DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250923007
引用格式: 侯美玲, 郑钦月, 辜世伟, 等. 2023—2024 年重庆市香辛料中镍、钴、锰含量分析及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 326–332.
HOU ML, ZHENG QY, GU SW, *et al*. Analysis of nickel, cobalt and manganese content in spices in Chongqing from 2023 to 2024 and its dietary exposure risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 326–332. (in Chinese with English abstract).

2023—2024 年重庆市香辛料中镍、钴、锰含量分析及膳食暴露风险评估

侯美玲[1,2*], 郑钦月[1,2], 辜世伟[1,2], 冯桂蓉[1,2], 黄丹丹[1,2], 张倩钰[1,2], 蔡小钦[1,2]

[1. 重庆市食品药品检验检测研究院, 重庆 401121;
2. 国家市场监督管理总局重点实验室(调味品监管技术), 重庆 401121]

摘 要: 目的 对重庆市主产香辛料中镍(Ni)、钴(Co)、锰(Mn) 3 种重金属元素的污染水平、空间分布特征及膳食暴露风险进行综合评价。**方法** 2023—2024 年期间采集重庆市 4 大区域(渝东北、渝东南、渝西、主城)240 批次花椒、辣椒、生姜样品, 按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》方法, 采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定其中 Ni、Co、Mn 含量。采用单因子污染指数法(single factor pollution index, P_i)评价污染水平, 利用皮尔逊相关性分析(Pearson correlation coefficient, PCC)与主成分分析(principal component analysis, PCA)探究元素间来源关系及空间分布规律, 并运用目标危害系数/总目标危害系数(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)模型评估膳食暴露水平。**结果** 3 种重金属在 0~100 μg/L 质量浓度范围内线性关系良好(r>0.999), 检出限(limit of detection, LOD)为 0.0003~0.0030 mg/kg, 定量限(limit of quantitation, LOQ)为 0.001~0.010 mg/kg, 加标回收率在 92.9%~103.4%之间, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)<5%。被测香辛料中 Ni、Co、Mn 含量范围分别为 ND~36.62、ND~9.17、ND~2169.42 mg/kg, 呈现明显的空间分布差异, 渝东南地区 3 种元素含量总体偏高。相关性分析表明 Ni 与 Co 呈极显著正相关(r=0.80, P<0.01), PCA 进一步证实 Ni 与 Co 同源性高, 而 Mn 来源相对独立。膳食风险评估显示, 3 批次样品(辣椒 1 批、生姜 2 批)的 TTHQ>1, 存在一定的健康风险, 主要风险贡献因子为 Mn。**结论** 重庆市香辛料中 Ni、Co、Mn 污染存在明显的空间分布特征和元素间相关性, 整体污染情况可控但存在局部污染和品种特异性风险, 建议将 Mn 纳入香辛料安全风险监测体系并对高风险区域实施重点监控。

关键词: 香辛料; 镍; 钴; 锰; 空间分布; 主成分分析; 膳食暴露风险

收稿日期: 2025-09-23
基金项目: 重庆市市场监督管理局科研计划项目(CQSJKJ2022006)
第一作者/*通信作者: 侯美玲(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全质量检测。E-mail: 384542310@qq.com

Analysis of nickel, cobalt and manganese content in spices in Chongqing from 2023 to 2024 and its dietary exposure risk assessment

HOU Mei-Ling[1,2*], ZHENG Qin-Yue[1,2], GU Shi-Wei[1,2], FENG Gui-Rong[1,2], HUANG Dan-Dan[1,2], ZHANG Qian-Yu[1,2], CAI Xiao-Qin[1,2]

(1. *Chongqing Institute for Food and Drug Control*, *Chongqing* 401121, *China*; 2. *Key Laboratory of Condiment Supervision Technology*, *State Administration for Market Regulation*, *Chongqing* 401121, *China*)

