

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250513005

引用格式: 纵瑞涵, 陈宁宁, 刘惠, 等. 安徽省花生中5种重金属污染水平及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 86-93.

ZONG RH, CHEN NN, LIU H, *et al.* Pollution characteristics of 5 kinds of heavy metals and dietary exposure risk assessment in *Arachis hypogaea* L. in Anhui Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 86-93. (in Chinese with English abstract).

安徽省花生中5种重金属污染水平及 膳食暴露风险评估

纵瑞涵, 陈宁宁, 刘惠, 陈元元, 王华东, 陈志飞, 姜健, 刘柏林, 谢继安*
(安徽省疾病预防控制中心, 合肥 230601)

摘要: **目的** 分析安徽省市售散装花生中铅(Pb)、镉(Cd)、总砷(As)、铬(Cr)、总汞(Hg) 5种重金属含量特征, 结合消费量数据开展膳食暴露风险评估。**方法** 随机采集安徽省16地市不同环节花生样品, 使用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定样品中5种重金属元素含量。使用内梅罗污染指数评价花生中的重金属污染状况, 结合2015—2017年安徽省居民花生消费量调查数据, 分析不同人群暴露重金属情况, 评估健康风险。**结果** 80份花生样品中Pb、Cd、As、Cr、Hg检出率依次为92.5%、100.0%、100.0%、93.8%、7.5%, 其中Cr超标率为5.0%。结果差异具有统计学意义($P<0.05$)。淮南市、滁州市采集的样品单因子污染指数 $P_{Ci}>0.7$ 。男性重金属暴露量高于女性, 18~50岁男性Cr元素暴露量最高[0.0622 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$, $P_{97.5}=0.413 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$]。不同性别、年龄的人群花生中5种重金属元素的膳食暴露限值(margin of exposure, MOE)和安全限值(margin of safety, MOS)均大于1, Cd的MOS值较其他元素最低, 18~50岁人群膳食Cr元素MOS值较低(<10)。**结论** 安徽省花生中重金属检出率高, 超标率低, Cr元素在个别地区存在超标现象。Cd元素在不同采样环节的样品中污染指数存在差异, 居民食用花生暴露重金属的健康风险较低。

关键词: 重金属; 花生; 膳食暴露; 风险评估; 安徽

Pollution characteristics of 5 kinds of heavy metals and dietary exposure risk assessment in *Arachis hypogaea* L. in Anhui Province

ZONG Rui-Han, CHEN Ning-Ning, LIU Hui, CHEN Yuan-Yuan, WANG Hua-Dong,
CHEN Zhi-Fei, JIANG Jian, LIU Bo-Lin, XIE Ji-An*

(Anhui Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hefei 230601, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the content characteristics of 5 kinds of heavy metals including lead (Pb), cadmium (Ca), total arsenic (As), total chromium (Cr), and total mercury (Hg) in *Arachis hypogaea* L. sold in Anhui Province, and to establish risk assessment of dietary exposure based on consumption data. **Methods** A total of 80

收稿日期: 2025-05-13

第一作者: 纵瑞涵(1994—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品理化检验。E-mail: zongrh212@163.com

*通信作者: 谢继安(1980—), 男, 硕士, 主任技师, 主要研究方向为食品理化检验和研究工作。E-mail: xja@ahcdc.com.cn

Arachis hypogaea L. samples were collected from 16 cities in Anhui Province. The content of Pb, Ca, As, Cr and Hg in *Arachis hypogaea* L. samples were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The Nemerow comprehensive pollution index were applied to evaluate the heavy metal pollution status in *Arachis hypogaea* L.. Combined with the consumption survey data on *Arachis hypogaea* L. consumption of residents in Anhui Province from 2015 to 2017, to analyze the exposure of various population groups in Anhui Province to heavy metals via *Arachis hypogaea* L. consumption, and the health effects were evaluated. **Results** Among the 80 *Arachis hypogaea* L. samples, the detection rates of Pb, Cd, As, Cr and Hg were 92.5%, 100.0%, 100.0%, 93.8% and 7.5%, respectively. Except for Cr, which had an over-limit rate of 5.0%, all other elements remained within the acceptable limits. The difference was statistically significant ($P < 0.05$). The single-factor pollution index of samples collected from Huainan City and Chuzhou City was greater than 0.7. Males aged 18–50 years had the highest Cr EDI [$0.0622 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, $P_{97.5} = 0.413 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]. The margin of exposure (MOE)/margin of safety (MOS) values of the 5 kinds of heavy metal elements in *Arachis hypogaea* L. were all greater than 1. The MOS value of the Cr element from 18–50 aged was lowed than 10, while the MOS values of Cd in were the lowest. **Conclusion** The detection rates of 5 kinds of heavy metals in *Arachis hypogaea* L. in Anhui Province are high, but the over-limit rates are low. Cr levels exceeds standards in certain localized areas, while Cd pollution indices varied across different sampling stages. The health risks from heavy metal exposure through *Arachis hypogaea* L. consumption are determined to be at acceptably low levels for local residents.

