

江西省市售坚果及籽类食品中五种重金属含量调查与暴露风险评估

彭文芳, 王艳敏, 陈福辉, 于晖, 李小平, 曾祥荣

江西省疾病预防控制中心, 重大疫情防控江西省重点实验室, 江西 南昌 330029

摘要:目的 调查江西省市售坚果及籽类食品中铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铬(Cr)和总砷(As)的污染状况, 评估其对居民的膳食暴露风险, 为精准化监管提供依据。方法 2024 年 11 月采集江西省 11 市 12 类 99 份样品, 采用电感耦合等离子体质谱法测定五种元素含量, 采用点评估法模型计算暴露量, 结合单项污染指数法与内梅罗综合污染指数法进行风险评估。结果 Cr 和 As 检出率均为 100%, Pb 和 Cd 检出率分别为 61.6% 和 67.7%, Hg 检出率仅为 2.02%。所有样品中仅 Cr 存在超标现象, 超标率 4.0%。开心果中 Pb、As 含量相对较高; 葵花籽中 Cr、Cd 含量最高, 其内梅罗综合污染指数达 4.1, 属重度污染。成人日均摄入 5g 时非致癌风险可控, 但 Pb 日暴露量[2.62 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$]显著超过联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会基准剂量下限[0.5~1.0 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$]。结论 该类食品整体安全, 葵花籽 Cr 污染及儿童 Pb 慢性暴露风险为主要隐患, 建议实施“高风险品类-价态分析-源头治理-消费引导”四位一体精准防控策略。

关键词: 坚果及籽类食品; 重金属; 类金属; 污染调查; 风险评估

中图分类号: R155.5 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2026)13-2366-06

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202512456

Investigation of five heavy metals in nuts and seed foods sold in Jiangxi Province and assessment of exposure risk

PENG Wen-fang, WANG Yan-min, CHEN Fu-hui, YU Hui, LI Xiao-ping, ZENG Xiang-rong

Jiangxi Provincial Center for Disease Control and Prevention, Jiangxi Provincial Key Laboratory of Major Epidemics Prevention and Control, Nanchang, Jiangxi 330029, China

Abstract: **Objective** To investigate the contamination status of lead (Pb), cadmium (Cd), mercury (Hg), chromium (Cr), and total arsenic (As) in nuts and seed foods sold in Jiangxi Province, assess the dietary exposure risks to residents, and provide a scientific basis for precise regulation. **Methods** A total of 99 samples belonging to 12 categories were collected from 11 cities in Jiangxi Province in November 2024. The contents of the five elements were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), exposure levels were calculated using a point-estimation model, and risk assessment was performed using the single-factor pollution index method and Nemerow comprehensive pollution index method. **Results** The detection rates of Cr and As were both 100%, while those of Pb and Cd were 61.6% and 67.7%, respectively. Hg had the lowest detection rate of only 2.02%. Among all samples, only Cr exceeded the standard limit, with an exceedance rate of 4.0%. Pistachios showed relatively high contents of Pb and As. Sunflower seeds had the highest contents of Cr and Cd, with a Nemerow comprehensive pollution index of 4.1, indicating severe pollution. For adults with a daily intake of 5 g, the non-carcinogenic risks of all elements were controllable. However, the daily exposure dose of Pb [2.62 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$] significantly exceeded the benchmark dose lower confidence limit [BMDL01: 0.5~1.0 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})$] established by JECFA. **Conclusion** These foods are generally safe, but Cr contamination in sunflower seeds and chronic Pb exposure risk for children are major potential risks. It is recommended to implement a four-in-one precise prevention and control strategy: “high-risk category targeting, speciation analysis, source control, and consumption guidance”.

Keywords: Nuts and seed-based foods; Heavy metals; Metalloids; Contamination survey; Risk assessment

坚果及籽类食品营养丰富, 已成为我国居民日常

基金项目: 重大疫情防控江西省重点实验室计划项目(2024SSY06021);
江西省卫生健康委科技计划项目(202510082); 江西省疾病预防控制中心科技创新培英计划项目(PYJH202501)

作者简介: 彭文芳(1986—), 女, 博士, 主管技师, 研究方向: 食品卫生检验

通信作者: 陈福辉, E-mail: wenfangnu@163.com

膳食的重要组成部分, 消费量逐年上升^[1]。该类作物生育期长、根系发达, 易从土壤、水体及大气中富集重金属, 且在加工、储运环节也存在外源污染风险。镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、铬(Cr)、砷(As)等重金属具有神经、肝肾毒性及潜在致癌性, 长期低剂量暴露危害人体健康^[2-4]。因此, 开展市售坚果及籽类食品重金属

