DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250627001
引用格式: 张来颖, 马晓曼, 李韵冰, 等. 2025 年北京市部分区县油炸面制品中铝的监测分析和风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 221–228.
ZHANG LY, MA XM, LI YB, *et al*. Monitoring analysis and risk assessment of aluminum in fried flour products from partial districts of Beijing in 2025 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 221–228. (in Chinese with English abstract).

2025 年北京市部分区县油炸面制品中铝的监测分析和风险评估

张来颖, 马晓曼*, 李韵冰, 王 菊, 王玉江, 谢俊卿
(北京市丰台区疾病预防控制中心, 北京 100070)

摘 要: 目的 系统评估 2025 年北京市部分区县市售油炸面制品中铝残留的污染特征及其健康风险。**方法** 采用微波消解进行样品前处理, 结合电感耦合等离子体发射光谱法对 61 份市售油炸面制品样本中铝残留量进行定量分析。铝含量差异采用克鲁斯卡尔-沃利斯 *H* 检验, 超标率比较采用卡方检验; 基于点评估法计算每周暴露量, 得出人群膳食中铝的安全限值; 采用污染指数法, 对油炸面制品中铝的污染状况进行评价; 通过目标危害系数评估长期健康风险。**结果** 本研究检测结果显示总超标率 8.2% (5/61), 全部集中于 C 区[平均值 178.5 mg/kg, 97.5 分位数值($P_{97.5}$)=873.8 mg/kg], 显著高于其他 3 区(P<0.05)。流通环节(超市/农贸市场/餐饮)、食物类型(高/低水分)、包装类型(定型/散装)的铝含量差异无统计学意义(P>0.05)。膳食暴露风险, C 区的每周暴露量均值 0.266 mg/kg • bw ($P_{97.5}$: 1.304 mg/kg • bw), 膳食安全限值达 0.133(平均值)和 0.652 ($P_{97.5}$); 其他 3 区均小于 0.01。C 区的内梅罗综合污染指数为 7.053>1, 其他区均小于 0.7。非致癌风险方面, C 区高暴露人群的目标危害系数为 0.654 (<1), 其他区小于等于 0.010, 均未超阈值。**结论** 北京市油炸面制品铝含量存在显著区域差异, C 区铝综合污染指数达到重度污染水平, 但因暴露量未超每周耐受摄入量, 安全风险都在可接受范围内, 且当前非致癌风险可控。建议重点监管散装食品及农贸市场/餐馆环节, 推广无铝膨松剂工艺, 并开展多途径铝暴露的长期风险评估。

关键词: 油炸面制品; 铝; 膳食暴露; 风险评估

Monitoring analysis and risk assessment of aluminum in fried flour products from partial districts of Beijing in 2025

ZHANG Lai-Ying, MA Xiao-Man*, LI Yun-Bing, WANG Ju, WANG Yu-Jiang, XIE Jun-Qing
(*Fengtai Center for Disease Control and Prevention*, *Beijing* 100070, *China*)

ABSTRACT: Objective To systematically evaluate the contamination characteristics and health risks of aluminum residues in commercially available fried flour products from partial districts/counties of Beijing in 2025. **Methods** Microwave

收稿日期: 2025-06-27
第一作者: 张来颖(1984—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全监测, 理化检验。E-mail: laiying998@163.com
***通信作者:** 马晓曼(1990—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全监测和风险评估, 理化检验。E-mail: mxm100200@sina.com

digestion was employed for sample pretreatment, and inductively coupled plasma optical emission spectrometry was applied for the quantitative analysis of aluminum residues in 61 samples of commercial fried flour products. The Kruskal-Wallis *H* test was used to compare the differences in aluminum content among the samples, while the chi-square test was adopted for the comparison of over-standard rates. The weekly dietary exposure dose of aluminum was calculated via the point estimation method, and the safety limit of dietary aluminum intake for the population was derived accordingly. The pollution index method was utilized to assess the contamination status of aluminum in fried flour products, and the target hazard quotient was used to evaluate the long-term health risks. **Results** The detection results indicated that the overall over-standard rate of aluminum residues was 8.2% (5/61), and all the non-compliant samples were concentrated in District C, with a mean aluminum content of 178.5 mg/kg and a 97.5th percentile value ($P_{97.5}$) of 873.8 mg/kg, which was significantly higher than that in the other 3 districts (P<0.05). No statistically significant differences in aluminum content were observed among different circulation channels (supermarkets/farmers' markets/restaurants), product types (high-moisture/low-moisture products), and packaging types (pre-packaged/bulk products) (P>0.05). In terms of dietary exposure risk, the mean weekly exposure dose of aluminum in District C was 0.266 mg/kg • bw, with a $P_{97.5}$ value of 1.304 mg/kg • bw, and the corresponding dietary safety limits were 0.133 (mean value) and 0.652 ($P_{97.5}$ value). In contrast, the values in the other three districts were all below 0.01. The Nemerow comprehensive pollution index of aluminum in District C was 7.053 (>1), whereas the indices in the other districts were all below 0.7. Regarding non-carcinogenic risks, the target hazard quotient of the high-exposure population in District C was 0.654 (<1), and the values in the other districts were less than or equal to 0.010, all of which were below the threshold value. **Conclusion** Significant regional differences exist in the aluminum content of fried flour products in Beijing. District C exhibits a severe level of aluminum contamination as indicated by the comprehensive pollution index. However, since the dietary exposure dose does not exceed the provisional tolerable weekly intake, the health risks are within the acceptable range, and the current non-carcinogenic risks are controllable. It is recommended to strengthen the supervision of bulk food products and the circulation links of farmers' markets and catering services, promote the application of aluminum-free leavening agent technology, and conduct long-term risk assessments of multi-pathway aluminum exposure.

