· 营养与食品卫生 ·

湖北省黄冈市居民膳食主要重金属含量特征及健康风险评价

刘雪芹,郑懿,王赤华,王红亮,王芬
黄冈市疾病预防控制中心,湖北 黄冈 438000

摘要:目的　了解黄冈居民膳食主要重金属污染情况,分析污染来源,评估人群经膳食途径摄入重金属的健康风险,为食品安全监管提供科学依据。**方法**　2019—2023 年,在黄冈市 10 县区 4 环节采集 11 大类 30 小类共 1 402 份样品,检测重金属含量。采用内梅罗污染指数法、Spearman 秩相关检验、聚类分析、主成分分析综合评估食品污染情况及可能来源。以总目标危害系数(total target hazard quotient,TTHQ)、总目标致癌风险(total target cancer risk,TTCR)评估人群非致癌和致癌健康风险。**结果**　食品重金属 Pb、Cd、总 Hg、总 As、Cr 平均含量分别为 0.007 ~ 0.217 mg/kg、0.001 ~ 0.632 mg/kg、0.001 ~ 0.012 mg/kg、0.003 ~ 0.103 mg/kg、0.005 ~ 0.376 mg/kg,重金属检出率为 0.0% ~ 100.0%,超标率为 0.0% ~ 31.7%。除 Hg 外,不同种类食品重金属含量、检出率、超标率差异均有统计学意义($P < 0.001$),食用菌类重金属检出率及超标率均较高。地区、季节、采样环节均是食品重金属含量的影响因素。食用菌类重金属两个可能来源为工业排放、交通尾气。除竹荪、香菇分别为重度、轻度污染外,其余食品均安全。不同人群 TTHQ 均处于 1 ~ 10 之间,TTCR 均大于 1×10^{-4},儿童高于成人,女性高于男性。人群 TTHQ、TTCR 主要重金属来源为总 As、Cd。**结论**　黄冈市主要膳食总体重金属污染程度尚在可控范围内,居民经膳食途径摄入重金属可能存在一定的重金属累积健康风险,需要重点关注儿童健康风险。

关键词:黄冈、食品、重金属污染、主成分分析、健康风险评价
中图分类号:X53;X826　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003 - 8507(2025)20 - 3705 - 07
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202502027

Content characteristics and health risk assessment of main heavy metals in the diet of Hubei Huanggang residents

LIU Xue - qin, ZHENG Yi, WANG Chi - hua, WANG Hong - liang, WANG Fen
Huanggang Center for Disease Control and Prevention, Huanggang, Hubei 438000, *China*

Abstract:Objective　To understand the main dietary heavy metal pollution situation of Huanggang residents, and to analyze the sources of pollution, and evaluate the health risks of heavy metal intake through dietary pathways. **Methods**　From 2019 to 2023, a total of 1 402 samples from 11 major categories and 30 subcategories were collected and detected in ten counties and districts of Huanggang City. The Nemerow contamination index method, Spearman rank correlation test, cluster analysis, and principal component analysis were usedto comprehensively evaluate the food contamination situation and possible sources. Evaluate the non carcinogenic and carcinogenic health risks of the population using the total target hazard quotient (TTHQ) and total target carcinogenic risk (TTCR). **Results**　The average content of heavy metals(Pb、Cd、Hg、As、Cr) in food was 0.007 - 0.217 mg/kg, 0.001 - 0.632 mg/kg, 0.001 - 0.012 mg/kg, 0.003 - 0.103 mg/kg, and 0.005 - 0.376 mg/kg, respectively. The detection rate of heavy metals was 0.0% - 100.0%, and the exceedance rate was 0.0% - 31.7%. Except for Hg, there were statistically significant differences in the content, detection rate, and exceedance rate of heavy metals in different types of food ($P < 0.001$). The detection rate and exceedance rate of heavy metals in edible fungi were relatively high. Region, season, stage, processing level, moisture content, and packaging level were all influencing factors of heavy metal content in food. The two possible sources of heavy metals in edible fungi were industrial emissions and traffic exhaust. Except for bamboo fungus and shiitake mushrooms, which were heavily and mildly contaminated respectively, all other foods were safe. The TTHQ of different populations was between 1 and 10, and the TTCR was greater than 1×10^{-4}. Children had

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)
作者简介:刘雪芹与郑懿为共同第一作者。刘雪芹(1984—),女,硕士,主管技师,研究方向:食品安全及理化检验;郑懿(1996—),男,硕士,技师,研究方向:食品安全及理化检验
通信作者:王红亮,E - mail: 156455449@qq.com

higher TTHQ than adults, and females had higher TTCR than males. The main sources of heavy metals for TTHQ and TTCR in the population were total As and Cd. **Conclusion** The overall degree of heavy metal pollution in the main diets of Huanggang City is still within a controllable range. There may be certain cumulative health risks of heavy metals for residents through dietary intake, and special attention should be paid to the health risks of children.

