DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250815007
引用格式: 姚博伟, 张哲. 西北某省市售食用植物油中铅污染情况调查及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 143–149.
YAO BW, ZHANG Z. Investigation on the pollution situation and risk assessment of dietary exposure of the lead in edible vegetable oil sold in a certain province in Northwest China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 143–149. (in Chinese with English abstract).

西北某省市售食用植物油中铅污染情况调查及膳食暴露风险评估

姚博伟*, 张　哲

(宁夏计量质量检验检测研究院, 银川　750200)

摘　要: 目的　分析西北某省市售食用植物油中铅污染状况, 并对其膳食暴露风险进行评估。**方法**　采集2023—2024年西北某省市售食用植物油样品共计335批次, 按照GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中规定的电感耦合等离子质谱法进行检测, 运用污染指数法对食用植物油中铅污染情况进行分析, 根据成人膳食消费量, 应用暴露边界比(margin of exposure, MOE)方法对居民的铅膳食暴露风险进行评估。**结果**　在 335 批次食用植物油样品中, 铅的总体检出率为 7.2%, 超标率为 0%, 平均含量为0.014 mg/kg。6 种食用植物中铅元素单因子污染指数均小于 1, 综合污染指数均小于 0.7, 污染水平为清洁, 污染等级为安全。西北某省各年龄段成年居民(18~44 岁、45~60 岁、60 岁以上)每日食用植物油膳食暴露量平均值和高含铅食品暴露量(第 95 百分数 P_{95})分别为 0.008、0.010、0.010 μg/(kg • d)和 0.035、0.041、0.041 μg/(kg • d), 各年龄段成年居民 MOE 均值和 P_{95} 均大于 1, 说明该省食用植物油中铅膳食暴露风险较低。**结论**　2023—2024年西北某省各类市售食用植物油铅污染情况总体较轻, 安全程度较高, 各年龄段成年居民平均膳食暴露和高暴露膳食风险均在可接受范围内, 但仍需持续关注和监测食用植物油食品安全风险, 采取措施进一步防范和减少食用植物油铅膳食暴露风险。

关键词: 食用植物油; 铅污染; 膳食暴露; 风险评估

Investigation on the pollution situation and risk assessment of dietary exposure of the lead in edible vegetable oil sold in a certain province in Northwest China

YAO Bo-Wei*, ZHANG Zhe

(*Ningxia Academy of Metrology & Quality Inspection*, *Yinchuan* 750200, *China*)

ABSTRACT: Objective　To analyze the lead pollution situation in edible vegetable oils sold in a certain province

收稿日期: 2025-08-15
基金项目: 宁夏市场监管厅科技计划项目(2024SJKY0005); 2023 年度宁夏回族自治区青年科技托举人才培养项目(宁科协发组字〔2024〕6 号); 宁夏科技惠民项目(2024CMG03049)
第一作者/*通信作者: 姚博伟(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为应用微生物及食品质量安全。E-mail: ybw2016@sina.com

in Northwestern China, and evaluate the risk of dietary exposure to lead. **Methods** A total of 335 edible vegetable oil samples were collected in a certain province in Northwest China from 2023 to 2024. The samples were tested using the inductively coupled plasma mass spectrometry method specified in GB 5009.268—2016 *National food safety standard-Determination of neotame in foods*, with a pollution index method applied to evaluate lead contamination levels. The risk of dietary lead exposure among residents was assessed using the margin of exposure (MOE) method based on adult consumption patterns. **Results** In the 335 batches of edible vegetable oil samples, the overall detection rate of lead was 7.2%, the exceeding standard rate was 0%, and the average content was 0.014 mg/kg. All 6 kinds of edible plant samples showed single-factor pollution indices was all less than 1, and comprehensive pollution indices was all less than 0.7, indicating clean contamination levels and safe exposure grades. The average daily dietary exposure to edible oil and high-lead food exposure (95th percentile P_{95}) for adult residents in a certain province in Northwest China (18–44 years, 45–60 years, over 60 years) were 0.008, 0.010 and 0.010 μg/(kg • d) and 0.035, 0.041, 0.041 μg/(kg • d) respectively. The mean value and P_{95} value of MOE for adult residents of all age groups were greater than 1, which indicated that the dietary exposure risk of lead from edible vegetable oils in this province was relatively low. **Conclusion** From 2023 to 2024, lead contamination in commercially available edible vegetable oils across a certain northwestern province is generally mild with high safety levels. Both the average dietary exposure and high-exposure risks for adults of all age groups remain within acceptable ranges. However, continuous monitoring and attention to food safety risks associated with edible vegetable oils are still required. Further measures should be taken to prevent and reduce lead exposure risks through improved food safety practices.

