

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250206006

引用格式: 刘雪芹, 王赤华, 王红亮, 等. 2022—2023年湖北省4类市售食品重金属污染风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 310–316.

LIU XQ, WANG CH, WANG HL, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in 4 types of food in Hubei Province from 2022 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 310–316. (in Chinese with English abstract).

2022—2023年湖北省4类市售食品 重金属污染风险评价

刘雪芹, 王赤华, 王红亮*, 王芬

(黄冈市疾病预防控制中心, 黄冈 438000)

摘要: 目的 了解2022—2023年湖北省4类市售食品中5种重金属污染情况, 评估人群经食品摄入重金属所致健康风险。**方法** 2022—2023年, 在湖北省随机采集4类6种市售食品(黄豆、花生、香菇、竹荪、大米、小麦)共316份。采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)检测5种重金属含量, 采用单因子污染指数(P_i)、综合因子污染指数(P_M)分析食品污染情况。根据美国国家环保局推荐的健康风险评价模型, 以目标危害指数法(target hazard quotient, THQ)、目标致癌风险评价法(target cancer risk, TCR)评估人群经重金属暴露所致的非致癌和致癌健康风险。**结果** 食品整体合格率接近95%, 重金属中Cd检出率、超标率均为最高(100.0%、14.2%)。5种重金属检出率和超标率差异均具有统计学意义($\chi^2=179.320$ 、 21.849 , $P<0.001$)。6种食品污染等级依次为竹荪(重度)、香菇(轻度)、黄豆(安全)、花生(安全)、大米(安全)、小麦(安全)。不同地区、不同性别人群单项重金属THQ均小于1, 但综合重金属THQ均大于1, 不同地区、不同性别人群重金属致癌风险均大于 10^{-4} 。湖北地区人群膳食摄入重金属所致非致癌和致癌健康风险, 农村高于城市, 女性高于男性。非致癌健康风险主要来源于Cd和Cr, 致癌健康风险主要来源于Cr。**结论** 2022—2023年湖北省4类市售食品中食用菌类存在一定程度的污染, 尤其是竹荪为重度。居民经膳食途径摄入重金属所致的非致癌健康风险较高, 致癌风险在可接受范围内。有关部门应加强监管, 关注Cd、Cr的暴露健康风险。

关键词: 重金属; 金属污染; 风险评估

Risk assessment of heavy metal pollution in 4 types of food in Hubei Province from 2022 to 2023

LIU Xue-Qin, WANG Chi-Hua, WANG Hong-Liang*, WANG Fen

(Huanggang Center for Disease Control and Prevention, Huanggang 438000, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the pollution of 5 kinds of heavy metals in 4 types of food in Hubei Province from 2022 to 2023, and to assess the health risks caused by heavy metal intake in the population. **Methods** From

收稿日期: 2025-02-06

基金项目: 湖北省公共卫生青年拔尖人才项目(鄂卫通 2021-40 号)

第一作者: 刘雪芹(1984—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全及理化检验。E-mail: 2270345146@qq.com

*通信作者: 王红亮(1975—), 男, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全及理化检验。E-mail: 156455449@qq.com

2022 to 2023, a total of 316 samples of 4 types 6 kinds of food (soybean, peanut, mushroom, dictyophora, rice and wheat) were randomly collected in Hubei Province. The content of 5 kinds of heavy metals were detected by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), and the contamination of food was analyzed by single factor pollution index (P_i) and comprehensive factor pollution index (P_M). According to the health risk assessment model recommended by U.S. Environmental Protection Agency, the target hazard quotient (THQ) and target cancer risk assessment (TCR) were used to assess the non-carcinogenic and carcinogenic health risks caused by heavy metal exposure in the population. **Results** The overall qualified rate of food was close to 95%, the detection rate of Cd in heavy metals was the highest (100.0%, 14.2%). There were statistically significant differences in the detection rate and excess rate of the 5 kinds of heavy metals ($\chi^2=179.320, 21.849, P<0.001$). The 6 kinds of food contamination levels were dictyophora(severe), shiitake mushroom (mild), soybean (safe), peanut (safe), rice (safe), and wheat (safe). The individual heavy metal THQ of different regions and different genders was less than 1, but the comprehensive heavy metal THQ was greater than 1, and the carcinogenic risk of heavy metal in different regions and different genders was greater than 10^{-4} . In Hubei, the non-carcinogenic and carcinogenic health risks caused by dietary heavy metals intake were higher in rural areas than in urban areas, and higher in women than in men. Non-carcinogenic health risks mainly come from Cd and Cr, while carcinogenic health risks mainly come from Cr. **Conclusion** There is a certain degree of contamination of edible fungi in the four types of food sold in Hubei Province from 2022 to 2023, especially the heavy pollution of dictyophora. The non-carcinogenic health risk caused by the intake of heavy metals through dietary means is high, and the carcinogenic risk is within the acceptable range. Relevant departments should strengthen supervision and pay attention to the health risks of Cd and Cr exposure.