污染分析与健康风险评估,对保障公众食品安全具有重要意义。

江西省属典型有色金属矿区,地质高背景与矿业活动致使区域环境重金属本底值偏高,大米、蔬菜等主要农产品已存在不同程度重金属富集,防控形势严峻^[5]。坚果及籽类对重金属具备一定富集能力,但其在江西省的污染状况与健康风险尚不明确,相关系统性多元素评估研究较为缺乏。同时,坚果作为常见零食,儿童对重金属暴露更为敏感^[6]。为此,本研究系统检测江西省市售坚果及籽类食品中 Pb、Cd、Hg、Cr、总 As 含量,评估其人群膳食暴露风险,结合区域其他食品研究结果,为当地食品安全精准监管提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品来源 2024 年 11 月,由江西省各设区疾病预防控制中心在超市、农贸市场、主流电商平台随机采集样品。共涵盖 8 类坚果(开心果、腰果、核桃、松子、板栗、巴旦木、碧根果、夏威夷果)和 4 类籽类(葵花籽、南瓜籽、西瓜籽、瓜蒌籽),总计 99 份。样品密封后于阴凉干燥处保存。

1.2 仪器与试剂 Agilent 7700 电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦公司);MARS6 全自动消解装置(美国 CEM 公司);硝酸(电子纯,美国默克公司);多元素标准溶液(质量浓度 10 μg/ml, GNM-M259254-2013 国家有色金属及电子材料分析测试中心);Hg 单元素溶液标准物质[质量浓度 100 μg/ml, GBW(E) 080124, 中国计量科学研究院];过氧化氢(分析纯, Aladdin)。

1.3 样品前处理与测定 样品经除杂、粉碎、过 12 目筛均质后,称取 0.3 g 于消解管,加 5 ml 硝酸和 1 ml 过氧化氢浸泡过夜,按 120℃ 1min、150℃ 2min、180℃ 25 min 条件微波消解,冷却后超纯水定容至 25ml。参照《国家食品安全风险监测工作手册》电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma spectrometry, ICP-MS)法测定 5 种重金属含量,同步做试剂空白试验^[7-8]。

1.4 质量控制 每批次样品均包含国家标准物质[花生粉, GBW(E)100718]、试剂空白及≥10%的平行双样。ICP-MS 检测中每 20 个样品回读标准曲线中间点,采用内标法(185Re、103Rh、72Ge)校正基体效应与信号漂移。

1.5 数据处理、暴露量计算及风险评估 经统一培训人员完成采样、检测及数据录入,未检出(ND)数据按世界卫生组织 GEMS/FOOD 原则处理,Excel 用于统计分析。以成人 60 kg、每日食用 5 g 坚果为摄入量,采用点评估法计算暴露量^[9]:

$$E_{XP}=C \times M \times 30 / BW$$

E_{XP} : 每月每千克体质量金属暴露量 [μg/(kg·

BW)]; C : 元素平均含量 (mg/kg); M : 每日摄入量 (g/d); BW : 平均体质量(kg)。

风险评估采用风险商(hazard quotient, HQ)法和暴露边界比(margin of exposure, MOE)法进行风险特征描述^[10]。对于 Cd、As、Hg、Cr,采用风险商(HQ)进行评价,计算公式为:

$$HQ = \text{膳食日暴露量} [\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})] / \text{健康指导值} [\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})]$$

$HQ < 1$ 表示暴露量低于安全限值,风险可接受; $HQ \geq 1$ 表示存在潜在健康风险。

对于 Pb,采用基于儿童神经发育毒性的基准剂量下限值[BMDL_{0.5}=0.5 μg/(kg·bw·d)]计算暴露边界比 MOE ,公式为: $MOE = \text{BMDL}_{0.5} / \text{膳食日暴露量}$

$MOE \geq 100$ 认为健康风险较低; $MOE < 100$ 提示存在潜在健康风险。

1.6 污染评价 依据 GB 2762—2022 及全国化学污染物风险监测分析系统设定限量值:Pb 为 0.2 mg/kg, Cd 为 0.5 mg/kg, Cr 为 1.0 mg/kg, Hg 为 0.05 mg/kg, As 为 0.5 mg/kg。采用单项污染指数、内梅罗综合污染指数进行评价^[11],分级标准见表 1。