KEY WORDS: fried flour products; aluminum; dietary exposure; risk assessment

0 引 言

铝作为食品加工中常用的添加剂成分(如硫酸铝钾、明矾), 因其优异的膨松性和稳定性, 被广泛应用于油炸面制品(如油条、油饼)的生产工艺中[1−2]。然而, 长期过量摄入铝可能导致神经毒性、骨软化症及认知功能障碍等健康危害[3−4]。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)建议铝的暂定每周耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)为 2 mg/kg • bw[5], 我国 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定油炸面制品铝残留限值为小于等于 100 mg/kg(干基), 油炸面制品中铝超标问题依然突出, 且存在显著的区域差异[6−7], 亟需系统性研究以评估其风险并优化监管策略。

近年来, 我国食品添加剂管理政策持续完善。2014 年首次限制含铝膨松剂在油炸面制品中的使用[8], 2022 年进一步强化铝污染管控, 2024 年《食品添加剂使用标准》提出逐步淘汰高铝添加剂, 鼓励无铝替代方案。北京市 2022 年实施《北京市食品安全管理条例》, 要求对高风险食品实施季度抽检。然而, 政策执行效果存在区域差异, 河南省农村地区仍存在添加剂滥用现象[9], 而上海市通过强化流动摊点监管, 显著降低超标率[10]。这表明, 铝污染的防控需结合地方实际, 制定差异化的监管策略。

油炸面制品铝污染呈现高检出率、高超标率及高风险环节集中(流动摊点为主)特征[11−12]。北京市作为超大城市, 油炸面制品消费量大, 但系统性数据匮乏。周边地区监测显示潜在风险, 如天津市油炸面制品超标率 50.0%[13], 结合北京市流动人口多、供应链复杂的特点, 铝污染形势严峻, 亟需开展针对性研究以评估其健康风险。

铝残留检测方法的准确性与效率直接影响监测数据的可靠性。传统分光光度法(如铬天青 S 法)因操作烦琐、抗干扰能力弱, 逐渐被现代仪器分析法取代[14−15]。电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES)和电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)

凭借高灵敏度(检出限低至 0.05 mg/kg)、多元素联测能力及高回收率(大于 95%), 成为主流检测技术[16–17]。李珍等[18]对比分光光度法与 ICP-OES, 发现后者回收率提高 4.9%, 且数据稳定性更优(相对标准偏差小于 2%)。不同方法的适用场景不同, 分光光度法成本低廉, 适合基层实验室快速筛查; ICP-OES 适用于大批量样品的高通量检测[19]; 而 ICP-MS 在超痕量分析(如生物样本铝代谢研究)中更具优势[20–21]。2025 年发布的 GB 5009.268—2025《食品安全国家标准 食品中铝的测定》将 ICP-OES 列为标准方法, 检测技术进一步规范化, 为本研究提供了方法学基础。

本研究基于 GB 5009.268—2025 标准检测方法, 确保数据准确性和可比性采用 ICP-OES 对 2025 年北京市 4 个区的市售油炸面制品进行铝残留检测, 结合地理信息分析污染空间分布特征, 并评估不同人群膳食暴露风险, 结合区域差异提出针对性监管建议, 系统评估北京市油炸面制品铝污染现状, 可为北京市食品安全监管与健康风险防控提供科学依据, 同时为其他地区铝污染治理提供参考。

1　材料与方法

1.1　试样材料(样品来源)

按照《2025 年北京市食品污染及有害因素监测方案》采样要求, 对北京市 4 个区县, 从不同流通环节(商店、农贸市场、餐饮店)采集油条、油饼、麻花、馓子等油炸面制品, 并大致按消费量分配采样数量, 于 2025 年 4 月共采集样本 61 份, 其中定型包装 6 件, 散装(包括自行简易包装)55 件, 具体信息见表 1。

1.2　仪器与试剂

Optima 8000 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Perkin Elmer 公司); HGW-60 微波消解仪(中国海光仪器公司); VB20C 赶酸器(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); PX223ZH/E 千分之一分析天平[奥豪斯仪器(上海)有限公司]; Multi Reax 旋涡振荡器(德国海道夫公司); JYL-D025 料理机(九阳股份有限公司)。

硝酸(优级纯, 德国默克公司); 双氧水(优级纯, 纯度≥30.0%, 国药集团化学试剂有限公司); 铝单元素标准品[GBW(E)080219, 质量浓度 100 g/mL]、铝成分分析标准物质(GBW10119-GBW10122)(中国计量科学研究院)。

1.3　样本制备(样品处理)