Keywords: Huanggang; Food; Heavy metal pollution; Principal component analysis; Health risk assessment

随着工业化建设逐步加深,人类活动和工业生产过程产生的重金属污染愈发严重[1]。铅、镉、汞、砷、铬是常见的 5 种环境重金属污染物,广泛存在于水体、土壤、空气等环境介质中[2]。食品在生长、加工等过程均易受重金属污染,并随着食物链逐步富集到人体[3]。食品是非职业人群重金属暴露最主要途径,在重金属来源中占比 60% ~99%[4]。人体过量暴露于重金属后会引起如高血压、皮肤损害、内分泌及代谢紊乱、器官病变等危害[5-7]。目前,兰州[6]、北京[8]、无锡[9]、陕西[10]等研究分析了当地谷物、蔬菜等食品重金属含量特征及健康风险,结果表明,分析主要膳食多种重金属污染情况,可以更全面掌握本地区人群膳食总体暴露风险。

黄冈市位居华中地区,为鄂东重要的农作物种植基地和交通枢纽,拥有较多的化工企业[11]。既往研究表明,黄冈市沿江区域及部分县土壤存在中等程度的重金属污染,食品可能具有潜在的污染风险,而关于黄冈市食品重金属污染情况的研究较少,且大多关注于某一类食品或某一种重金属[12-13]。本研究依托黄冈市食品安全风险监测工作,结合本市人群饮食特点,调查 2019—2023 年黄冈市售食品重金属污染特征,评估人群总体健康风险,为扩充本地食品安全数据库提供科学依据,指导居民选择安全饮食。

1 材料与方法

1.1 *样本来源* 依托黄冈市食品安全风险监测工作,结合居民膳食习惯及消费数据,确定采样的地点、对象及数量。采样地点覆盖黄冈全市(2 市 7 县 1 区),采样环节涵盖种植、商超、农贸、网购四环节,采样对象为 2019—2023 年黄冈市市售 11 大类 30 小类(豆类、坚果类、食用菌类、谷类、茶类、蛋类、水果类、肉类、蔬菜类、水产类、特殊膳食类)共 1 402 份样品。

1.2 *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》,采用电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)对 1 402 份样品进行检测与复核。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》。

1.3 *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举办的食品中多元素检测能力验证。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。

1.4 *研究方法*

1.4.1 重金属含量影响因素分析 以采样区域、时间、地点对食品分类如下[6]:(1)地区因素为农村、城市;(2)季节因素为、春季(3 月—5 月)、夏季(6 月—8 月)、秋季(9 月—11 月)、冬季(12 月—2 月);(3)采样环节为种植环节、流通环节(商贸、农贸、网购)。

1.4.2 聚类分析 聚类分析是研究分类问题的一种多元统计方法,通过数据间关系将相似对象集合分组,组内对象相关。对指标分类为 R 型分析,对样品分析为 Q 型分析,本研究中聚类方法均为组间连接,测量区间为平方欧氏距离[14]。

1.4.3 主成分分析 主成分分析是一种多变量数据分析方法,可通过几个主成分代替原始数据绝大部分信息。在主成分分析中,需先对数据库进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和 Bartlett 球形度检验,检验结果同时满足 KMO > 0.50 和 Bartlett < 0.05 时,表明原始数据适合进行主成分分析。利用 SPSS 24.0 软件对重金属指标数据进行因子分析后,计算出特征值、方差贡献率、累计贡献率[14-15]。

1.4.4 污染程度评价 采用内梅罗污染指数法评价食品重金属污染程度[6]。单因子污染指数: $P_i = C_i / S_i$,其中 C_i 为某元素的实测值,mg/kg;S_i 为此元素限值,mg/kg,P_i 为污染指数。综合因子污染指数: $P_M = (1/2(\bar{P}^2 + P_{max}^2))^{1/2}$,其中 $\bar{P}$ 为所评价重金属单项污染指数的平均值,P_{max} 为所评价重金属单项污染指数的最大值。污染程度评价标准为:P_i 或 $P_M \leq 0.7$,安全;$0.7 < P_i$ 或 $P_M \leq 1.0$,警戒;$1.0 < P_i$ 或 $P_M \leq 2.0$,轻度污染;$2.0 < P_i$ 或 $P_M \leq 3.0$,中度污染;P_i 或 $P_M > 3.0$,重度污染。

