DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250815006
引用格式: 姚博伟, 朱秋楠. 西北某省市售食用植物油中苯并(a)芘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): 150–156.
YAO BW, ZHU QN. Investigation on the pollution situation and risk assessment of dietary exposure of the benzo(a)pyrene in edible vegetable oil sold in a certain province in Northwest China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 150–156. (in Chinese with English abstract).

西北某省市售食用植物油中苯并(a)芘污染情况调查及膳食暴露风险评估

姚博伟*, 朱秋楠

(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苯并(a)芘污染状况, 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 338 批次, 按照 GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》中规定的高效液相色谱法进行检测, 运用污染指数法对食用植物油中苯并(a)芘污染情况进行分析, 根据成人膳食消费量, 应用暴露边界比(margin of exposure, MOE)方法对居民的苯并(a)芘膳食暴露风险进行评估。**结果** 在 338 批次食用植物油样品中, 苯并(a)芘的总体检出率为 51.2%, 超标率为 0%, 平均含量为 0.8 μg/kg。6 种食用植物中苯并(a)芘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苯并(a)芘食品暴露量(第 95 百分数 P_{95})分别为 0.44、0.53、0.53 ng/(kg • d)和 1.73、2.05、2.06 ng/(kg • d), 各年龄段成年居民 MOE 均值和 P_{95} 均大于 10000, 说明该省食用植物油中苯并(a)芘膳食暴露风险较低。**结论** 2023—2024 年西北某省各类市售食用植物油苯并(a)芘污染情况总体较轻, 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较低, 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中苯并(a)芘的膳食暴露风险。

关键词: 食用植物油; 苯并(a)芘; 膳食暴露; 风险评估

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

YAO Bo-Wei*, ZHU Qiu-Nan

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

ABSTRACT: Objective To analyze the pollution situation of benzo(a)pyrene in edible vegetable oils sold in a

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

certain province in Northwest China and assess the dietary exposure risk. **Methods**　A total of 338 edible vegetable oil samples were collected in a certain province in Northwest China from 2023 to 2024. The samples were tested using high performance liquid chromatography as specified in GB 5009.27—2016 *National food safety standard-Determination of benzo(a)pyrene in foods*, and the contamination index method was applied to analyze benzo(a)pyrene contamination levels. Based on adult dietary consumption patterns, the exposure margin ratio (MOE) method was used to evaluate residents' dietary exposure risk. **Results**　Among the 338 edible oil samples, the overall detection rate of benzo(a)pyrene was 51.2%, with no samples exceeding the standard and an average content of 0.8 μg/kg. The single-factor pollution index of benzo(a)pyrene in 6 kinds of edible vegetable oils was all less than 1, and the comprehensive pollution index was all less than 0.7, which indicated a clean pollution level and a safe contamination grade. For adult residents in a certain province in Northwest China (aged 18–44, 45–60 and over 60), the average daily dietary exposure to edible oils and the exposure to foods with high benzo(a)pyrene content (95th percentile, P_{95}) were 0.44, 0.53, 0.53 ng/(kg • d) and 1.73, 2.05, 2.06 ng/(kg • d) respectively. The MOE and P_{95} for all age groups exceeded 10000, indicating a low dietary exposure risk of benzo(a)pyrene from edible vegetable oils in this province. **Conclusion**　The contamination of benzo(a)pyrene in various kings of commercially available edible vegetable oils in a certain province in Northwest China is generally mild, with a high level of safety in 2023—2024. The average dietary exposure and high-exposure dietary risks of adult residents of all age groups are relatively low, all within the acceptable range. However, it is still necessary to continuously pay attention to and monitor the food safety risks of edible vegetable oils, and take measures to further prevent and reduce the dietary exposure risk of benzo(a)pyrene in edible vegetable oils.