样品包含油条、油饼、麻花和撒子, 依据文献[22]将水分活度(water activity, Aw)>0.6 的归为高水分油炸面制品(油条、油饼), Aw<0.6 归为低水分油炸面制品(麻花、撒子)。试样经高速粉碎机粉碎均匀后, 称取样品 0.2 g(精确至 0.001 g, 对于高水分油炸面制品的样品可适当增加取样量至 0.5 g)于微波消解内罐中, 加入 8.00 mL 的硝酸(65 %, 质量分数), 加盖放置 1 h 或过夜, 旋紧罐盖, 按照微波消解仪标准操作步骤进行消解(消解参考条件: 120 ℃, 升温 5 mim, 保持 5 min; 150 ℃, 升温 5 mim, 保持 10 min; 190 ℃, 升温 5 mim, 保持 20 min)。冷却后取出, 缓慢打开罐盖排气, 用少量水冲洗内盖, 将消解罐放在控温电热板上赶酸至近干, 用水定容至 10 mL 或 25 mL, 混匀备用, 同时做空白实验和平行实验。

1.4　检测方法(仪器条件)

优化仪器操作条件, 使待测元素的灵敏度等指标达到分析要求, 编辑测定方法、选择各待测元素合适分析谱线, 仪器操作参考条件: 径向观测方式, 功率: 1300 W; 等离子气流量: 15 L/min; 辅助气流量: 0.2 L/min。雾化气气体流量: 0.55 L/min。分析泵速: 1.5 mL/min。Al 元素推荐分析谱线 396.15 nm。

1.5　标准曲线的绘制

精确吸取适量单元素标准贮备液或多元素混合标准贮备液, 用硝酸溶液(2%, 体积分数)逐级稀释配成质量浓度为 0、0.50、2.00、5.00、8.00、10.00 mg/L 的标准溶液。依据样品溶液中元素质量浓度水平, 可适当调整标准系列各元素质量浓度范围。将铝标准溶液依次进样, 以铝标准溶液的质量浓度为横坐标(X, mg/L), 信号强度为纵坐标(Y), 采用外标法计算待测物含量, 绘制标准曲线, 计算回归方程。

1.6　样品测定与计算

同样测定条件下, 测定样品和空白, 由回归方程计算待测物的浓度。计算如公式(1)。

$$X=\frac{(\rho-\rho_0)\times V\times f}{m} \tag{1}$$

式中: X 为试样中待测元素含量, mg/kg 或 mg/L; ρ 为试样溶液中被测元素质量浓度, mg/L; ρ_0 为试样空白液

表 1　北京市售油炸面制品采样信息(n=61)

Table 1　Sampling in formation of commercially available fried flour products in Beijing (n=61)

序号	样本来源	样本数/份	流通环节					
			超市/商场		农贸市场		餐饮店	
			定型	散装	定型	散装	定型	散装
1	A 区	16	1	2	-	3	1	9
2	B 区	15	1	8	1	-	-	5
3	C 区	15	-	-	-	6	1	8
4	D 区	15	-	-	-	3	1	11

注: -为未采样。

中被测元素 X 的质量浓度, mg/L; V 为试样消化液定容体积, mL; f 为试样稀释倍数; m 为试样称取质量或移取体积, g 或 mL。计算结果保留 3 位有效数字。

1.7 质量控制

将粉碎后的样品称取 0.2 g 左右作为平行加标的本底样, 对低、中、高 3 种质量浓度 0.50、2.00、5.00 mg/L 做加标回收试验, 实验步骤同上述过程, 测定结果减去本底值计算加标回收率。进行精密度实验, 对同一样品重复测定 6 次, 计算其平均值和相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。同时测定粉条粉丝中铝成分分析标准物质(GBW10119-GBW10122), 验证检测方法准确性。

1.8 膳食暴露与健康风险评价

1.8.1 膳食暴露量计算

按照点评估法[23], 计算油炸面制品来源的铝暴露量。铝的暴露量(dietary exposure, Exp), 即铝的每周平均摄入量(mg/kg·bw), 计算如公式(2)。

每周平均摄入量=油炸面制品消费量(g/周)×油炸面制品中铝含量(mg/kg)/体重(kg)/1000 (2)

在计算铝摄入量时, 铝含量数据采用该类食品平均铝含量和 97.5 分位数含量($P_{97.5}$), 以分别反映油炸面制品平均铝摄入量和高含量食品中铝摄入量; 鉴于目前北京市的油炸面制品膳食暴露研究较少, 本研究采用已发布的北京市部分高校食堂学生对油炸面制品的平均消费量[24](每周 89.52 g)作为暴露评估消费量参数; 居民体重统一按国家食品安全风险评估中心公布的调查数据 60 kg 标准计算[25]。在食品添加剂专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committeeon Food Additives, JECFA)第 74 次会议上制定铝的 PTWI 修订为 2 mg/kg·bw, 将其作为暴露评估标准[26], 将铝的 Exp 与 PTWI 进行对比, 得出人群膳食中铝的安全限值(margin of safety, MOS), 计算如公式(3)。