KEY WORDS: heavy metals; metal pollution; risk assessment

0 引言

随着我国工业化进程加快, 城市化程度不断加深, 工业三废对水源、土地的金属污染不断累积^[1]。据调查, 全国有 16%左右土地点位重金属含量检测超标^[2], 导致农作物对重金属的过度富集^[3-5]。膳食途径是人群摄入重金属的主要途径, 可达 60%~99%^[6], 重金属通过食物链逐级积累, 最终在人群引起神经系统、血液系统、消化系统、泌尿系统等多重损害, 严重威胁人体健康^[7-10]。

我国长期开展食品有害因素监测, 苏州、湖南温州等地发现大米、水生蔬菜等 Pb、Cd、As 均存在超标情况^[11-13], 西南矿区、南宁、阜阳等地谷物、黄豆重金属含量存在不同程度的超标情况, 部分样品可达国家标准限值 3.8 倍^[14-16], 可见, 食品中的重金属污染已经成为普遍问题。

湖北省作为华中地区重要农作物种植大省^[17]、全国食用菌产业大省, 其中孝感、十堰、黄冈等地已经有规模化的食用菌、花生、黄豆、大米生产集群, 因农作物生长环境易受到重金属污染^[18], 监管湖北省此 4 类食品重金属污染情况有助于保障本地甚至全国居民食品安全。谷物、豆类、食用菌类等是湖北省居民膳食的主要部分, 目前, 仅有恩施州报道食品中重金属赋存情况^[19-20], 其他地市报道较少。为了解湖北省食品重金属污染状况, 本研究对湖北省市售 4 类 6 种食品在多个环节进行随机取样, 分析 5 种

重金属(Pb、Cd、Hg、As、Cr)含量, 结合膳食消费数据, 评估重金属污染情况与健康风险, 为湖北省重点食品重金属污染风险评估、开展食品监管专项工作、指导居民选择安全膳食提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样本

依托 2022 和 2023 年湖北省食品安全风险监测工作, 在湖北省各地市州(种植地、农贸市场、商店超市、网店)随机采集黄豆、花生、食用菌、谷物样品共计 316 份, 其中黄豆 48 份、花生 108 份、食用菌 31 份(竹荪 11 份, 香菇 20 份)、谷物 129 份(大米 63 份、小麦粉 66 份)。

1.2 仪器与试剂

NexION 1000G 电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)(美国珀金埃尔默公司); M6 型微波消解仪、ME203/02 千分之一电子分析天平(瑞士梅特勒-托利多仪器公司); Milli-Q EQ 7000 超纯水系统(德国默克公司)。

多元标准溶液(编号 GNM-M321686-2013, 质量浓度 100 $\mu\text{g/mL}$)、多元内标溶液(编号 GSB 04-2826-2011, 质量浓度 10 $\mu\text{g/mL}$)(国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸(超纯级, 江苏晶瑞公司); 菠菜质控品(编号 GBW10015a GSB-6a, 中国地质科学院地球物理地球化学

勘查研究所)。

1.3 检测方法

按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》方法,采用 ICP-MS 法对 316 份样品进行 5 种重金属检测与复核。

1.4 质量控制

实验室每年参加并通过国家食品安全风险评估中心、湖北省疾病预防控制中心等食品中多元素检测能力验证。检测仪器均在检定有效期内,每批次样品均使用质控品进行质量控制,随机抽取 10% 样品复测。超标样品复检两次,取平均值上报系统。

1.5 评价方法

1.5.1 食品污染程度评价

食品中重金属限值参照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》。采用单因子污染指数法和综合因子污染指数法对食品重金属污染程度进行评价,评价标准见表 1。单因子污染指数计算见公式(1)。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: i 为某种元素; C_i 为污染物的实测值; S_i 为国家标准限值; P_i 为污染指数。综合因子污染指数计算见公式(2)。

$$P_M = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P_M 为综合因子污染指数; \bar{P} 为所评价重金属单项污染指数平均值; P_{\max} 为所评价重金属单项污染指数最大值。