KEY WORDS: edible vegetable oil; benzo(a)pyrene; dietary exposure; risk assessment

0　引　言

苯并(a)芘是一种广泛存在于空气、水、土壤和食品中的多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)类化合物, 由芘和苯稠合成[1–3]。苯并(a)芘具有高毒性和高致癌性, 被国际癌症研究机构确认为 I 类致癌物[4], 具有免疫毒性、神经毒性、生殖毒性、致畸性和遗传毒性[5–7], 可导致肺癌、乳腺癌、结肠癌、皮肤癌等癌症[8–10]。苯并(a)芘可造成持久性的污染, 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[11]。

饮食摄入是苯并(a)芘进入人体最主要的途径[12], 因此, 苯并(a)芘的膳食暴露相关研究长期备受关注, 常被用作标志物开展健康风险评价及食品安全标准限值的相关探究[13]。食用植物油、油炸食品、熏烤制品、粮食制品中普遍存在苯并(a)芘污染[14–16]。食用植物油中苯并(a)芘污染的来源主要来自油料作物本身、精炼加工方式、运输储存过程以及高温烹调制作过程[17]。我国现行 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定食用油脂中苯并(a)芘含量不得超过 10 μg/kg, 欧盟(EU) 2023/915《关于食品中某些污染物最高含量的条例》规定油脂中苯并(a)芘最大限量为 2.0 μg/kg, 且 PAHs 即苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽以及䓛之和的最大限量为 10 μg/kg[18–19]。近年来, 众多学者对食用油中的苯并(a)芘安全性展开了相关研究。宇盛好等[16]对上海市 2019—2022 年 3965 批次食用油监测数据进行分析, 苯并(a)芘检出率为 19.6%, 平均值为 0.43 μg/kg。路杨等[20]对河北省包装食用油和散装食用油样品进行检测, 苯并(a)芘检出率分别为 86.2%和 100%。黄飞飞等[21]对苏州市 158 批次煎炸油样品进行检测, 苯并(a)芘检出率为 83.5%。食用油是人民日常生活的必需品, 是膳食组成的重要部分, 其质量安全是社会和民众关注的重点。相对于其他食用植物油如花生油[22]、菜籽油[23]等的质量分析和膳食风险评估数据, 国内亚麻籽油相关研究较为少见。本研究采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)检测 2023—2024 年 338 份国内西北某省市售食用植物油苯并(a)芘浓度, 重点针对国内西北地区主产的亚麻籽油[24], 结合成年居民膳食消费调查数据, 应用污染指数法、暴露边界比(margin of exposure, MOE)法对其潜在健康风险进行评估, 获得该省市售食用植物油中苯并(a)芘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食用植物油苯并(a)芘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 年从国内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 338 批次食用植物油, 种类包括亚麻籽油、花生油、大豆油、玉米

油、菜籽油、植物调和油共 6 种食用植物油。

苯并(a)芘标准溶液(质量浓度 100.3 mg/L, 山东美正生物科技有限公司); 正己烷、二氯甲烷、乙腈(色谱纯, 美国默克集团有限公司)。

1.2 仪器与设备

LC-20AD 型高效液相色谱仪(配荧光检测器, 日本岛津株式会社); 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); SPE1000 型全自动固相萃取装置(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); 苯并(a)芘印迹柱(500 mg/6 mL, 山东美正生物科技有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 样品前处理和检测方法

按照 GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》进行样品前处理和食用植物油中苯并(a)芘含量的测定。方法检出限(limit of detection, LOD)为 0.2 μg/kg, 定量限为 0.5 μg/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 判定是否超标, 苯并(a)芘含量大于 10 μg/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污染物的污染程度, 单因子污染指数[25]如公式(1)所示。

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

式中: P_i 为第 i 个污染物的污染指数; C_i 为第 i 个污染物的实测值, mg/kg; S_i 为第 i 个污染物的评价标准中规定的限量值, mg/kg。P_i≤1.0 为清洁, 1.0<P_i≤2.0 为轻污染, 2.0<P_i≤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[26]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。

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

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; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为污染物中污染指数平均值; $P_{综}$≤0.7, 污染等级为安全; 0.7<$P_{综}$≤1.0, 污染等级为警戒限; 1.0<$P_{综}$≤2.0, 污染等级为轻污染, 2.0<$P_{综}$≤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

成年居民食用油每日膳食暴露量的计算如公式(3)所示。

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

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), ng/(kg·d); C 为食用植物油中苯并(a)芘含量实测值, μg/kg, 采用平均值和第 95 百分数(P_{95})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[27], 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[28]。