KEY WORDS: edible vegetable oil; lead pollution; dietary exposure; risk assessment

0 引 言

铅是一种在自然界中广泛分布的重金属元素，具有高毒性、可造成持久性的污染，能够在多种环境介质中迁移，在食物链中传递蓄积，可通过皮肤接触、呼吸暴露、饮食摄入等多种方式进入人体，对人体造成损伤，进而威胁人类身体健康[1–3]。除职业暴露途径以外，膳食暴露是铅进入人体的重要途径[4–5]。食品中铅污染的来源主要有含铅的食品添加剂或加工助剂，食品包装材料中的迁移溶出，食品加工过程中和农产品原材料生长过程接触到的土壤、空气、水等[6]。

长期食用含铅食品和接触低浓度铅可对人体中枢神经系统、心脑血管、肾脏和生殖系统造成累计危害，尤其是可对儿童的生长发育造成不可逆的严重影响，可导致儿童发育迟缓，引发智力障碍[7–9]。因此，铅的膳食暴露研究一直备受关注。国际上如美国环保局提出了用于评估食品中铅等重金属对人体危害的风险评估模型[10]。GAZZAWI 等[11]对巴勒斯坦市售的 13 种鱼类和 8 种鱼肉罐头中铅、砷、镉等重金属进行测定和健康风险评价，其铅浓度在 0.02~0.07 μg/g 干重范围内，无致癌和非致癌风险，但仍需持续关注当地水产品安全。YAN 等[12]采集了 2020—2022 年河南省 18 个地区的 6632 份水稻样品，对其铅、砷等重金属含量进行检测及风险评估，结果显示铅的检出率为 2.25%，健康风险在可接受范围内。GÜLTEKIN 等[13]对土耳其奥尔迪省城乡地区种植的番茄、辣椒、菜豆和玉米中铅、铁和铝浓度进行检测和风险评价，结果显示所有蔬菜中的铅含量(341.4~13240.4 μg/kg)均超过了允许限度，没有非致癌风险，仍需持续监测。CHEN 等[14]采集了 2017—2021 年宁夏农田的 1274 份土壤和农作物样本，检测其铅、砷、镉等重金属含量，结果显示农作物样本中重金属含量均未超标，健康风险值大于 1，可接受，作物暂未出现累积效应，但需建立长效监测制度以保证农作物食品安全。王艳敏等[15]采集 2015—2019 年江西省 648 份婴幼儿谷物辅食样品，调查铅、镉、砷等重金属污染状况，并评估饮食暴露及其潜在的健康风险，研究结果表明铅的平均浓度为 0.039 mg/kg，检出率为 81.2%，暴露边界比(margin of exposure, MOE)大于 1，其铅污染情况较轻，健康风险在可接受范围内。李明璐等[16]应用点评估方法对 2012—2021 年中国 19 个省份的 31008 份膳食铅含量数据进行风险评估，研究得到中国成人铅膳食平均暴露量为 1.05 μg/(kg • d)，P_{95} 为 1.87 μg/(kg • d)，各年龄段 MOE 均值均大于 1，但 P_{95} 均小于 1，说明中国成人铅膳食暴露风险整体较低，但高暴露人群风险较高，需进一步监测防范。

近年来，国内各位学者开展了针对不同地区食用植物油中各类污染物的膳食暴露风险评估，如山东省和浙江

省对于食用油中氯丙醇酯[17–18]、上海市和河南省对于食用油中苯并芘的膳食风险评估[19–20], 但我国西北地区对于食用油中污染物的膳食暴露风险评估研究相对较为少见。本研究重点针对国内西北某省市售食用植物油中铅含量进行安全监测和暴露风险评估, 尤其关注西北地区主产且主要食用的亚麻籽油[21]的铅污染情况。相对于其他食用植物油如花生油[22]、菜籽油[23]等的风险评估数据, 国内亚麻籽油相关研究较为少见。本研究采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)检测 2023—2024 年 335 份西北某省市售食用植物油铅浓度, 结合成年居民膳食消费调查数据, 应用污染指数法、MOE 法和目标危害指数法对其潜在健康风险进行评估, 获得该省市售食用植物油铅污染水平和膳食暴露风险数据, 以期为监管部门制定相应监管措施降低铅污染提供理论参考和依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