1.4.5 健康风险评价 根据美国国家环境保护署推荐的健康风险评价模型[8],以目标危害系数(target hazard quotient, THQ)、目标致癌风险(target cancer risk, TCR)评估非致癌风险、致癌风险,以总目标危害系数(total target hazard quotient, TTHQ)、总目标致癌风险(total target cancer risk, TTCR)评估重金属累计非致癌和致癌健康风险,计算公式如下,式中各参数含义及取值见表 1。

$$ADI = C \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \quad (1)$$

$$THQ = ADI / RfD \quad (2)$$

$$TTHQ = \sum_{i=1}^{n=5} THQ_i \quad (3)$$

$$TCR = ADI \times SF \quad (4)$$

$$TTCR = \sum_{i=1}^{n=3} TCR_i \quad (5)$$

表 1　重金属健康风险评价各参数取值

Table 1　Values of Parameters for Heavy Metal Health Risk Assessment

参数	中英文名称	单位	取值
ADI	可接受日摄入量,acceptable daily intake	mg·(kg·d)$^{-1}$	各参数取值后按照公式(1)计算可得
C	各重金属含量,concentration	mg/kg	中位数
IR	经口日均摄入量,intake rate	g/d	儿童:豆类 48.5、坚果类 23.56、食用菌类 44.7、谷类 336.0、蛋类 30.2、水果类 101.0、肉类 102.9、蔬菜类 272.4、乳类 56.0、水产类 37.3、特殊膳食 3.28[16] 成人:豆类 61.54、坚果类 23.56、食用菌类 57.77、谷类 434.32、蛋类 33.99、水果类 33.64、肉类 70.33、蔬菜类 521.44、乳类 22.7、水产类 60.6[16]
EF	年暴露频率,exposure frequency	d/year	365[17]
ED	暴露持续时间,duration of exposure	year	非致癌风险 30,致癌风险 70[17]
BW	体重,body weight	kg	男 66.2、女 57.3、儿童 25.6[18]
AT	暴露时间,exposure time	d	非致癌风险 10 950、致癌风险 25 550[17]
Rfd	经口摄入参考剂量,reference dose	mg·(kg·d)$^{-1}$	Pb(0.001 4)、Cd(0.000 5)、Hg(0.000 3)、As(0.000 3)、Cr(0.003)[6]
SF	致癌斜率因子,cancer slope factor	kg·d·mg^{-1}	Pb(0.008 5)、As(1.5)、Cr(0.5)[6]

THQ 或 TTHQ < 1 没有明显健康风险;THQ 或 TTHQ 为 1 ~ 10 可能存在一定健康风险;THQ 或 TTHQ > 10 存在较明显健康风险。TCR 或 TTCR < 10^{-6}致癌风险较低;TCR 或 TTCR 为 1×10^{-6} ~ 1×10^{-4}可能存在值得关注的致癌风险;TCR 或 TTCR > 1×10^{-4},有较高的致癌风险。

1.5　统计分析　采用 Excel 2016、SPSS 24.0 软件进行数据统计、分析,Origin 2021 绘图。低于检出限的数据均以检出限的 1/2 参与统计。对率或构成比的计数资料进行比较采用χ^2检验,对重金属含量两组间差异比较采用 Mann - Whitney U 检验,多组间差异比较采用 Kruskal - Wallis H 检验。采用 Spearman 秩相关检验分析重金属间相关性,聚类分析、主成分分析法分析重金属可能来源。双侧检验,检验水准 α =0.05。

2　结果与分析

2.1　食品重金属含量分布、检出率及超标率　重金属含量分布见图 1,检出率及超标率见表 2。不同种类食品五种重金属(Pb、Cd、总 Hg、总 As、Cr)平均含量分别为 0.007 ~ 0.217 mg/kg、0.001 ~ 0.632 mg/kg、0.001 ~ 0.012 mg/kg、0.003 ~ 0.103 mg/kg、0.005 ~ 0.376 mg/kg,含量差异均具有统计学意义(H = 185.944、291.310、75.598、182.445、441.768,P 均 < 0.001)。茶类和食用菌类的重金属含量与贡献比高于其他食品。

食品重金属总体检出率、超标率分别为 0.0% ~ 100.0%、0.0% ~ 31.7%。不同种类食品重金属检出率差异均具有统计学意义(P 均 < 0.001),Cd 检出率最高(48.3%)。不同种类食品除 Hg 外的重金属超标率差异均具有统计学意义(P 均 < 0.001)。食用菌类 Pb、Cd 超标样本较多,超标率分别为 20.3%、30.5%。