表 1 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数分级标准
Table 1 Single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index classification standards

单因子污染指数(P_i)	污染程度分级	内梅罗综合污染指数(P_M)	污染程度分级
$P_i \leq 0.7$	优良	$P_M \leq 0.7$	清洁(安全)
$0.7 < P_i \leq 1.0$	安全	$0.7 < P_M \leq 1.0$	尚清洁(警戒限)
$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	$1.0 < P_M \leq 2.0$	轻度污染
$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	$2.0 < P_M \leq 3.0$	中度污染
$P_i > 3.0$	重度污染	$P_M > 3.0$	重度污染

1.5.2 人群重金属暴露值

人体重金属暴露的健康风险根据美国国家环保局(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)中推荐的“四步法”健康风险评估模型。人体每天平均重金属摄入量(acceptable daily intake, ADI)的计算见公式(3)。

$$ADI_i = \sum_{i=1}^{n=5} \frac{C_i \times m_{IR} \times t_{EF} \times t_{ED}}{t_{AT} \times m_{BW}} \quad (3)$$

式中: ADI_i 为重金属 i 的日均估计暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; C_i 为食品中重金属 i 的实测浓度, mg/kg ; m_{IR} 为食品日摄入

量, kg/d , 根据《第五次中国总膳食研究》对居民膳食消费量进行取值; t_{EF} 为暴露频率, 取值 365 d/a; t_{ED} 为持续暴露时间; t_{AT} 为平均作用时间, 取值 $t_{ED} \times 365$ d; m_{BW} 为平均体重, 根据国家卫健委《中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)》取值。具体取值见表 2。

表 2 重金属健康风险评估模型参数取值
Table 2 Parameter values of the heavy metal health risk assessment model

组别	城市	农村	男	女	平均值	
寿命/年	80.49	76.65	76.93	81.69	78.94	
体重/kg	69.2	63.3	69.6	59.0	64.3	
	豆类	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062
食品消费量/kg	食用菌类	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067
	谷物类	0.916	0.916	0.916	0.916	0.916

1.5.3 非致癌及致癌风险评估

非致癌风险评估采用目标危害指数法(target hazard quotient, THQ), 包括单项重金属 THQ 与综合重金属目标危害指数(total target hazard quotient, TTHQ), 计算见公式(4)~(5)。

$$THQ_i = \frac{ADI_i}{RfD_i} \quad (4)$$

$$TTHQ = \sum_{i=1}^{n=5} THQ_i \quad (5)$$

式中: THQ_i 为重金属 i 的非致癌健康风险值; ADI_i 为重金属 i 的日均估计暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; RfD_i 为重金属 i 的暴露参考剂量, 取值参考 US EPA, Cr、As、Cd、Hg、Pb 分别取值 0.003、0.0003、0.001、0.0003 和 0.0035 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。THQ 或 TTHQ < 1 表明暴露人群没有明显健康风险; THQ 或 TTHQ ≥ 1 表明暴露人群存在显著健康风险; THQ 或 TTHQ > 10 表明存在慢性毒性作用。THQ 值越大, 暴露人群健康风险越高。

致癌风险评估采用目标致癌风险(target cancer risk, TCR)评价法。包括单项重金属 TCR 与综合重金属目标致癌风险(total target cancer risk, TTCR), 参考 US EPA 的致癌斜率系数(cancer slope factor, CSF_i), Cr、As 分别取值 0.5 $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$ 、1.5 $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$, 计算见公式(6)~(7)。

$$TCR_i = ADI_i \times CSF_i \quad (6)$$

$$TTCR = \sum_{i=1}^{n=2} TCR_i \quad (7)$$

式中: TCR_i 为重金属 i 的致癌健康风险值; ADI_i 为重金属 i 的日均估计暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; CSF_i 为重金属 i 致癌强度指数, $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$ 。根据 US EPA 推荐的致癌风险参考值, 当 $\geq 1.00 \times 10^{-4}$ 时, 表明该重金属在该暴露途径下有致癌风险。

1.6 数据处理

采用 Excel 2010 及 SPSS 20.0 软件进行数据的统计和分析, 对率或构成比的计数资料进行比较采用 χ^2 检验, 检验水准 $\alpha=0.05$ 。对于低于检出限的数据均以检出限的半量参与统计。

