DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251229008
引用格式: 张妮娜, 孙开奇, 刘丽萍, 等. 2024 年北京市售 4 类禽类预制菜肴中多元素分析及有害元素健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 102–111.
ZHANG NN, SUN KQ, LIU LP, *et al*. Multielement analysis and health risk assessment of harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes sold in Beijing in 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 102–111. (in Chinese with English abstract).

2024 年北京市售 4 类禽类预制菜肴中多元素分析及有害元素健康风险评价

张妮娜[1#], 孙开奇[1#], 刘丽萍[1,2], 牛宇敏[1,2], 沙博郁[1], 王 正[1*]

(1. 北京市疾病预防控制中心, 食物中毒诊断溯源技术北京市重点实验室, 北京 100013;
2. 首都医科大学公共卫生学院, 北京 100069)

摘 要: 目的 研究 2024 年北京市售鸡肉、鸭肉、内脏及掌爪 4 类禽类预制菜肴中元素分布特征, 评价有害元素膳食暴露风险。**方法** 采用电感耦合等离子体质谱法测定北京市售 46 件禽类预制菜肴中 14 种元素。运用污染指数法、靶标危害系数法(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)、危害商(hazard quotient, HQ)、危害指数(hazard index, HI)和致癌风险指数(carcinogenic risk, CR)评价有害元素健康风险。**结果** 14 种元素在禽类预制菜肴中全部检出, 铝、锰、硼、铬、镍、钼含量中位值高于 0.01 mg/kg。有害元素检出率为砷(100%)>铬(97.8%)>铅(41.3%)、汞(41.3%)>镉(39.1%), 含量均低于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》标准。4 类禽类预制菜肴中 14 种元素含量中位值差异较大, 内脏类预制菜肴中钒、锰、钴、砷、钼、镉、铅含量最高, 掌爪类预制菜肴中汞含量最高, 铅含量次高, 鸡肉类预制菜肴中砷、铅含量最低。铬在 4 类禽类预制菜肴中含量中位值差异较小, 但鸡肉类预制菜肴的铬含量均值(0.10 mg/kg)约是其他 3 类禽类预制菜肴的 2 倍, 尤其宫保鸡丁具有明显的高铬特征。铅、镉、砷、汞、铬的污染指数均小于 0.7, 表明样品未受有害元素污染。针对非致癌健康风险的评价, 采用了美国环境保护署和世界卫生组织/国际食品法典委员会的两套评估方法, 镉、汞、铬的 THQ/TTHQ 和 HQ/HI 评估值均小于 1, 表明风险处于可接受水平。两种评估方法结果一致, 且均识别出镉在内脏类、汞在掌爪类预制菜肴中风险最高。4 类禽类预制菜肴中铅的 CR<1×10^{-6}, 表明无致癌风险, 砷的 CR 介于 1×10^{-6}~1×10^{-4}, 为可接受的致癌风险。**结论** 北京市售 4 类禽类预制菜肴中有害元素的健康风险处于安全水平。掌爪类预制菜肴中多元素检出率和含量水平虽较低, 但其汞、铅含量在 4 类禽类预制菜肴中处于较高水平, 建议加强监测。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 禽类; 预制菜肴; 多元素; 有害元素; 健康风险评价

收稿日期: 2025-12-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1104800)
#张妮娜和孙开奇为共同第一作者
第一作者: 张妮娜(1977—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全检测技术。E-mail: znnms@sina.com
孙开奇(1978—), 男, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全检测技术。E-mail: diego1978sun@163.com
***通信作者:** 王正(1976—), 女, 主任技师, 主要研究方向为食品安全风险监测预警技术。E-mail: Lab_zlgl@126.com

Multielement analysis and health risk assessment of harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes sold in Beijing in 2024

ZHANG Ni-Na[1#], SUN Kai-Qi[1#], LIU Li-Ping[1,2], NIU Yu-Min[1,2], SHA Bo-Yu[1], WANG Zheng[1*]

(1. *Beijing Key Laboratory of Diagnostic and Traceability Technologies for Food Poisoning*, *Beijing Center for Disease Prevention and Control*, *Beijing* 100013, *China*; 2. *School of Public Health*, *Capital Medical University*, *Beijing* 100069, *China*)

ABSTRACT: Objective　To study the element distribution characteristics in 4 kinds of poultry pre-made dishes, including chicken, duck, visceral and claw sold in Beijing in 2024, and evaluate the dietary exposure risk of harmful elements. **Methods**　Inductively coupled plasma mass spectrometry was used to determine 14 kinds of elements in 46 poultry pre-made dishes sold in Beijing. Pollution index method, target hazard quotient/total target hazard quotient (THQ/TTHQ), hazard quotient (HQ), hazard index (HI) and carcinogenic risk index (CR) were used to evaluate the health risks of harmful elements. **Results**　All 14 kinds of elements were detected in poultry pre-made dishes, with median content of aluminum, manganese, boron, chromium, nickel and molybdenum exceeding 0.01 mg/kg. The detection rates of harmful elements were as follows: Arsenic (100%)>chromium (97.8%)>lead (41.3%) and mercury (41.3%)>cadmium (39.1%). The content of these elements were all below the standards of the GB 2762—2022 *National food safety standard-Limits of pollutants in food*. There were significant differences in the median values of 14 kinds of elements among 4 kinds of poultry pre-made dishes. Among the visceral pre-made dishes, the content of vanadium, manganese, cobalt, arsenic, molybdenum, cadmium and lead were the highest. Among the claw pre-made dishes, the content of mercury was the highest, followed by lead. Among the chicken pre-made dishes, the content of arsenic and lead were the lowest. The median chromium content in 4 kinds of poultry pre-made dishes showed little variation, but the average chromium content (0.10 mg/kg) in chicken pre-made dishes was approximately twice that of the other 3 kinds of poultry pre-made dishes, with Kung Pao chicken exhibiting a notably high chromium characteristic. The pollution index for lead, cadmium, arsenic, mercury and chromium were all less than 0.7, indicating that the sample was not contaminated with harmful elements. For the assessment of non-carcinogenic health risks, 2 sets of assessment methods from the United States Environmental Protection Agency and the World Health Organization/International Codex Alimentarius Commission were employed. The THQ/TTHQ and HQ/HI assessment values for cadmium, mercury and chromium were all less than 1, indicating that the risks were at an acceptable level. The results from both assessment methods were consistent, and both identify that Cd posed the highest risk in visceral pre-made dishes, while Hg posed the highest risk in claw pre-made dishes. The CR of Pb in 4 kinds of poultry pre-made dishes was less than 1×10^{-6}, indicating no carcinogenic risk. The CR of arsenic ranged from 1×10^{-6}–1×10^{-4}, indicating an acceptable carcinogenic risk. **Conclusion**　The health risks posed by harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes sold in Beijing are at a safe level. Although the detection rate and content levels of multiple elements in claw pre-made dishes are relatively low, the mercury and lead contents in these dishes are at a higher level among the 4 kinds of poultry pre-made dishes, which should be recommended to strengthen monitoring.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; poultry; pre-made dishes; multielement; harmful elements; health risk assessment