于 2023—2024 年从西北某省各地级市超市、农贸市场、小作坊、餐饮经营单位等场所随机抽取 335 批次食用植物油, 种类包括亚麻籽油(170 批次)、花生油(20 批次)、大豆油(31 批次)、玉米油(22 批次)、菜籽油(20 批次)、植物调和油(70 批次)共 6 种食用植物油。

铅标准溶液(GSB G 62071-90, 质量浓度 1000 μg/mL)(国家钢铁测试中心钢铁研究总院); 硝酸(色谱纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2　仪器与设备

S210 型 pH 计、XS204 型电子天平(精度 0.0001 g)、XPR225DU 型电子天平(精度 0.00001 g)(瑞士梅特勒托利多公司); iCAP Qs 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); ultraCLAVE V型超级微波消解平台(意大利迈尔通有限公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　样品前处理和检测方法

按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中第一法 ICP-MS 进行样品前处理和植物油中铅含量的测定。方法检出限(limit of detection, LOD)为 0.02 mg/kg, 定量限为 0.05 mg/kg, 高于定量限视为检出。实验采用加标回收、平行双样、空白实验等方法进行质量控制。

1.3.2　评价标准

按照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》判定是否超标, 铅含量(以铅计)>0.08 mg/kg 视为超标。

1.4　污染指数分析

1.4.1　单因子污染指数法

单因子污染指数用以评价单个元素的污染程度, 单因子污染指数[24]如公式(1)所示。

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

式中: P_i 为第 i 个元素的污染指数; C_i 为第 i 个元素的实测值, mg/kg; S_i 为第 i 个元素的评价标准中规定的限量值, mg/kg。$P_i\leqslant 1.0$ 为清洁, $1.0<P_i\leqslant 2.0$ 为轻污染, $2.0<P_i\leqslant 3.0$ 为中污染, $P_i>3.0$ 为重污染。其中 P_i 越大, 表明受该元素污染程度越大。

1.4.2　内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数[25]兼顾了污染指数平均值和最高值, 可以突出污染较重污染物的作用, 综合指数计算方法以及污染分布如公式(2)所示。

$$P_{综}=\sqrt{\frac{(C_i/S_i)^2_{\max}+(C_i/S_i)^2_{ave}}{2}} \tag{2}$$

式中: $P_{综}$为综合污染指数; $(C_i/S_i)_{\max}$ 为污染物中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{ave}$ 为污染物中污染指数平均值; $P_{综}\leqslant 0.7$, 污染等级为安全; $0.7<P_{综}\leqslant 1.0$, 污染等级为警戒限; $1.0<P_{综}\leqslant 2.0$, 污染等级为轻污染, $2.0<P_{综}\leqslant 3.0$, 污染等级为中污染, $P_{综}>3.0$, 污染等级为重污染。$P_{综}$越大, 表明受该元素污染程度越大。

1.5　膳食暴露风险评估

1.5.1　膳食暴露量的计算

成年居民食用植物油每日膳食暴露量的计算如公式(3)所示。

$$\mathrm{EXP}=\frac{C\times \mathrm{DC}}{\mathrm{BW}} \tag{3}$$

式中: EXP 为某种重金属经口途径的单位体重日均暴露量(dietary exposure), μg/(kg • d); C 为食用植物油中铅元素的实测值, mg/kg, 采用平均值和第 95 百分数(P_{95})值计算; DC 为当地居民每日食用油消费量(daily consumption), g/d, 采用成年居民食用油膳食摄入状况调查数据[26], 18~44 岁为 35.8 g/d, 45~60 岁为 42.3 g/d, 60 岁以上为 41.1 g/d; BW 为体重(body weight), 18~59 岁和 60 岁以上人群分别以体重 62 kg 和 60 kg 计[7]。