单因子污染指数法计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

其中 i 为某种金属, P_i 为污染指数, C_i 为样品中污染物的实测值 (mg/kg), S_i 为污染物的评价标准 (mg/kg)。

内梅罗综合污染指数法计算公式为:

$$P_M = [(P_{i_{ave}}^2 + P_{i_{max}}^2) / 2]^{1/2}$$

其中, P_M 为综合污染指数, $P_{i_{ave}}$ 为坚果中各重金属单因子污染指数平均值; $P_{i_{max}}$ 为坚果中各重金属单因子污染指数中最大值。坚果与籽类食品质量等级划分见表 1。

表 1 坚果与籽类食品质量等级划分一览表

单因子污染指数	污染程度分级	内梅罗综合污染指数	污染程度分级
$P_i \leq 0.7$	优良	$P_M \leq 0.7$	清洁
$0.7 < P_i \leq 1.0$	安全	$0.7 < P_M \leq 1.0$	尚清洁
$1.0 < P_i \leq 2.0$	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

2 结果

2.1 检测方法验证与判定标准 采用 ICP-MS 法测定 99 份样品中 5 种重金属,各元素标准曲线相关系数均≥0.999,线性关系良好,满足痕量分析要求。判定标准:Pb、Cd 参考 GB 2762—2022, Cr、Hg、As 参考全国化学污染物风险监测分析系统^[12]。见表 2。

表 2 各元素标准曲线、相关系数、测定范围和限量值

Table 2 Standard curves, correlation coefficients, determination ranges, and limit values for each element

元素	标准曲线	相关系数	测定范围(mg/mL)	内标	检出限(mg/kg)	限量值(mg/kg)
Pb	$y=17.204\ 0x+0.488\ 3$	0.999 9	0 ~ 50	^{185}Re	0.005	0.2 [*]
Cd	$y=0.993\ 0x+0.003\ 7$	0.999 2	0 ~ 50	^{103}Rh	0.003	0.5 ^{**}
Cr	$y=0.045\ 6x+0.005\ 6$	0.999 1	0 ~ 50	^{72}Ge	0.01	1 ^{**}
Hg	$y=2.049\ 5x+0.056\ 8$	0.999 2	0 ~ 3	^{185}Re	0.004	0.05 ^{**}
As	$y=0.007\ 2x+2.441\ 6\times 10^{-4}$	0.999 5	0 ~ 50	^{72}Ge	0.005	0.5 ^{**}

注: *《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2022); ** 全国化学污染物风险监测分析系统(<https://sppt.cfsa.net.cn/goto/main/rwrw>)。

2.2 江西省坚果及籽类食品的整体污染特征 本研究采集 99 份样品,检测 Pb、Cd、Hg、总 Cr、总 As 五种元素。结果显示,总 Cr、As 检出率均为 100%,表明二者在江西省市售坚果供应链中普遍存在;Pb、Cd 检出率分别为 61.6%、67.7%,处于较高水平;Hg 检出率仅 2.02%,污染风险极低,与坚果非水生来源、Hg 生物富

集能力弱的特性一致。

含量分布显示,Cr 是唯一超标元素,超标率 4.0%,平均含量 0.32 mg/kg,95 百分位数为 0.84 mg/kg,接近 1.0 mg/kg 限量值;Pb、Cd、总 As 平均含量分别为 0.031、0.023 和 0.047 mg/kg,均远低于限量值,整体安全。见表 3。

表 3 江西省市售与籽类食品中重金属检测结果

Table 3 Heavy metal test results in nuts and seeds sold in Jiangxi Province

元素类别	数量	平均值(mg/kg)	P_{95} (mg/kg)	检出率(%)	超标率(%)
Pb	99	0.031	0.110	61.6	0
Cd	99	0.023	0.120	67.7	0
Cr	99	0.320	0.840	100.0	4
Hg	99	0.004	0.004	2.02	0
As	99	0.047	0.090	100.0	0

2.3 品类特异性污染差异 参照表 4、5 数据,不同品类坚果的重金属污染水平存在明显差异。Pb 方面,开心果污染特征最为显著,平均含量达 0.055 0 mg/kg、检出率 77.8%,且变异系数较小;板栗 Pb 检出率仅 20.0%、平均含量 0.012 5 mg/kg,污染风险最低;其余品类 Pb 含量均处于低水平。Cd 分布特征与 Pb 存在区别:碧根果、开心果、葵花籽 Cd 检出率均为 100%,其中碧根果平均含量最高,为 0.051 3 mg/kg;核桃平均含量最低,为 0.010 0 mg/kg。As 在所有样品中均 100% 检出,普遍存在于各类坚果中,开心果平均含量最高,为 0.071 3 mg/kg,且所有品类含量均远