$$\mathrm{MOS}=\frac{\mathrm{Exp}}{\mathrm{PTWI}} \tag{3}$$

当 MOS≥1 时, 认为食品安全风险超过可接受程度; MOS<1 时, 认为食品安全风险为可接受。

1.8.2 铝的污染状况评价

采用污染指数法[27]对油炸面制品中铝的污染状况进行评价, 分别按照公式(4)和(5)计算。

$$P_i=C_i/S_i \tag{4}$$

$$P_c=\sqrt{(P_{\mathrm{ave}}{}^2+P_{\mathrm{max}}{}^2)/2} \tag{5}$$

式中: P_i 为有害元素 i 的单项污染指数(individual pollution index); C_i 为元素 i 的含量值(measured concentration), mg/kg; S_i 为元素 i 的限量标准值(standard concentration), mg/kg。参照 GB 2760—2024《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》对油炸面制品中的限量值为 100 mg/kg。最后, 根据 P_i 进行分级: P_i<0.2 为未受污染, 0.2≤P_i<0.6 为轻微污染, 0.6≤P_i<1.0 为中度污染, P_i≥1.0 为重度污染。

式中: P_c 为内梅罗综合污染指数(Nemerow integrated pollution index); P_{ave} 为单项污染指数平均值(average of individual pollution indices); P_{max} 为单项污染指数最大值(maximum individual pollution index)。根据 P_c 评价污染等级, 当 P_c≤0.7 为安全等级, 0.7<P_c≤1.0 为警戒线, 1.0<P_c≤2.0 为轻度污染, 2.0<P_c≤3.0 为中度污染, P_c>3.0 为重度污染。

1.8.3 铝的非致癌风险评估

采用目标危害系数(target hazard quotients, THQ)法对油炸面制品中铝的膳食健康风险进行评价[28]。该方法假定污染物吸收剂量等于人体摄入剂量, 以测定的污染物人体摄入剂量与参考剂量的比值作为评价标准。此法由美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)提出[29], 用于估算长期接触食物中污染物的人体相关潜在非致癌风险, 通过计算目标危害系数可以评价油炸面制品中铝的非致癌风险。按照公式(6)计算。

$$\mathrm{THQ}=\frac{C\times E_{\mathrm{D}}\times F_{\mathrm{IR}}\times E_{\mathrm{F}}}{\mathrm{RfD}_0\times M_{\mathrm{AB}}\times T_{\mathrm{A}}} \tag{6}$$

式中: C 为测定的油炸面制品中的含量, mg/kg; E_{D} 为暴露持续时间, 一般为 70 年; E_{F} 为暴露频率,一般为 365 d; T_{A} 为平均暴露时间, 即 E_{D} 实际对应的天数 25550 d; F_{IR} 为每日摄入量, 根据上文给出的油炸面制品平均消费量为 89.52 g/周, 得出 F_{IR}=89.52 (g/周)/7=12.79 g/d; M_{AB} 为体重, 成人 60 kg; RfD_0 为经口暴露非致癌参考剂量, 为 2 mg/(kg·bw)/7=0.285 mg/(kg·d)。若 THQ≤1, 说明污染物对暴露人群没有明显的膳食摄入健康风险; 若 THQ>1, 暴露人群极可能存在膳食摄入健康风险。THQ 值越大, 污染物对人体健康风险越大。

1.9 数据处理

应用统计学软件 SPSS 29.0 进行统计学分析, 铝含量差异采用克鲁斯卡尔-沃利斯 H 检验(Kruskal-Wallis H)检验, 超标率的比较采用卡方(Chi-squaretest, $\bar{\chi}$ -test)检验, 以 P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 方法学评价

在本方法测定条件下, 铝元素标准曲线线性相关回归方程为 Y=1.494×10^6X–1.029×10^5, 相关系数 r^2=0.9996, 该方法在 0.05~10.00 mg/L 的范围内线性良好。在仪器最佳工作状态下, 对试剂空白进行至少 10 次测定, 计算标准偏差, 得出方法检出限为 0.5 mg/kg, 定量限为 1.5 mg/kg。选取油条麻花等样品按 10%比例进行加标回收试验, 分别加入低、中、高不同浓度的铝标准溶液, 将其与样品同时消化进行测定, 加标回收率在 95.6%~103.8%, 6 次平行实验

的 RSDs 为 0.2%~5.3%。同时对粉条粉丝中铝成分分析标准物质系列进行同样的消化处理和测定, 测定值均在该质控样的标准参考值范围内, 且 RSD≤3.25%, 结果见表 2, 表明该方法准确度和精密度良好。

2.2　食品中铝含量监测结果分析

由表 3 可知, 不同流通环节(超市、农贸市场、餐馆)的超标率为 0%~23.1%; 不同食物类型(高水分油炸面制品、低水分油炸面制品)的超标率为 6.1%~10.7%; 不同包装类型(定型包装、散装)的超标率为 0%~9.1%。结果表明除了超市、定型包装的油炸面制品不存在超标情况, 在其余流通环节、食物类型、包装类型中有超标, 但超标率差异无统计学意义($\bar{\chi}$=5.230、$\bar{\chi}$=0.436、$\bar{\chi}$=0.594, P>0.05)。为了进一步探究各类别中铝含量是否存在差异, 将各类铝含量用 H 检验评估, 依然在不同流通环节、不同食物类型、不同包装类型中的铝含量差异无统计学意义(H=4.437、H=0.872、H=3.569, P>0.05)。说明流通环节、食物类型、包装类型对铝含量和超标率影响不大。