0　引　言

预制菜肴因具有品种丰富、口味多样、食用简便等优点进入越来越多的家庭餐桌, 伴随蓬勃的产业发展, 消费者对预制菜肴食用安全性的关注日益凸显[1]。金属元素因具有环境持久性, 可通过食物链的生物富集作用进入人体, 增加人类健康风险, 是关注的焦点之一。金属中锰(Mn)、钴(Co)、铜(Cu)、铁(Fe)、钼(Mo)等必需营养元素, 是构成多种生物酶的重要组分; 镍(Ni)、锡(Sn)、锑(Sb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)等非必需元素[2]则普遍存在于环境接触中,

无论是必需还是非必需元素, 过量蓄积均会危害人体健康[3]。Pb、砷(As)、铬(Cr)等高毒元素更具有多系统毒性[4−5], 可引发人体氧化应激反应造成蛋白质、DNA、脂质的损伤[6], 导致细胞功能障碍或凋亡最终诱发多种疾病[7−8]。研究显示, 即使是低水平暴露如血中 Pb 质量浓度低至 3.5 μg/dL, 仍可能导致儿童认知能力下降、行为异常等问题[9]。食物是普通人有害元素暴露的一个主要途径, 预制菜肴生产的全链条特性使金属元素可通过“原料-加工-包装”路径向菜肴中迁移[10]。预制菜肴的农产品原料在养殖或种植过程中对重金属具有生物富集性[11−12], 设备、包装材料中 Cr、Sn、Sb 等杂质在加工环节的酸性或高温条件下溶出是有害元素的常见迁移方式, 这些都可能会带来预制菜肴的污染问题, 此前抽样中发现北京市售扣肉类预制菜肴受到不同程度的 Pb、Cd、Cr 污染[13]。

禽类预制菜肴因成本优势占据市场较大份额, 宫保鸡丁、口水鸡等传统中式预制菜肴深受消费者欢迎。2024 年对北京市居民家庭主要食品人均消费量的调查[14]显示, 禽肉的消费量超过牛羊肉总和, 在肉类消费中位列第二。但抽样监测数据显示, 禽肉中某些重金属超标率较家畜更高, 如在 2015—2017 年我国 10500 份畜禽肉(猪、牛、羊、鸡、鸭)重金属监测结果中, Pb 在鸡肉中(2.48%)、Cr 在鸭肉中(2.57%)超标率最高, As 在鸡肉(1.00%)和鸭肉(0.86%)中超标率位居前 2 名[15]; 对河南省 2575 份畜禽肉中重金属污染状况调查发现, 鸭肉中 Pb 超标率是 Pb 总体超标率的 2.2 倍, 在 6 大类畜禽肉中最高[16]。禽类在饲养过程中的饲料与饮水是禽肉中重金属的主要来源, 为防病及促进生长而人为在饲料中添加金属元素也是导致禽肉中出现重金属超标的重要原因[17]。因此, 有必要对禽类预制菜肴进行多元素含量分析, 并评价有害元素的健康风险水平, 为预制菜食品安全体系建设提供基础数据。

本研究采集北京市售 46 件禽类预制菜肴, 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定硼(B)、Co、Mn、Mo、铝(Al)、钒(V)、Sn、Ni、Hg、Cd、Cr、As、Sb、Pb 14 种元素, 按鸡肉、鸭肉、内脏和掌爪 4 个类别分析元素特征, 并使用单因子污染指数(P_i)和综合污染指数(P_c)评价样品中有害元素的污染程度, 进一步以靶标危害系数(target hazard quotien, THQ)和累计靶标危害系数(total target hazard quotient, TTHQ)、危害商(hazard quotient, HQ)、危害指数(hazard index, HI)和致癌风险指数(carcinogenic risk, CR)评价成人健康风险。研究结果旨在为禽类预制菜行业全链条金属元素污染防控及相关标准的制修订提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2024 年 4—5 月, 在北京市内多家超市及大型网络电商平台自营店随机购买 46 件禽类预制菜肴(含酱卤制品 7 件), 按包装标签主要成分分为 4 类样品, 其中鸡肉类预制菜肴 25 件, 主要品种为炸鸡、口水鸡、宫保鸡丁等; 鸭肉类预制菜肴 7 件, 主要品种为酱鸭、鸭锁骨、鸭柳等; 内脏类预制菜肴 8 件, 主要品种为心、肝、肠; 掌爪类预制菜肴 6 件, 主要品种为凤爪和鸭掌。

1.2 仪器与试剂

NEXION 300D 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司); Mars5 型微波消解仪(美国 CEM 公司); BS 323 S 千分之一电子天平(德国 Sartorius 公司); 8010G 型组织捣碎机(美国 Waring 公司); VORTEX-5 漩涡混合器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司); Milli-Q2150 全自动超纯水处理系统(美国密利博公司)。

多元素标准溶液(质量浓度 100 μg/mL, As、Cd、Pb、Cr、Co、Mn、Sb、Mo、Ni、V、Sn、B、Al, 钢研纳克公司); Hg 单元素标准溶液(质量浓度 100 mg/L, 中国计量科学研究院); 多元素混合内标溶液[质量浓度 10 μg/mL, 锂(Li)、钪(Sc)、锗(Ge)、钇(Y)、铑(Rh)、铟(In)、铽(Tb)、铼(Re)、铋(Bi), 中国计量科学研究院]; 硝酸(分析纯, 德国默克公司); 过氧化氢(30%, 优级纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.3 实验方法

参照 GB 5009.268—2025《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中第一法, 采用 ICP-MS 测定 14 种元素。取样品可食用部分匀浆, 准确称取 0.5~0.8 g 样品置于高压消解罐中, 加入 6 mL 硝酸和 1 mL 过氧化氢, 加盖静置 2 h, 于微波消解仪中按优化好的微波消解程序进行消解。消解完毕冷却至室温, 用超纯水将消解液定容至 25 mL 混匀备用, 同时做空白实验。ICP-MS 工作参数: 工作模式为碰撞模式, 射频功率为 1500 W, 等离子体气体体积流量为 15.0 L/min, 辅助气体积流量为 0.4 L/min, 雾化气体积流量为 0.8 L/min, 泵转速为 40 r/min, 测定重复采集 3 次。用 1 μg/mL 的铍(Be)、铈(Ce)、Fe、In、Li、镁(Mg)、Pb、铀(U)调谐液优化仪器, 使质谱仪灵敏度、氧化物、双电荷、分辨率等各项指标达到最佳状态, 以 1 μg/mL 的 45Sc、103Rh、115In、209Bi 为内标元素校正, 依次测定空白、多元素标准系列、有证标准物质和样品溶液, 采用外标法定量, 保证检测数据的准确性。