低于限量标准。Cr 是主要潜在风险因子,品类间分布差异突出:葵花籽平均含量最高,为 0.819 1 mg/kg,部分样品含量超 1 mg/kg 限量值;开心果、核桃处于中等污染水平;碧根果、板栗虽 100% 检出 As,但含量相对较低。Hg 污染风险最低,仅在开心果、松子中有少量检出,其余品类均未检出。

变异系数分析结果显示,9 种坚果的 Pb 变异系数大于 1,4 种坚果的 Cd 变异系数大于 1,反映人类活动对 Pb、Cd 含量的影响程度较高;As、Hg 变异系数均小于 1,受人为活动干扰相对较小。

表 4 江西省市售坚果和籽类中 Pb、Cd 检测结果

Table 4 Lead and cadmium test results in nuts and seeds sold in Jiangxi Province

坚果类别	Pb 含量范围 (mg/kg)	平均值(mg/kg)	变异系数(%)	检出率(%)	Cd 含量范围 (mg/kg)	平均值(mg/kg)	变异系数(%)	检出率(%)
巴旦木	ND ~ 0.115	0.022 4	2.03	33.3	ND ~ 0.155	0.005 4	1.15	33.3
板栗	ND ~ 0.132	0.028 4	2.04	20.0	ND ~ 0.164	0.010 6	0.54	80.0
碧根果	ND ~ 0.073	0.026 1	1.21	75.0	0.004 ~ 0.139	0.051 3	1.17	100
核桃	ND ~ 0.188	0.034 0	1.35	63.2	ND ~ 0.018	0.004 1	1.50	26.3
开心果	ND ~ 0.135	0.055 5	0.95	77.8	0.006 ~ 0.046	0.016 0	0.81	100
松子	ND ~ 0.073	0.030 1	1.24	66.7	0.059 ~ 0.131	0.093 8	0.38	100
夏威夷果	ND ~ 0.067	0.032 4	0.96	85.7	ND ~ 0.011	0.003 7	0.94	42.9
腰果	ND ~ 0.104	0.026 2	1.30	58.3	ND ~ 0.028	0.006 6	1.20	58.3
瓜蒌籽	ND ~ 0.069	0.035 4	0.87	75.0	0.003 8 ~ 0.013	0.006 6	0.67	100
葵花籽	ND ~ 0.115	0.032 9	1.01	69.2	0.045 ~ 0.256	0.095 2	0.62	100
南瓜籽	ND ~ 0.077	0.017 4	1.63	45.5	ND ~ 0.0079	0.004 0	0.54	72.7
西瓜籽	ND ~ 0.082	0.032 0	1.18	66.7	ND ~ 0.021	0.009 4	0.71	83.3

表 5 江西省市售坚果和籽类中 As、Cr、Hg 检测结果

Table 5 Test results of arsenic, chromium, and mercury in nuts and seeds sold in Jiangxi Province

坚果类别	As 含量范围 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	变异系数 (%)	检出率 (%)	Cr 含量范围 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	变异系数 (%)	检出率 (%)	Hg 含量范围 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	变异系 数(%)	检出 率(%)
巴旦木	0.017 6 ~ 0.059 1	0.038 5	0.376 4	100	0.14 ~ 0.364	0.220 2	0.375 2	100	ND	0.004	0	0
板栗	0.006 97 ~ 0.030 1	0.016 2	0.534 6	100	0.069 3 ~ 0.122	0.090 4	0.277 9	100	ND	0.004	0	0
碧根果	0.018 ~ 0.132	0.061 7	0.832 1	100	0.106 ~ 0.297	0.197 0	0.404 8	100	ND	0.004	0	0
核桃	0.024 7 ~ 0.094 5	0.057 3	0.357 1	100	0.069 8 ~ 0.258	0.154 2	0.393 6	100	ND	0.004	0	0
开心果	0.021 5 ~ 0.144	0.071 3	0.527 1	100	0.11 ~ 0.559	0.235 0	0.584 2	100	ND ~ 0.004 81	0.004 1	0.066	11.1
松子	0.036 6 ~ 0.072 8	0.056 5	0.325 1	100	0.122 ~ 0.432	0.231 3	0.752 2	100	ND ~ 0.008 73	0.005 6	0.489 7	33.3
夏威夷果	0.018 5 ~ 0.078 4	0.037 6	0.574 7	100	0.097 1 ~ 0.769	0.336 0	0.853 9	100	ND	0.004	0	0
腰果	0.016 7 ~ 0.073 9	0.038 5	0.453 3	100	0.057 5 ~ 0.221	0.147 7	0.357 7	100	ND	0.004	0	0
瓜蒌籽	0.025 8 ~ 0.067 4	0.045 1	0.474 4	100	0.307 ~ 0.821	0.539 5	0.433 1	100	ND	0.004	0	0
葵花籽	0.011 2 ~ 0.081 4	0.042 8	0.564 9	100	0.070 7 ~ 5.76	0.819 1	1.873 3	100	ND	0.004	0	0
南瓜籽	0.020 3 ~ 0.056 7	0.037 3	0.329 1	100	0.073 9 ~ 0.504	0.286 7	0.954 7	100	ND	0.004	0	0
西瓜籽	0.030 6 ~ 0.090 2	0.053 6	0.453 7	100	0.241 ~ 1.06	0.501 5	0.664 8	100	ND	0.004	0	0