KEY WORDS: heavy metals; *Arachis hypogaea* L.; dietary of exposure; risk assessment; Anhui

0 引言

花生是我国广泛种植的重要油料作物之一, 在安徽省油料作物播种面积中排名第二, 仅次于油菜籽^[1], 花生也是安徽省重要的经济作物。花生仁中含有丰富的脂肪酸、维生素、氨基酸、矿物质元素等人体必需营养素, 《中国居民膳食指南(2022)》推荐每周摄入坚果 50~70 g, 适量食用花生有益于心脏健康^[2-3]。

食品中的重金属主要来源于土壤、水、化肥、杀虫剂等^[4], 有研究表明, 花生能富集多种重金属元素, 镉元素含量与土壤中镉含量呈正相关^[5]。重金属经食物链进入人体后, 难以被人体分解代谢, 产生累积性。长期、低剂量摄入重金属, 会对人体肾脏、肝脏、神经系统、骨骼组织等造成严重的健康危害^[6]。我国在 GB 2762—2022《食品安全国家标准食品中污染物限量》和 NY/T 1067—2006《中华人民共和国农业行业标准 食用花生》中对花生中重金属的最大残留量分别作了规定, 依次是铅(Pb) $\leq 0.2 \text{ mg/kg}$ 、镉(Cd) $\leq 0.5 \text{ mg/kg}$ 、无机砷(As) $\leq 0.2 \text{ mg/kg}$ 、铬(Cr) $\leq 1.0 \text{ mg/kg}$ 、汞(Hg) $\leq 0.02 \text{ mg/kg}$ 。

目前, 我国对于本地食品中重金属的污染研究大部分集中在粮食、水果、蔬菜和肉类等食品^[7-9], 花生中重金属的分析少有报道^[10]。安徽省是我国十大花生种植主产区之一^[11], 单产水平常年居全国领先水平^[12]。调查污染物水平, 关注种植质量, 将提高我国花生产业可持续发展能力。本研究使用电感耦合等离子体质谱(inductively coupled

plasma mass spectrometry, ICP-MS)法对花生样品中重金属元素 Pb、Cd、As、Cr 和 Hg 的含量进行测定, 分析安徽省花生中这 5 种重金属元素的污染特征。评估花生中的重金属污染对本地居民产生的健康风险, 为相关卫生与健康政策的制定与优化提供数据支持, 确保居民饮食安全与健康。

1 材料与方法

1.1 样品来源及制备

采集安徽省 16 地市的的花生样品, 从每个市随机抽取不少于 3 个采样点, 每个采样点采集样品 1~2 份, 每份样品不少于 1 kg, 均为散装干花生。采样环节涵盖种植环节和流通环节(商场超市、农贸市场、个体商店), 共采集 80 份, 其中 74 份样品产地为安徽省, 6 份样品分别产自河南、河北、辽宁、吉林和黑龙江省。样品来源分布见图 1。

将采集的花生去除杂、除壳, 不脱花生衣, 经实验室专用粉碎机粉碎, 过筛, 储存于洁净的塑料保鲜盒中, 于 2~8 °C 保存。

1.2 试剂与仪器

多元素混合溶液标准物质[GBW(E)082429, 浓度 10 mg/kg]、汞单元素溶液标准物质(GBW08617, 质量浓度 1000 mg/L)(中国计量科学研究院); 内标元素混合标准溶液(GNM-M043583-2013, 质量浓度 100 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 调谐溶液(质量浓

度 1 $\mu\text{g/L}$, 美国 PerkinElmer 公司); 硝酸(色谱级, 苏州晶瑞化学有限公司); 黄豆粉成分分析标准物质(GBW10190, 坛墨质检科技股份有限公司)。

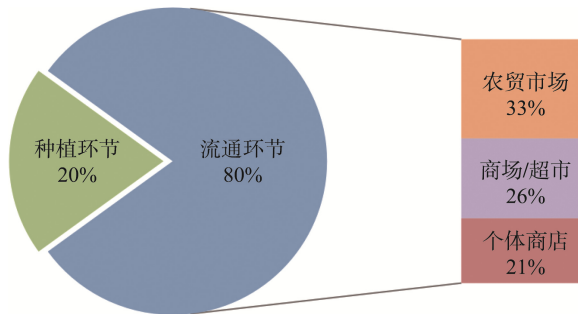


图 1 样品来源分布

Fig.1 Distribution of samples from different sources

NexLON 300D 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司); ultraCLAVE 超级微波消解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); XPE204 万分之一天平[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; Milli-Q IQ element 超纯水机(美国 Millipore 公司)。

1.3 样品处理

称取 0.2 g 样品于消解管中, 加入 3 mL 硝酸, 将消解管放入装有 440 mL 纯水和 10 mL 硝酸的内衬桶内, 经超级微波消解仪消解。消解完成后, 用纯水转移并定容至 25 mL, 混匀待测, 同时进行空白实验。

1.4 样品测定与质量控制

根据《国家食品污染和有害因素风险监测工作手册》中食品中多元素分析的标准操作程序和 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》, 采用 ICP-MS 法同时测定 Pb、Cd、As、Cr、Hg 5 种元素含量, 测定结果以 mg/kg 表示。

选用黄豆粉成分分析标准物质为质量控制样品, 进行 6 次平行测定试验; 随机选取 10% 的样品进行平行样品测定, 对结果超标或异常样品进行复测定试验。

1.5 污染评价

1.5.1 重金属限量标准

GB 2762—2022 中对花生中的 Pb 和 Cd 的限量标准作了规定, As、Cr、Hg 则依据农业部标准 NY/T 1067—2006《食用花生》的卫生指标进行评价, 详见表 1。

1.5.2 污染程度评价

使用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法分别对花生中 5 种重金属的污染程度展开评价^[13]。单因子污染指数计算见公式(1)。

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

表 1 花生中重金属最高允许限量标准

Table 1 Standards for heavy metals in *Arachis hypogaea* L.