1.5.2　铅暴露评估—暴露边界比法

根据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的评估结果, 目前尚无可以用于铅的风险特征描述的健康指导值[27], 因此本研究采用欧洲食品安全局科学委员会提出的 MOE 方法[28]对西北某省居民市售植物油中铅暴露进行风险评估。MOE 计算公式如式(4)所示。

$$\mathrm{MOE}=\frac{\mathrm{BMDL}}{\mathrm{EXP}} \tag{4}$$

式中：BMDL 为基准计量下限值(benchmark dose lower confidence limit, BMDL)为剂量—效应曲线上的参考点，成人铅的日均基准计量下限值为 1.2 μg/kg[29]。

MOE 与健康风险呈负相关。当 MOE>1 时，健康风险相对较低；当 MOE≤1 时，存在一定的健康风险。

1.6 数据处理

使用 Excel 2010 对数据进行统计、作图，采用 SPSS 22.0 对数据进行显著性差异分析，以 $P<0.05$ 为显著性差异，$P<0.01$ 为极显著性差异。食用植物油样品中铅检出率差异比较采用卡方检验(χ^2)。对于低于 LOD 的数据，采用世界卫生组织推荐的替代法进行处理，将未检出值用 1/2LOD 值进行替换[30]。本研究选择均值、最大值、中位数和 P_{95} 分析食用植物油中铅含量，并与国家标准限值对比。

2 结果与分析

2.1 西北某省市售植物油中铅的监测情况

按照 GB 5009.268—2016 中规定的 ICP-MS 对 2023—2024 年采取的 335 份西北某省市售食用植物油样品进行铅含量检验(对未检出样品进行样品加标回收验证实验，其加标回收率为 108%，符合 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检测》附录 F 中对方法加标回收率的要求)，结果显示铅的总体检出率为 7.2% (24/335)，超标率为 0%，铅检测值均值为 0.014 mg/kg，最大值为 0.08 mg/kg，中位数为 0.010 mg/kg，P_{95} 为 0.06 mg/kg。植物调和油铅检出率最高为 14.3%，亚麻籽油和大豆油检出率较低，分别为 4.1%和 3.2%。不同品类食用植物油的铅污染状况存在差异，菜籽油、食用调和油、玉米油及花生油的铅含量 P_{95} 相对偏高，而作为西北地区主要栽培与食用的亚麻籽油，其铅污染水平则相对偏低。应用卡方检验分析不同类别食用植物油检出率差异，结果显示 $\chi^2=68.75$，$P<0.05$，故食用植物油类别与检出率存在显著性差异，具有统计学意义。具体监测情况分析详见表 1。

2.2 西北某省市售食用植物油中铅的污染指数分析

对 2023—2024 年采集的 335 份西北某省市售食用植物油样品中铅含量监测数据进行污染指数分析，结果如表 2 所示。由表 2 可知，亚麻籽油等 6 种植物油铅单因素污染均小于 0.7，铅污染水平为清洁。6 种植物油铅内梅罗综合污染指数范围均小于 0.7，按照食品安全质量等级划分，均为安全等级。

2.3 西北某省市售植物油中铅的膳食暴露水平

根据 2023—2024 年西北某省市售食用植物油中的平均检测值的和 P_{95} 以及该省不同年龄段成年居民食用植物油消费量的均值，计算不同年龄段人群膳食铅暴露量。铅摄入量的 P_{95} 反映了膳食高暴露消费者的铅暴露水平[31]。结果如表 3 所示，该省成年居民各年龄段(18~44 岁、45~59 岁、60 岁及以上)人群每日通过膳食摄入食用植物油中

表 1 2023—2024 年西北某省市售食用植物油中铅的污染水平

Table 1 Pollution level of lead in edible vegetable oil sold in a certain province of Northwest China in 2023—2024

样品类别	标准限量/(mg/kg)	样品数/个	检出率/%	均值/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	超标率/%
亚麻籽油	≤0.08	170	4.1	0.013	0.010	0.010	0.080	0
大豆油		31	3.2	0.012	0.010	0.010	0.080	0
菜籽油		22	9.1	0.015	0.010	0.058	0.070	0
植物调和油		70	14.3	0.018	0.010	0.066	0.080	0
玉米油		22	9.1	0.016	0.010	0.067	0.080	0
花生油		20	10.0	0.016	0.010	0.058	0.070	0
合计		335	7.2	0.014	0.010	0.060	0.080	0