ABSTRACT: Objective To comprehensively evaluate the contamination levels, spatial distribution characteristics and dietary exposure risks of 3 kinds of heavy metal elements [nickel (Ni), cobalt (Co) and manganese (Mn)] in major spices in Chongqing. **Methods** A total of 240 batches of *Zanthoxylum bungeanum*, *Capsicum annuum* and *Zingiber* samples were collected from 4 major regions of Chongqing (Northeast, Southeast, West and main urban area) from 2023 to 2024. The content of Ni, Co and Mn was determined by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) following GB 5009.268—2016 *National food safety standard-Determination of multiple elements in food*. The contamination level was assessed using the single factor index (P_i) method, and Pearson correlation coefficient (PCC) and principal component analysis (PCA) were applied to explore the source relationships among the elements and their spatial distribution patterns. The dietary exposure risk was evaluated using the target hazard quotient/total target hazard quotient (THQ/TTHQ) model. **Results** The 3 kinds of heavy metals showed good linear relationships (r>0.999) within the mass concentration range of 0–100 μg/L. The limits of detection (LOD) and limits of quantitation (LOQ) were 0.0003–0.0030 mg/kg and 0.001–0.010 mg/kg, respectively. Spike recoveries ranged from 92.9% to 103.4%, with relative standard deviation (RSD) less than 5%. The content of Ni, Co and Mn in the tested spices ranged from ND–36.62, ND–9.17 and ND–2169.42 mg/kg, respectively. Obvious spatial distribution differences were observed, with overall higher levels of all 3 kinds of elements in the Southeast region. Correlation analysis indicated a highly significant positive correlation between Ni and Co (r=0.80, P<0.01). PCA further confirmed the high homology of Ni and Co, while Mn had a relatively independent source. Dietary risk assessment showed that the TTHQ of 3 samples (1 chili and 2 gingers) exceeded 1, indicating certain health riskes, with Mn being the primary risk contributor. **Conclusion** The contamination of Ni, Co and Mn in Chongqing-produced spices exhibits distinct spatial distribution characteristics and inter-element correlations. While the overall situation is controllable, localized pollution and variety-specific risks exist. It is recommended to include Mn in the spice safety risk monitoring system and strengthen supervision in high-risk regions.

KEY WORDS: spices; nickel; cobalt; manganese; spatial distribution; principal component analysis; dietary exposure risk

0　引　言

香辛料作为重要的食品调味品, 其质量安全是国内外食品安全监管的焦点之一。重金属污染因其毒性、生物累积性和不可降解性, 成为香辛料最主要的食品安全风险因素之一[1]。目前, 国内外对香辛料重金属污染的研究及监管标准主要集中于镉、铅、砷、汞等传统污染物[2–6], 我国 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》亦未对香辛料中镍(Ni)、钴(Co)、锰(Mn)的限量作出规定。随着新能源产业的迅猛发展, Ni、Co、Mn 三元锂电池的生产与废弃量激增, 使 Ni、Co、Mn 通过工业排放、废弃物不当处理等途径进入环境并迁移至食物链的风险显著提升[7–8]。已有毒理学研究表明, Ni 和 Co 化合物具有潜在的致癌性与致敏性, 而过量摄入 Mn 则可能对神经系统造成损害[9–11]。然而, 相较于传统重金属, 此 3 类元素在香辛料中的污染水平、分布特征及健康风险尚未得到系统评估, 相关基础数据严重缺乏, 难以支撑有效的风险预警与标准制定。本研究以重庆市主要香辛料(花椒、辣椒、生姜)为研究对象, 依据 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》, 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对 240 批次样品中 Ni、Co、Mn 的含量进行测定。旨在: (1)

查明 3 种重金属在香辛料中的污染水平及空间分布特征; (2)通过相关性分析与主成分分析探讨元素间的协同作用及污染特征; (3)采用目标危害系数/总目标危害系数(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)模型评估其膳食暴露风险。本研究结果可为香辛料中新兴重金属污染的风险评估提供基础数据, 为完善相关食品安全标准与实施针对性监管策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品来源

花椒、辣椒、生姜样品于 2023—2024 年采收季采集自重庆市渝东北、渝东南、渝西及主城产区的主要大型种植基地, 各区域采样分布检表 1, 共计 240 批次(辣椒 60 批、生姜 61 批、花椒 119 批)。

表 1 各采样区域分布
Table 1 Distribution of each samples area

区域	数量/批次
渝东北(含万州、梁平、丰都、垫江、忠县、开州、奉节、巫山 8 个区县)	53
渝东南(含黔江、武隆、石柱、秀山、酉阳、彭水 6 个区县)	54
渝西(含涪陵、长寿、江津、合川、永川、綦江、大足、璧山、潼南、荣昌、万盛 11 个区县)	92
主城(含江北、九龙坡、北碚、渝北、巴南 5 个区)	41

1.2 仪器与设备

iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司); Milli-Q Advantage A10 超纯水系统(美国 Millipore 公司); BSA224S 精密电子天平(精度 0.1 mg, 德国 Sartorius 公司)。