1.4 有害元素膳食暴露风险评价方法

1.4.1 禽类预制菜肴有害元素污染状况评价

评价单一有害元素污染程度采用 P_i, 评价多种有害元素的综合污染程度采用 P_c[18], 计算公式分别为(1)和(2)。

$$P_i=C_i/S_i \tag{1}$$

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

式(1)中: P_i 为有害元素元素 i 的污染指数; C_i 为有害元素元素 i 的测定含量, mg/kg; S_i 为有害元素元素 i 的标准限值, mg/kg, 依据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中肉及肉制品对应食品类别规定的有害元素限量值, As 为 0.5 mg/kg、Hg 为 0.05 mg/kg、Cr 为 1.0 mg/kg, 鸡肉、鸭肉和掌爪类预制菜肴 Pb 为 0.3 mg/kg、Cd 为 0.1 mg/kg, 内脏类预制菜肴 Pb 为 0.5 mg/kg、Cd 为 0.5 mg/kg。当 $P_i \leqslant 0.7$ 时为清洁水平, $0.7 \leqslant P_i \leqslant 1.0$ 时为警戒水平, $1.0 < P_i \leqslant 2.0$ 时为轻度, $2.0 < P_i \leqslant 3.0$ 时为中度污染, $P_i > 3.0$ 时为重度污染[19]。

式(2)中: P_c 为综合污染指数; P_{ave} 为单一元素污染指数平均值; P_{max} 为单一元素污染指数最大值。根据 P_c 评价有害元素综合污染等级, 共分为 5 个等级: $P_c \leqslant 0.7$ 为无污染, $0.7 < P_c \leqslant 1.0$ 为污染警戒限, $1.0 < P_c \leqslant 2.0$ 为轻度污染, $2.0 < P_c \leqslant 3.0$ 为中度污染, $P_c > 3.0$ 为重度污染。

1.4.2　禽类预制菜肴有害元素健康风险评价

(1)非致癌风险评价

使用美国环境保护署(United States environmental protection agency, USEPA)推荐的 THQ 和 TTHQ 评价禽类预制菜肴中非化学致癌金属的非致癌风险, 按照公式(3)、(4)计算。

$$\mathrm{THQ}=\frac{C\times \mathrm{EF}\times \mathrm{ED}\times \mathrm{IR}\times \mathrm{CF}}{\mathrm{RfD_o}\times \mathrm{BW}\times \mathrm{AT}} \tag{3}$$

$$\mathrm{TTHQ}=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{THQ}_i \tag{4}$$

式中: C 为有害元素元素测定含量, mg/kg; EF 为暴露频率(exposure frequency), 一年为 365 d/a; ED 为暴露时间(exposure duration), 成人为 70 a; AT 为平均暴露时间(averaging time), 按成人平均寿命 70 年计算为 25550 d; BW 为平均体重(body weight), 为 61.8 kg[20]; IR 为每日摄入量(ingestion rate), 采用 2023 年北京市居民家庭人均禽肉消费量, 为 17.8 g/d[14]; CF 为转换因子(conversion factor), 为 1×10^{-3} kg/g; $\mathrm{RfD_o}$ 为经口摄入非致癌参考剂量(oral reference dose), Pb、As、Cd、Cr、Hg 分别为 0.0035、0.0003、0.001、0.0009 和 0.0003 mg/kg • d[21]。多种有害元素摄入的非致癌风险总和为 TTHQ, 当 TTHQ≤1, 说明不存在非致癌风险, TTHQ>1 时, 表明非致癌风险处于不可接受水平。

制定食品安全法规标准通常采用世界卫生组织(World Health Organization, WHO)/国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, Codex)的评估方法, 因此采用 WHO/Codex 的点评估法对禽类预制菜肴中有害元素进行暴露评估, 以 HQ 和 HI 对已确定健康指导值(health-based guidance values, HBGV)的有害元素进行风险特征描述, 评价健康风险, 计算公式为(5)~(7)。

$$\mathrm{Exp}=\frac{C\times F}{W} \tag{5}$$

$$\mathrm{HQ}=\frac{\mathrm{Exp}}{\mathrm{HBGV}} \tag{6}$$

$$\mathrm{HI}=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{HQ}_i \tag{7}$$

式(5)中: Exp 为预估日暴露量(estimated daily exposure), mg/kg bw day; C 为食物中污染物的含量, mg/kg; F 为日均食品消费量, 为 0.0178 kg/d; W 为平均体重, 为 61.8 kg。

式(6)中: WHO/联合国粮食及农业组织食品添加剂联合专家委员会(joint Food and Agriculture Organization of the United Nations/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)未列出 Cr 的健康指导值, 并撤销了 As、Pb 的每周可耐受摄入量, 因此仅对 Cd、Hg 进行暴露风险评估。Cd 采用 JECFA 推荐值作为 HBGV, 暂定每月耐受摄入量为 25 μg/kg[22], Hg 采用无机汞的暂定每周耐受摄入量为 4 μg/kg[23], 分别折算为与 Exp 对应的每日耐受摄入量 0.00083 mg/kg bw day、0.00057 mg/kg bw day。HQ≤1, 表示预估暴露水平下不存在可关注的健康风险; HQ>1, 表示当前暴露水平可能存在潜在的健康风险, 需引起关注。

式(7)中: HI 用于评估多种有害元素联合非致癌风险, HI<1, 认为联合暴露风险是可接受的, HI≥1, 认为联合暴露风险是不可接受的。

(2)致癌风险评价

采用 CR 评价禽类预制菜肴中化学致癌金属元素的致癌风险, 评价方法见公式(5)。

$$\mathrm{CR}=\frac{C\times \mathrm{EF}\times \mathrm{ED}\times \mathrm{IR}\times \mathrm{CF}\times \mathrm{SF_o}}{\mathrm{BW}\times \mathrm{AT}} \tag{8}$$

式(8)中: $\mathrm{SF_o}$ 为经口摄入的致癌斜率因子, Pb、Cr、As 的 $\mathrm{SF_o}$ 分别是 0.0085、0.16、1.5 mg/kg • d[24]。$\mathrm{CR}>1\times10^{-4}$ 时为不可接受的致癌风险, CR 在 1×10^{-6}~1×10^{-4} 范围内为可接受的致癌风险, $\mathrm{CR}<1\times10^{-6}$ 为可忽略的致癌风险。

1.5　数据处理

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据计算和绘图, SPSS 24 进行数据统计。采用 CNS-knowall 可视化 R 语言包“agricolae”绘制指数坐标图。低于检出限数据以 1/2 检出限进行统计。

2　结果与分析

2.1　禽类预制菜肴中 14 种元素含量分析

14 种元素在禽类预制菜肴中全部检出, 结果见表 1。Mn、As 总检出率 100.0%, B、Al、V、Cr、Ni、Mo 总检出率大于 70%, Co、Cd、Sn、Pb、Hg 总检出率小于 50%, Sb 仅在 1 件鸡肉类预制菜肴中检出, 总检出率最低。14 种元素含量差异极大, 仅有 6 种元素含量中位值高于 0.01 mg/kg, 从大到小排序依次为: Al>Mn>B>Cr>Ni>Mo。禽类预制菜

肴中有害元素总检出率为 As (100.0%)>Cr (97.8%)>Pb、Hg (41.3%)>Cd (39.1%), 含量中位值由高到低为: Cr>As>Pb>Hg、Cd, 均低于 GB 2762—2022 规定的限量值, 样品合格率达 100%。

14 种元素总变异系数为 46.4%~198.4%, 整体较高。在总检出率大于 90%的 5 种元素 Mn、As、Cr、Ni、Mo 中, Cr、Mn、Ni、Mo 总变异系数均大于 100%, 为超高变异, 说明这 4 种元素在样品中离散度较高, 含量范围较宽; As 在样品中全部检出, 总变异系数最低(46.4%), 说明样品中 As 的数据集中度最高, 含量范围较窄。