表 2 2023—2024 年西北某省市售食用植物油中铅元素污染指数

Table 2 Pollution index of lead in edible vegetable oil sold in a certain province of Northwest China in 2023—2024

样品类别	P_i	污染水平	$P_{综}$	污染等级
亚麻籽油	0.16	清洁	0.69	安全
大豆油	0.15	清洁	0.69	安全
菜籽油	0.19	清洁	0.64	安全
植物调和油	0.22	清洁	0.69	安全
玉米油	0.20	清洁	0.69	安全
花生油	0.20	清洁	0.63	安全
合计	0.18	清洁	0.69	安全

铅的平均暴露量分别为 0.008、0.010、0.010 μg/(kg • d), 各年龄段居民的膳食铅日均暴露量有随年龄增大上升的趋势。各年龄段膳暴露消费者通过高含铅食用植物油对铅的暴露量分别为 0.035、0.041、0.041 μg/(kg • d)。各年龄段高暴露消费者对铅的暴露量有随年龄增大上升的趋势。

2.4　西北某省市售食用植物油中铅的膳食暴露风险评估

根据成人铅暴露 BMDL 和该省不同年龄成年人群中每日膳食摄入铅元素暴露量和高含铅食品暴露量进行食用植物油中膳食铅暴露风险评估, 计算 MOE, 评估结果如表 4 所示。由表 4 可知, 18~44 岁、45~59 岁、60 岁及以上年龄人群 6 种食用植物油膳食铅暴露量均值和高含铅食用植物油暴露值均大于 1, 说明膳食风险相对较低, 均在可接受范围内。不同年龄人群中 6 种植物油高含铅食用植物油膳食铅暴露 MOE 低于暴露均值, MOE 呈现随着年龄的增大而降低的趋势, 这可能是因为该省 45 岁以上人群食用油膳食消耗量较高的原因, 导致其膳食风险高于 18~44 岁人群。

表 3　2023—2024 年西北某省不同年龄人群中每日膳食中植物油铅元素暴露量[μg/(kg • d)]
Table 3　Estimated dietary exposure of lead at different age groups in edible vegetable oil sold in a certain province of Northwest China in 2023—2024 [μg/(kg • d)]

食品类型	18~44 岁 EXP		45~60 岁 EXP		60 岁以上 EXP	
	均值	P_{95}	均值	P_{95}	均值	P_{95}
亚麻籽油	0.008	0.006	0.009	0.007	0.009	0.007
大豆油	0.007	0.006	0.008	0.007	0.008	0.007
菜籽油	0.009	0.033	0.010	0.040	0.010	0.040
植物调和油	0.010	0.038	0.012	0.045	0.012	0.045
玉米油	0.009	0.039	0.011	0.046	0.011	0.046
花生油	0.009	0.033	0.011	0.040	0.011	0.040
合计	0.008	0.035	0.010	0.041	0.010	0.041

表 4　2023—2024 年西北某省不同年龄人群中每日膳食中植物油铅元素暴露 MOE
Table 4　MOE of dietary lead exposure in edible vegetable oil at different age groups sold in a certain province of Northwest China in 2023—2024

食品类型	18~44 岁 MOE		45~60 岁 MOE		60 岁以上 MOE	
	均值	P_{95}	均值	P_{95}	均值	P_{95}
亚麻籽油	159.86	207.82	135.30	175.89	134.76	175.18
大豆油	173.18	207.82	146.57	175.89	145.99	175.18
菜籽油	138.55	35.83	117.26	30.33	116.79	30.20
植物调和油	115.46	31.49	97.71	26.65	97.32	26.54
玉米油	129.89	31.02	109.93	26.25	109.49	26.15
花生油	129.89	35.83	109.93	30.33	109.49	30.20
合计	148.44	34.64	125.63	29.31	125.13	29.20