本次参与检测的 4 个区县位于北京东部和北部。总超标率为 8.2% (5/61), 超标的 5 件样品均来自 C 区, 其余 3 个区县未见超标, 故不同区县间的超标率差异有统计学意义($\bar{\chi}$=16.702, P=0.002)。但对铝含量进行分析时, 在不同区县间差异无统计学意义(H=2.517, P=0.417), 说明个别的超标情况没有影响各区县的整体铝含量。

2.3　铝的膳食暴露评估及安全风险

由表 4 可知, 当食物中铝含量取均值时, A、B 和 D 各区之间的铝含量和 Exp 近乎相似; 当取 $P_{97.5}$ 时, 高铝含量油炸面制品导致的 B 区 Exp 约为 D 区的两倍。C 区的铝含量平均值(178.542 mg/kg)和 $P_{97.5}$(873.816 mg/kg)均超出我国油炸面制品铝的限值标准, 相应的 Exp 也是明显高于其他区, 但小于 PTWI (2 mg/kg • bw), 在每周可允许摄入量范围内, 与胡亚奇等[30]的研究结果一致。

不论是按铝摄入量的均值还是按摄入量的 97.5 分位数计算, C 区油炸面制品中铝的 MOS 平均值和 $P_{97.5}$ 分别达到 0.133 和 0.652, 均小于 1。这与李流川等[31]对达州市一般居民、高食物消费人群 MOS 结果较接近。其他 3 个区的铝含量取均值时, MOS 值均为 0.004; 当取 $P_{97.5}$ 时, MOS 值范围是 0.006~0.010, 两种含量取值下, MOS 均显著低于 C 区。4 个区的安全风险都在可接受范围内(MOS<1)。

表 2　粉条粉丝标准物质中铝元素的检测结果(n=5)

Table 2　Detection results of aluminum in certified reference materials for vermicelli (n=5)

标准物质编号	标准值/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	回收率/%	RSDs/%
GBW10119	27.1±1.3	26.15、26.85、27.86、28.02、28.22	27.41	96.49~104.13	3.25
GBW10120	32.1±1.2	31.22、32.40、31.89、33.13、32.58、	32.24	97.26~103.21	2.25
GBW10121	63.8±2.1	62.02、65.59、63.51、64.27、64.05	63.89	97.21~102.81	2.03
GBW10122	70.1±2.0	68.95、69.24、71.89、70.25、69.85	70.04	98.36~102.55	1.65

表 3　不同采样地点、食物类型、包装类型中铝的超标情况和含量分析

Table 3　Analysis of aluminum exceedance situation and content across different sampling locations, food types and packaging types

	分类	超标数[n(%)]	χ^2	P	M (P_{25}, P_{75})/(mg/kg)	H	P
采样地点	超市	0 (0.0)	5.230	0.073	4.79 (3.3,6.1)	4.437	0.109
	农贸市场	3 (23.1)			7.14 (4.04,152.4)		
	餐馆	2 (5.6)			5.1 (4.8,7.8)		
食物类型	高水分油炸面制品	2 (6.1)	0.436	0.509	5.0 (3.1,7.7)	0.872	0.351
	低水分油炸面制品	3 (10.7)			5.4 (3.7,13.6)		
包装类型	定型包装	0 (0.0)	0.594	0.441	3.8 (2.5,4.7)	3.569	0.059
	散装	5 (9.1)			5.4 (3.7,8.7)		

表 4　不同区县油炸面制品膳食铝的暴露量

Table 4　Dietary aluminum exposurein fried flour products across different districts

区县	铝含量/(mg/kg)		Exp/(mg/kg • bw)		MOS	
	平均值	$P_{97.5}$	平均值	$P_{97.5}$	平均值	$P_{97.5}$
A 区	5.553	10.181	0.008	0.015	0.004	0.008
B 区	5.339	13.867	0.008	0.021	0.004	0.010
C 区	178.542	873.816	0.266	1.304	0.133	0.652
D 区	5.643	7.878	0.008	0.012	0.004	0.006

2.4 铝的污染程度评价

采用含量中位数计算油炸面制品中铝 P_i, 采样含量最大值和最小值计算 P_c。P_i 方面, B 区污染指数最少, 其次是 A 区、D 区, 3 个区的 P_i<0.2, 均未受到污染; C 区的 P_i 为 0.351, 在 0.2≤P_i<0.6 范围内, 属于轻微污染。P_c 方面, D 区的综合污染指数最小, 其次是 A 区、B 区, 3 个区的 P_c<0.7, 处于安全水平; C 区的 P_c 为 7.053>1, 属于重度污染水平, 见表 5。从统计学角度分析, 中位数比均值能更好地反映一组数据的真实情况, 避免被极高或极低的数值影响到大部分测定值[25], 故由中位数含量计算出的 P_i 更能代表本组数据铝污染程度的真实水平。