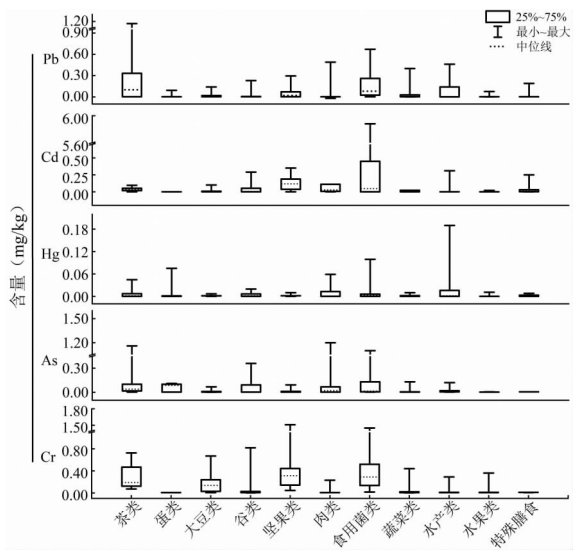


图 1　黄冈市食品五种重金属含量分布

Fig. 1　Distribution of five heavy metal contents in food in Huanggang City

2.2　食品重金属影响因素　食品因生长环境及加工过程不同,对重金属的富集程度会受到如地区、季节等影响[19],黄冈市不同类型食品重金属平均含量见图 2。地区、季节因素主要影响除 Pb 外的四种重金属,城市食品重金属 Cd 平均含量高于农村,而总 Hg、总 As、Cr 则低于农村;夏冬季食品重金属平均含量高于春秋季节,且夏季高于冬季。不同采样环节对五种重金属含量均有影响,种植环节食品总 As、Cr 平均含量较高,网购环节 Pb、Cd、总 Hg 平均含量较高。

表 2 不同种类食品五种重金属检出率及超标率

Table 2 Detection rates and exceedance rates of five heavy metals in different types of food

类型	检出率(%)					超标率(%)				
	Pb	Cd	总 Hg	总 As	Cr	Pb	Cd	总 Hg	总 As	Cr
豆类	40.8	71.8	12.7	56.3	89.6	0.0	0.0	/	/	7.0
坚果类	65.6	81.7	11.8	63.0	100.0	3.3	0.0	/	/	/
食用菌类	79.7	72.9	31.9	59.4	93.5	20.3	30.5	0.0	5.1	/
谷类	13.7	35.7	30.4	19.0	8.3	1.2	2.4	0.0	0.0	0.0
茶类	58.6	91.4	57.1	82.9	100.0	1.4	/	/	/	/
蛋类	20.8	0.0	25.0	70.0	0.0	0.0	0.0	0.0	/	/
水果类	16.9	7.7	12.3	0.0	10.9	0.0	0.0	/	/	/
肉类	8.3	81.1	42.2	59.8	2.9	0.0	26.5	1.0	1.0	0.0
蔬菜类	33.3	34.9	21.5	54.4	68.8	3.1	3.1	0.0	0.0	0.0
水产类	35.7	24.3	59.1	47.8	21.3	0.0	6.1	0.0	0.9	4.3
特殊膳食	4.9	78.6	47.6	0.0	9.9	0.0	4.8	0.0	0.0	/
合计	32.9	48.3	29.5	44.9	46.3	3.6	5.2	0.2	0.4	0.7
统计量 χ^2	260.986	408.688	148.525	316.651	870.083	206.729	173.206	16.431	34.898	47.082
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.126	<0.001	<0.001

注:/表示该元素含量限值未规定。

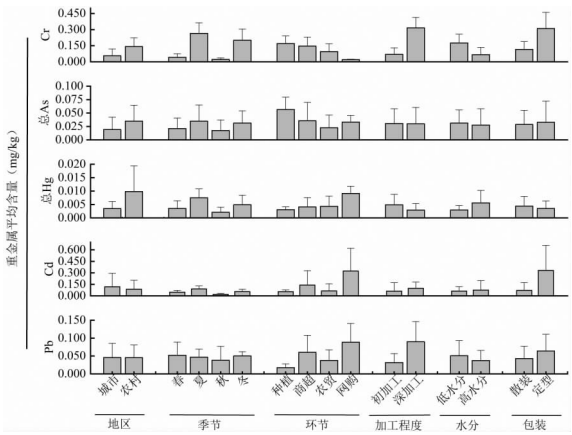


图 2 黄冈市不同类型食品重金属平均含量

Fig. 2 Average content of heavy metals in different types of food in Huanggang City

2.3 食品重金属来源分析

2.3.1 食品重金属相关性分析与聚类分析 黄冈市食品重金属间 Spearman 相关性分析结果见表 3。总 Hg 与总 As 表现出最强的相关性(r =0.841, P <0.001),Pb 与总 As 也具有一定的相关性(r =0.516, P =0.039),Cd、Cr 间具有较高的相关性(r =0.582, P =0.031)。这表明,Pb - 总 Hg - 总 As 可能是同一来源,而 Cd - Cr 可能是另一来源。

表 3 黄冈市食品重金属含量 Spearman 相关性分析(r)

Table 3 Spearman correlation analysis of heavy metal content in food in Huanggang City (r)

重金属	Pb	Cd	总 Hg	总 As	Cr
Cd	0.344				
总 Hg	0.384	0.371			
总 As	0.516[b]	0.494	0.841[a]		
Cr	0.354	0.582[b]	0.184	0.417	1.000

注:a 表示 P <0.01;b 表示 P <0.05。

系统聚类分析结果见图 3。食品可分为 3 类,即食用菌类、茶类 - 坚果类、其他食品,这表明食用菌类污染情况与其他食品差异较大;重金属可分为 2 类,即 Pb - Hg - As、Cd - Cr,聚类分析结果与相关性分析一致。