2.4 膳食暴露与污染指数评价 基于成人 60kg、每日 5g 坚果的平均消费水平,采用联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会/欧洲食品安全局(JECFA/EFSA)推荐方法开展膳食暴露与污染指数评价。Pb 以儿童神经发育毒性 BMDL₀₅[0.5 μg/(kg·bw·d)]计算 MOE;因未进行形态分析,以总 As 含量替代无机 As 进行评估,不额外折算。Cd、总 Hg、无机 As、总 Cr 分别采用对应 JECFA/EFSA 健康指导值计算 HQ^[13-14]。结果如表 6 所示,成人日均暴露

量:Pb 为 2.62 μg/(kg·d)(P₉₅=9.00)、Cd 为 1.90 μg/(kg·d)(P₉₅=9.75)、Cr 为 26.42 μg/(kg·d)(P₉₅=69.67)、Hg 为 0.33 μg/(kg·d)(P₉₅=0.33)、As 为 3.92 μg/(kg·d)(P₉₅=7.55);Cd 平均 HQ=2.38(>1)、Pb 平均 MOE=0.19(<100),均存在潜在健康风险,Cr、As、Hg 的 HQ<1,风险可接受。污染指数分析显示,仅葵花籽内梅罗综合污染指数 4.1(重度污染),其余品种均为“优良”或“清洁”,整体污染较轻。见表 7。

表 6 江西省市售坚果与籽类食品膳食暴露情况及风险评价结果

Table 6 Dietary exposure and risk assessment results of nuts and seed foods sold in Jiangxi Province

元素类别	平均值(mg/kg)	均值得 P ₉₅					平均 HQ/MOE	风险评价
		日暴露量 [μg/(kg·d)]	月暴露量 (mg/kg)	P ₉₅ (mg/kg)	日暴露量[μg/(kg·d)]	月暴露量 (μg/kg)		
Pb	0.031	2.62	78.6	0.108	9.00	270.0	0.190 (MOE)	存在潜在健康风险
Cd	0.023	1.90	57.0	0.117	9.75	292.5	2.380 (HQ)	存在潜在健康风险
Cr	0.317	26.42	792.6	0.836	69.67	2 090.0	0.004(HQ)	风险可接受
Hg	0.004	0.33	9.9	0.004	0.33	9.9	0.580 (HQ)	风险可接受
As	0.047	3.92	117.6	0.091	7.55	226.5	0.650 (HQ)	风险可接受

表 7 江西省市售坚果与籽类食品中 Pb、Cr、Cd、Hg、As 污染评价结果

Table 7 Evaluation results of lead, chromium, cadmium, mercury, and arsenic contamination in nuts and seeds sold in Jiangxi Province