2.5 铝的非致癌风险评价

采用铝摄入量的均值、25 分位数和 97.5 分位数, 计算油炸面制品的目标危害系数。发现低铝含量油炸面制品在 4 个区的 THQ_{25} 范围是 0.001~0.003, 相差不大, 结合采样来源发现低铝含量油炸面制品主要来自超市或者定型包装的样品。高铝含量油炸面制品的 $THQ_{97.5}$ 系数大小是 D 区<A 区<B 区<C 区<1。C 区的 $THQ_{97.5}$ 为 0.654, 对比其他区的非致癌风险系数达到较高水平, 说明 C 区油炸面制品中铝含量虽然高, 但是目前不会产生非致癌风险, 见表 6。

表 5 不同区县油炸面制品中铝的 P_i 和 P_c

Table 5 P_i and P_c of aluminumin in fried flour products across different districts

区县	P_i	污染等级	P_c	安全等级
A 区	0.048	未受污染	0.084	安全水平
B 区	0.045	未受污染	0.110	安全水平
C 区	0.351	轻微污染	7.053	重度污染水平
D 区	0.054	未受污染	0.069	安全水平

表 6 不同区县油炸面制品中铝的 THQ

Table 6 THQ of aluminumin in fried flour products across different districts

区县	铝含量/(mg/kg)			THQ		
	平均值	P_{25}	$P_{97.5}$	平均值	P_{25}	$P_{97.5}$
A 区	5.553	4.045	10.181	0.004	0.003	0.008
B 区	5.339	2.741	13.867	0.004	0.002	0.010
C 区	178.542	1.919	873.816	0.134	0.001	0.654
D 区	5.643	4.326	7.878	0.004	0.003	0.006

3 结 论

本次抽检的 61 件油炸面制品铝的超标率和含量在流通环节、食物类型和包装类型上的差异均无统计学意义; 在不同区之间的差异较明显, 超标率均集中在 C 区。

进一步对不同地区进行膳食暴露评估研究显示, 本研究中 4 个区油炸面制品中铝的膳食暴露评估结果优于河南省[32], 但略高于广州省[33]的 MOS 值, 这可能跟面制品在南北方消耗量的差异有关。虽然目前 4 个区油炸面制品膳食铝的安全风险都在可接受范围内, 但从食物多样性考虑, 油炸面制品仅为人体摄入铝的众多途径之一, 其他食品如水产品、乳制品、蛋类和其他米面制品等也对人体铝的积累有所贡献, 故应谨防高暴露地区的潜在风险。

C 区油炸面制品中的 P_c 到重度污染水平, 但尚没有达到非致癌风险; 而关于铝的致癌性, 未被明确列为人类致癌物[34], 说明该区的油炸面制品对非致癌风险引起的健康问题影响不大。值得关注的是, C 区监测的样品均来自农贸市场和餐饮环节, 且大部分为散装, 这可能是导致该区超标率高的原因之一。这与杭州市[35]部分市售食品中铝残留量的检测结果相似, 该地区的散装超标率(17.55%)高于定型包装(2.14%), 农贸市场(17.39%)和小型餐饮店(20.0%)超标率明显高于超市(4.36%), 差异均有统计学意义($\bar{\chi}$=30.230、$\bar{\chi}$=12.58, P=0.000)。为了降低非致癌风险, 建议消费者适当控制购买散装且来自农贸市场及餐馆的油炸面制品; 生产者在生产时, 改进油炸面制品的脱铝加工工艺, 王琳等[11]研究发现若使用无铝膨松剂一般不会造成食物中的铝含量超标, 若使用含铝添加剂, 很容易造成超标现象; 有关监督部门需要规范相关产品的质量监控。

由于数据和资料有限, 本评估具有以下不确定性: 本次评估所使用的高校食堂消费量数据, 由于其人群的特定性(几乎全部为 18~25 岁的青壮年), 在人群代表性上存在一定局限, 未能充分覆盖如儿童、老年等不同年龄阶段的居民群体。本研究仅从油炸面制品中铝暴露进行评估, 未对其他重金属及其他暴露途径进行评估。高暴露量计算采用高污染食品, 可能对平均消费水平人群的长期暴露产生高估, 但未反映高食物消费量人群的暴露水平。本次评估主要基于北京4个区在2025年被抽检到的油炸面制品铝含量数据, 还有部分食品类别及区县未被纳入, 食品样本的来源和数量有限, 据此推算的分析结果可能存在一定的不确定性。计划在下一步的研究中继续搜集最新、最全的膳食消费量数据, 关注多途径暴露风险, 以开展更全面、准确的北京市居民膳食铝暴露风险评估。

参考文献

[1] 宋政, 周陶鸿, 胡家勇, 等. 面制品及糕点中含铝食品添加剂的测定[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(4): 142–147.
SONG Z, ZHOU TH, HU JY, *et al*. Determination of aluminum containing additives in flour products and pastry [J]. China Food Additives, 2020, 31(4): 142–147.

[2] 马怡童, 吴迪, 张伟清, 等. 餐饮食品中铝的来源、控制措施及其在食品安全抽检中的问题分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 225–231.
MA YT, WU D, ZHANG WQ, *et al*. Sources and control measures of aluminumin catering food and analysis of issues in food safety sampling inspection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(20): 225–231.