2 结果与分析

2.1 食品整体重金属含量情况

316 份样品整体合格率为 94.7%。5 种重金属中 Cr 平均含量最高, 为 0.3770 mg/kg, 其次是 Cd, 平均含量为 0.1892 mg/kg, 其余重金属平均含量为 0.0077~0.0526 mg/kg。5 种重金属中 Cd 检出率最高, 达 100.0%, 其余重金属检出率依次为 Cr (88.9%)>As (79.1%)>Pb (69.3%)>Hg (21.8%), 不同重金属的检出率差异有统计学意义($\chi^2=179.320$, $P<0.001$)。5 种重金属中 Cd 超标率最高, 为 14.2%, Hg 无超标, 其余重金属超标率依次为 Pb (5.7%)>Cr (4.1%)>As (2.5%)。不同重金属的超标率差异有统计学意义($\chi^2=21.849$, $P<0.001$)。见表 3。

2.2 不同类别食品中重金属含量情况

不同重金属在不同种类食品中的含量不同, Pb 含量: 食用菌类>谷类>坚果类>豆类, 最高为 1.3205 mg/kg; Cd 含量: 食用菌类>坚果类>谷类>豆类, 为最高 5.8805 mg/kg; Hg 在所有食品中含量均较低; As 在竹荪上含量较高, 最高为 1.1075 mg/kg, 其他食品 As 含量较低; Cr 含量: 坚果类、

食用菌类>豆类>谷类, 最高为 4.3100 mg/kg。不同重金属在不同种类食品中的检出率不同, Pb 检出率: 食用菌类>坚果类>豆类、谷类, 最高为 100.0%; Cd 在所有种类食品中的检出率均为 100.0%; Hg 在大米中检出率为 100.0%, 食用菌中为 20.0%以上, 其他种类食品中未检出; As 检出率: 食用菌类>谷类、坚果类>豆类, 最高为 100.0%; Cr 检出率: 食用菌类>坚果类>豆类>谷类, 最高为 100.0%。具体见表 4。

表 3 食品整体重金属含量情况
Table 3 Overall heavy metal content in food

元素	份数	平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	检出率/%	超标率/%
Pb	316	0.0526	ND~1.3205	69.3	5.7
Cd	316	0.1892	0.0055~5.8805	100.0	14.2
Hg	316	0.0077	ND~0.0196	21.8	0.0
As	316	0.0478	ND~1.1075	79.1	2.5
Cr	316	0.3770	ND~4.3100	88.9	4.1
统计值				$\chi^2=179.320$	$\chi^2=21.849$
P				$P<0.001$	$P<0.001$

注: ND 表示未检出, 下同。

表 4 不同类别食品中重金属含量及检出率、超标率
Table 4 Content of heavy metals in different types of food, detection rate and excess rate

类型	份数	元素	平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	检出率/%	超标率/%	
豆类	黄豆	48	Pb	0.0169	ND~0.1410	45.8	0.0
			Cd	0.0082	0.0060~0.0190	100.0	0.0
			Hg	0.0015	ND	0.0	0.0
			As	0.0056	ND~0.0150	64.6	0.0
			Cr	0.1781	ND~0.6700	87.5	6.3
坚果类	花生	108	Pb	0.0583	ND~0.8200	72.2	3.7
			Cd	0.1532	0.0160~0.3510	100.0	0.0
			Hg	0.0015	ND	0.0	0.0
			As	0.0097	ND~0.0390	80.6	0.0
			Cr	0.4670	0.0450~4.3100	100.0	0.0
食用菌类	香菇	20	Pb	0.1189	0.0250~0.5400	100.0	5.0
			Cd	0.2775	0.0275~1.0901	100.0	15.0
			Hg	0.0035	ND~0.0091	20.0	0.0
			As	0.1028	ND~0.3305	90.0	0.0
			Cr	0.2336	ND~0.8065	90.0	0.0
	竹荪	11	Pb	0.4345	0.1401~1.3205	100.0	18.2
			Cd	2.8500	1.4107~5.8805	100.0	72.7
			Hg	0.0031	ND~0.0060	27.3	0.0
			As	0.4001	0.0770~1.1075	100.0	0.0
			Cr	0.6414	0.2500~1.4529	100.0	0.0
谷类	大米	63	Pb	0.0231	ND~0.0979	47.6	0.0
			Cd	0.0753	0.0065~0.1770	100.0	0.0
			Hg	0.0086	0.0030~0.0196	100.0	0.0
			As	0.1043	0.0466~0.1910	100.0	0.0
			Cr	0.0492	ND~0.1320	63.5	0.0
	小麦粉	66	Pb	0.0086	ND~0.0950	43.9	0.0
			Cd	0.0170	0.0067~0.0708	100.0	0.0
			Hg	0.0015	ND	0.0	0.0
			As	0.0089	ND~0.0865	60.6	0.0
			Cr	0.0501	ND~0.1720	93.9	0.0