元素	最高残留限量 (mg/kg)	标准来源
铅(以 Pb 计)	0.2	GB 2762—2022
镉(以 Cd 计)	0.5	GB 2762—2022
无机砷(以 As 计)	0.2	NY/T 1067—2006
铬(以 Cr 计)	1.0	NY/T 1067—2006
汞(以 Hg 计)	0.02	NY/T 1067—2006

式中: P_i 为污染元素 i 的污染指数; C_i 为污染元素 i 在样品中的浓度, mg/kg ; S_i 为污染元素的最高残留限量值, mg/kg 。

内梅罗综合污染指数计算见公式(2)。

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{i,\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; \bar{P}_i 为各污染元素 i 的污染指数的平均值; $P_{i,\text{max}}$ 为各污染元素 i 污染指数的最大值。参考 CHENG 等^[14]对重金属污染划分为 5 个等级: $P_{\text{综}} \leq 0.7$, $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$, $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$, $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$, $P_{\text{综}} > 3.0$, 分别对应安全等级、警戒限、轻度污染、中度污染和重度污染。

1.6 消费量数据

花生消费量数据来自 2015—2017 年安徽省居民营养与健康状况监测, 在全省共设置 12 个监测点, 运用多阶段整群随机抽样的方法选择调查对象, 开展 3 d 24 h 膳食回顾调查, 收集各调查对象的个体花生消费量数据。共调查 18 岁及以上人群 7548 人, 其中男性 3588 人, 女性 3960 人, 18~50 岁组 3066 人, 50~65 岁组 2733 人, 65 岁以上组 1749 人。

为匹配检测样品类型, 本研究只针对花生仁(花生米)的消费量进行统计, 对花生制品的消费量不作统计。带壳花生与花生仁的质量转换系数以 0.7 计。

1.7 风险评估方法

1.7.1 膳食暴露评估

结合消费量调查数据与花生样品中 Pb、Cd、As、Cr、Hg 的含量, 采用点评估模型^[15], 根据公式(3)计算人群每日每公斤体重的膳食暴露量(estimated daily intake, EDI)。

$$\text{EDI}[\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})] = \frac{F \times X_i}{\text{BW}} \quad (3)$$

式中: F 为花生的人群每日消费量, g/d ; X_i 为花生中重金属 i 的平均含量, mg/kg ; BW 为人群体重, kg 。

1.7.2 风险特征描述

联合国粮农组织和世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)指出 $1.2 \mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d}$ 的 Pb 暴露水平, 将

引起人群收缩压升高 1 mmHg^[16], 因此将 1.2 μg/kg · bw · d 作为 Pb 元素的基准剂量下限值(benchmark dose limit, BMDL); 推荐 Cd 元素的每月可耐受摄入量(provisional tolerable monthly intake, PTMI)为 25 μg/kg · bw, 则每日可耐受摄入量(tolerable daily intake, TDI)为 0.833 μg/kg · bw^[16]; JECFA 通过评估, 给出无机 As 元素引起肺癌的基准剂量下限(95%可信区间, BMDL_{0.5})为 3 μg/kg · bw · d^[17]; 在 2018 年, 美国环保署(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)提出的每日安全摄入六价 Cr 限值为 3 μg/kg · bw^[18]; JECFA 建议除鱼类和贝类以外总 Hg 对于成人的每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)为 1 μg/kg · bw, 儿童为 4 μg/kg · bw^[17]。

使用暴露限值法(margin of exposure, MOE)评估通过食用花生摄入 Pb 和 As 的暴露风险情况^[19]。无机 As 毒性较强, 在总 As 含量占比约 70%^[20], 保守选择总 As 作为无机 As 的评价指标。MOE=BMDL/EDI, BMDL 为 Pb 和无机 As 的基准剂量下限, EDI 为对应元素的膳食暴露量。若 MOE>1, 认为健康风险较低; MOE≤1, 认为存在一定健康风险, 需予以关注。

使用安全限值(margin of safety, MOS)法评价 Cd、Hg 和 Cr 的暴露风险^[15]。MOS=TDI/EDI, 将 PTMI、PTWI 换算成每日可耐受摄入量 TDI, Cd 元素 TDI 为 0.833 μg/kg · bw, Hg 元素为 0.14 μg/kg · bw。六价 Cr 为致癌物, 而三价 Cr 为营养元素^[21], 保守认为 Cr 元素 TDI 为 3 μg/kg · bw。当 MOS≤1 时, 认为存在暴露风险。MOS 值越大, 风险越低。

1.8 数据处理

参照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)关于低水平污染物检测数据可信度统计规则的建议^[22], 若检测结果低于检出限(limit of detection, LOD), 记为未检出。当未检出率(未检出样品在所有检测样品中的比例)小于 60%时, 所有未检出数据以 LOD 的一半(1/2 LOD)作为替代值; 当未检出率大于等于 60%时, 所有未检出数据直接用 LOD 替代。

