大米质量安全标准对比分析[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 28-33.
LIU J, AN XN, WANG YN, *et al.* Comparison and analysis of quality and safety standards of rice, brown rice and rice between China and CAC [J]. Chin Rice, 2023, 29(3): 28-33.
- [19] 金曹贞, 孙灿, 郝晓洁, 等. 不同脱壳研磨方式对稻谷重金属含量的影响研究[J]. 上海农业科技, 2022(6): 30-32, 39.
JIN CZ, SUN C, HAO XJ, *et al.* Study on the influence of different shelling grinding methods on the heavy metal content of rice [J]. Shanghai Agric Sci Technol, 2022(6): 30-32, 39.

- [20] 丁哲慧, 鞠兴荣, 袁建, 等. 加工精度对稻谷籽粒中重金属含量的影响[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(2): 21–23.
DING ZH, JU XR, YUAN J, *et al.* Effect of processing accuracy on the content of heavy metals in rice grains [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2016, 24(2): 21–23
- [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.
NI XY, XU YX, MEI G, *et al.* Study on the distribution of major heavy metals in contaminated rice grains [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2017, 32(1): 7–11.
- [22] 陈刘浦, 贝亦江, 线婷, 等. 基于微波消解-电感耦合等离子体质谱法检测稻田综合种养稻谷的重金属元素[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(15): 124–127.
CHEN LP, BEI YJ, XIAN T, *et al.* Detection of heavy metal elements in rice fields based on microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Anhui Agronomol Report*, 2019, 25(15): 124–127.
- [23] 王佳雅, 尚艳娥, 张晓, 等. 稻谷中无机砷和总汞分布规律研究[J]. 粮食科技与经济, 2016, 41(3): 46–47, 49.
WANG JY, SHANG YE, ZHANG X, *et al.* Study on the distribution of inorganic arsenic and total mercury in rice [J]. *Food Technol Econ*, 2016, 41(3): 46–47, 49.
- [24] 乔丽娜. 辽宁省地产稻谷卫生安全现状的分析[J]. 粮食加工, 2024, 49(4): 68–70.
QIAO LN. Analysis of the current situation of rice health and safety in Liaoning Province [J]. *Grain Proc*, 2024, 49(4): 68–70.
- [25] 戴志英, 杨清华, 郭新颖, 等. 南通地区部分稻谷中铅、镉、铬及无机砷的污染状况分析[J]. 计量与测试技术, 2024, 51(2): 15–17.
DAI ZY, YANG QH, GUO XY, *et al.* Analysis of the pollution status of lead, cadmium, chromium and inorganic arsenic in some rice in Nantong Area [J]. *Measurem Test Technol*, 2024, 51(2): 15–17.
- [26] 田威, 李娜, 倪才英, 等. 江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 331–339.
TIAN W, LI N, NI CY, *et al.* Soil and rice heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation in the rice fishing system of Jiangxi Province [J]. *J Ecotoxicol*, 2021, 16(3): 331–339.
- [27] 任婷, 钟文思, 赵丽娇, 等. 四川省Y县稻谷和农田土壤中重金属含量测定及致癌风险评价[J]. 化学试剂, 2020, 42(9): 1073–1077.
REN T, ZHONG WS, ZHAO LJ, *et al.* Determination of heavy metal content and carcinogenic risk assessment in rice and farmland soil in Y County, Sichuan Province [J]. *Chem Reagent*, 2020, 42(9): 1073–1077.
- [28] 蒋欣容, 程道远, 王俊鹏, 等. 2023 年镇江市粳稻质量、品质和卫生安全分析[J]. 粮油科学与工程, 2024, 38(4): 39–41, 53.
JIANG XR, CHENG DY, WANG JP, *et al.* Analysis of the quality, quality and health and safety of japonica rice in Zhenjiang City in 2023 [J]. *Grain Oil Sci Eng*, 2024, 38(4): 39–41, 53.
- [29] 黄东荣, 聂文昌, 张旭, 等. 东阳市农田土壤和农作物重金属污染评价及相关性分析[J]. 中国农学通报, 2024, 40(17): 56–62.
HUANG DR, NI WC, ZHANG X, *et al.* Evaluation and correlation analysis of heavy metal pollution in farmland soil and crops in Dongyang City [J]. *Not Chin Agronol*, 2024, 40(17): 56–62.
- [30] 田威, 李娜, 倪才英, 等. 江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 331–339.
TIAN W, LI N, NI CY, *et al.* Characteristics and health risk evaluation of soil and rice heavy metal pollution in the rice fishing system in Jiangxi Province [J]. *J Ecotoxicol*, 2021, 16(3): 331–339.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)

作者简介

符杏夏, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: 564543423@qq.com

吴毓炜, 正高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测以及实验室质量管理与质量控制。

E-mail: hnwuyuwe@126.com

唐闻宁, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测以及实验室质量管理与质量控制。

E-mail: 930246361@qq.com