2.3 不同食品 5 种重金属的贡献比

不同类别种类的食品中对不同重金属的富集能力差异显著。竹荪中 Pb、Cd 以及 As 的贡献比最高,分别为 65.8%、84.29%和 63.37%。大米中 Hg 贡献比最高为 43.65%,黄豆中铬的贡献比最高为 44.59%。花生、小麦各重金属贡献比均较低。不同食品的重金属 Pb、Cd、Hg、As、Cr 5 种重金属贡献比差异具有统计学意义 ($\chi^2=22217.731$ 、 39825.669 、 7029.533 、 20819.708 、 9646.970 , $P<0.001$)。结果见图 1。

2.4 重金属污染状况评价及健康风险评价

2.4.1 污染情况评价

单因子污染指数评价显示, Pb、Cd、As 在竹荪中的 P_i 值超标, 分别为 2.173、14.250、2.000, Cd 在花生、香菇中的 P_i 值超标为 0.766、1.388, 其余食品的 P_i 值均小于 0.7。综合污染因子评价显示, 竹荪、香菇 P_M 值分别为 10.601、1.089; 黄豆、花生、大米、小麦 P_M 值均小于 0.7, 为安全食品。结果见表 5。

2.4.2 健康风险评价

对不同地区、不同性别重金属暴露所致的非致癌健康

风险和致癌健康风险进行评估, 结果如表 6 所示。不同地区、不同性别人群 THQ 值均小于 1, 但 TTHQ 值均大于 1, 主要来源均为 Cd 和 Cr。不同地区、不同性别人群 TCR、TTCR 值均大于 1×10^{-4} , 主要来源均为 Cr。非致癌及致癌健康风险农村高于城市, 女性高于男性。

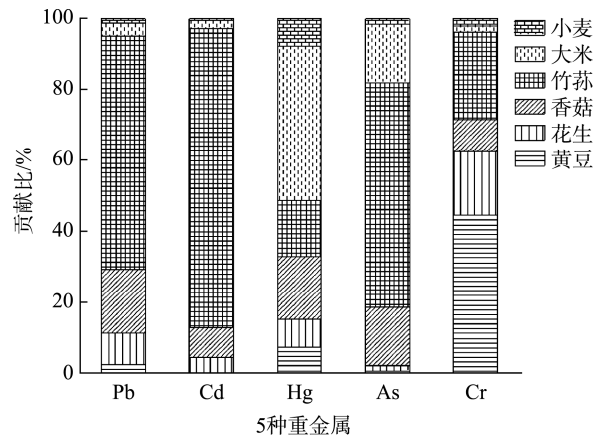


图 1 5 种重金属的贡献比

Fig.1 Contribution ratio of 5 kinds of heavy metals

表 5 6 种食品的污染情况评价
Table 5 Evaluation of contamination of 6 kinds of food

类别		单因子污染指数(P_i)					综合污染指数(P_M)	污染等级
		Pb	Cd	Hg	As	Cr		
豆类	黄豆	0.085	0.041	a	a	0.178	0.134	安全
坚果类	花生	0.292	0.766	a	a	a	0.634	安全
食用菌类	香菇	0.595	1.388	0.175	0.514	a	1.089	轻度
	竹荪	2.173	14.250	0.155	2.000	a	10.601	重度
谷类	大米	0.116	0.377	0.430	0.522	0.049	0.601	安全
	小麦	0.043	0.085	0.075	0.045	0.050	0.104	安全

注: a 代表 GB 2762—2022 未规定该类食品标准限值。

表 6 5 种重金属人群暴露非致癌和致癌风险
Table 6 Non-carcinogenic and carcinogenic risks of exposure to 5 kinds of heavy metals

组别		THQ					TTHQ	TCR		TTCR
		Pb	Cd	Hg	As	Cr		As	Cr	
地区	城市	0.047	0.532	0.032	0.305	0.638	1.554	1.37×10^{-4}	2.37×10^{-4}	1.37×10^{-4}
	农村	0.052	0.581	0.034	0.333	0.685	1.686	1.50×10^{-4}	2.45×10^{-4}	1.50×10^{-4}
性别	男	0.045	0.507	0.030	0.291	0.597	1.470	1.31×10^{-4}	2.14×10^{-4}	1.31×10^{-4}
	女	0.056	0.631	0.037	0.362	0.743	1.830	1.63×10^{-4}	2.66×10^{-4}	1.63×10^{-4}
合计		0.050	0.559	0.033	0.321	0.659	1.621	1.44×10^{-4}	2.36×10^{-4}	1.44×10^{-4}