类别	单因子污染指数					单因子污染指 内梅罗综合污		综合污染程度
	Pb	Cr	Cd	Hg	As	数分级	染指数	
巴旦木	0.11	0.22	0.011	0.08	0.08	优良	0.41	清洁
板栗	0.14	0.09	0.021	0.08	0.03	优良	0.47	清洁
碧根果	0.13	0.20	0.100	0.08	0.12	优良	0.27	清洁
核桃	0.17	0.15	0.008	0.08	0.12	优良	0.67	清洁
开心果	0.28	0.24	0.032	0.08	0.14	优良	0.49	清洁
松子	0.15	0.23	0.190	0.11	0.11	优良	0.32	清洁
夏威夷果	0.16	0.34	0.007	0.08	0.08	优良	0.56	清洁
腰果	0.13	0.15	0.013	0.08	0.08	优良	0.37	清洁
瓜蒌籽	0.18	0.54	0.013	0.08	0.09	优良	0.59	清洁
葵花籽	0.16	0.82	0.190	0.08	0.09	优良	4.10	重度污染
南瓜籽	0.09	0.29	0.008	0.08	0.08	优良	0.69	清洁
西瓜籽	0.16	0.50	0.019	0.08	0.11	优良	0.76	清洁

3 讨 论

本研究评估了江西省市售坚果及籽类中五种重金属的污染特征与健康风险。结果显示,Cr 和 As 检

出率为 100%,Pb 和 Cd 检出率超 60%,提示环境背景或加工环节存在持续输入;Hg 检出率仅 2.02%,与其非水生来源及富集特征一致。整体污染物含量未

超标且非致癌风险可控($P_i < 0.7$),但 Cr 的污染特征需高度警惕。本研究中 Cr 平均含量 0.32 mg/kg, 95% 分位数达 0.84 mg/kg, 且 4.0% 的样品(主要为葵花籽)超标。葵花籽的内梅罗综合污染指数($P_M=4.1$)远超重度污染阈值,这与昆明、广州等地坚果低污染水平的研究结果^[15-17]存在显著地域差异。该差异可能源于供应链不同:本地坚果多源自本省或邻近工业区,受历史排放、大气沉降或灌溉残留影响较大。此外,本研究仅测定总 Cr,未区分三价 Cr 与六价 Cr。前者为人体必需元素,后者毒性较强。本研究仅对食品中总 Cr 含量进行监测,用于了解其本底水平。若超标样品中高毒性 Cr 占比较大,实际致癌风险将显著高于当前评估,亟需开展形态分析以确证毒性当量。

品类差异方面,开心果 Pb、As 含量较高可能与其外壳特性易吸附沉降物有关^[18];葵花籽对 Cr、Cd 富集能力强或与其根系及转运蛋白表达相关^[19]。Pb 的高变异系数(>1)表明人为活动影响显著,需强化全链条溯源^[20]。

膳食暴露评估显示,Cd、Hg、Cr、As 日均暴露量均低于健康指导值。Pb 的每日暴露量为 2.62 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw})$,高于 JECFA 推导的 Pb 基准剂量下限 BMDL_{01} $[0.5 \sim 1.0 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw})]$ ^[21]。在 Pb 每日摄入总量不变的条件下,20 kg 儿童经体重标准化后的暴露剂量可达 7.86 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw})$,约为普通人群暴露水平的 3 倍。由于儿童血脑屏障发育尚未成熟、中枢神经系统处于快速发育敏感期,对 Pb 的吸收利用率更高、神经毒性损伤具有不可逆性,现行基于成人毒理数据制定的限量标准难以充分保护儿童易感人群,亟需建立针对儿童 Pb 暴露的特异性健康风险评估框架。

基于此,建议构建“监测-分析-治理-引导”四位一体的监管体系:一是实施靶向监测,将葵花籽列为重点,强制产地溯源;二是推进 Cr(VI)专项检测,为修订国标提供依据;三是强化源头管控,联合开展土壤修复与加工规范;四是加强消费引导,倡导儿童食用正规预包装产品,避免长期单一食用高风险散装食品。