1.3 试 剂

硝酸(优级纯, 重庆川东化工有限公司); Ni、Co、Mn 单元素标准溶液(质量浓度 1000 mg/L, 中国计量科学研究院); 内标元素 Sc、Ge 单元素标准溶液(质量浓度 1000 mg/L, 中国计量科学研究院); 实验用水为超纯水(18.25 MΩ • cm)。

1.4 实验方法

1.4.1 方法学验证

实验方法参考 GB 5009.268—2016。

检出限(limit of detection, LOD)与定量限(limit of quantitation, LOQ): 以 3 倍信噪比(S/N=3)计算方法的 LOD, 以 10 倍信噪比(S/N=10)计算方法的 LOQ。

精密度实验: 选取阴性花椒样品(经测定 Ni、Co、Mn 含量均低于 LOD)作为空白基质, 进行 3 个浓度水平(低、中、高)的加标回收实验。每个水平平行制备 6 份样品, 按国家标准前处理测定, 计算各元素的平均加标回收率(%)及其相对标准偏差(relative standard deviation, RSD, %), 用以评价方法的精密度。

1.4.2 污染水平评价

参考文献[12], 采用单因子污染指数(single factor pollution index, P_i)法对土壤中重金属污染水平进行分析。P_i 按照公式(1)计算:

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

式中: P_i 为单因子指数; C_i 为样品中重金属 i 的实测含量, mg/kg; S_i 为重金属 i 的参考限量值, mg/kg。由于 GB 2762—2022 未规定香辛料中 Ni、Co、Mn 的限量, 本研究 S_i 参考文献[13–15]建议值(Ni: 5 mg/kg; Co: 3.5 mg/kg; Mn: 100 mg/kg), 单因子污染评价标准见表 2。

表 2 金属污染指数分级标准
Table 2 Grading standards for metal pollution index

级别	单因子污染指数 P_i	等级
1	$P_i \leqslant 1$	安全
2	$1<P_i \leqslant 2$	轻度污染
3	$2<P_i \leqslant 3$	中度污染
4	$P_i>3$	重度污染

1.4.3 膳食风险评估

采用 THQ/TTHQ 评估单一和多种重金属膳食暴露风险[16–18]。THQ/TTHQ ≤ 1, 膳食摄入风险可接受; THQ/TTHQ>1, 膳食摄入风险不可接受, 值越大则风险越高。

其中, 单一重金属 THQ 按照公式(2)计算:

$$\mathrm{THQ}=\frac{E_\mathrm{F}\times E_\mathrm{D}\times F_\mathrm{IR}\times C}{R_\mathrm{FD}\times W_\mathrm{AB}\times T_\mathrm{A}}\times 10^{-3} \tag{2}$$

多种重金属 TTHQ 按照公式(3)计算:

$$\mathrm{TTHQ}=\sum \mathrm{THQ} \tag{3}$$

式中: E_F 为人群暴露频率, 365 d/年; E_D 为暴露持久性, 70 年; F_IR 人均每日摄入量, 取 1.4 g/d[19]; C 为香辛料中测得的重金属含量, mg/kg; R_FD 为人均每日每千克体重非致癌口服参考剂量, Mn=1.4×10^{-1} mg/(kg • d), Co=1.6×10^{-3} mg/(kg • d), Ni=2×10^{-2} mg/(kg • d)[20–21]; W_AB 为我国人均体重, 60 kg; T_A 为非致癌平均暴露时间, 365 d/年×E_D。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 Orgin pro 2022 软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 方法学验证结果

本研究采用微波消解-ICP-MS 法对香辛料中 Ni、Co、

Mn 含量进行测定, 3 种元素在 0~100 μg/L 质量浓度范围内线性关系良好, 相关系数(r)均大于 0.999, 表明该方法具有良好的线性响应。方法的 LODs 为 0.0003~0.0030 mg/kg, LOQs 为 0.001~0.010 mg/kg, 能够满足香辛料中痕量重金属的分析需求。低、中、高 3 个加标水平下的平均回收率为 92.9%~103.4%, RSDs 均小于 5% (n=6), 表明该方法准确度高、精密度好, 符合多元素同时测定的技术要求。