1.5.2 苯并(a)芘暴露评估—暴露边界比法

苯并(a)芘具有遗传毒性和致癌性, 属于无阈值风险因子[29], 因此本研究采用欧洲食品安全局科学委员会提出的 MOE 法[30]对西北某省居民市售食用植物油中苯并(a)芘膳食暴露进行风险评估。MOE 计算如式(4)所示。

$$\text{MOE}=\frac{\text{BMDL}_{10}}{\text{EXP}} \tag{4}$$

式中: BMDL_{10} 为基准计量下限值(benchmark dose lower confidence limit, BMDL), 是剂量-效应曲线上的参考点。2008 年, 欧洲食品安全局以苯并(a)芘的动物致癌性为关键毒性效应, 确定了苯并(a)芘的基准剂量 10%可信区间下限值(BMDL_{10})为 70000 ng/(kg·d)(以体质量计)[31]。

MOE 与健康风险呈负相关。当 MOE>10000 时, 健康风险相对较低, 公共卫生关注度也较低; 当 MOE≤10000 时, 存在一定的健康风险, 需采取一定的风险管理措施。

1.6 数据处理

使用 Excel 2010 对数据进行统计, Word 2010 进行表格绘制, 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。食用植物油样品中苯并(a)芘检出率差异比较采用卡方检验(χ^2)。不同种类食用油样品中苯并(a)芘的含量水平差异比较采用 Kruskal Wallis H 检验。对于低于 LOD 的数据, 当苯并(a)芘含量低于 LOD 时, 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[32]。本研究选择均值、最大值、中位数和 P_{95} 分析亚麻籽油中苯并(a)芘含量, 并与国家标准限值对比。

2 结果与分析

2.1 西北某省市售食用植物油中苯并(a)芘的监测情况

2023—2024 年采取的 338 份西北某省市售食用植物油样品中, 苯并(a)芘的总体检出率为 51.2% (173/338), 超标率为 0%, 苯并(a)芘检测值均值为 0.8 μg/kg, 最大值为

6.0 μg/kg, 中位数为 0.5 μg/kg, P_{95} 为 3.0 μg/kg。亚麻籽油中苯并(a)芘检出率最高为 63.2%, 玉米油中苯并(a)芘检出率最低为 12.5%。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 χ^2=150.06, P<0.05, 故食用植物油类别与检出率存在统计学意义。对不同种类食用植物油苯并(a)芘含量水平进行统计学分析, 存在显著差异(H=29.84, P<0.05), 其中亚麻籽油、菜籽油、植物调和油苯并(a)芘含量水平较高, 玉米油含量水平最低。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苯并(a)芘的污染指数分析

对 2023—2024 年采集的 338 份西北某省市售食用植物油样品中苯并(a)芘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 种植物油苯并(a)芘单因素污染均小于 0.7, 苯并(a)芘污染水平为清洁。6 种植物油苯并(a)芘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　西北某省市售食用植物油中苯并(a)芘的膳食暴露水平

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苯并(a)芘暴露量。苯并(a)芘摄入量的 P_{95} 反映了膳食高暴露消费者的苯并(a)芘暴露水平。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苯并(a)芘的平均暴露量分别为 0.44、0.53、0.53 ng/(kg・d), 各年龄段居民的膳食苯并(a)芘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苯并(a)芘食用植物油对苯并(a)芘的暴露量分别为 1.73、2.05、2.06 ng/(kg・d)。各年龄段高暴露消费者对苯并(a)芘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苯并(a)芘的膳食暴露风险评估

根据成人苯并(a)芘暴露 $BMDL_{10}$ 和西北某省不同年龄成年人群中每日膳食摄入苯并(a)芘元素暴露量和高含苯并(a)芘食品暴露量进行食用植物油中膳食苯并(a)芘暴露风险评估, 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 种食用植物油膳食苯并(a)芘暴露量均值和高含苯并(a)芘食用植物油暴露值均大于 10000, 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 种植物油高含苯并(a)芘食用植物油膳食苯并(a)芘暴露 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 1　2023—2024 年西北某省市售食用植物油中苯并(a)芘的污染水平

Table 1　Pollution level of benzo(a)pyrene in edible vegetable oil sold in a certain province of Northwest China in 2023—2024