2.3.2 食用菌类重金属主成分分析 经 KMO - Bartlett 检验,KMO 统计量为 0.708 大于 0.5,巴特利特球形检验 P <0.001,表明食用菌类重金属含量适合进行主成分分析。前两个主成分的总方差贡献率 71.424%,且前两个主成分特征值均大于 1,可以用两个主成分来解释原始数据的大部分信息。PC1 方差贡献率为 49.806%,对总 Hg、总 As、Cd、Cr 均有较高的负载。Hg、As 常与工业废水、煤炭燃烧等有关,Cd、Cr 与冶金、电镀等有关[20]。因此,PC1 可能为与工业活动污染相关的环境因素。PC2 方差贡献率为 21.618%,对 Pb 有较高负载(0.961),Pb 主要与汽车尾气排放有关[20],因此 PC2 可能为与废气相关的环境因素,结果见表 4。

2.4 食品重金属污染评价 食品重金属污染指数见图 4。大部分食品污染指数处于安全线内,仅食用菌类(香菇、竹荪)存着一定程度的污染。香菇 P_i(Cd)指数为 1.388, P_M 为 1.089,为轻度污染;竹荪 P_i(Pb)、P_i(Cd)、P_i(总 As)、P_M 分别为 2.173、14.25、2.000、10.600,为重度污染。

2.5 健康风险评价 不同人群健康风险评估结果如表 5 所示,不同人群 TTHQ 均处于 1 ~ 10 之间,TTCR 均大于 1×10^{-4},TTHQ 比较,儿童(7.712) > 成人女性(4.222) > 成人男性(3.654);TTCR 比较,儿童

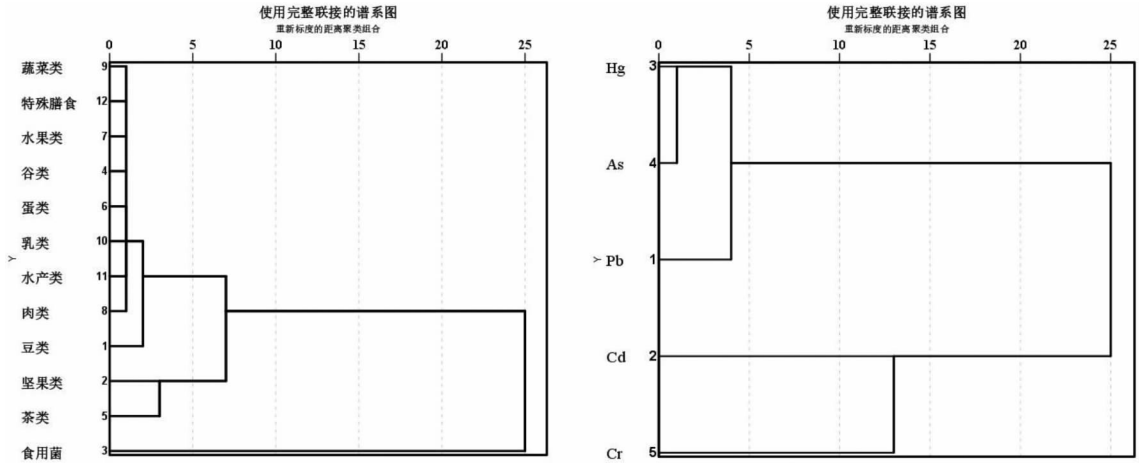


图 3　黄冈市食品重金属系统聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of heavy metal systems in food in Huanggang City

表 4　黄冈市食用菌类食品重金属主成分分析结果

Table 4　Results of principal component analysis of heavy metals in edible fungi in Huanggang City

成分	初始特征值			重金属	各项因子载荷	
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%		PC1	PC2
PC1	2. 490	49. 806	49. 806	Cr	0. 765	
PC2	1. 081	21. 618	71. 424	Cd	0. 810	
PC3	0. 642	12. 840	84. 264	Pb		0. 961
PC4	0. 483	9. 663	93. 927	总 As	0. 856	
PC5	0. 304	6. 073	100. 000	总 Hg	0. 712	