2.2 4 类禽类预制菜肴中 14 种元素分布特征

14 种元素在 4 类禽类预制菜肴中的检出率和变异系数见表 2。分类别看, V、Co、Sn 在鸡肉类、内脏类预制菜肴中检出率高于鸭肉类和掌爪类; Cd 在内脏类预制菜肴中检出率高于其他 3 类禽类预制菜肴; Pb、Hg 在内脏类、掌爪类预制菜肴中检出率高于鸭肉类和鸡肉类预制菜肴; Sb 仅在鸡肉类预制菜肴中检出; Cd、Sn、Sb 在掌爪类预制菜肴中均未检出, B、Al、Mo 在掌爪类预制菜肴中检出率明显低于其他 3 类禽类预制菜肴。4 类禽类预制菜肴中元素的分布有较大差异, 总体上元素在鸡肉、内脏类预制菜肴中检出率较高, 鸡肉类预制菜肴中 14 种元素全部检出, 且 8 种元素检出率大于 70%; 内脏类预制菜肴中检出 13 种元素, 其中 10 种元素检出率大于 70%。鸭肉类预制菜肴检出 12 种元素, 7 种元素检出率大于 70%。掌爪类预制菜肴中元素检出率最低, 11 种检出元素中仅 Cr、Mn、Ni、As 4 种元素检出率大于 70%。

表 1 禽类预制菜肴中 14 种元素含量

Table 1 Content of 14 kinds of elements in poultry pre-made dishes

元素	平均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	总检出率/%	总变异系数/%
B	0.570	0.270	0.025	3.770	76.1	164.5
Al	2.26	1.70	0.10	7.83	76.1	96.8
V	0.0081	0.0078	0.0020	0.0210	78.3	61.5
Cr	0.0740	0.0430	0.0050	0.8900	97.8	184.5
Mn	1.55	0.92	0.11	8.85	100.0	112.7
Co	0.0054	0.0010	0.0010	0.0280	47.8	127.4
Ni	0.0890	0.0420	0.0050	1.0300	97.8	185.2
As	0.0110	0.0100	0.0051	0.0310	100.0	46.4
Mo	0.1200	0.0360	0.0025	0.9900	93.5	191.4
Cd	0.0033	0.0015	0.0015	0.0210	39.1	104.9
Sn	0.0028	0.0025	0.0025	0.0160	32.6	70.9
Sb	0.0054	0.0025	0.0025	0.0190	2.0	88.7
Pb	0.0083	0.0020	0.0020	0.1000	41.3	198.4
Hg	0.0095	0.0015	0.0015	0.0360	41.3	117.3

表 2 4 类禽类预制菜肴中元素检出率和变异系数

Table 2 Detection rates and coefficients of variation of elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes

元素	鸡肉		鸭肉		内脏		掌爪	
	检出率/%	变异系数/%	检出率/%	变异系数/%	检出率/%	变异系数/%	检出率/%	变异系数/%
B	84.0	133.6	71.4	81.9	75.0	75.3	50.0	104.9
Al	84.0	76.9	85.7	59.2	87.5	88.4	16.7	127.2
V	84.0	56.6	57.1	75.4	100.0	54.0	50.0	81.2
Cr	96.0	180.8	100.0	43.5	100.0	44.1	100.0	36.0
Mn	100.0	122.3	100.0	54.3	100.0	73.5	100.0	86.3
Co	52.0	123.9	28.6	140.3	62.5	85.9	33.3	192.9
Ni	96.0	174.4	100.0	44.0	100.0	76.9	100.0	111.6
As	100.0	45.3	100.0	42.6	100.0	45.4	100.0	27.1
Mo	100.0	173.9	100.0	21.3	100.0	145.6	50.0	115.5
Cd	36.0	119.6	42.9	44.0	75.0	46.4	0.0	0.0
Sn	56.0	72.8	0.0	0.0	12.5	103.8	0.0	0.0
Sb	4.0	88.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	28.0	74.8	42.9	159.0	62.5	160.4	66.7	68.3
Hg	28.0	149.3	28.6	143.8	75.0	74.6	66.7	74.7

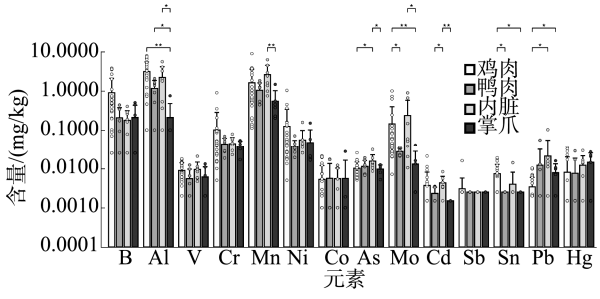
14 种元素在 4 类禽类预制菜肴中变异系数也有较大差异, B、Cr、Mn、Ni、Mo、Cd、Hg 在鸡肉类预制菜肴中变异系数最大; Al、V、Co 在掌爪类预制菜肴中变异系数最大; Pb 在内脏、鸭肉类预制菜肴中变异系数均较大, B、V、Co 在内脏类预制菜肴中变异系数最小; Al、Mn、Ni、Mo 在鸭肉类预制菜肴中变异系数最小。鸡肉类预制菜肴中 Cr 的变异系数显著高于其他 3 类禽类预制菜肴, 达到 4 倍以上。该高变异系数数值主要由 2 个高含量离群值所致, 剔除 2 个离群值后, 鸡肉类预制菜肴中 Cr 的变异系数(84.9%)与其他 3 类禽类预制菜肴的比值从 4 倍降为约 2 倍。相比之下, 鸭肉类预制菜肴品种较为单一、配料构成相对简单, 鸭肉原料在菜肴中的质量占比较高, 这导致其元素含量分布范围相对集中, 因此其元素含量的变异系数整体低于其他 3 类禽类预制菜肴。

4 类禽类预制菜肴中 14 种元素的含量见表 3。比较含量中位值, 4 类禽类预制菜肴中元素含量有较大差异, 其中内脏类预制菜肴中元素含量较高, V、Mn、Co、As、Mo、Cd、Pb 含量均为 4 类禽类预制菜肴中最高; 鸡肉类预制菜肴中 B、Al、Ni、Sn 含量均为 4 类禽类预制菜肴中最高, 但 As、Pb 含量为最低; 掌爪类预制菜肴元素含量较低, B、Al、Cr、Mn、Ni、Mo 均为 4 类禽类预制菜肴中最低, 但 Hg 含量为最高, Pb 含量次高。使用非参数检验比较 14 种元素含量的组间差异, Al、Mn、As、Mo、Cd、Sn、Pb 的 P<0.05, 说明这 7 种元素在 4 类禽类预制菜肴中具有组间差异, 掌爪类预制菜肴中 Al 含量显著低于其他 3 类禽类预制菜肴(P<0.05), 其中与鸡肉类预制菜肴对比达到极显著差异(P<0.01); 内脏类预制菜肴中 Mn 含量极显著高于掌爪类预制菜肴(P<0.01); 内脏类预制菜肴中 As 含量显著高于鸡肉类、掌爪类预制菜肴(P<0.05); 掌爪类预制菜肴中 Mo 含量显著低于内脏类预制菜肴(P<0.05)、极显著低于鸡肉类预制菜肴(P<0.01), 鸭肉类预制菜肴中 Mo 含量显著低于鸡肉类预制菜肴(P<0.05); 内脏类预制菜肴中 Cd 含量显著高于鸭肉类预制菜肴(P<0.05)、极显著高于掌爪类预制菜肴(P<0.01); 鸡肉类预制菜肴中 Sn 含量显著高于鸭肉、掌爪类预制菜肴(P<0.05); 鸡肉类预制菜肴中 Pb 含量显著低于内脏、掌爪类预制菜肴(P<0.05), 结果见图 1。