2.2　香辛料中 Ni、Co、Mn 含量分析

重庆市 240 批次香辛料中 Ni、Co、Mn 的含量测定结果见表 3。由表 3 可知, 3 种元素在不同香辛料中的含量差异显著。Ni 含量范围在 ND~36.62 mg/kg, 平均含量表现为花椒(1.99 mg/kg)>辣椒(1.65 mg/kg)>生姜(1.16 mg/kg)。值得注意的是, 有 13 批次样品 Ni 含量超过参考限量(5 mg/kg), 其中, 花椒 7 批次, 辣椒和生姜各 3 批次, 最高值达 36.62 mg/kg (产于渝东南地区的辣椒), 约为参考限量的 7.3 倍。Co 含量范围在 ND~9.17 mg/kg, 平均含量均在限量以下, 其中, 以辣椒最高(0.35 mg/kg), 高于花椒(0.12 mg/kg), 但总体处于弱污染水平。Mn 含量范围在 ND~2169.42 mg/kg, 平均含量以生姜极高(174.69 mg/kg), 高于花椒(53.78 mg/kg)和辣椒(26.18 mg/kg)。有 26 批次生姜样品 Mn 含量超过参考限量(100 mg/kg), 最高值达 2169.42 mg/kg。生姜作为根茎类作物, 其食用部分与土壤直接接触的特性有关[22–23], 更易富集 Mn 等元素, 这一发现与白玉杰等[24]关于蔬菜富集规律的研究结论一致。

表 3　香辛料中 Ni、Co、Mn 的含量分析
Table 3　Content analysis of Ni, Co and Mn in spices

重金属	香辛料	样本数	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	平均值±标准偏差/(mg/kg)	超参考限量率/%
Ni	花椒	119	ND	10.27	1.99±1.83	5.88
	辣椒	60	ND	36.62	1.65±4.76	5.00
	生姜	61	ND	6.26	1.16±1.46	4.92
Co	花椒	119	ND	0.48	0.12±0.07	0.00
	辣椒	60	0.01	9.17	0.35±1.16	1.67
	生姜	61	0.01	1.95	0.31±0.38	0.00
Mn	花椒	119	ND	208.68	53.78±31.02	7.56
	辣椒	60	6.73	326.66	26.18±43.20	3.33
	生姜	61	15.41	2169.42	174.69±309.80	42.62

注: ND 表示未检出; 超参考限量率参考 1.4.2 节中的参考限量值计算。

2.3　污染水平评价及空间污染分布特征

根据单因子指数法评价结果(表 4), 240 批次香辛料中, 绝大部分样品处于未污染状态(P_i≤1)。受污染的 Ni、Co、Mn (P_i>1)样品占比分别为 5.42%、0.42%和 15.42%。其中, 重度污染样品(P_i>3)主要集中在辣椒和生姜中, 表明不同香辛料对重金属的富集能力存在明显差异。从区域分布来看, 4 个区域各元素含量如下: Ni 平均值含量为渝东南(2.02 mg/kg)>渝西(1.90 mg/kg)>主城(1.28 mg/kg) = 渝东北(1.28 mg/kg); Co 平均值含量为渝东南(0.34 mg/kg)>主城(0.22 mg/kg)>渝西(0.19 mg/kg)>渝东北(0.18 mg/kg); Mn 平均值含量为渝东南(86.89 mg/kg)>渝西(76.72 mg/kg)>主城(75.38 mg/kg)>渝东北(71.42 mg/kg), 表明香辛料中重金属污染存在明显空间异质性。从各区域 P_i 值分布来看(图 1), 3 种元素(Ni、Co、Mn)的 P_i 最大值均来自渝东南地区, 且数据离散度较大, 异常值较多, 表明该地区污染情况较为复杂, 部分辣椒样品中 Ni、Co 含量异常偏高, 推测与该区域地质高背景(如页岩风化)及历史矿业活动有关[16,25–26], 与周建民等[27]对大宝山矿区周边污染特征的研究发现相似。另外, 主城区域有 3 批次 Mn 含量较高(P_i>3), 可能与城市工业活动、交通污染等人为源输入有关, 特别是汽车尾气排放和工业粉尘沉降可能是 Mn 的重要来源[28]。渝东北地区 3 种元素污染总体处于较低水平, 表明污染程度较轻且分布较为均匀, 环境背景相对清洁。

表 4　香辛料中 Ni、Co、Mn 的污染水平评价
Table 4　Evaluation of contamination levels of Ni, Co and Mn in spices