注:各重金属对 PC1、PC2 载荷系数小于 0. 6 则不显示。

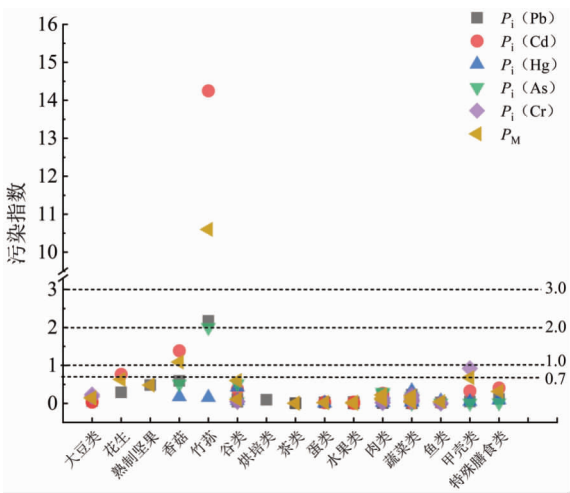


图 4　黄冈市食品重金属污染指数

Fig. 4　Huanggang City food heavy metal pollution index

(2.25×10^{-3}) > 成人女性(1.22×10^{-3}) > 成人男性(1.06×10^{-3})。不同人群 THQ 中 Cd、总 As 均高于 1,不同人群 TCR 中总 As 均大于 1×10^{-4}。表明黄冈市居民经膳食途径摄入重金属可能存在需引起关注的非致癌及致癌健康风险,其中儿童健康风险高于成人,女性高于男性。

3　讨　论

监测表明,黄冈市食品主要富集 Pb、Cd、Cr 等重金属,检出率及超标率均较高。Pb、Cd 主要富集于茶类和食用菌类,Cr 主要富集于大豆类,与北京[6]、南宁[2]等地调查结果基本一致。重金属含量较高的食品普遍有夏冬季节、来源于农村地区的特点,这可能与农村地区种植环节食品较多,更容易从土壤富集重

表 5　黄冈不同人群重金属暴露健康风险

Table 5　Health Risks of Heavy Metal Exposure in Huanggang Population

不同人群	THQ					TTHQ	TCR			TTCR
	Pb	Cd	总 Hg	总 As	Cr		Pb	总 As	Cr	
儿童	0. 756	3. 058	0. 447	2. 794	0. 657	7. 712	9.01×10^{-6}	1.26×10^{-3}	9.85×10^{-4}	2.25×10^{-3}
成人										
男	0. 376	1. 475	0. 213	1. 268	0. 323	3. 654	4.48×10^{-6}	5.70×10^{-4}	4.84×10^{-4}	1.06×10^{-3}
女	0. 434	1. 704	0. 246	1. 465	0. 373	4. 222	5.17×10^{-6}	6.59×10^{-4}	5.59×10^{-4}	1.22×10^{-3}

金属有关[8];食品夏季生长吸收快,冬季低代谢,也有利于富集重金属[19]。

食用菌类尤其是竹荪严重污染,其重金属间相关性不同于其他膳食,主要来源为工业排放、尾气等,这可能与地域经济特点有关。黄冈市化工企业较多,同时黄冈市受武汉都市圈发展影响,工业物流、人群流动频繁,重金属可能会通过水体、土壤污染或大气沉降等多途径污染食品[21]。因此,需要根据不同地区食用菌类重金属污染的不同来源,采取针对性的监管措施。

黄冈市儿童膳食健康风险高于成人,主要与儿童生长发育较快,单位体重的食品摄入量高于成人有关。不同人群主要风险来源基本一致,主要为 Cd、总 As,其中总 As 对不同人群的非致癌健康风险和致癌健康风险均高于推荐值,这提示有关部门需重视黄冈市售食品中的总 As 污染风险,开展全方面的健康风险评估。

本研究也存在一些局限性,膳食消费数据依赖于湖北省人群平均值,未开展本地人群相关调查,计算参数可能与实际消费量存着偏差;食用菌类样本量略少,代表性不够强,需要增加采样数量以准确追踪污染源。蔬菜的清洗方式、烹饪方式也会影响重金属的残留,因此本研究的健康风险可能高于实际,需要谨慎解读。

综上所述,黄冈市食品整体污染程度尚在可控范围内,但在累积效应影响下,人群经膳食途径摄入重金属可能存在一定程度的致癌和非致癌健康风险,在后续食品安全监管工作中需要重点关注儿童经膳食途径摄入总 As、Cd 所致的健康风险。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] 李金哲,刘宁强,龚庆杰,等. 广东汕头市内海湾沉积物重金属环境质量调查与评价[J]. 现代地质,2021,35(5):1441 – 1449.
Li JZ, Liu NQ, Gong QJ, et al. Investigation andevaluation on environmental quality of heavy metals in sediments of the inland bay of Shantou city, Guangdong province[J]. Geoscience, 2021, 35(5): 1441 – 1449. (In Chinese)

[2] 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 contamination in main food of Nanning City residents during 2021 to 2023[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23): 215 – 222. (In Chinese)

[3] 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. Risk assessments and health impacts of heavy metal pollution[J]. Science in China(Series C), 2021, 51(9): 1264 – 1273. (In Chinese)

[4] 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. (In Chinese)

[5] Che ZW, Ahmed W, Weng JC, et al. Distribution, pollution, and human health risks of persistent and potentially toxic elements in the sediments around Hainan Island, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 174: 113278.