样品类别	标准限量/(μg/kg)	样品数/个	检出率/%	均值/(μg/kg)	中位数/(μg/kg)	P_{95}/(μg/kg)	最大值/(μg/kg)	超标率/%
亚麻籽油	≤10	166	63.2	0.9	0.8	3.0	5.0	0
大豆油		31	41.9	0.4	0.1	1.0	2.0	0
菜籽油		34	29.4	0.8	0.1	4.0	6.0	0
植物调和油		65	50.8	0.8	0.5	2.8	6.0	0
玉米油		24	12.5	0.2	0.1	0.9	1.0	0
花生油		18	50.0	0.5	0.3	1.0	1.0	0
合计		338	51.2	0.8	0.5	3.0	6.0	0

表 2　2023—2024 年西北某省市售食用植物油中苯并(a)芘元素污染指数

Table 2　Pollution index of benzo(a)pyrene in edible vegetable oil 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	0.09	清洁	0.36	安全
大豆油	0.04	清洁	0.14	安全
菜籽油	0.08	清洁	0.43	安全
植物调和油	0.08	清洁	0.43	安全
玉米油	0.02	清洁	0.07	安全
花生油	0.05	清洁	0.08	安全
合计	0.08	清洁	0.43	安全

表 3 2023—2024 年西北某省不同年龄人群中每日膳食中植物油苯并(a)芘元素暴露量[ng/(kg • d)]

Table 3 Estimated dietary exposure of benzo(a)pyrene in edible vegetable oil at different age groups in a certain province of Northwest China 2023—2024 [ng/(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	0.54	1.73	0.64	2.05	0.64	2.06
大豆油	0.24	0.58	0.29	0.68	0.29	0.69
菜籽油	0.47	2.31	0.55	2.73	0.55	2.74
植物调和油	0.44	1.62	0.52	1.91	0.52	1.92
玉米油	0.11	0.52	0.13	0.61	0.13	0.62
花生油	0.27	0.58	0.32	0.68	0.32	0.69
合计	0.44	1.73	0.53	2.05	0.53	2.06

表 4 2023—2024 年西北某省不同年龄人群中每日膳食中植物油苯并(a)芘元素暴露 MOE

Table 4 MOE of dietary benzo(a)pyrene exposure in edible vegetable oil at different age groups 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	128967	40410	109149	34200	108713	34063
大豆油	288641	121229	244287	102600	243309	102190
菜籽油	149665	30307	126667	25650	126160	25547
植物调和油	159512	43296	135001	36643	134460	36496
玉米油	638048	134699	540002	114001	537841	113544
花生油	257934	121229	218299	102600	217425	102190
合计	157440	40410	133247	34200	132714	34063

3 讨论与结论

从这次监测结果中可以看出，我国西北某省 2023—2024 年市售食用植物油中苯并(a)芘检出率较低，为 51.2%，超标率为 0%，本研究中食用植物油苯并(a)芘平均浓度为 0.8 μg/kg，远低于现行 GB 2762—2022 中规定的 10 μg/kg 的限值，表明该省市售食用植物油苯并(a)芘污染情况总体较轻，安全性较高。不同种类植物油苯并(a)芘污染水平不同，其中亚麻籽油检出率最高，玉米油检出率最低；菜籽油、植物调和油、亚麻籽油中苯并(a)芘浓度平均值和 P_{95} 较高，玉米油则相对较低。上海市 2019—2022 年关于不同种类市售植物油苯并(a)芘污染水平调查中，亚麻籽油苯并(a)芘平均浓度为 0.27 μg/kg[16]，这可能与两项研究采样地点、年份、数量不同有关。各类食用植物油苯并(a)芘单因素污染指数均小于 1，苯并(a)芘食品污染水平均为清洁；苯并(a)芘综合污染指数均小于等于 0.7，苯并(a)芘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苯并(a)芘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 均值和 P_{95} 值均大于 10000，高暴露水平(P_{95}) MOE 低于均值，风险相对较高，这与其他地区对食用油中苯并(a)芘暴露的研究一致[16−17]。本研究中苯并(a)芘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。上海市 18~59 岁、60 岁以上成年居民食用植物油苯并(a)芘膳食暴露 MOE 均值分别为 340638 和 377580[16]；河南省城乡成年居民食用植物油苯并(a)芘暴露 MOE 分别为 137255 和 142857[17]；陕西汉中市成人居民苯并(a)芘暴露 MOE 为 135362[33]；中国全人群苯并(a)芘膳食暴露 MOE 均值和 P_{95} 为 70707 和 26415[21]。本研究所得 MOE 与上述研究所得数据相比，均高于 10000，说明西北某省食用油苯并(a)芘膳食健康风险较低，低于全国平均水平。各个城市苯并(a)芘暴露风险值数据不同，可能与当地饮食习惯、食用油消费量不同有关。中国营养学会发布的《中国居民膳食指南(2022)》中建议成人食用油摄入量为 25~30 g/d[34]。据此来看，该省居民每日食用植物油摄入量普遍超过建议标准，这与该省居民喜好重油重辣口味的饮食习惯有关。