采用 Excel 2007 和 SPSS 20 软件进行数据统计分析。对计量资料进行正态性检验(Kolmogorov-Smirnov 检验)后, 发现 Pb、As、Cr、Hg 元素含量不符合正态分布($P<0.05$), Cd 元素含量符合正态分布($P=0.20$), 采用均值与中位数对数据进行分布描述。用 Kruskal-Wallis 检验分析不同重金属

元素检测结果之间的差异性。检出率和超标率的差异采用 χ^2 检验, 检验水准 $\alpha=0.05$ 。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 花生中重金属含量情况

Cr 元素含量最高, 平均值为 0.334 mg/kg, 其次是 Cd, 平均值为 0.209 mg/kg, Pb 和 As 含量平均水平小于 0.1 mg/kg, Hg 元素水平最低(<0.001 mg/kg)。不同元素的检出率差异具有统计学意义($\chi^2=286.882, P<0.05$)。Cd 和 As 元素检出率 100.0%, Hg 检出率(7.5%) 最低, 仅有 6 份检出, 另外 Pb 和 Cr 的检出率分别为 92.5%和 93.8%。不同元素的超标率差异也具有统计学意义($\chi^2=16.162, P<0.05$)。除 Cr 元素(超标率 5.0%)外, 其余 4 个元素均没有超标现象。见表 2。

由表 3 可见, 农贸市场和商场/超市采购的花生样品中, 存在 Cr 元素超标情况, 超标率分别为 7.7% (2/26)和 9.5% (2/21), 超标样品均为本地生产。Hg 元素在种植环节的样品中无检出。不同采样环节的花生中, 同一元素的含量除 Cd 元素($H=13.28, P<0.05$)外, 其他 4 个元素的含量没有显著性差异($P>0.05$)。农贸市场采集的样品中 Cd 元素平均含量最高, 为 0.258 mg/kg, 种植环节(农户家中)采集的花生中 Cd 元素平均含量最低, 为 0.147 mg/kg。

2.2 花生中重金属污染特征

采用单因子污染指数与内梅罗综合污染指数评价法, 对花生中 5 种重金属元素的污染状况进行评估, 得出单因子污染指数 P_i 由高到低排列为: Cd (0.42)>Cr (0.29)> Hg (0.21)>Pb (0.14)>As (0.07)。不同采样环节的具体评价结果见图 2。农贸市场采集的花生样品 Cd 污染程度最大($P_{Cd}=0.52$)。在农贸市场和商场/超市环节, 分别有 2 份样品处于 Cr 元素的中度污染和重度污染水平。种植环节存在 1 份样品出现 Pb 轻度污染。Hg、As 元素在所有样品中均处于安全水平。Cd 元素的污染指数在不同采样环节有显著性差异($H=13.29, P<0.05$)。不同采样环节的综合污染指数 P_{Σ} 没有显著性差异($P>0.05$)。

分析不同采样地区的花生中的重金属污染程度(表 4), 淮南市和滁州市采集的花生样品 P_{Cr} 分别为 0.87、2.24。其余采样城市的花生中重金属污染程度较轻, 处于安全水平。

表 2 花生中重金属含量特征($n=80$)

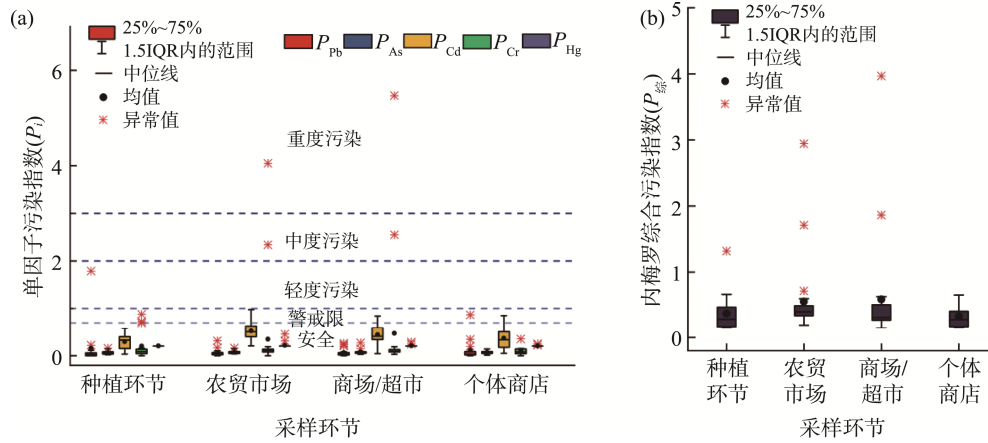
Table 2 Characteristics of heavy metal contents in *Arachis hypogaea* L. ($n=80$)

元素	含量范围/(mg/kg)	平均值±标准偏差/(mg/kg)	中位值(4 分位间距)/(mg/kg)	检出率/%	超标率/%
Pb	ND~0.850	0.0276±0.0342	0.0152 (0.0310, 0.0080)	92.5	-
Cd	0.0160~0.489	0.209±0.106	0.200 (0.269, 0.143)	100.0	-
As	0.0130~0.267	0.0139±0.0080	0.0114 (0.0169, 0.0089)	100.0	-
Cr	ND~5.470	0.334±0.885	0.0938 (0.136, 0.0738)	93.8	5.0
Hg*	ND~0.0090	0.0041±0.0006	0.0040 (0.0040, 0.0040)	7.5	-