重金属	品种	样本量	P_i≤1	1<P_i≤2	2<P_i≤3	P_i>3
Ni	花椒	119	112	6	1	0
	辣椒	60	57	2	0	1
	生姜	61	58	3	0	0
Co	花椒	119	119	0	0	0
	辣椒	60	59	0	1	0
	生姜	61	61	0	0	0
Mn	花椒	119	110	8	1	0
	辣椒	60	58	1	0	1
	生姜	61	35	14	5	7

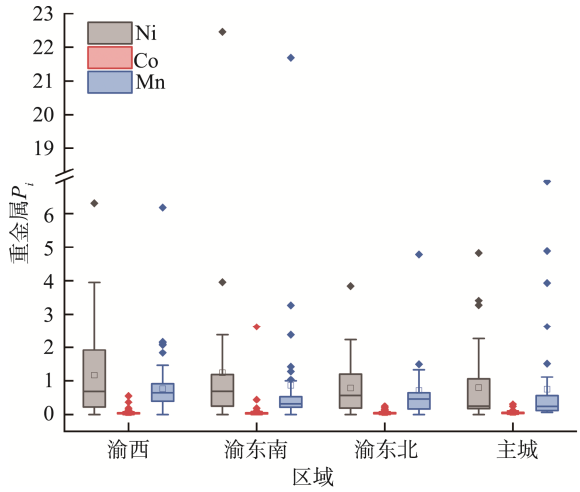


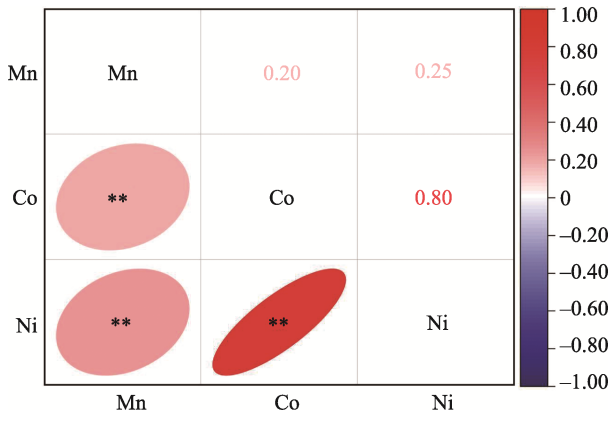
图 1 重庆市不同区域香辛料中重金属 P_i 值分布箱线图

Fig.1 Supplementary figure boxplot of heavy metal P_i in spices from different regions of Chongqing

2.4 香辛料中重金属相关性及主成分分析

为探究 3 种重金属元素间的来源关系，本研究进行了皮尔逊相关性分析(Pearson correlation coefficient, PCC)与主成分分析(principal component analysis, PCA)。

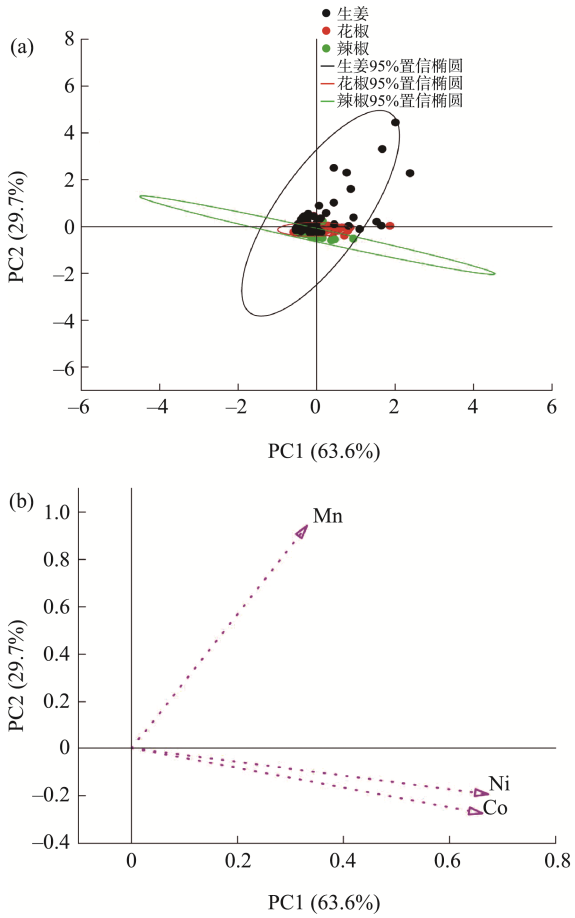
PCC 结果(图 2)表明，Ni 与 Co 之间存在极强的显著正相关关系(r=0.80, P<0.01)，表明二者可能具有共同的污染来源或相似的迁移富集行为。这与前人对土壤-作物系统中重金属迁移规律的研究结果一致[29–31]，提示可能来源于同一地球化学过程或人为活动。相比之下，Mn 与 Ni、Co 之间的相关性较弱，暗示其来源或环境行为可能不同于 Ni 和 Co。PCA 结果(图 3)进一步证实了元素间的来源关系。得分图显示 3 类香辛料样品分布相互重叠，未呈现按品种聚集的趋势，表明香辛料品种并非导致重金属含量差异的主要因素。载荷图显示 Ni 与 Co 的载荷向量方向高度一致且夹角极小，强有力地证实了二者具有极强的同源性和协同作用；而 Mn 的载荷向量则位于独立方向上，与 Ni、Co 的向量夹角接近 90°，支持其来源相对独立的结论，主成分分析结果与皮尔逊相关性分析结论基本一致。