3　讨论与结论

从这次监测结果中可以看出, 西北某省 2023—2024 年市售食用植物油中铅检出率较低, 为 7.2%, 超标率为 0%, 本研究中食用植物油铅平均浓度为 0.014 mg/kg, 远低于现行 GB 2762—2022 中规定的 0.08 mg/kg 的限值, 表明其铅含量较低。不同种类植物油铅污染水平不同, 其中菜籽油、植物调和油、玉米油、花生油中铅浓度 P_{95} 较高, 而西北地区主产和主要食用的亚麻籽油则相对较低。各类食用植物油铅单因素污染指数均小于 1, 食用油中铅食品污染水平均为清洁; 铅综合污染指数均小于等于 0.7, 铅食品污染等级为安全。对不同年龄段西北某省成年居民食用植物油铅膳食暴露水平进行分析和风险评估, 不同种类食用植物油 MOE 均大于 1, 高暴露水平(P_{95}) MOE 低于均值, 风险相对较高, 这与国内其他地区对食品铅暴露的研究一致[7,16]。本研究中铅暴露存在随年龄增大而风险上升的趋势, 但总体风险水平较低, 在可接受范围内。广州成人铅膳食暴露 MOE 为 15.38[7]、安徽成人铅暴露 MOE 为 10.35[26]、陕西成人居民铅暴露 MOE 为 1.89[32], 本研究所得 MOE 均高于上述城市, 说明该省居民食用植物油膳食健康风险低于以上城市的平均水平。

从铅污染监测情况、污染指数和膳食暴露风险评价方

面都表明该省市售食用植物油具有较高的安全性，但监管部门仍需密切注意食用植物油安全风险，保持较高的监管力度，(1)因为长时间食用经铅污染的食品，可导致铅进入人体后蓄积难以代谢排出；(2)长期接触低浓度铅也可导致身体健康受损[33]，如心血管、神经系统甚至胚胎发育受到损伤和危害；(3)虽然铅超标率为 0%，但需注意到各类植物油铅浓度最大值均等于或接近标准规定限值，且膳食暴露风险随年龄上升而增加，65 岁以上老年人是心脏病、高血压高发人群[34]，对于食用高含铅植物油的人群，仍具有较高的健康风险。

本次评估具有一定的局限性，(1)抽取样本来自流通领域，未覆盖到居民自制食用植物油；(2)仅涉及 2023—2024 年近两年的采样数据，数据量较少，不能反映完整的铅污染时空分布特征；(3)缺少未成年人群食用油膳食摄入数据，未进行未成年人群食用植物油膳食风险评估。

综上述，西北某省市售食用植物油中铅的污染水平总体较轻，膳食暴露量风险较低，安全程度较高，在可接受范围内，但监管部门仍需重点关注，加强监管力度，防止铅污染和铅超标食品进入市场，降低含铅食品对人体健康造成的安全风险。

参考文献

[1] 乔增运, 李昌泽, 周正, 等. 铅毒性危害及其治疗药物应用的研究进展[J]. 毒理学杂志, 2020, 34(5): 416–420.
QIAO ZY, LI CZ, ZHOU Z, *et al*. Research progress of lead toxicity and its therapeutic drug application [J]. Journal of Toxicology, 2020, 34(5): 416–420.

[2] EFSA. Scientific opinion on lead in food [J]. EFSA Journal, 2010, 8(4): 1570.

[3] WANG G, HU X, ZHU Y, *et al*. Historical accumulation and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of a drinking water lake [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 24882–24894.

[4] RAI PK, LEE SS, ZHANG M, *et al*. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment International, 2019, 125: 365–385.

[5] 鲁力, 布多, 张强英, 等. 西藏自治区农产品重金属污染特征及暴露风险评估[J]. 环境化学, 2025, 44(12): 1–11.
LU L, BU D, ZHANG QY, *et al*. Heavy metal pollution characteristics and exposure risk assessment of agricultural products in Tibet Autonomous Region [J]. Environmental Chemistry, 2025, 44(12): 1–11.

[6] O'CONNOR D, HOU D, YE J, *et al*. Lead-based paint remains a major public health concern: A critical review of global production, trade, use, exposure, health risk, and implications [J]. Environment International, 2018, 121(Pt1): 85–101.

[7] 宋韶芳, 李燕, 张维蔚, 等. 2023 年广州市售食品中铅污染状况及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 76–82.
SONG SF, LI Y, ZHANG WW, *et al*. Assessment of the health risks from dietary exposure to lead in Guangzhou in 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 76–82.

[8] SPECHT AJ, WEISSKOPF M, NIE LH. Childhood lead biokinetics and associations with age among a group of lead-poisoned children in China [J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2019, 9: 416–423.