注: ND 表示未检出; *为未检出数据用 LOD 替代; -表示 0, 下同。

表 3 不同采样环节中花生重金属含量特征
Table 3 Characteristics of heavy metal contents *Arachis hypogaea* L. from different sampling stages

元素	种植环节(n=16)					农贸市场(n=26)					商场/超市(n=21)					个体商店(n=17)					
	Pb	Cd	As	Cr	Hg ⁺	Pb	Cd	As	Cr	Hg ⁺	Pb	Cd	As	Cr	Hg ⁺	Pb	Cd	As	Cr	Hg ⁺	
平均值 (mg/kg)	0.0745	0.147	0.0124	0.199	0.0040	0.0259	0.258	0.0141	0.342	0.0043	0.0309	0.219	0.0148	0.467	0.0041	0.0551	0.181	0.0140	0.0930	0.0041	
中位值 (mg/kg)	0.0117	0.162	0.0090	0.0846	0.0040	0.0162	0.249	0.0113	0.112	0.0040	0.0184	0.203	0.0119	0.0941	0.0040	0.0141	0.167	0.0110	0.0742	0.0040	
检出率 /%	75.0	100.0	100.0	87.5	-	88.5	100.0	100.0	96.2	7.7	90.5	100.0	100.0	100.0	9.5	88.2	100.0	100.0	88.2	11.8	
超标率 /%	-	-	-	-	-	-	-	-	7.7	-	-	-	-	9.5	-	-	-	-	-	-	-



注: 1.5IQR 指 1.5 倍四分位间距(1.5×interquartile range)。

图 2 花生中重金属单因子污染指数和内梅罗污染指数

Fig.2 Single factor pollution index and Nemerow pollution index for *Arachis hypogaea* L. heavy metals

表 4 不同采样城市花生中重金属污染程度评价
Table 4 Pollution assessment of heavy metals in *Arachis hypogaea* L. from different cities

地区	城市	单因子污染指数(P_i)					内梅罗综合污染指数($P_{综合}$)	污染等级
		Pb	Cd	As	Cr	Hg		
皖北	淮北	0.01	0.29	0.13	0.08	0.20	0.25	安全
	亳州	0.15	0.53	0.05	0.08	0.20	0.41	安全
	宿州	0.02	0.16	0.06	0.13	0.20	0.19	安全
	蚌埠	0.13	0.36	0.05	0.12	0.20	0.30	安全
	阜阳	0.25	0.38	0.06	0.09	0.22	0.32	安全
皖中	淮南	0.05	0.47	0.06	0.87	0.20	0.87	警戒限
	合肥	0.24	0.46	0.06	0.11	0.22	0.37	安全
	安庆	0.18	0.39	0.06	0.13	0.20	0.32	安全
	滁州	0.06	0.37	0.06	2.24	0.20	1.68	轻度污染
皖南	六安	0.14	0.34	0.06	0.26	0.25	0.38	安全
	黄山	0.24	0.48	0.05	0.06	0.20	0.39	安全
	宣城	0.20	0.42	0.07	0.11	0.20	0.34	安全
	池州	0.10	0.34	0.09	0.08	0.22	0.29	安全
	芜湖	0.19	0.71	0.05	0.06	0.20	0.53	安全
	马鞍山	0.15	0.55	0.09	0.19	0.20	0.47	安全
	铜陵	0.07	0.46	0.11	0.07	0.20	0.35	安全

2.3 人群花生消费情况

由表 5 可见, 同一年龄组中, 男性的花生消费量大于女性, 有显著差异($P < 0.05$)。同一性别组人群, 其年龄越大, 体重越低, 花生消费量也呈现降低趋势。18~50 岁男性体重最高(68.3 kg), 花生消费量最大(12.7 g/d, $P_{97.5}$ =84.5 g/d)。65 岁以上女性体重最低(54.3 kg), 花生消费量最少(1.89 g/d, $P_{97.5}$ =30.0 g/d)。50~65 岁男性人群, 最大消费量在 105 g/d, 而 50~65 岁女性人群中, 最大消费量达到 200 g/d, 表明在性别整体差异的背景下, 个体间的花生消费行为也存在波动。

2.4 人群暴露情况

安徽省经食用花生摄入 5 种重金属元素的暴露量结果见图 3。男性通过食用花生摄入 5 种重金属的暴露量均高于女性群

体。Cr 元素暴露量最高[0.0116~0.0622 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$], 其次是 Cd 元素[0.0073~0.0389 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]、Pb 元素[0.0009~0.0051 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]、As 元素与 Hg 元素暴露水平较低。18~50 岁男性 Cr 元素暴露量最高[0.0622 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$], $P_{97.5}$ =0.413 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

2.5 暴露风险评估

根据各地区花生重金属含量的平均值水平和 1.7.2 中描述方法, 进行不同性别、年龄人群的花生膳食暴露风险评估。5 种元素在不同组别人群中的 MOE/MOS 值均大于 1, 表明我省居民花生中重金属暴露对健康的潜在风险较低。高端消费人群 Cd 的 MOE 值均在 10 以下, 表明 Cd 较其他元素经花生膳食的暴露风险更高。此外, 18~50 岁人群 Cr 元素高端暴露的 MOS 值也低于 10。见表 6。