3 讨论与结论

湖北省是鱼米之乡, 重要的食品基地, 关注湖北地区食品的重金属污染现状有利于保护市民身体健康。

2022—2023 年湖北省 4 类市售食品整体合格率接近 95%, 其中谷类、豆类、坚果类食品 5 种重金属污染程度均处于安全范围内, 而食用菌类存在轻至重度的污染, 与河南、无锡、陕西、上海、贵州等地区近些年的监测结果一致^[21-25]。监

测结果表明, Cd、As、Cr 在市售食品中的污染比较普遍, 检出率在 80%~100%, 同时 Cd 的超标率也达到 14.2%。Pb、Cd、As 对竹荪的重金属污染贡献较高。竹荪 Cd 超标报道较多^[26-29], 其高污染现状可能与其生长特性、生产流程有关, 有关部门应该积极开展竹荪食品的 Cd 污染风险防治宣传教育活动。与青岛地区调查结果相比^[30], 香菇中 Cd 污染水平有所不同, 但与刘哲等^[31]、李静等^[32]研究结果一致, 湖北省香菇对 Cd 富集程度较高, 且存在一定非致癌健康风险, 应引起关注。

监测表明, 湖北地区人群均存在 5 种重金属暴露所致的非致癌风险和致癌风险, 其中农村居民高于城市居民, 女性高于男性。TTHQ 主要来源于 Cd 和 Cr, Pb 和 Hg 贡献较低, 这与各类食品中 Cd 浓度均较高相符合。TTCR 主要来源于 Cr。湖北地区人群 Cd 和 Cr 所致的健康风险需要引起关注。

本研究也存在一些局限性, 竹荪样本的采样量不高, 可能会产生偏差; 竹荪食品的产地来源比较单一, 没能开展大范围多样本多来源的集中检测。此外, 竹荪食品在居民日常生活中食用制作前, 会进行大量冲洗, 其实际产生的健康风险可能会比本研究所评估的结论要低。在目前的国家相关标准下, 除食用菌外其他食品处于安全状况, 但仍要关注重金属非致癌风险, 建议监管部门开展食用菌专项监测工作, 保护居民身体健康。