[3] SUOM IJ, TUOMINE NP. Cumulative risk assessment of the dietary heavy metal and aluminum exposure of Finnish adults [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(7): 809.

[4] MOHAMMADPOUR A, HOSSEINI MR, DEHBANDI R, *et al*. Probabilistic human health risk assessment and Sobol sensitivity reveal the major health risk parameters of aluminum in drinking water in Shiraz, Iran [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(11): 7665–7677.

[5] JECFA. Evaluation of certain food additives and contaminants [R]. WHO Technical Report Series, 2011, 966: 7–18.

[6] 江爽. 2021 年食品风险监测食用油条中铝含量分析[J]. 食品安全导刊, 2023(4): 94–96.
JIANG S. Analysis of aluminum content in edible fried dough sticks under food risk monitoring in 2021 [J]. China Food Safety Magazine, 2023(4): 94–96.

[7] 李娜, 任钊, 王鋆坦, 等. 河南省小麦面粉面制品中铝含量调查研究[J]. 农产品加工, 2021(7): 75–79.
LI N, REN Z, WANG JT, *et al*. Investigation of aluminum content in flour products in He’nan Province [J]. Farm Products Processing, 2021(7): 75–79.

[8] 吴昕妍. “禁铝令”下的泡打粉[J]. 福建质量技术监督, 2014(9): 45–46.
WU XY. Baking powder under the “aluminum ban” [J]. Fujian Quality & Technolongy Supervision, 2014(9): 45–46.

[9] 尹红娜, 李娜, 王春杰, 等. 河南省面制品中含铝添加剂使用情况调查[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 287–289.
YIN HN, LI N, WANG CJ, *et al*. Investigation on the use of aluminum-containing additives in flour products in Henan Province [J]. Food Industry, 2020, 41(11): 287–289.

[10] 吕静, 张晶晶, 付晔, 等. 上海闵行区市售面制食品铝含量调查及人群膳食暴露风险评估[J]. 公共卫生与预防医学, 2021, 32(4): 63–66.
LV J, ZHANG JJ, FU Y, *et al*. An investigation on aluminum content in commercially available flour products and risk assessment of dietary aluminum exposure of population in Minhang District, Shanghai [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2021, 32(4): 63–66.

[11] 王琳, 赵亚荣, 彭广怀, 等. 不同类型食品铝含量比较及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(15): 5246–5251.
WANG L, ZHAO YR, PENG GH, *et al*. Comparison and risk assessment on aluminum content of different types of food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(15): 5246–5251.

[12] 斯冬芳, 刘梦丽, 卢国伟, 等. 绍兴市柯桥区 2015 年—2019 年部分市售食品中铝残留量的调查分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(8): 1008–1010.
SI DF, LIU ML, LU GW, *et al*. Investigation of aluminum residues in some commercially available food in Keqiao Distrcit of Shaoxing City during 2015—2019 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(8): 1008–1010.

[13] 罗莎, 马洁, 李建平, 等. 2015—2018 年天津市部分市售食品中含铝添加剂监测结果[J]. 职业与健康, 2019, 35(8): 1059–1062.
LUO S, MA J, LI JP, *et al*. Surveillance results of additives containing aluminum in some commercially available food in Tianjin from 2015—2018 [J]. Occupation and Health, 2019, 35(8): 1059–1062.

[14] 刘育金, 李春雷, 孟强. 含铝食品添加剂及其检测技术与监测分析的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 470–476.
LIU YJ, LI CL, MENG Q. Research progress of detection technology and monitoring analysis of aluminum-containing food additives [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 470–476.

[15] 薛庆海, 董刘敏, 王成军, 等. 食品中铝的检测方法研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2022, 29(4): 65–67.
XUE QH, DONG LM, WANG CJ, *et al*. Progress on the aluminum determination method in food [J]. Cereal & Food Industry, 2022, 29(4): 65–67.

[16] 林起辉, 张建莹, 林妮, 等. ICP-MS 法和 UV-Vis 法测定油炸食品中铝残留量的比较研究[J]. 食品安全导刊, 2024(34): 93–96, 107.
LIN QH, ZHANG JY, LIN N, *et al*. Comparative study on determination of aluminum residues in fried food by ICP-MS and UV-Vis [J]. China Food Safety Magazine, 2024(34): 93–96, 107.

[17] FERMO P, SODDU G, MIANI A, *et al*. Quantification of the aluminum content leached into foods baked using aluminum foil [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(22): 8357.

[18] 李珍, 李杰, 方亮. 分光光度法和电感耦合等离子体发射光谱法测定面制品中的铝[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16): 5538–5542.
LI Z, LI J, FANG L. Comparison of spectrophotometry and inductively coupled plasma optical emission spectrometry for determination of aluminum in flour products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(16): 5538–5542.

[19] ZAFALON RVA, PEDREIRA RS, VENDRAMINI THA, *et al*. Toxic element levels in ingredients and commercial pet foods [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 21007.

[20] SAN MSP, BAUCA JM, MARTINEZ ME. Determination of aluminum concentrations in biological specimens: Application in the clinical laboratory [J]. Advances in Laboratory Medicine-Avances en Medicina de Laboratorio, 2022, 3(2): 153–166.