表 5 不同年龄与性别人群花生消费量情况
Table 5 Consumption of *Arachis hypogaea* L. in different gender and age groups

年龄	性别	人数	平均体重/kg	平均值/(g/d)	P_{95} /(g/d)	$P_{97.5}$ /(g/d)	最大值/(g/d)
18~50 岁	男	1365	68.3	12.70	53.4	84.5	180
	女	1701	58.6	7.35	50.0	60.0	180
50~65 岁	男	1284	65.1	6.72	50.0	50.0	105
	女	1449	58.3	3.39	30.0	40.0	200
>65 岁	男	939	60.7	4.23	40.0	50.0	150
	女	810	54.3	1.89	10.8	30.0	100

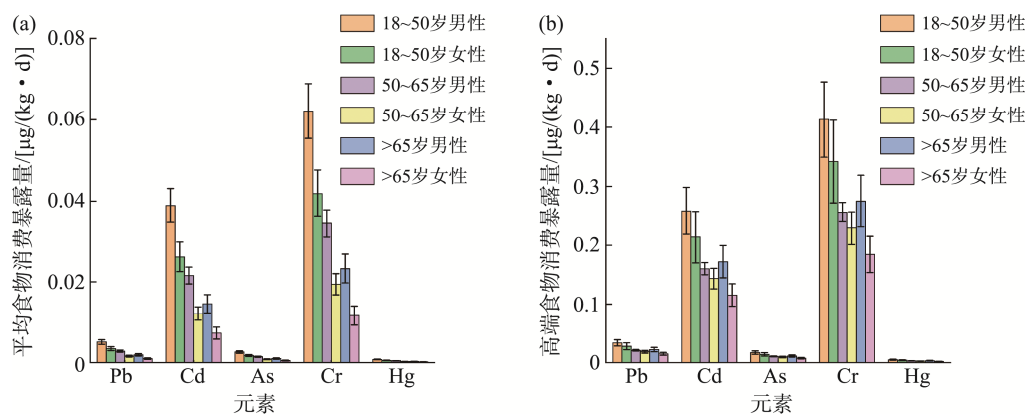


图 3 不同性别、年龄人群经花生摄入重金属的暴露水平

Fig.3 Exposure levels of heavy metals through *Arachis hypogaea* L. consumption among residents of different genders and ages

表 6 不同性别、年龄人群花生中重金属膳食暴露风险

Table 6 Dietary exposure risk of heavy metals in *Arachis hypogaea* L. among populations of different genders and ages

组别	Pb		Cd		As		Cr		Hg		
	MOE ₁	MOE ₂	MOS ₁	MOS ₂	MOE ₁	MOE ₂	MOS ₁	MOS ₂	MOS ₁	MOS ₂	
18~50 岁	男	236.2	35.5	21.4	3.2	1159.6	174.4	48.3	7.3	181.7	27.3
	女	350.5	42.9	31.8	3.9	1721.2	210.8	71.6	8.8	269.7	33.0
50~65 岁	男	426.0	57.2	38.6	5.2	2091.9	281.0	87.1	11.7	327.8	44.0
	女	755.8	64.1	68.5	5.8	3711.2	314.6	154.4	13.1	581.5	49.3
>65 岁	男	630.1	53.4	57.1	4.8	3093.7	262.0	128.8	10.9	484.7	41.1
	女	1261.2	79.6	114.4	7.2	6192.5	390.6	257.7	16.3	970.3	61.2

注: MOE₁, MOS₁ 对应平均暴露量; MOE₂, MOS₂ 对应 $P_{97.5}$ 高端食物消费暴露量。

3 讨论与结论

本研究对安徽省本地花生中 5 种重金属(Pb、Cd、As、Cr、Hg)的含量特征及其人群膳食暴露风险进行分析。结果显示, 80 份花生样品中重金属的检出率较高, 但超标率较低, 仅 Cr 元素出现 5.0%超标率的情况。安徽省花生在种植和销售过程中, 整体重金属污染情况处于可控范围。

不同地区采集的花生中重金属污染程度存在差异。花生中的 Cd 含量与土壤中的 Cd 含量呈现显著相关, 也可能有农药、肥料等其他重金属来源^[23]。与其他坚果相比, 因花生的果实于土壤生长, 其检出率及检出含量也相对其他种类坚果较高^[24]。本研究发现淮南市和滁州市采集的当地生产花生样品中 Cr 元素的污染指数较高。分别达到警戒线和中度污染水平, 表明这些地区生产的花生可能存在较高的 Cr 污染风险, 需引起重视。周启武等^[25]也发现了云南省西双版纳州采集的红花生样品中存在 Cr 元素轻度污染($P_{Cr}=1.138$)。此外, 芜湖市的花生样品中 Cd 元素的单因子污染指数为 0.71, 处于警戒限, 表明芜湖市花生中 Cd 元素污染需给予关注, 结果与文献报道芜湖市蔬菜与粮食中 Cd 元素超标情况一致^[26]。