[6] 牛兆澄. 基于食品重金属赋存水平的人群膳食暴露及健康风险评价[D]. 兰州:兰州大学,2022.
Niu ZC. Dietary exposure and health risk assessment of population based on the level of heavy metal occurrence in food[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (In Chinese)

[7] 冉茂霞,吴迪,史永富,等. 砷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 Arsenic's bioaccumulation and biotransformation in aquatic organisms, and its metabolism and toxicology in other organisms[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(4): 1069 – 1084. (In Chinese)

[8] 魏军晓. 北京市售食品重金属含量特征与健康风险评估[D]. 北京:中国地质大学,2022.
Wei JX. Characteristics of heavy metal content and health risk assessment in food sold in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2022. (In Chinese)

[9] 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]. 中国食品卫生杂志,2024,36(4):420 – 425.
Liu P, Ren L, Zhou WJ, et al. Pollution status and health risk assessment of heavy metals in grains in Wuxi city[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(4): 420 – 425. (In Chinese)

[10] 袁文婷,刘宇,程国霞,等. 陕西主要食品中砷污染及居民膳食暴露风险评估[J]. 现代预防医学,2021,48(1):55 – 58.
Yuan WT, Liu Y, Cheng GX, et al. Arsenic pollution in main foods in Shaanxi and risk assessment of residents' dietary exposure[J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(1): 55 – 58. (In Chinese)

[11] 居字龙,陈思,万翔,等. 湖北省红安县基于生态地质单元的土壤重金属分布规律对比研究[J]. 资源环境与工程,2023,37(2):217 – 226.
Ju ZL, Chen S, Wan X, et al. Distribution regularity of heavy metals in Soilbased on eco – geological units in Hong'an county, Hubei province[J]. Resources Environment & Engineering, 2023, 37(2): 217 – 226. (In Chinese)

[12] 王婧,何祖安,谢曙光,等. 湖北省农田土壤重金属铅、镉、铬的健康风险评估研究[J]. 环境卫生学杂志,2019,9(3):258 – 263, 268.
Wang J, He ZA, Xie SG, et al. Health risk assessment of heavy metals (Pb, Cd, and Cr) in farmland Soil of Hubei province[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2019, 9(3): 258 – 263, 268. (In Chinese)

[13] 范俊楠,贺小敏,陆泗进,等. 湖北省重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. 华中农业大学学报,2018,37(5):74 – 80.
Fan JN, He XM, Lu SJ, et al. Status of heavy metal pollution and potential ecological hazard assessment in surrounding soil of enterprises in Hubei Province, China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(5): 74 – 80. (In Chinese)

[14] 罗旭,杨林,申小歌,等. 重庆市铜梁区菜地土壤重金属污染现状,源解析及健康风险评估[J/OL]. 环境科学,1 – 13 [2025 – 09 – 01]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202407282.

Luo X, Yang L, Shen XG, et al. Current status, Source analysis, and health risk assessment of heavy metal pollution in vegetable soil in Tongliang District, Chongqing[J/OL]. Environmental Science, 1 – 13 [2025 – 09 – 01]. https://doi. org/10. 13227/j. hjkx. 202407282. (In Chinese)

[15] 曲林博,席海洋,齐鹏,等. 黑河中下游重金属污染物空间分布特征及污染源解析[J/OL]. 环境科学学报,1 – 10 [2025 – 09 – 01]. https://doi. org/10. 13671/j. hjkxxb. 2024. 0509.
Qu LB, Xi HY, Qi P, et al. Spatial distribution and pollution source analysis of heavy metal pollutants in the middle and lower reaches of Heihe River[J/OL]. Journal of environmental science, 1 – 10 [2025 – 09 – 01]. https://doi. org/10. 13671/j. hjkxxb. 2024. 0509. (In Chinese)

[16] 吴永宁,赵云峰,李敬光. 第五次中国总膳食研究[M]. 北京:科学出版社,2018.
Wu YN, Zhao YF, Li JG. The fifth total diet study in China[M]. Beijing: Science Press, 2018. (In Chinese)

[17] 孙庆华,杜宗豪,杜艳君,等. 环境健康风险评估方法第五讲风险特征(续四)[J]. 环境与健康杂志,2015,32(7):640 – 642.
Sun QH, Du ZH, Du YJ, et al. Environmental health risk assessment methods lecture 5: risk characteristics (continued 4)[J]. Journal of Environment and Health, 2015, 32(7): 640 – 642. (In Chinese)

[18] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京:中国环境出版社,2013.
Ministry of Environmental Protection. Chinese population exposure parameter manual[M]. Beijing: China Environment Press, 2013. (In Chinese)

[19] 李玲,谭力,段丽萍,等. 食品重金属污染来源的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2016,42(4):238 – 243.
Li L, Tan L, Duan LP, et al. Progress of the sources of heavy metal pollution in food[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(4): 238 – 243. (In Chinese)