表 3　4 类禽类预制菜肴中元素含量

Table 3　Elements content in 4 kinds of poultry pre-made dishes

元素	鸡肉		鸭肉		内脏		掌爪	
	中位值/(mg/kg)	均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	均值/(mg/kg)
B	0.47	0.89	0.17	0.21	0.17	0.18	0.13	0.21
Al	3.24	3.09	1.38	1.16	1.89	2.19	0.10	0.21
V	0.0080	0.0100	0.0041	0.0055	0.0088	0.0095	0.0043	0.0061
Cr	0.044	0.100	0.048	0.043	0.043	0.044	0.037	0.038
Mn	0.70	1.60	1.21	1.03	2.00	2.58	0.41	0.54
Co	0.0020	0.0100	0.0010	0.0056	0.0042	0.0055	0.0010	0.0056
Ni	0.050	0.120	0.034	0.037	0.044	0.055	0.021	0.047
As	0.0097	0.0100	0.0110	0.0110	0.0140	0.0150	0.0100	0.0097
Mo	0.0460	0.1400	0.0290	0.0270	0.0550	0.2300	0.0078	0.0130
Cd	0.0015	0.0037	0.0015	0.0023	0.0040	0.0043	0.0015	0.0015
Sn	0.0067	0.0074	0.0025	0.0025	0.0025	0.0039	0.0025	0.0025
Sb	0.0025	0.0030	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
Pb	0.0020	0.0034	0.0020	0.0120	0.0120	0.0210	0.0083	0.0078
Hg	0.0015	0.0080	0.0015	0.0075	0.0140	0.0120	0.0170	0.0140



注: *表示具有显著性差异, P<0.05, **表示极显著差异, P<0.01。

图 1　4 类禽类预制菜肴中 14 种元素含量指数坐标图

Fig.1　Index coordinate chart of 14 kinds of elements content in 4 kinds of poultry pre-made dishes

2.3　有害元素污染程度评价

对禽类预制菜肴中有害元素 Pb、Hg、As、Cr、Cd 的污染评价结果见表 4, 5 种元素 P_i 的平均值均小于 0.7, 全部处于清洁水平, P_i 平均值依次排序为 Hg>Cr>As>Pb>Cd。4 类禽类预制菜肴的元素单项污染指数均小于 0.7, 样品未受污染, 但内脏、掌爪类预制菜肴的 P_{Hg}、P_{Pb} 明显高于鸡肉、鸭肉类。4 类禽类预制菜肴的 P_c 均小于 0.7, 处于安全水平, 按类别 P_c 从大到小依次为掌爪类>内脏类>鸭肉类>鸡肉类预制菜肴。4 类禽类预制菜肴中 5 种有害元素的 P_i 对 P_c 的贡献率差异较大, 见图 2, 鸡肉、鸭肉类预制菜肴

表 4 4 类禽类预制菜肴中有害元素 P_i 和 P_c

Table 4 P_i and P_c of harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes

名称	P_{Pb}	P_{Cd}	P_{Hg}	P_{As}	P_{Cr}	污染水平	P_c	安全等级
鸡肉	0.0067	0.0150	0.030	0.019	0.044	清洁	0.035	安全
鸭肉	0.0067	0.0150	0.030	0.022	0.048	清洁	0.038	安全
内脏	0.0240	0.0080	0.280	0.028	0.043	清洁	0.20	安全
掌爪	0.0280	0.0150	0.350	0.021	0.037	清洁	0.25	安全
平均值	0.0160	0.0130	0.170	0.023	0.043	清洁	0.13	安全

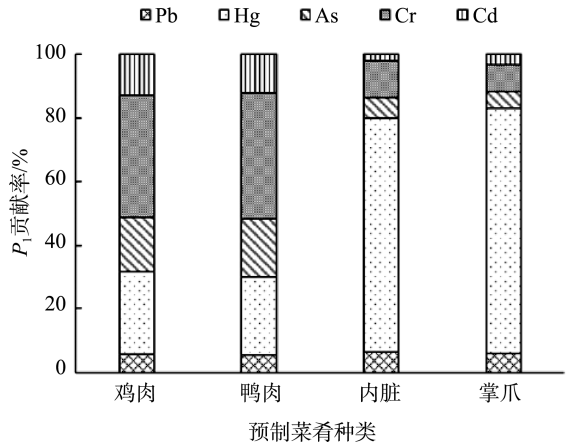


图 2 4 类禽类预制菜肴中有害元素 P_i 贡献率

Fig.2 Contribution of P_i of harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes

的 P_i 贡献率排序为 Cr>Hg>As>Cd>Pb, 而内脏、掌爪类预制菜肴的 P_i 贡献率排序为 Hg>Cr>As、Pb>Cd, 说明鸡肉和鸭肉类预制菜肴中有害元素富集特征较相似, 更易富集 Cr, 而内脏和掌爪类预制菜肴中有害元素富集特征较相似, 更易富集 Hg。

2.4 有害元素膳食暴露风险评价

2.4.1 非致癌风险评价结果分析

分别应用 USEPA 和 WHO/Codex 的评估方法对有害元素进行非致癌风险评价。以中位值计算 THQ 和 TTHQ 值, Cd 的 THQ 在内脏类预制菜肴中最高, Hg 的 THQ 在掌爪类预制菜肴中最高, Cr 的 THQ 在 4 类禽类预制菜肴中差距较小; 4 类禽类预制菜肴的 TTHQ 由大到小为: 内脏类>掌爪类>鸭肉类>鸡肉类。THQ 和 TTHQ 全部小于 1, 说明 4 类禽类预制菜肴均不存在有害元素 Cd、Hg、Cr 的非致癌风险, 结果见表 5。

以中位值计算 Exp、HQ 和 HI, 结果见表 6。Cd 的 HQ 在内脏类预制菜肴中最高, Hg 的 HQ 在掌爪类预制菜肴中最高。4 类禽类预制菜肴的 HI 排序为: 掌爪类>内脏类>鸭肉类、鸡肉类。Cd、Hg 的 HQ 全部小于 1, 说明 4 类禽类预制菜肴中 Cd、Hg 的暴露水平均不存在可关注的健康风险。HI 全部小于 1, 说明 4 类禽类预制菜肴中 Cd 和 Hg 的联合暴露风险是可接受的, 不存在健康危害。

表 5 4 类禽类预制菜肴中有害元素的 THQ、TTHQ 和 CR

Table 5 THQ, TTHQ and CR of the harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes

名称	THQ			TTHQ	CR	
	Cd	Hg	Cr		Pb	As
鸡肉	4.3E-04	1.4E-03	1.4E-02	2.5E-02	4.9E-09	4.2E-06
鸭肉	4.3E-04	1.4E-03	1.5E-02	2.8E-02	4.9E-09	4.8E-06
内脏	1.2E-03	1.3E-02	1.4E-02	4.3E-02	3.0E-08	6.1E-06
掌爪	4.3E-04	1.7E-02	1.2E-02	4.0E-02	2.0E-08	4.5E-06
平均值	6.1E-04	8.2E-03	1.4E-02	3.4E-02	1.5E-08	4.9E-06

表 6 4 类禽类预制菜肴中有害元素的 Exp、HQ 和 HI

Table 6 Exp, HQ and HI of the harmful elements in 4 kinds of poultry pre-made dishes

名称	Exp/(mg/kg bw day)		HQ		HI
	Cd	Hg	Cd	Hg	
鸡肉	4.3E-07	4.3E-07	5.2E-04	7.6E-04	1.3E-03
鸭肉	4.3E-07	4.3E-07	5.2E-04	7.6E-04	1.3E-03
内脏	1.2E-06	4.0E-06	1.4E-03	7.0E-03	8.4E-03
掌爪	4.3E-07	5.0E-06	5.2E-04	8.7E-03	9.3E-03
平均值	6.1E-07	2.5E-06	7.4E-04	4.3E-03	5.1E-03

2.4.2　致癌风险评价结果分析

禽类预制菜肴中 Pb、As 的致癌风险评价结果见表 5。4 类禽类预制菜肴的 CR 全部为 As>Pb, As 的 CR 介于 1×10^{-6}~1×10^{-4}, 为可接受的致癌风险, Pb 的 CR<1×10^{-6}, 处于无致癌风险水平。

3　讨论与结论

14 种元素在禽类预制菜肴中检出率为 100.0%, 其中 Al、Mn、B、Cr、Ni、Mo 含量较高。4 类禽类预制菜肴中元素含量差异较大, 鸡肉、鸭肉类预制菜肴中含量最高的元素为 Al, 内脏、掌爪类预制菜肴中含量最高的元素为 Mn。Al、Mn、As、Mo、Cd、Sn、Pb 7 种元素在 4 类禽类预制菜肴中具有显著差异, 内脏类预制菜肴中元素含量偏高, Mn、Mo、Cd、As、Pb 显著高于其他类别禽类预制菜肴(P<0.05), 掌爪预制菜肴中元素含量偏低, Al、Mn、Mo、Cd 极显著低于其他类别禽类预制菜肴(P<0.01)。

5 种有害元素中, As、Cr 在禽类预制菜肴中普遍检出, Pb、Hg 在内脏、掌爪类预制菜肴中检出率大幅高于鸡肉、鸭肉类预制菜肴, Cd 在内脏类预制菜肴中检出率较高, 但在掌爪类预制菜肴中未检出。与报道的禽肉中有害元素检出率相比, 本次采集的鸡肉类预制菜肴中 5 种有害元素检出率均高于 2021 年太原市鸡肉污染调查中检出率(As: 11.54%、Hg: 3.85%、Cd: 0%、Cr: 73.08%、Pb: 19.23%), 其中 As、Hg、Cd 检出率高于太原市售鸡肉中的 6 倍以上[19]; Cd 在本次禽肉类预制菜肴中检出率为 37.5%, 达到 2022 年山东省抽检禽肉中 Cd 检出率(4.38%)的 8.5 倍[25]; Cr 在本次鸡肉类预制菜肴中的检出率(96.0%)是成都地区抽检 30 份鸡肉(16.7%)中的 5.7 倍[26], 表明有害元素在本次采集的禽肉类预制菜肴中检出更为普遍, 分布更加广泛。

比较 5 种有害元素含量中位数, Cr 在禽类预制菜肴中含量最高, Cd、Hg 含量最低。分类别看, 内脏类预制菜肴中有害元素含量普遍高于鸡肉、鸭肉、掌爪类预制菜肴, Cd、As、Pb 含量在 4 类禽类预制菜肴中最高。内脏是动物体内重金属代谢、蓄积的主要器官[27], 文献[28]报道鸭肝中 Pb、Cr、Cd 含量高于禽肉中; 安徽省内 16 个地市采集的鸡内脏中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 含量普遍高于鸡肉[29]。本次采集禽内脏类预制菜肴中有害元素 As、Cd、Pb、Hg 含量高于禽肉类预制菜肴, 分布特征与文献报道的禽内脏中有害元素高于禽肉情况一致。

掌爪类预制菜肴中 Hg 含量最高, Pb 含量也较高, 仅次于内脏类预制菜肴, 元素分布特征与其他 3 类禽类预制菜肴有较大差异, 表现为多元素的检出率和含量水平均较低。目前对禽掌爪中有害元素含量的文献报道较少, 但有文献对烧鸡制作过程中有害元素含量变化的研究发现, 鸡爪经热加工和高温灭菌后 Pb 含量有明显升高, 而鸡肉中并未发生明显的 Pb 升高[30]。文献[31]测定鸡骨中 Pb 含量高于鸡肉中, 证实骨和软骨组织是禽体内 Pb 积累的主要器官。本研究所测掌爪类预制菜肴多为脱骨类凤爪, 加工过程包含卤制浸泡、油炸等环节, 推测鸡爪在加工环节可能发生了 Pb、Hg 从鸡骨至爪肉的“迁移-富集”过程, 此观点尚需后续研究进一步验证。

本次检测的 4 类禽类预制菜肴中 Cr 含量中位值较相近, 鸭肉、内脏、掌爪类预制菜肴中 Cr 含量均值与中位值均近似, 但鸡肉类预制菜肴中 Cr 含量均值是中位值的 2.2 倍, 有 2 个宫保鸡丁出现高含量 Cr 离群值(0.89 mg/kg、0.35 mg/kg), 分别是中位值的 20.2 倍和 7.9 倍。禽类预制菜肴中 Cr 的污染可能主要来源于以下两方面: (1)禽肉原材料中的较高本底值, 2022 年山东省的冻禽肉监测中重金属污染达中度等级, 其中 Cr 在污染指数中权重最大, 出现 Cr 超标 3 倍样品[25], 而禽肉中重金属污染的主要来源之一是饲料, 文献[32]报道华东地区 49 份家禽养殖场采集的饲料中 Cr 含量均值为 36.7 mg/kg, 达到饲料的国标限量 3.6 倍, 整体超标率为 33.3%, Cr 污染较严重; (2)宫保鸡丁在加工环节中不锈钢设备的 Cr 溶出, 不锈钢中 Cr 的占比通常要达到 10%以上才能满足耐腐蚀性要求[33], 因而可能会带来禽类预制菜肴中 Cr 的外源性污染风险。但本研究未对禽类预制菜肴原材料进行对照实验, 缺乏直接的数据对比, 无法准确判断预制菜肴中 Cr 的来源途径, 这也是本研究存在的主要不足之处。