安徽省花生成人平均消费量为 6.05 g/d, 与《第五次中国总膳食研究》中辽宁省花生平均消费量为 6.06 g/d 最接近^[27]。受饮食习惯影响, 18~50 岁男性花生消费量最大, 一方面此年龄段属于坚果摄入量最高人群^[28], 与胡国党等^[29]对北京市居民食用花生的年龄分布描述一致, 另一方面与成年男性喜爱以花生作为伴酒菜有关^[30]。综上所述, 在进行健康风险评估时, 需要综合考虑人群差异, 以提高评估的准确性和针对性。

基于 MOE 与 MOS 的计算结果, 表明花生中的 5 种重金属暴露对安徽省居民健康的潜在风险较低, 而不同元素也存在风险大小的差异。黄发源等^[31]调查表示安徽省部分地区土壤中镉超标现象较严重, 王晓等^[32]发现花生中 Cd 是对人体的危害风险最大的重金属元素。本研究中 Cd 元素 MOS 相对其他元素低, 因而安徽省花生中 Cd 的潜在健康风险也值得关注。另外, 18~50 岁高端消费者存在 Cr 元素暴露风险较高的情况, 黄彪等^[33]对福建省连城县种植花生的风险评估也出现此 Cr 元素健康风险较其他元素高的情况。而由于铬形态不同, 毒性不同, 对样品中的铬形态进一步测定以评估风险, 将更具科学性。本次未对儿童进行暴露风险评估, 更精确的评估工作需要进一步对人群类别进行划分。

本评估存在一定的不确定性: (1)大部分样品的 Hg 元素检测结果都小于 LOD, 在评估时全部使用 LOD 代替将造成一定程度的风险高估。(2)评估过程多关注单一元素, 对不同元素累积暴露风险考虑欠缺。(3)依据 3 d 内的花生消费调查数据来评估人群的长期花生摄入量, 较短的时

间范围难以代表全年不同季节的实际消费习惯, 如罗宝章等^[34]调查发现上海市居民在夏季坚果、籽类食品摄入量较其他季节更低。

安徽省各流通环节的花生中重金属元素的污染情况总体呈良好态势, 重金属的膳食暴露量显著低于健康指导标准, 人群摄入适量坚果不会引起重金属蓄积导致的健康危害。但仍有必要开展针对消费者合理均衡饮食的科普工作, 重点关注高端消费人群的健康风险。因采样环节分析时发现农贸市场的花生样品中 Cd 元素污染指数较其他流通环节高, 还建议相关部门重点关注污染源调查工作, 助力我省农作物高质量种植和发展, 保障居民饮食安全与健康。