本研究存在一定局限性:采样集中于城市商超,对偏远地区覆盖不足;且未进行重金属形态分析。未来研究将扩大采样范围,引入形态分析与精细化暴露模型,以推动多污染物累积风险的精准评估。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] 王慧强. 中国坚果资源与坚果产业研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
Wang HQ. Study on nut resources and nut industry in China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.(In Chinese)
- [2] 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)
- [3] Hadian Z, Shariatifar N, Arabameri M, et al. Risk assessment of metal exposure from nuts consumption in Iran using inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 21: 101865.
- [4] 王艳敏,李娟,熊丽,等. 江西省市售婴幼儿米粉中铅、镉、总砷污染状况调查及暴露评估 [J]. 现代预防医学,2024,51(15): 2742-2747.
Wang YM, Li J, Xiong L, et al. Lead, Cadmium, and Arsenic contamination in infant and young child rice flour sold in Jiangxi Province and exposure assessment [J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(15): 2742-2747.(In Chinese)
- [5] 张笑辰,刘煜,张兴绘,等. 江西省主要城市土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境科学与技术,2022,45(8):206-217.
Zhang XC, Liu Y, Zhang XH, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of top-soil in major cities of Jiangxi province [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45 (8): 206-217.(In Chinese)
- [6] Paiva EL, Morgano MA, Ariseto-Bragotto AP, et al. Occurrence and determination of inorganic contaminants in baby food and infant formula[J]. Current opinion in food science, 2019, 30: 60-66.
- [7] 杨大进,李宁,蒋定国. 2014 年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册[M]. 北京:中国标准出版社,2014.
Yang DJ, Li N, Jiang DG. National food contamination and harmful factors risk monitoring workbook 2014 [M]. Beijing: Standards Press of China, 2014.(In Chinese)
- [8] 王晓丽,徐计宏,郭建娥,等. 太原市售坚果中铅、镉、砷污染状况及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报,2025,16(17): 313-320.
Wang XL, Xu JH, Guo JE, et al. Assessment of Lead, Cadmium and Arsenic pollution and health risk evaluation in nuts sold in Taiyuan City[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(17): 313-320.(In Chinese)
- [9] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)[M]. 北京:人民卫生出版社,2022.
Chinese Nutrition Society. Dietary Guidelines for Chinese Residents (2022) [M]. Beijing: People's Health Publishing House, 2022. (In Chinese)
- Heavy metal and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Content in sea buckthorn and assessment of their health risks [D]. Yinchuan: Ningxia Medical University, 2025
- [10] 林视在. 沙棘中重金属与多环芳烃的含量及其健康风险评估 [D]. 银川:宁夏医科大学,2025.
Lin JZ. Heavy metal and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Content in sea buckthorn and assessment of their health risks [D]. Yinchuan: Ningxia Medical University, 2025.(In Chinese)
- [11] 罗伟. 食品安全风险分析化学危害评估[M]. 北京:中国质检出版社中国计量出版社,2012.
Luo Y. Food safety risk analysis chemical hazard risk assessment Food safety risk analysis chemical hazard risk assessment [M]. Beijing: China Standard Publishing House, 2012.(In Chinese)
- [12] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. GB 2762-2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
(下转第 2465 页)

- metabolism[J]. *Frontiers in Immunology*, 2025, 16: 1653472.
- [17] Zheng T, Hao HN, Liu QQ, et al. Effect of extracellular vesicles derived from *akkermansia muciniphila* on intestinal barrier in colitis mice[J]. *Nutrients*, 2023, 15(22): 4722.
- [18] Hua DX, Yang Q, Li XW, et al. The combination of *Clostridium butyricum* and *Akkermansia muciniphila* mitigates DSS-induced colitis and attenuates colitis-associated tumorigenesis by modulating gut microbiota and reducing CD8+ T cells in mice [J]. *mSystems*, 2025, 10(2): e0156724.
- [19] Su Z, Li W, Li S, et al. Harnessing *akkermansia muciniphila* membrane coating for probiotic therapy in inflammatory bowel disease[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(8): 11653–11666.
- [20] Wade H, Pan KC, Duan QH, et al. *Akkermansia muciniphila* and its membrane protein ameliorates intestinal inflammatory stress and promotes epithelial wound healing via CREBH and miR-143/145[J]. *Journal of Biomedical Science*, 2023, 30(1): 38.
- [21] Martini E, Krug SM, Siegmund B, et al. Mend Your fences: the epithelial barrier and its relationship with mucosal immunity in inflammatory bowel disease[J]. *Cell Mol Gastroenterol Hepatol*, 2017, 4(1): 33–46.
- [22] Zhang Z, Li S, Cao H, et al. The protective role of phloretin against dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis in mice[J]. *Food & Function*, 2019, 10(1): 422–431.
- [23] Kumar P, Schroder EA, Rajaram MVS, et al. The battle of LPS clearance in host defense vs. inflammatory signaling [J]. *Cells (Basel, Switzerland)*, 2024, 13(18): 1590.
- [24] Li MC, He SH. IL-10 and its related cytokines for treatment of inflammatory bowel disease [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2004, 10(5): 620.
- [25] Xu N, Xiao XP, Ma Y, et al. Advancements in understanding the relationship between *Akkermansia muciniphila* and the development of ulcerative colitis[J]. *Front Pediatr*, 2025, 13: 1673156.
- [26] Shaheen ND, Khursheed W, Gurung B, et al. *Akkermansia muciniphila*: A key player in gut microbiota-based disease modulation[J]. *Microbiological Research*, 2025, 301: 128317.
- [27] Sun L, Zhang Y, Dong W, et al. *Akkermansia muciniphila*-derived hypoacylated rough-type lipopolysaccharides alleviate diet-induced obesity via activation of TLR4—IL-23—IL-22 immune axis [J]. *Imeta*, 2025, 4(5): e70066.
- [28] Zhang B, Wang N, He G, et al. *Akkermansia muciniphila*-Derived Outer Membrane Vesicles as a Novel Therapeutic Approach for Mastitis: Insights From In Vitro and Vivo Studies [J]. *The FASEB Journal*, 2025, 39(13): e70770.
- [29] Selmi H, Walker A, Balas L, et al. Ornithine lipids from *Akkermansia muciniphila* are dynamically modulated in colitis and shape macrophage inflammatory responses [J]. *Gut Microbes*, 2025, 17(1): Article: 2601376.
- [30] Buttó LF, Haller D. Dysbiosis in intestinal inflammation: Cause or consequence[J]. *International Journal of Medical Microbiology*, 2016, 306(5): 302–309.
- [31] Buttó LF, Schaubeck M, Haller D. Mechanisms of Microbe–Host interaction in crohn's disease: dysbiosis vs. pathobiont selection[J]. *Frontiers in Immunology*, 2015, 6: 555.
- [32] Manichanh C, Rigottier-Gois L, Bonnaud E, et al. Reduced diversity of faecal microbiota in Crohn's disease revealed by a metagenomic approach[J]. *Gut*, 2006, 55(2): 205–211.
- [33] Frank DN, St Amand AL, Feldman RA, et al. Molecular-phylogenetic characterization of microbial community imbalances in human inflammatory bowel diseases[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104 (34): 13780–13785.