参考文献

- [1] 刘东胜. 长江流域污水厂污泥重金属污染特征及其产品林地利用风险评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
LIU DS. Characteristics of sludge heavy metal pollution from sewage plants in the Yangtze River Basin and risk assessment of forest land utilization of its products [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
CHEN NC, ZHENG YJ, HE XF, *et al.* Analysis on the *National soil pollution survey bulletin* [J]. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] 张娟, 王明君, 郭掌珍. 朔州东部农田土壤-农作物重金属富集及健康风险评价[J]. 环境化学, 2024, 43(4): 1315-1329.
ZHANG J, WANG MJ, GUO ZZ. Heavy metal enrichment and health risk assessment in farmland and crops in eastern Shuozhou [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(4): 1315-1329.
- [4] 余飞, 张风雷, 周皎, 等. 矿区周边耕地土壤-农作物系统重金属富集特征及风险评价[J/OL]. 环境科学, 1-15. [2025-02-08]. <https://doi.org/10.13227/j.hjck.202410194>.
YU F, ZHANG FL, ZHOU J, *et al.* Heavy metal enrichment characteristics and risk assessment in soil-crop system of cultivated land around mining area [J/OL]. *Environmental Science*, 1-15. [2025-02-08]. <https://doi.org/10.13227/j.hjck.202410194>
- [5] 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 等. 重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5264-5274.
MA J, SHE ZL, WANG SL, *et al.* Cadmium health risk assessment and soil environmental base value derivation of agricultural products around coal heap in Chongqing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 44(9): 5264-5274.
- [6] 中国环境科学研究院. 典型地区居民金属环境总暴露研究报告[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
Chinese Academy of Environmental Sciences. Research report on total exposure to metal environment of residents in typical areas [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [7] 王丽慧. 蔬菜重金属污染及其防治措施研究[J]. 现代化农业, 2023(1): 37-39.
WANG LH. Research on heavy metal pollution of vegetables and its control measures [J]. *Modern Agriculture*, 2023(1): 37-39.
- [8] 郑飞, 郭欣, 郭博洋, 等. 重金属污染评估及其生物健康效应[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(9): 1264-1273.
ZHENG F, GUO X, GUO BY, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its biological health effects [J]. *Science in China: Life Sciences*, 2021, 51(9): 1264-1273.
- [9] 冉茂霞, 吴迪, 史永富, 等. 镉在水生生物中的生物累积、转化及在其他生物体内的代谢毒理学研究进展[J]. 环境化学, 2024, 43(4): 1069-1084.
RAN MX, WU D, SHI YF, *et al.* Research progress on bioaccumulation and transformation of arsenic in aquatic organisms and metabolic toxicology in other organisms [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(4): 1069-1084.
- [10] 习春红. 粮食中重金属污染的危害与防控[J]. 粮食加工, 2023, 48(3): 140-142.
XI CH. Hazard and prevention of heavy metal pollution in grain [J]. *Food Processing*, 2023, 48(3): 140-142.
- [11] 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. Heavy metal pollution in real estate rice and dietary exposure risk assessment of population in Suzhou [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(23): 9039-9045.
- [12] 黄飞飞, 张宁, 赵敏娟, 等. 2016—2018 年苏州市水生蔬菜重金属污染状况分析及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 648-654.
HUANG FF, ZHANG N, ZHAO MX, *et al.* Analysis of heavy metal pollution status and health risk assessment of aquatic vegetables in Suzhou from 2016 to 2018 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(2): 648-654.
- [13] 高四海, 蔡圆圆, 刘倩倩, 等. 温州市本地大米重金属镉污染空间分布及人群膳食暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(9): 1333-1339.
GAO SH, CAI YY, LIU QQ, *et al.* Spatial distribution and dietary exposure risk assessment of cadmium pollution in local rice in Wenzhou [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(9): 1333-1339.
- [14] 黄楚珊, 胡国成, 陈棉彪, 等. 矿区家庭谷物和豆类重金属含量特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1171-1178.
HUANG CS, HU GC, CHEN MB, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metal content in cereals and legumes in mining areas [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1171-1178.
- [15] 庞洁, 梁善范, 唐琼, 等. 2021—2023 年南宁市居民主要食品重金属污染健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 215-222.
PANG J, LIANG SF, TANG Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metal pollution in main food of residents in Nanning City from 2021 to