参考文献

- [1] 游其. 安徽省农产品比较优势与结构优化研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
YOU Q. Research on the comparative advantage and structural optimization of agricultural products in Anhui Province [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [2] 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 Medical Publishing House, 2022.
- [3] 邓源喜, 张姚瑶, 董晓雪, 等. 花生营养保健价值及在饮料工业中的应用进展[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(6): 166-169.
DENG YX, ZHANG YY, DONG XX, et al. Research progress on nutritional and health value of peanuts and its application in the beverage industry [J]. Storage and Process, 2018, 18(6): 166-169.
- [4] ONAKPA MM, NJAN AA, KALU OC. A review of heavy metal contamination of food crops in Nigeria [J]. Annals of Global Health, 2018, 84(3): 488-494.
- [5] 刘璇, 张淑霞, 吴曼, 等. 花生重金属富集特征及防控对策研究进展[J]. 山东农业科学, 2020, 52(3): 144-150.
LIU X, ZHANG SX, WU M, et al. Research advances on heavy metal enrichment characteristics in peanut and its prevention and control measurements [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(3): 144-150.
- [6] 胡方舟. 重金属超标对农产品食品安全的危害探讨[J]. 食品安全导刊, 2025(4): 25-27.
HU FZ. Discussion on the harm of excessive heavy metals to food safety of agricultural products [J]. China Food Safety Magazine, 2025(4): 25-27.
- [7] 吴艾琳, 罗书全, 赵怡楠, 等. 基于污染指数法对重庆市市售食品中重金属污染调查及评价[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 175-180.
WU AIL, LUO SQ, ZHAO YN, et al. Survey and evaluation of heavy metal pollution of food in Chongqing by contamination index method [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(2): 175-180.
- [8] 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 of cadmium pollution in locally produced rice and human exposure risk assessment in Wenzhou City [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(9): 1333-1339.
- [9] 黄飞飞, 王瑛, 张宇. 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 status of local rice and human dietary exposure risk assessment in Suzhou City [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(23): 9039–9045.
- [10] YANG BL, ZHANG CX, ZHANG XJ, *et al.* Survey of aflatoxin B₁ and heavy metal contamination in peanut and peanut soil in China during 2017–2018 [J]. *Food Control*, 2020, 118: 107372.
- [11] 姚金哲. 中国三大油料作物的碳氮足迹: 构成、时空特征及驱动因素分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- YAO JZ. Carbon and nitrogen footprint of three major oilcrops in China: composition, spatial and temporal characteristics and driving factors analysis [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [12] 朱晓峰, 倪皖莉, 姜涛, 等. 安徽省花生生产现状·存在问题及对策[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(1): 253–255.
- ZHU XF, NI WL, JIANG T, *et al.* Production situation, existing problem and countermeasures of peanut in Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 253–255.
- [13] NEMEROW NL. Scientific stream pollution analysis [M]. Washington D C: Scripta Book Co, 1974.
- [14] CHENG HX, LI M, ZHAO CD, *et al.* Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139(1): 31–52.
- [15] 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, 2012
- LUO Y. Chemical hazard assessment in food safety risk analysis [M]. Beijing: China Quality and Inspection Publishing House, 2012.
- [16] WHO. Evaluation of certain food additives and contaminants: Seventy-third report of the Joint FAO/WHO expert committee on Food additives [C]. WHO: Technical Report Series, 2011.
- [17] WHO. Safety evaluation of certain food additives and contaminants: Seventy-second report of the Joint FAO/WHO expert committee on Food additives [C]. WHO: Technical Report Series, 2011.
- [18] USEPA. Chemical SearchIRIS [EB/OL]. (2016-12-19) [2025-2-22]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index.cfm>
- [19] 刘兆平. 食品中化学物风险评估原则和方法[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012.
- LIU ZP. Principles and methods of chemical risk assessment in food [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2012.
- [20] 李喜艳. 砷膳食暴露评估模型构建与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LI XY. Establishment and application of models for long-term dietary exposure for arsenic [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [21] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for chromium [J]. *EFSA Journal*, 2014, 12(10): 3845.
- [22] WHO. GEMS/Food-EURO workshop on reliable evaluation of low level contamination of food: Eport of a workshop in the frame of GEMS/Food-EURO [C]. Kulmbach Germany: WHO Regional Office for Europe, 1994.
- [23] 王磊, 唐娟, 于春娣, 等. 花生中重金属含量的影响因素及其来源[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 349–356.
- WANG L, TANG J, YU CD, *et al.* The influence factors and sources of heavy metals in peanuts [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(1): 349–356.
- [24] 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.
- [25] 周启武, 唐兴莹, 李志宏, 等. 5 种市售坚果类产品部分营养成分及重金属元素分析[J]. *安徽农业科学*, 2022(19): 193–197, 238
- ZHOU QW, TANG XY, LI ZH, *et al.* Analysis of some nutrients and heavy metal elements in 5 kinds of nut products on the market [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022(19): 193–197, 238.
- [26] 赵云霞, 林超, 叶遼, 等. 2013–2016 年芜湖市 5 类食品重金属污染监测[J]. *江苏预防医学*, 2019, 30(3): 328–330.
- ZHAO YX, LIN C, YE K, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of five heavy metals in vegetables in Wuhu City [J]. *Jiangsu Journal of Preventive Medicine*, 2019, 30(3): 328–330.
- [27] 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 china total diet study [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [28] 王静, 魏九玲, 刘培培, 等. 中国成年居民坚果摄入量评价及其影响因素分析[J]. *中国食物与营养*, 2024, 30(10): 66–72, 77.
- WANG J, WEI JL, LIU PP, *et al.* Evaluation on nut intake in chinese adult residents and its influencing factors analysis [J]. *Food and Nutrition in China*, 2024, 30(10): 66–72, 77.
- [29] 胡国党, 杨静, 李宗泰. 北京市居民花生及其制品消费现状分析[J]. *中国食物与营养*, 2010(3): 47–49.
- HU GD, YANG J, LI ZT. Analysis of peanut and peanut products consumption of Beijings residents in 2009 [J]. *Food and Nutrition in China*, 2010(3): 47–49.
- [30] CHEN L, ZHAO YH, CHEN X, *et al.* Peanut pairing Baijiu: To enhance retronasal aroma intensity while reducing Baijiu aftertaste [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(26): 14851–14864.
- [31] 黄发源, 徐艳龙, 王志强, 等. 安徽省 2011—2016 年农村土壤铅、镉及蛔虫卵监测结果分析[J]. *安徽预防医学杂志*, 2017, 23(2): 75–77.
- HUANG FY, XU YL, WANG ZQ, *et al.* Investigation of lead, cadmium and ascaris ova in soil from 24 counties in Anhui Province, 2011—2016 [J]. *Anhui Journal of Preventive Medicine*, 2017, 23(2): 75–77.
- [32] 王晓, 高洁, 邵丽. ICP-MS 法同时测定花生中 6 种重金属含量及健康风险评估[J]. *食品安全导刊*, 2022(25): 104–108.
- WANG X, GAO J, SHAO L. Simultaneous determination of six heavy metals in peanut by inductively coupled plasma-mass spectrometry and health risk assessment [J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(25): 104–108.
- [33] 黄彪, 鲁菲菲, 李巍, 等. 福建连城县潜在富硒土壤典型种植区花生-土壤系统金属元素含量特征及健康风险评估[J/OL]. *农业环境科学学报*, 1-23. [2025-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20250113.1430.002.html>
- HUANG B, LU FF, LI W, *et al.* Metal content characteristics and health risk assessment of peanut-soil system in typical potential selenium-rich planting areas of Liancheng county, Fujian Province [J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1-23. [2025-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20250113.1430.002.html>
- [34] 罗宝章, 吴春峰, 朱珍妮, 等. 上海市 15 岁及以上居民膳食摄入量分析[J]. *上海预防医学*, 2022, 34(5): 417–424.
- LUO BZ, WU CF, ZHU ZN, *et al.* Analysis of dietary intake in the residents aged 15 years and above in Shanghai [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2022, 34(5): 417–424.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)