收稿日期: 2026-01-23

(上接第 2370 页)

- 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Supervision and Regulation. GB 2762–2022 National standard for food safety limits of contaminants in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.(In Chinese)
- [13] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Evaluation of certain food additives and contaminants [R]. Geneva: World Health Organization, 2013.
- [14] European Food Safety Authority. Scientific opinion on Lead in food[J]. *EFSA Journal*, 2010, 8(4): 1570.
- [15] 李文廷, 尚城, 李洁, 等. 昆明市售坚果中 5 种有害元素的监测 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(15): 5190–5194.
- Li WT, Shang C, Li J, et al. Monitoring of five kinds of harmful elements in nuts sold in Kunming [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(15): 5190–5194.(In Chinese)
- [16] 刘单单, 曾晓琮, 周露. 2018 年广东省炒货食品及坚果制品安全状况结果分析[J]. *食品工业*, 2021, 42(5): 367–372.
- Liu DD, Zeng XC, Zhou L. Analysis on the safety status of roasted seeds and nut products in Guangdong province in 2018[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(5): 367–372.(In Chinese)
- [17] 周娜, 白艳艳, 陈丽惠, 等. 厦门市售坚果中重金属元素和黄曲霉毒素含量的测定及质量安全评价 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2014, 24(15): 2252–2254.
- Zhou N, Bai YY, Chen LH, et al. Quality safety assessment of roasted seeds and nuts in Xiamen [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2014, 24(15): 2252–2254.(In Chinese)
- [18] Komnitsas K, Zaharidi M, Xanthopoulou G. Assessment of pistachio shell biochar quality and its potential for adsorption of heavy metals [R]. Athens: National Technical University of Athens, 2014.
- [19] 吴运东, 郭旭丽, 李朋朋, 等. 向日葵对重金属复合污染土壤中 Cd、Zn、Pb、Cr 的吸收和转运特性研究[J]. *湖南农业科学*, 2020 (9): 47–51.
- Wu YD, Guo XL, Li PP, et al. Study on bioconcentration and translocation characteristics of Soil Cd, Zn, Pb and Cr in *helianthus annuus* L[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2020(9): 47–51.(In Chinese)
- [20] World Health Organization. FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA)/safety evaluation of certain food additives and contaminants: Lead[R]. Geneva: World Health Organization, 2011.
- [21] 王超, 刘畅, 胡清, 等. 植物药重金属污染状况及全链条生产过程污染的溯源与管控 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3789–3800.
- Wang C, Liu C, Hu Q, et al. Pollution status of heavy metals in herbal medicine and their traceability & control in the whole chain production process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3789–3800.(In Chinese)

收稿日期: 2025-12-26