本次评估具有一定的局限性：(1)本研究未考虑其他膳食摄入，如烧烤、高温油炸食品摄入，风险评估结果相对保守；(2)抽取样本来自流通领域，未覆盖到居民自制食用植物油；(3)仅涉及 2023—2024 年近两年的采样数据，数据量较少，不能反映完整的时空分布特征；(4)未考虑到苯并(a)芘在饮食制作如煎炸、熏烤等过程中的含量变化。

综上所述, 从苯并(a)芘污染监测情况、污染指数和膳食暴露风险评价方面都表明国内西北某省市售食用植物油具有较高的安全性, 膳食暴露风险较低, 在可接受范围内, 但监管部门仍需重点关注, (1)采取措施从源头控制油料作物在土肥传播、晾晒以及食用油精炼过程中苯并(a)芘的污染; (2)加强食品安全监督检验、风险监测力度, 做好食用油污染物风险评估; (3)要加大科普力度, 宣传苯并(a)芘食品安全风险, 提升居民食用油安全认识, 改善消费饮食习惯, 适当控制和减少食用油摄入量, 以降低含苯并(a)芘植物油对人体健康造成的安全风险。

参考文献

[1] HU TP, MAO Y, KE YP, *et al*. Spatial and seasonal variations of PAHs in soil, air, and atmospheric bulk deposition along the plain to mountain transect in Hubei Province, central China: Air-soil exchange and long-range at mospheric transport [J]. Environmental Pollution, 2021, 291: 118139

[2] SARAVANAKUMAR K, SIVASANTOSH S, SATHIYASEELAN A, *et al*. Impact of benzo [a] pyrene with other pollutants induce the molecular alternation in the biological system: Existence, detection, and remediation methods [J]. Environmental Pollution, 2022, 304: 119207

[3] 田野, 宋紫薇, 李书国. 肉类食品加工过程中苯并(a)芘形成机制及消减策略[J]. 食品科技, 2024, 49(2): 98–105.
TIAN Y, SONG ZW, LI SG. Review on formation mechanism and mitigation strategy of benzo(a)pyrene in heating-processed meat foods [J]. Food science and Technology, 2024, 49(2): 98–105.

[4] WANG HZ, LIU BC, CHEN H, *et al*. Dynamic changes of DNA methylation induced by benzo(a)pyrene in cancer [J]. Genes and Environment, 2023, 45(1): 21.

[5] 王惠增, 刘秉春, 陈红, 等. 苯并[a]芘对生殖系统的毒性作用及其机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(2): 165–183.
WANG HZ, LIU BC, CHEN H, *et al*. Research progress on toxic effects of benzo(a)pyrene on reproductive system and its mechanism [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(2): 165–183.

[6] TARTALIONE AM, RACCA A, RICCERI L. Developmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Focus on benzo [a] pyrene neurotoxicity [J]. Reproductive Toxicology, 2023, 119: 108394.

[7] WANG DL, GROOT A, SEIDEL A, *et al*. The influence of alkyl substitution on the *in vitro* metabolism and mutagenicity of benzo [a] pyrene [J]. Chemico-Biological Interactions, 2022, 363: 110007.

[8] 袁莉, 贾颖宇, 骆莹. miRNA 影响苯并[a]芘诱发毒性的机制研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(6): 1–6.
YUAN L, JIA YY, LUO Y. Advances in mechanism study of miRNA on toxicity induced by benzo[a]pyrene [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(6): 1–6.