[9] TIRIMA S, BARTREM C, LINDERN I, *et al*. Food contamination as a pathway for lead exposure in children during the 2010—2013 leadpoisoning epidemic in Zamfara, Nigeria [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 67: 260–272.

[10] 张甜, 李拥军, 王义平, 等. 甘肃省市售蔬菜中 16 种稀土元素含量调查及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 150–156.
ZHANG T, LI YJ, WANG YP, *et al*. Content investigation and health risk assessment of 16 kinds of rare earth elements in commercial vegetables in Gansu Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 150–156.

[11] GAZZAWI B, QADAH D, MUBIANA KV, *et al*. Exposure assessment of As, Cd, Hg, and Pb in fish and canned fish collected from local markets at Ramallah city using high-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2025, 9: 1591035.

[12] YAN Y, MAO Z, WANG X, *et al*. From farm to table: Assessing the status and health risk assessment of heavy metal pollution in rice in Henan Province [J]. Frontiers in Public Health, 2025, 13: 1499653.

[13] GÜLTEKIN Y, BAYRAKTAR KM, SEVIK H, *et al*. Optimal vegetable selection in urban and rural areas using artificial bee colony algorithm: Heavy metal assessment and health risk [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107169.

[14] CHEN L, LI H, MA JJ, *et al*. Health risk assessment of heavy metals in soil-crop system in different ecological regions of Ningxia [J]. Environmental Science, 2024, 45(12): 7209–7217.

[15] 王艳敏, 熊丽, 李娟, 等. 2015—2019 年江西省市售婴幼儿谷类辅食中重金属污染状况及膳食暴露评估[J]. 卫生研究, 2024, 53(5): 805–810.
WANG YM, XIONG L, LI J, *et al*. Pollution status and dietary exposure assessment of heavy metal in commercially available cereal-based complementary foods for infants and toddlers in Jiangxi Province from 2015 to 2019 [J]. Journal of Hygiene Research, 2024, 53(5): 805–810.

[16] 李明璐, 秦周, 余勇, 等. 中国成人经膳食摄入铅的风险评估[J]. 中华疾病控制杂志, 2022, 26(7): 862–868.
LI ML, QIN Z, YU Y, *et al*. Risk assessment of lead via dietary intake in Chinese adults [J]. Chinese Journal of Disease Control and Prevention, 2022, 26(7): 862–868.

[17] 朱丽君, 王立友, 王楷, 等. 2016—2020 年山东省食用植物油中氯丙醇酯污染水平及人群暴露评估[J]. 卫生研究, 2022, 51(5): 823–828.
ZHU LJ, WANG LY, WANG K, *et al*. Contamination level and population exposure assessment of chloropropanol esters in edible vegetable oil in Shandong Province from 2016 to 2020 [J]. Journal of Hyciene Research, 2022, 51(5): 823–828.

[18] 张荷香, 陈江, 陈莉莉, 等. 2016—2020 年浙江省市售食用植物油中 2-氯丙醇酯污染状况和暴露评估[J]. 卫生研究, 2023, 52(4): 618–622.
ZHANG HX, CHEN J, CHEN LL, *et al*. Contamination and dietary exposure assessment of 2-chloropropanol esters in vegetable oils available on Zhejiang market during 2016-2020 [J]. Journal of Hygiene Research, 2023, 52(4): 618–622.

[19] 宇盛好, 李亦奇, 彭少杰. 上海市市售食用植物油中苯并[a]芘的膳食

暴露评估[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(7): 142–146.
YU SH, LI YQ, PENG SJ. Dietary exposure assessment of benzo[a]pyrene in edible vegetable oil sold in Shanghai [J]. Cereals & Oils, 2024, 37(7): 142–146.

[20] 李赵平, 孙琳娟, 王娜娜, 等. 2019 年河南食用植物油中苯并(a)芘污染水平及其膳食暴露评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(13): 1653–1655.
LI ZP, SUN LJ, WANG NN, *et al*. Contamination level of benzo(a)pyrene in edible vegetable oils and its dietary exposure assessment in Henan Province, 2019 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(13): 1653–1655.