注: **表示差异极显著(P<0.01)。

图 2 香辛料中 Ni、Co、Mn 含量的 PCC 热图

Fig.2 PCC heatmap of Ni, Co and Mn content in spices



注: (a). PCA 得分图; (b). PCA 载荷图。

图 3 香辛料样品中重金属的 PCA

Fig.3 PCA of heavy metals in spice samples

综合空间分布特征与主成分分析结果，Ni 和 Co 污染在渝东南等地区可能受地质高背景及历史矿业活动的显著影响，同时工业活动等外部输入亦不可忽视；而 Mn 的含量空间异质性较高，在渝东南地区受自然背景影响为主，在主城等区域则可能叠加了交通排放、工业粉尘等人为源输入，呈现自然与人为因素共同作用的特征。

2.5 膳食暴露风险评估

采用 THQ 模型对食用香辛料带来的健康风险进行评估，结果见表 5。花椒中 3 种元素的 THQ 值均远小于 1，风险可忽略。辣椒和生姜的 THQ 均值也小于 1，但存在高风险个体样本。有 1 批次辣椒(Co 贡献为主，为 0.9549)和 2 批次生姜(Mn 贡献为主，分别为 1.0577 和 2.5826)的 TTHQ 值大于 1，存在一定的健康风险。

表 5　基于 THQ 模型的膳食暴露风险评估
Table 5　Dietary exposure risk assessment based on THQ model

香辛料种类	数量	特征参数	THQ			TTHQ
			Ni	Co	Mn	
花椒	119	最小值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
		最大值	0.0856	0.0504	0.2484	0.3830
		平均值	0.0166	0.0128	0.0640	0.0934
		THQ (TTHQ)>1 数量	0	0	0	0
辣椒	60	最小值	0.0013	0.0008	0.0080	0.0186
		最大值	0.3051	0.9549	0.3889	1.6489
		平均值	0.0139	0.0366	0.0312	0.0816
		THQ (TTHQ)>1 数量	0	0	0	1
生姜	61	最小值	0.0003	0.0008	0.0183	0.0217
		最大值	0.0522	0.2034	2.5826	2.6548
		平均值	0.0096	0.0326	0.2080	0.2502
		THQ (TTHQ)>1 数量	0	0	2	2

特别值得注意的是, Mn 是膳食暴露最主要的贡献因子, 其 THQ 值远高于 Ni 和 Co。与倪张林等[32]对桂皮、八角等香辛料的风险评估结果相似。总体来说, 香辛料中 98%以上样品风险可控, 但个别高风险样本的存在表明仍需加强对香辛料中 Mn 的监测, 特别是对生姜等富集能力较强的品种应当实施重点监控。

3　结　论

本研究采用微波消解-ICP-MS 同时测定香辛料中 Ni、Co、Mn 的方法, 该方法准确、快速、灵敏度高, 适用于香辛料的日常质量检测。

本研究结果显示重庆市香辛料中 Ni、Co、Mn 污染整体并不严重, 但存在品种差异性和地域集中性。Ni 与 Co 具有极强的同源性, 而 Mn 则来源独立。生姜对 Mn 有较强的富集作用, 渝东南地区部分辣椒存在 Ni、Co 复合污染现象, 此发现对于追溯污染源和制定精准治理策略具有重要意义。

膳食风险水平研究表明, 98%的样品是安全的, 但个别批次的辣椒(Co)和生姜(Mn)存在较高的健康风险。值得注意的是, Mn 是最大的风险贡献因子, 且其现行监管标准缺失。有必要在香辛料质量安全监测中增加 Mn 的监测指标, 并考虑对渝东南等高风险产区和品种实施源头监控和重点监控。本研究的不足在于未能对 Pb、Cd 等传统重金属进行同步检测与分析, 未来研究应关注多种重金属的复合污染效应。

参考文献

[1] GALL JE, BOYD RS, RAJAKARUNA N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: A review [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(4): 201.