[9] XIAO Y, LIU C, FU Y, *et al*. Mediation of association between benzo[a]pyrene exposure and lung cancer risk by plasma microRNAs: A Chinese case-control study [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 271: 115980.

[10] MENG H, LI G, WEI W, *et al*. Epigenome-wide DNA methylation signature of benzo [a] pyrene exposure and their mediation roles in benzo [a] pyrene-associated lung cancer development [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125839.

[11] 袁莉, 王珠琳, 李建科, 等. 食品中有害物苯并[a]芘诱导结肠毒性的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(8): 9–16.
YUAN L, WANG ZL, LI JK, *et al*. Research progress on colonic toxicity induced by foodborne benzo[a]pyrene [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(8): 9–16.

[12] LI Z, XIMO W, CHEN C, *et al*. A surface-enhanced Raman scattering sensor for the detection of benzo[a]pyrene in foods based on a gold nanostars@reduced graphene oxide substrate [J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136171.

[13] International Agency for Research on Cancer (IARC). BenzoLaJPyren [M]. Lyon: IARC, 2012.

[14] 田野, 宋紫薇, 李书国. 基于磁性 Fe_3O_4 纳米材料的电化学传感器快速测定烤肉中的苯并[a]芘[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 261–268.
TIAN Y, SONG ZW, LI SG. Rapid determination of benzo[a]pyrene in barbecued meat using electrochemical sensors based on magnetic Fe_3O_4 nanomaterials [J]. Food Science, 2024, 45(12): 261–268.

[15] 郑艺, 金晨憬, 何计国. 不同油脂对油炸食品中苯并(a)芘含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 94–100.
ZHENG Y, JIN CJ, HE JG. Effect of different oils on benzo(a)pyrene content in fried foods [J]. Food Science, 2020, 41(16): 94–100.

[16] 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.

[17] 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.

[18] ZHU ZS, XU Y, HUANG TR, *et al*. The contamination, formation, determination and control of polycyclic aromatic hydrocarbons in meat products [J]. Food Control, 2022, 141: 109194.

[19] 张楷淳, 董新凤. 高温煎炸对大豆油、花生油中酸价及多环芳烃含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 260–266.
ZHANG KC, DONG XF. Effects of high temperature frying on acid value and content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soybean oil and peanut oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 260–266.

[20] 路杨, 刘印平, 王丽英, 等. 高风险食品中多环芳烃含量调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(18): 6608–6613.
LU Y, LIU YP, WANG LY, *et al*. Investigation and analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons content in high risk food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(18): 6608–6613.

[21] 黄飞飞, 刘兆平, 张磊, 等. 煎炸油中多环芳烃污染情况及其健康风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(6): 577–581.
HUANG FF, LIU ZP, ZHANG L, *et al*. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in frying oils and health risk assessment [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(6): 577–581.

[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 LZ, *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] 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.

[25] 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.

[26] 陈元元, 庄美慧, 姜健, 等. 2023 年安徽省小麦苯并(a)芘、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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 丁超, 乔雄梧, 齐艳丽, 等. 红枣中苯并[a]芘污染及其膳食风险评估[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 65–74.
DING C, QIAO XW, QI YL, *et al*. Benzo[a]pyrene contamination in jujube dates and dietary risk assessment [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(12): 65–74.

[30] 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.

[31] European Food Safety Authority. Polycyclic aromatic hydrocarbons in food-scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain [J]. EFSA Journal, 2008, 6(8): 724.

[32] 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.

[33] 杨靓, 牟霄, 张崇森. 食用植物油中苯并(a)芘的污染特征及城乡居民膳食暴露评估——以汉中市为例[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 106–111.
YANG L, MOU X, ZHANG CM. Contamination characteristics of benzo(a)pyrene in edible vegetable oil and dietary exposure assessment for urban and rural residents: A case study of Hanzhong City [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(6): 106–111.

[34] 曹清明, 王蔚婕, 张琳, 等. 中国居民平衡膳食模式的践行——《中国居民膳食指南(2022)》解读[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 22–29.
CAO QM, WANG WJ, ZHANG L, *et al*. The practice of balaneed diet model for Chinese residents: Interpretation of dietary guidelines for Chinese residents (2022) [J]. Food & Machinery, 2022, 38(6): 22–29.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)