[21] 李成. 加工对亚麻籽油有益脂质伴随物和抗氧化能力的影响[J]. 科技资讯, 2019, 17(27): 53–54.
LI C. Effect of processing on beneficial lipid phytochemical and antioxidant activity of flaxseed oil [J]. Science & Technology Information, 2019, 17(27): 53–54.

[22] 李亚, 梁剑锋, 柯立坚, 等. 广西梧州市土榨花生油中黄曲霉毒素 B_1 膳食暴露风险评估[J]. 中国油脂, 2022, 47(11): 80–84.
LI Y, LIANG JF, KE LJ, *et al*. Dietary exposure risk assessment of aflatoxin B_1, in native pressed peanut oil in Wuzhou, Guangxi Province [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(11): 80–84.

[23] 范金旭, 王媛媛, 李林竹, 等. 贵阳地区市售菜籽油中 18 种塑化剂含量及风险评估[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(1): 16–23.
FAN JX, WANG YY, LI ZL, *et al*. Detection of 18 plasticizers in rapeseed oil sold in Guiyang and their risk assessment [J]. China Food Additives, 2024, 35(1): 16–23.

[24] 程良宇, 殷娇娇. 武汉市 14 种市售淡水鱼类中砷和汞的污染特征及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 108–114.
CHENG LY, YIN JJ. Arsenic and mercury pollution characteristics anddietary exposure risk assessment of 14 commercially available freshwater fish in Wuhan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 108–114.

[25] 陈元元, 庄美慧, 姜健, 等. 2023 年安徽省小麦铅、镉、砷、铬污染分析及暴露健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 83–90.
CHEN YY, ZHUANG MH, JIANG J, *et al*. Analysis of lead, cadmium, arsenic and chromium pollution and health risk assessment of *Triticum aestivum* L. exposure in Anhui Province in 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 83–90.

[26] 马芳, 张银娥, 靳雅男, 等. 宁夏成年居民膳食摄入状况调查分析[J]. 宁夏医学杂志, 2017, 39(2): 186–188.
MA F, ZHANG YE, JIN YN, *et al*. Investigation and analysis of dietary intake status of adult residents in Ningxia [J]. Ningxia Medical Journal, 2017, 39(2): 186–188.

[27] World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Evaluation of certain food additives and contaminants: Seventy-third report of the Joint FAO/WHO expert committee on food additives [R/OL]. (2012-06-16) [2020-07-28]. https://apps.who.int/iris/handle/10665/44515

[28] VASCONCELOS-NETO M, QUINTAL APN, PÔRTO LBG, *et al*. Lead in Brazilian food: Exposure assessment and risk characterization [J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2021, 38(2): 315–325.

[29] JECFA. WHO food additives series: 64 (Lead addendum). In joint FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA) (Ed.), safety evaluation of certain food additives and contaminants [Z]. 2011.

[30] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J].中华预防医学杂志, 2002, 6(4): 278–279.
WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Problem of low level data processing in food contamination monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 6(4): 278–279.

[31] 张玉华, 张维蔚, 黄婕, 等. 2017—2019 年广州市售食品中铅污染状况及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2021, 5(50): 832–837.
ZHANG YH, ZHANG WW, HUANG J, *et al*. Lead contamination status and assessment of potential risk to human health of commercial foods in Guangzhou City in 2017—2019 [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 5(50): 832–837.

[32] 程国霞, 李俊龙, 王彩霞, 等. 陕西省食品和饮用水中铅污染状况及风险评估[J]. 卫生研究, 2016, 45(6): 988–992.
CHENG GX, LI JL, WANG CX, *et al*. Contamination status and risk assessment of lead in the foods and drinking water in Shanxi Province [J]. Journal of Hygiene Research, 2016, 45(6): 988–992.

[33] ERCAL N, GURER-ORHAN H, AYKIN-BUMS N. Toxic metals and oxidative stress part I: Mechanisms involved in metal- induced oxidative damage [J]. Current Topics in Medicinal Chemistry, 2001, 1(6): 529–539.

[34] 邢浩然, 张茹钰, 邢若斌, 等. 老年人健康生活方式与心脏病、糖尿病及共病的关联性研究[J]. 中国慢性病预防与控制, 2024, 32(2): 152–156.
XING HR, ZHANG RY, XING RB, *et al*. Study on the association between healthy lifestyle and heart disease, diabetes and comorbidity in the elderly [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2024, 32(2): 152–156.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)