对鸡肉类预制菜肴中 Cr 含量的进一步分析显示, 在剔除 2 个离群值后, 4 件宫保鸡丁中 Cr 含量均值(0.072 mg/kg)仍高于其他 19 件鸡肉类预制菜肴均值 (0.051 mg/kg) 41.1%, 表明其高 Cr 特征并非偶然, 可能与菜肴特有的原料配方相关。作为宫保鸡丁的主要配料, 花生对 Cr 的富集能力值得关注。多项研究证实了花生对 Cr 具有较强的累积特性, 例如, 一项关于土壤-花生系统中重金属累积特征的研究发现, 在检测的花生样品中, Zn、Cu、Cd 全部未超标, 而 Cr 是唯一全部超出国标限值(1.0 mg/kg)的元素[34]。另一项针对安徽省散装花生的污染调查也表明, 检测的 5 种重金属中, Cr 的含量最高(0.33 mg/kg), 且是唯一出现超标的元素(超标率为 5.0%)[35]。这些结果与文献[36]的研究结论一致, 表明花生对 Cr 具有较强的富集能力。尽管不同文献中报道的花生 Cr 含量存在差异, 如文献[36]中为 0.18 mg/kg, 文献[37]中为 0.71~0.97 mg/kg, 但均显著高于本研究中鸡肉类预制菜肴中 Cr 含量均值(0.1 mg/kg)。此外, 宫保鸡丁中的花生多经油炸处理, 该过程会导致水分流失, 可使 Cr 含量进一步浓缩。因此, 综合现有数据, 初步推断花生是导致宫保鸡丁中 Cr 含量高于其他鸡肉类预制菜肴的主要来源。

本研究分别应用 USEPA 和 WHO/Codex 两种风险评估框架, 对 4 类禽类预制菜肴中有害元素的非致癌健康风险进行了评价。两种方法的评价结果具有一致性: USEPA 的评价指标 THQ、TTHQ 和 WHO/Codex 的评价指标 HQ、

HI 均小于 1, 表明有害元素的非致癌风险均在安全水平内; 此外, 两种方法均识别出 Cd 在内脏类、Hg 在掌爪类菜肴中的风险贡献最高。这是由于两种评估框架都是通过比较污染物的膳食暴露水平与其对应的安全阈值(RfD 或 HBGV)来量化风险, 两种方法在定量逻辑上具有一致性。

但两种方法的评价结果也存在差异, 主要体现在对衡量多种有害元素混合暴露的风险指标评估结果不同, USEPA 框架下的 TTHQ 排序为: 内脏类>掌爪类>鸭肉类>鸡肉类; 而 WHO/Codex 框架下的 HI 排序为: 掌爪类>内脏类>鸭肉类、鸡肉类, 风险排序不同。究其原因, 是二者在污染物的毒性认定与安全阈值设定上的不同。比如对 Cr 的毒性认定, USEPA 为六价 Cr 设定 RfD_o 为 0.0009 mg/kg • d, 用于评估其经口暴露风险; 而 JECFA 认为膳食中 Cr 以低毒的三价 Cr 为主, 无需设定 Cr 的 HBGV。因此本研究依据 WHO/Codex 框架进行评估中, Cr 未被纳入 HI 的计算。此外, 对同一污染物, USEPA 设定的 RfD_o 通常较 WHO/Codex 的 HBGV 更为严格一些, 例如对 Hg(无机汞), RfD_o 为 0.0003 mg/kg • d, 而 JECFA 的 HBGV 设为 0.00057 mg/kg • d (由暂定每周耐受摄入量 4 μg/kg 折算), HBGV 比 RfDo 宽松 90%, 说明在相同暴露水平下, USEPA 框架更容易超过安全阈值, 评价结果更偏保守。这种差异源于 USEPA 框架与 WHO/Codex 框架具有不同的适用范围与侧重点, USEPA 框架用于评估污染物在环境介质中通过多途径(经口、吸入、皮肤接触)造成的暴露风险, 广泛应用于环境健康风险评价; 而 WHO/Codex 框架则针对污染物的经口膳食暴露风险评估, 旨在为食品安全标准的制定提供科学依据。

虽然内脏、掌爪类预制菜肴在 4 类禽类预制菜肴的多种有害元素混合暴露风险指标中风险排序均较高, 但本研究采用的膳食暴露量以禽肉的摄入量计算, 实际膳食中禽类内脏、掌爪的摄入量一般小于禽肉类, 因此内脏、掌爪类预制菜肴的实际膳食暴露风险要低于本研究结果的计算值。尽管如此, 内脏类预制菜肴中 As、Cd、Pb 和掌爪类预制菜肴中 Hg 含量中位值均在 4 类禽类预制菜肴中处于最高水平, 反映出禽类内脏、掌爪对有害元素的富集特性。禽类预制菜肴产品的全产业链特性使膳食风险暴露涉及多方面, 从养殖环节的饲料与环境暴露, 到加工、包装、储存等诸多环节的外源性污染和迁移转化, 均可能成为有害元素的来源。因此, 禽类预制菜肴中有害元素含量监测是全过程的系统监测, 监测结果能够反映涵盖产业链的整体食品安全水平。基于当前内脏类标准相对完善, 而禽掌爪中有害元素的基础本底数据欠缺, 建议加强对禽掌爪类食品中有害元素的监测, 为食品安全标准制修订提供数据支撑。

参考文献

[1] 何杰敏, 谷佳桐, 谷卓桐, 等. 数字消费模式下广东省预制菜消费意愿和行为-基于 3152 名 C 端消费者的调查[J]. 农村经济与科技, 2025, 36(10): 194–197.
HE JM, GU JT, GU ZT, *et al*. Consumption willingness and behavior of prefabricated vegetables in Guangdong Province under the digital consumption mode: Based on the survey of 3152 C-end consumers [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2025, 36(10): 194–197.

[2] MARQUÈ M, CORREIG E, CAPDEVILA E, *et al*. Essential and non-essential trace elements in milks and plant-based drinks [J]. Biological Trace Element Research, 2022, 200: 4524–4533.

[3] ANNU K, KUMAR K, RAMOVATAR M, *et al*. Persistence, toxicity, and risk assessment of toxic compounds in food: Implications for food safety and public health [J]. Exploration of Foods and Foodomics. 2025, 3: 101097.

[4] MONISHA J, TENZIN T, NARESH A, *et a*l. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals [J]. Interdiplinary Toxicology, 2014, 7(2): 60–72.

[5] WU XY, COBBINA SJ, MAO GH, *et al*. A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(9): 8244–8559.

[6] HALLIWELL B, JOHN G. Free radicals in biology and medicine [M]. 5th ed. Oxford University Press, 2015.

[7] TCHOUNWOU PB, YEDJOU CG, PATLOLLA AK, *et al*. Heavy metals toxicity and the environment [J]. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, 2012, 101: 133–164.

[8] ABHISHEK N, ALBIN CS, PARTH S, *et al*. An integrated approach for electronic waste management—Overview of sources of generation, toxicological effects, assessment, governance, and mitigation approaches [J]. Sustainability, 2023, 15: 16946.