- 2023 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(23): 215–222.
- [16] 张利, 刘阳, 刘景泰, 等. 2022—2023年阜阳市食品重金属污染情况调查分析[J]. *食品安全导刊*, 2024(9): 9–13.
ZHANG L, LIU Y, LIU JT, *et al.* Investigation and analysis of heavy metal pollution in food in Fuyang City from 2022 to 2023 [J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(9): 9–13.
- [17] 郭翠英, 王素萍, 陈钢, 等. 武汉市新城区菜地土壤重金属含量状况及污染评价[C]. 中国环境科学学会, 华中科技大学: 第九届重金属污染防治技术及风险评估研讨会论文集, 华中农业大学资源与环境学院, 湖北省武汉市农业科学院作物科学研究所, 2019.
GUO CY, WANG SP, CHEN G, *et al.* Heavy metal content and pollution evaluation of vegetable soil in Xincheng District of Wuhan [C]. *Chinese Society of Environmental Sciences, Huazhong University of Science and Technology: Proceedings of the 9th Symposium on Heavy Metal Pollution Control Technology and Risk Assessment*, College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Institute of Crop Science, Wuhan Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [18] 高海成. 食品中重金属检测技术质量控制的优化路径[J]. *中国食品*, 2024(10): 100–102.
GAO HC. Optimization path of quality control of heavy metal detection technology in food [J]. *China Food*, 2024(10): 100–102.
- [19] 李俐, 雷生姣, 薛华, 等. 恩施地区市售硒食品重金属污染及健康风险评估[J]. *食品安全导刊*, 2022(5): 14–18.
LI L, LEI SJ, XUE H, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of selenium food in Enshi Area [J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(5): 14–18.
- [20] 刘继华, 何晓宏, 牟志浩, 等. 恩施州9类食品中铅、镉和汞含量监测结果[J]. *职业与健康*, 2012, 28(18): 2261–2262, 2265.
LIU JH, HE XH, MOU ZH, *et al.* Monitoring results of Pb, Cd and Hg in 9 kinds of food in Enshi Prefecture [J]. *Occupational Health*, 2012, 28(18): 2261–2262, 2265.
- [21] 常晓歌, 韩琳, 符晓蒙, 等. 河南省洛阳市市售谷物中铅镉汞砷的污染状况及暴露风险评估[J]. *现代疾病预防控制*, 2024, 35(11): 838–842.
CHANG XG, HAN L, FU XM, *et al.* Pollution status and exposure risk assessment of Lead, cadmium, mercury and arsenic in cereals sold in Luoyang City, Henan Province [J]. *Modern Disease Prevention and Control*, 2024, 35(11): 838–842.
- [22] 刘萍, 任梁, 周伟杰, 等. 无锡市谷物重金属污染状况及健康风险评估[J]. *中国食品卫生志*, 2024, 36(4): 420–425.
LIU P, REN L, ZHOU WJ, *et al.* Heavy metal pollution status and health risk assessment of cereals in Wuxi [J]. *Journal of Food Hygiene*, 2024, 36(4): 420–425.
- [23] 王彩霞, 郭蓉, 程国霞, 等. 陕西省谷物中重金属污染状况及健康风险评估[J]. *卫生研究*, 2016, 45(1): 35–38, 44.
WANG CX, GUO R, CHENG GX, *et al.* Status and health risk assessment of heavy metal pollution in cereals in Shaanxi Province [J]. *Health Research*, 2016, 45(1): 35–38, 44.
- [24] 吴丽珠, 高红梅, 马英. 上海市青浦区主要市售谷物及其制品的铅、镉、汞污染及健康风险评估[J]. *上海预防医学*, 2019, 31(6): 451–456.
WU LZ, GAO HM, MA Y. Lead, cadmium and mercury pollution and health risk assessment of main cereals and their products in Qingpu District, Shanghai [J]. *Shanghai Preventive Medicine*, 2019, 31(6): 451–456.
- [25] 徐孟怀, 朱明, 周富强, 等. 贵州省市售豆类中铅、镉污染和健康风险评估[J]. *食品工业*, 2021, 42(12): 484–487.
XU MH, ZHU M, ZHOU FQ, *et al.* Pollution and health risk assessment of lead and cadmium in legumes in Guizhou Province [J]. *Food Industry*, 2021, 42(12): 484–487.
- [26] 李冰茹, 张全刚, 姚真真, 等. 北京市市售干食用菌中重金属特征分析及健康风险评估[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(12): 293–299, 319.
LI BR, ZHANG QG, YAO ZZ, *et al.* Characterization and health risk assessment of heavy metals in dried edible fungi in Beijing [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(12): 293–299, 319.
- [27] 饶书恺, 邱树毅, 谢锋. 贵州省栽培食用菌重金属含量的测定及健康风险评估[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 54–58.
RAO SK, QIU SY, XIE F. Determination of heavy metal content in cultivated edible fungi and health risk assessment in Guizhou Province [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(18): 54–58.
- [28] 沈霞, 郭新东. 广东省市售干食用菌中元素含量分析与质量安全评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(12): 276–284.
SHEN X, GUO XD. Analysis and quality safety evaluation of elements in dried edible fungi in Guangdong Province [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(12): 276–284.
- [29] 华小菊, 刘斌, 梁小勇, 等. 江西几种食用菌中重金属含量检测[J]. *现代农业科技*, 2021(21): 195–196, 200.
HUA XJ, LIU B, LIANG XY, *et al.* Detection of heavy metals in several edible fungi in Jiangxi [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(21): 195–196, 200.
- [30] 薛鲁燕, 蔡葵, 王秀娟, 等. 山东省青岛地区栽培食用菌中铅、镉、汞、砷含量测定及健康风险分析[J]. *农产品质量与安全*, 2024(4): 36–39, 46.
XUE LY, CAI K, WANG XJ, *et al.* Determination and health risk analysis of lead, cadmium, mercury and Arsenic in cultivated edible fungi in Qingdao, Shandong Province [J]. *Agricultural Product Quality and Safety*, 2024(4): 36–39, 46.
- [31] 刘哲, 王康, 穆虹宇, 等. 香菇中重金属含量风险分析及栽培基质对重金属累积的作用[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1226–1232.
LIU Z, WANG K, MU HY, *et al.* Risk analysis of heavy metal content in mushroom and effect of cultivation medium on heavy metal accumulation [J]. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2019, 38(6): 1226–1232.
- [32] 李静, 王明锐, 姚晶晶, 等. 湖北省7个香菇种植基地的香菇和基质重金属污染调查研究[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(S2): 403–405, 408.
LI J, WANG MR, YAO JJ, *et al.* Investigation on heavy metal pollution of mushroom and matrix in 7 mushroom planting bases in Hubei Province [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(S2): 403–405, 408.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)