[20] 骆善彩,张雯,陈国才,等. 淮安市 2020 – 2022 年 PM2.5 中重金属污染的来源解析和健康风险评估[J]. 现代预防医学,2024,51(11):1962 – 1967.
Luo SC, Zhang W, Chen GC, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metal pollution in PM2.5 in Huai'an city from 2020 to 2022[J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(11): 1962 – 1967. (In Chinese)

[21] 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 content in cultivated edible fungi in Qingdao, Shandong Province[J]. Quality and Safety of Agricultural Products, 2024, (4): 36 – 39, 46. (In Chinese)

收稿日期:2025-02-06

(上接第 3692 页)

Liu XH. Assessment of the applicability of endogenous estimates in age – period – cohort analysis and research on the construction and application of Bayesian models[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (In Chinese)

[15] Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, et al. Estimates and 25 – year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J]. The Lancet, 2017, 389(10082): 1907 – 1918.

[16] 刘硕. 2012—2020 年青岛市慢性呼吸系统疾病死亡情况及空间流行特征[D]. 青岛:青岛大学,2023.
Liu S. Mortality and spatial epidemiological characteristics of chronic respiratory diseases in Qingdao City, 2012 – 2020[D]. Qingdao: Qingdao University, 2023. (In Chinese)

[17] 毋丹丹,赵国栋,崔彩岩,等. 2014 – 2020 年西安市慢性呼吸系统疾病过早死亡及潜在减寿变化趋势分析[J]. 中国卫生统计,2023,40(4):555 – 558, 562.
Wu DD, Zhao GD, Cui CY, et al. Analysis of trends in premature mortality and potential years of life lost due to chronic respiratory diseases in Xi'an city from 2014 to 2020[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2023, 40(4): 555 – 558. (In Chinese)

[18] 朱瑶,颜玮,赵军,等. 2015 – 2021 年江西省慢性呼吸系统疾病死亡情况及变化趋势[J]. 环境卫生学杂志,2023,13(8):624 – 628, 634.
Zhu Y, Yan W, Zhao J, et al. Mortality from chronic respiratory diseases in Jiangxi Province, 2015 – 2021, and trends[J]. Journal of Environmental Health, 2023, 13(8): 624 – 628, 634. (In Chinese)

[19] Yin P, Brauer M, Cohen AJ, et al. The effect of air pollution on deaths, disease burden, and Life expectancy across China and its provinces, 1990 – 2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet Planetary Health, 2020, 4(9): e386 – e398.

[20] 雷晶,张虞,朱静,等. 我国环境监测标准体系发展现状、问题及建议[J]. 环境保护,2018,46(22):37 – 39.
Lei J, Zhang Y, Zhu J, et al. Current status, issues, and recommendations for the development of China's environmental monitoring standards system[J]. Environmental Protection, 2018, 46(22): 37 – 39. (In Chinese)

[21] 宛琪,吴繁,邓志珊,等. 大力推进慢性阻塞性肺疾病早期社区综合防治[J]. 中国临床新医学,2025,18(1):1 – 5.
Wan Q, Wu F, Deng ZS, et al. Vigorously promoting early community – based comprehensive prevention and treatment of chronic obstructive pulmonary disease[J]. Chinese Journal of New Clinical Medicine, 2025, 18(1): 1 – 5. (In Chinese)

[22] 徐文超,周孟孟,丁梦珂,等. 1990—2019 年江苏省慢性呼吸系统疾病的疾病负担和危险因素分析[J]. 中华预防医学杂志,2023,57(8):1141 – 1146.
Xu WC, Zhou MM, Ding MK, et al. Analysis ofthe disease burden and risk factors of chronic respiratory diseases in Jiangsu Province from 1990 to 2019[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2023, 57(8): 1141 – 1146. (In Chinese)

[23] 李晓晨,曹小佩,郭铭洲,等. 1990—2017 年慢性呼吸系统疾病死亡率和伤残调整寿命年变化趋势及其危险因素:2017 年全球疾病负担研究分析[J]. 英国医学杂志中文版,2020,23(7):382 – 389.
Li XC, Cao XP, Guo MZ, et al. Trends in mortality and disability – adjusted life years for chronic respiratory diseases and their risk factors from 1990 to 2017: Analysis from the 2017 global burden of disease study[J]. Chinese Journal of the British Medical Journal, 2020, 23(7): 382 – 389. (In Chinese)

[24] 苏鑫,范雯怡,徐昕晔,等. 中国居民癌症等四大慢病危险因素及归因疾病负担分析[J]. 中国癌症防治杂志,2024,16(4):442 – 447.
Su X, Fan WY, Xu XY, et al. Analysis of risk factors for four major chronic diseases, including cancer, and their attributable disease burden among Chinese residents[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Control, 2024, 16(4): 442 – 447. (In Chinese)

[25] 陈金花,卢军. 室内空气污染治理的研究进展[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(6):108 – 112.
Chen JH, Lu J. On indoor air pollution and indoor air quality control[J]. Journalof Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(6): 108 – 112. (In Chinese)

收稿日期:2024-10-17