[2] 张颖茜, 于文斌, 杨娟, 等. 不同前处理方式对 ICP-MS 法检测香辛料中金属元素含量的影响[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(3): 117–122.
ZHANG YQ, YU WB, YANG J, *et al*. Influence of different pretreatment methods on the detection of metal element contents in spices by ICP-MS method [J]. China Food Additives, 2025, 36(3): 117–122.

[3] BUA DG, ANNUARIO G, ALBERGAMO A, *et al*. Heavy metals in aromatic spices by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2016, 9(3): 210–216.

[4] SINGH M, KUMAR J. Flourescence sensors for heavy metal detection: Major contaminants in soil and water bodies [J]. Analytical Sciences, 2023, 39: 1829–1838.

[5] TEFERA M, TEKLEWOLD A. Health risk assessment of heavy metals in selected Ethiopian spices [J]. Heliyon, 2021, 7: e07048.

[6] GAYA U, IKECHUKWU SA. Heavy metal contamination of selected spices obtained from Nigeria [J]. Journal of Science and Environment Management, 2016, 20: 681–688.

[7] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261–272.
CHEN WP, YANG Y, XIE T, *et al*.Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 261–272.

[8] 涂康安. 锂离子电池三元正极材料现状及发展趋势[J]. 当代化工研究, 2021, 17: 17–18.
TU KAN. Present situation and development trend of ternary cathode materials for lithium-ion batteries [J]. Modern Chemical Research, 2021, 17: 17–18.

[9] ARSHAD A, KHALID S, NOOR MJ. Monitoring and assessment of toxicological risks of poultry meat contaminated with heavy metals [J]. Biological Trace Element Research, 2025, 203: 3845–3859.

[10] LAI L, YAN F, CHEN G, *et al*. Recent progress on fluorescent probes in heavy metal determinations for food safety: A review [J]. Molecules, 2023, 28(15): 5689.

[11] 王艳敏, 周鸿, 熊丽, 等. 2016—2018 年江西省居民膳食食品中镍污染状况调查[J]. 实验与检验医学, 2021, 39(1): 208–210, 218.

WANG YM, ZHOU H, XIONG L, *et al*. Investigation on nickel contamination in dietary foods of Jiangxi Province residents from 2016 to 2018 [J]. Experimental and Laboratory Medicine, 2021, 39(1): 208–210, 218.

[12] LANG Y, ZHANG B, CAI D, *et al*. Determination methods of the risk factors in food based on nanozymes: A review [J]. Biosensors, 2023, 13(1): 69.

[13] European Food Safety Authority. Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water [J]. EFSA Journal, 2015, 13(2): 4002.

[14] SOARE A, MUSTAŢEA G, UNGUREANU EL, *et al*. Heavy metals and trace elements content in different types of seasoning and aromatic plants: A review [J]. Journal of Hygienic Engineering and Design, 2023, 635(7): 20–21.

[15] SEMERJIAN L, ALAWADHI N, ABASS K, *et al*. Metal concentrations and health risk assessment of spices and herbs from United Arab Emirates markets [J]. Food Control, 2025, 178: 111478.

[16] 闫巧俐, 华震宇, 何伟忠, 等. 枣果中重金属镍来源途径探究[J].食品与机械, 2020, 36(1): 95–99.
YAN QL, HUA ZY, HE WZ, *et al*. Study on the sources of nickel in jujube fruit [J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 95–99.

[17] TUSAR KR, ARAFAT-HOSSAIN SK, SAIFUL-ISLAM MD, *et al*. Assessing heavy metals using ICP-MS in fruits from the developing world and their associated health risks [J]. Biological Trace Element Research, 2025(prepublish). DOI: 10.1007/s12011-025-04809-5

[18] LUÍS-FELIPE-DE AD, ANDRESSA DSBO, MARINA DSP, *et al*. Coastal fallout of settleable particulate matter: Metal bioaccumulation and sublethal toxicity in estuarine bivalves with implications for human health [J]. Marine Pollution Bulletin, 2025, 220: 118441.