[9] US Centers for Disease Control and Prevention. CDC updates blood lead reference value [EB/OL]. (2024-04-02) [2025-09-05]. https://www.cdc.gov/lead-prevention/php/news-features/updates-blood-lead-reference-value.html

[10] 李莹, 钱敏, 曾晓房, 等. 畜禽肉类预制菜肴全链条风险因子研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 365–374.
LI Y, QIAN M, ZENG XF, *et al*. Research progress on risk factors in the whole supply chain of prepared livestock and poultry meat dishes [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 365–374.

[11] ALENGEBAWY A, ABDELKHALEK ST, QURESHI SR, *et al*. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications [J]. Toxics, 2021, 9: 42.

[12] 顾涛, 赵信文, 胡雪原, 等. 珠海市新马墩村农业园区土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 岩矿测试, 2018, 37(4): 419–430.
GU T, ZHAO XW, HU XY, *et al*. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil from an agricultural park of Xinmadun village, Zhuhai City [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(4): 419–430.

[13] 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 Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(4): 598–608.

[14] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴2024[EB/OL]. (2024-12-24) [2025-09-05]. https://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2024-tjnj/zk/indexch.htm
Beijing Municipal Bureau of Statistics Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2024 [EB/OL]. (2024-12-24) [2025-09-05]. https://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2024-tjnj/zk/indexch.htm

[15] 王雅洁, 杨冰, 何锦林, 等. 我国各地区畜禽肉中重金属污染水平的安全评价及分布特征[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(9): 2259–2265.
WANG YJ, YANG B, HE JL, *et al*. Safety assessment and distribution characteristics of heavy metal pollutants in livestock and poultry meats in different regions of China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(9): 2259–2265.

[16] 杨丽, 付鹏钰, 李杉, 等. 河南省市售畜禽肉与水产品中重金属污染状况调查[J]. 中国卫生产业, 2019, 16(32): 3–7.
YANG L, FU PY, LI S, *et al*. Investigation on heavy metal pollution status of livestock and poultry meat and aquatic products in Henan Province [J]. China Health Industry, 2019, 16(32): 3–7.

[17] 马丽萍, 孟秋峰. 饲料重金属残留的危害与应对措施[J]. 浙江畜牧兽医, 2024, 49(3): 25–26.
MA LP, MENG QF. Harm and countermeasures of heavy metal residues in feed [J]. Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary Medicine, 2024, 49(3): 25–26.

[18] CHEN XL, ZHANG HF, WONG C. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of soil heavy metals in Wulongdong national forest park [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 8880.

[19] 赵冉, 李常青, 王莉, 等. 2021 年太原市售禽畜肉中重金属的污染调查[J]. 医学动物防制, 2024, 40(7): 719–723.
ZHAO R, LI CQ, WANG L, *et al*. Investigation on pollution of heavy metals in poultry and livestock meat sold in Taiyuan City in 2021 [J]. Journal of Medical Pest Control, 2024, 40(7): 719–723.

[20] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
Department of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (adults) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.

[21] USEPA. Integrated risk information system [EB/OL]. (2024-08-01) [2025-09-05]. https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha

[22] World Health Organization. Evaluation of certain food additives and contaminants: ninety-first report of the joint FAO/WHO expert committee on food additives [EB/OL]. (2022-11-23) [2026-02-06]. https://www.who.int/publications/i/item/9789240054585

[23] Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA): Safety evaluation of certain contaminants in food [R]. Geneva: WHO/FAO, 2021.

[24] LIN Y, LIU J, ZOU S, *et al*. Characteristics of heavy metal element content and health risk assessment in groundwater in Zhaojue Area, Sichuan Province, China [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 31773.

[25] 王韬, 刘小丽, 孙晓晨, 等. 山东省市售禽肉中多元素调查及健康风险评价[J]. 职业与健康, 2024, 40(24): 3347–3351.
WANG T, LIU XL, SUN XC, *et al*. Investigation and health risk assessment of multi-elements in commercially available poultry meat in Shandong Province [J]. Occupation and Health, 2024, 40(24): 3347–3351.

[26] 罗培林, 吴虹玥, 代姝, 等. 成都地区鸡肉和鸡蛋中重金属及部分微量元素含量检测[J]. 四川畜牧兽医, 2025, 52(4):15–17.
LUO PL, WU HY, DAI S, *et al*. Determination of heavy metals and some trace elements in chicken and eggs in Chengdu [J]. Sichuan Animal & Veterinary Sciences, 2025, 52(4): 15–17.

[27] KAMALY HF, SHARKAWY AA. Health risk assessment of metals in chicken meat and liver in Egypt [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195: 802.

[28] AKIBUL IC, MOHAMMAD RA. Health effects of heavy metals in meat and poultry consumption in Noakhali, Bangladesh [J]. Toxicology Reports, 2024, 12: 168–177.

[29] 唐秀娉, 杨洋, 曾勇, 等. 安徽省鸡肉、鸡蛋和鸡内脏中重金属污染状况调查分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(6): 1244–1249.
TANG XP, YANG Y, ZENG Y, *et al*. Investigation and analysis of heavy metal pollution in chicken, eggs and viscera in Anhui Province [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(6): 1244–1249.

[30] JI HY, ZHANG Y, ZHAO JW, *et al*. The distribution of selected toxic elements in sauced chicken during their feeding, processing, and storage stages [J]. Foods, 2023, 12(7): 1404.

[31] DJOHAN D. Application of data ratio analysis of lead accumulation in cartilage and bones of goats and chickens in Yogyakarta, Indonesia [J]. Journal of Applied and Natural Science, 2024, 16(1): 226–238.

[32] 蒲俊华, 陈大伟, 刘茵茵, 等. 华东某省部分禽场重金属污染检测与分析[J]. 家畜生态学报, 2014, 35(11): 70–72, 87.
PU JH, CHEN DW, LIU YY, *et al*. Detection and analysis of heavy metals pollution in poultry farms in East China [J]. Acta Ecologae Animalis Domastici, 2014, 35(11): 70–72, 87.

[33] ZHAO Q, LIU CJ, CAO LH, *et al*. Stability of chromium in stainless steel slag during cooling [J]. Minerals, 2018, 8: 445.

[34] 李嘉奇, 郭自春, 汪亚及, 等. 长期施肥下红壤坡耕地土壤-花生系统重金属累积特征及风险评价[J]. 土壤通报, 2025, 56(5): 1412–1422.
LI JQ, GUO ZC, WANG YJ, *et al*. Assessment of long-term fertilization on heavy metal ecological and health risks in the soil-peanut system of red soil in sloping farmland [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(5): 1412–1422.

[35] 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.

[36] 罗泉达. 铬在土壤-作物系统中的迁移及安全利用调控研究[J]. 福建农业学报, 2023, 38(6): 746–752.
LUO QD. Chromium migration and application of conditioners in vegetable-growing soil [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2023, 38(6): 746–752.

[37] 杨林飞, 胡迎春, 黄婷, 等. 微波消解-石墨炉原子吸收测定花生中的铬[J]. 中国卫生产业, 2016, 13(26): 92–94.
YANG LF, HU YC, HUANG T, *et al*. Microwave resolution-graphite furnace atomic absorption in measuring the chromium in peanuts [J]. China Health Industry, 2016, 13(26): 92–94.

(责任编辑: 韩晓红　曹岱琳)