[21] WANG R, CHENG X, LONG T, *et al*. Plasma metals, genetic risk, and rapid kidney function decline among type 2 diabetes [J]. Science of the Total Environment, 2024, 946: 174069.

[22] 赵雪, 丛中笑, 孙华军, 等. 市售调味面制品品质评价体系的建立与应用[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 25–33.
ZHAO X, CONG ZX, SUN HJ, *et al*. Establishment and application of the quality evaluation system of extruded flavouring noodlesin market [J]. Food Science, 2025, 46(8): 25–33.

[23] 杨乐, 邢宏宇, 单美娜, 等. 内蒙古自治区居民膳食中铝暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 196–200.
YANG L, XING HY, SHAN MN, *et al*. Advances in research on toxicity and dietary exposure of aluminum [J]. Journal of Public Health and

Preventive Medicine, 2020, 33(2): 196–200.

[24] 王安琪, 黄可慧, 刘阔阅, 等. 北京市部分高校食堂面制食品铝污染及学生铝食用安全 KAP 调查[J]. 中国学校卫生, 2016, 37(1): 27–29.
WANG ANQ, HUANG KH, LIU KK, *et al*. Aluminum exposure from wheat flour products in college canteens in Beijing and KAP on dietary aluminum safety among college students [J]. Chinese Journal of School Health, 2016, 37(1): 27–29.

[25] 张泓, 李倩云, 陈少鸿, 等. 食品接触用铝和铝合金材料及制品中铝元素的迁移及风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(1): 92–97.
ZHANG H, LI QY, CHEN SH, *et al*. Study of migration and safety assessment of aluminum in food contact aluminum and aluminum alloy materials and articles in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(1): 92–97.

[26] 杨乐, 蒲云霞. 铝的毒性和膳食暴露评估研究进展[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(1): 118–122.
YANG L, PU YX. Advances in research on toxicity and dietary exposure of aluminum [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2020, 31(1): 118–122.

[27] 郑瑞生, 王巧燕, 张冰泉, 等. 9 种近海鱼重金属污染状况及食用安全性评价[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 353–359.
ZHENG RS, WANG QY, ZHANG BQ, *et al*. Evaluation of heavy metal pollution status and food safety of nine offshore fish species [J]. Food Science, 2022, 43(14): 353–359.

[28] FAKHRI Y, SARAFRAZ M. Refer to evaluation of possible human health risk of heavy metals from the consumption of two marine fish species *Tenualosa ilisha* and *Dorosoma cepedianum* [J]. Biological Trace Element Research, 2021, 199(3): 1090–1091.

[29] 张妮娜, 陈绍占, 刘洋, 等. 北京市售畜禽肉类预制菜和方便菜肴中多元素含量分析及有害元素健康风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(4): 598–608.
ZHANG NN, CHEN SZ, LIU Y, *et al*. Content analysis of multi-elements and health risk assessment of harmful elements in prepared dishes and convenient dishes of livestock and poultry meat sold in Beijing [J]. Chinese Jorunal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(4): 598–608.

[30] 胡亚奇, 刘克克, 任增辉, 等. 2012—2020 年河南省许昌市市售油炸面制品中铝含量监测及膳食暴露评估[J]. 河南预防医学杂志, 2021, 32(9): 707–709.
HU YQ, LIU KK, REN ZH, *et al*. Monitor ingand dietary exposure assessment of aluminum content in fried dough stick from Xuchang, Henan from 2012 to 2020 [J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2021, 32(9): 707–709.

[31] 李流川, 鲜欣言, 陈玲, 等. 达州市熟制米面食品中膳食铝暴露风险评估[J]. 江苏预防医学, 2023, 34(5): 625–626, 629.
LI LC, XIAN XY, CHEN L, *et al*. Risk assessment of dietary aluminum exposure in cooked rice and flour products in Dazhou City [J]. Jiangsu Journal of Preventive Medicine, 2023, 34(5): 625–626, 629.

[32] 李杉, 付鹏钰, 杨丽, 等. 河南省居民膳食中铝暴露风险评估[J]. 华南预防医学, 2022, 48(1): 94–97.
LI S, FU PY, YANG L, *et al*. Dietary aluminum exposure risk assessment for residents in Henan Province [J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2022, 48(1): 94–97.

[33] 张玉华, 刘于飞, 张维蔚, 等. 2014—2018 年广州市市售食品中铝含量调查及人群膳食暴露评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(11): 1967–1969, 1974.
ZHANG YH, LIU YF, ZHANG WW, *et al*. Investigation on aluminum content in commercially available foods in Guangzhou City and dietary exposure assessment, 2014—2018 [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(11): 1967–1969, 1974.

[34] World Health Organization International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to human [Z]. 2024.

[35] 张丛笑, 沈利明, 陈晖, 等. 2015 年—2019 年杭州市西湖区部分市售食品中铝残留量检测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(6): 748–752.
ZHANG CX, SHEN LM, CHEN H, *et al*. Detection and analysis of aluminum residues in some commercially available foods in Xihu District, Hangzhou, 2015—2019 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(6): 748–752.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)