[19] 史学丽, 高辉, 周永红, 等. 石家庄市 8 种香辛料中重金属污染调查评价[J]. 医学动物防制, 2021, 37(12): 1135–1139.
SHI XL, GAO H, ZHOU YH, *et al*. Analysis on heavy metal pollution of 8 spices in Shijiazhuang [J]. Journal of Medical Pest Control, 2021, 37(12): 1135–1139.

[20] 郑钦月, 辜世伟, 胡云均, 等. 烧烤蘸料中重金属污染情况及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 309–316.
ZHENG QY, GU SW, HU YJ, *et al*. Analysis of heavy metal contamination and dietary risk assessment in barbecue condiment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 309–316.

[21] SOH B, HAN Y, CHO SY, *et al*. Assessing cobalt and manganese in foods: A study on determination and health risk using inductively coupled plasma spectrometry [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106394.

[22] ZHANG X, WANG XL, GAO XB, *et al*. Heavy element contents of vegetables and health-risk assessment in China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154552.

[23] WANG YR, WANG RM, FAN LY, *et al*. Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China [J]. Chemosphere, 2017, 174: 613–627.

[24] 白玉杰, 沈根祥, 陈小华, 等. 三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1619–1625.
BAI YJ, SHEN GX, CHEN XH, *et al*. Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1619–1625.

[25] 蒋金柱, 吴媛媛, 蒋艳娇, 等. 安徽省东南部江淮平原区农业土壤的重金属含量特征[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(12): 49–51, 59.
JIANG JZ, WU YY, JIANG YJ, *et al*. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in Jianghuai plain of Southeastern Anhui Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(12): 49–51, 59.

[26] 刘力, 张传华, 王钟书, 等. 农用地土壤重金属来源解析与健康风险空间分异特征研究—以重庆市巫山县笃坪乡为例[J]. 西南农业学报, 2024, 37(5): 1099–1107.
LIU L, ZHANG CH, WANG ZS, *et al*. Analysis of heavy metal sources and spatial differentiation of health risks in agricultural soil: A case study of Duping Township, Wushan County, Chongqing [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(5): 1099–1107.

[27] 周建民, 党志, 司徒粤, 等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 6: 1172–1176.
ZHOU JM, DANG Z, SI TY, *et al*. Distribution and characteristics of heavy metals contaminations in soils from Dabaoshan mine area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 6: 1172–1176.

[28] 孙梅娟, 彭银霞, 赵娟, 等. 云南省典型区域地下水 Fe、Mn 分布特征及健康风险评价[J]. 四川环境, 2025, 44(4): 133–141.
SUN MJ, PENG YX, ZHAO J, *et al*. Distribution characteristics and health risk assessment of Fe and Mn in groundwater of typical areas of Yunnan Province [J]. Sichuan Environment, 2025, 44(4): 133–141.

[29] 司瑞, 李新斌, 康成鑫, 等. 矿区周边农田土壤-花椒作物系统重金属风险评价及迁移富集特征[J]. 甘肃科学学报, 2025, 37(4): 9–16.
SI R, LI XB, KANG CX, *et al*. Risk assessment and migration enrichment characteristics of heavy metals in soil-*Zanthoxylum* crop system in farmland surrounding mine area [J]. Journal of Gansu Sciences, 2025, 37(4): 9–16.

[30] 严莎, 凌其聪, 严森, 等.城市工业区周边土壤-水稻系统中重金属的迁移累积特征[J]. 环境化学, 2008, 2: 226–230.
YAN S, LING QC, YAN S, *et al*. Behaviors of heavy metals in soil-rice system around in industrial area around city [J]. Environmental Chemistry, 2008, 2: 226–230.

[31] 姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 等. Ni-Mo 多金属矿区土壤和农作物铬、钴污染及健康风险评价[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(1): 109–117.
YAO CB, ZHOU MZ, XIONG KN, *et al*. Health risk assessment of chromium and cobalt in soils and crops around the Ni-Mo polymetallic mining area [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(1): 109–117.

[32] 倪张林, 栾洁, 谢一娇, 等. 桂皮、八角和花椒中重金属的溶出及健康风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(9): 1211–1219.
NI ZL, LUAN J, XIE YJ, *et al*. Infusion of heavy metals in *Cinnamomum cassia*, *Illicium verum*, *Zanthoxylum bungeanum* and their health risk assessment [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(9): 1211–1219.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)