DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250905001
引用格式: 朱秋楠, 姚博伟, 张译匀, 等. 西北某省市售食品中苯并(a)芘检测方法优化及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 120–126.
ZHU QN, YAO BW, ZHANG YY, *et al*. Optimization of benzo(a)pyrene detection methods and dietary exposure risk assessment in foods sold in a certain province in Northwest China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 120–126. (in Chinese with English abstract).

西北某省市售食品中苯并(a)芘检测方法优化及膳食暴露风险评估

朱秋楠, 姚博伟*, 张译匀, 李应东
(宁夏计量质量检验检测研究院, 银川 750200)

摘 要: 目的 对西北某省 2023—2024 年 197 份食用植物油与熏烧烤肉制品中苯并(a)芘的含量进行检测, 分析食品种类、食物的加工渠道等因素对苯并(a)芘含量的影响, 评估暴露风险, 并对苯并(a)芘的检测方法进行优化。**方法** 样品经过处理后, 采用高效液相色谱-荧光检测法(high performance liquid chromatography coupled with fluorescence detection, HPLC-FLD)对苯并(a)芘进行检测, 暴露边界比(margin of exposure, MOE)法评估暴露风险。**结果** 197 份样品中, 每种食品中苯并(a)芘都有检出, 检出率为 61%, 苯并(a)芘含量均值为 0.59 μg/kg。其中市售散装植物油的检出率和平均值最高, 分别为 84%和 1.49 μg/kg。西北某省各年龄段(18~44 岁、45~60 岁、60 岁以上)苯并(a)芘的膳食暴露量平均值和高暴露消费者分别为 0.34、0.40、0.40 ng/(kg·d)和 1.15、1.36、1.37 ng/(kg·d)。各年龄段居民 MOE 均大于 10000。对检测方法的优化数据表明最优的检测流动相为 98%的有机相乙腈, 最灵敏的激发波长为 380 nm, 发射波长为 410 nm。**结论** 2023—2024 年西北某省市售重点食品存在一定的苯并(a)芘污染。各年龄段西北某省居民经膳食途径摄入苯并(a)芘的健康风险较低, 在可接受范围内。但仍需持续关注食品中苯并(a)芘食品安全风险, 尽量选择定型包装的食用植物油, 少食用煎炸食品和熏烧烤肉制品等经过高温加热的食物。

关键词: 苯并(a)芘; 风险评估; 食用植物油; 熏烧烤肉制品; 膳食暴露

Optimization of benzo(a)pyrene detection methods and dietary exposure risk assessment in foods sold in a certain province in Northwest China

ZHU Qiu-Nan, YAO Bo-Wei*, ZHANG Yi-Yun, LI Ying-Dong
(*Ningxa Academy of Metrology & Quality Inspection*, *Yinchuan* 750200, *China*)

ABSTRACT: Objective To analyze the concentrations of benzo(a)pyrene in 197 samples of edible vegetable oils

收稿日期: 2025-09-05
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: 朱秋楠(1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品质量安全。E-mail: 1424069025@qq.com
***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

and smoked and barbecued meat products collected from a province in Northwest China (2023—2024), analyse the effects of food type and processing methods on benzo(a)pyrene content, assesse relative exposure risks, and optimize detection methods. **Methods**　After sample pretreatment, benzo(a)pyrene was detected using high performance liquid chromatography coupled with fluorescence detection (HPLC-FLD). Exposure risks were evaluated using the margin of exposure (MOE) method. **Results**　Among the 197 samples, benzo(a)pyrene was detected in all food categories, with a detection rate of 61%. The mean benzo(a)pyrene concentration was 0.59 μg/kg. Bulk retail edible vegetable oils exhibited the highest detection rate (84%) and mean benzo(a)pyrene level (1.49 μg/kg). In a province in Northwest China, the average dietary benzo(a)pyrene exposure levels for different age groups (18–44, 45–60 and >60 years) were 0.34, 0.40 and 0.40 ng/(kg • d), respectively, while high-exposure consumers had values of 1.15, 1.36 and 1.37 ng/(kg • d). The MOE for all age groups exceeded 10000. Method optimization revealed that the optimal mobile phase consisted of 98% organic phase (acetonitrile), with the most sensitive excitation and emission wavelengths at 380 nm and 410 nm, respectively. **Conclusion**　In 2023–2024, certain benzo(a)pyrene contamination is observed in key foods sold in a province in Northwest China. The health risks of dietary benzo(a)pyrene intake among residents of all age groups are low and within acceptable limits. However, continuous monitoring of benzo(a)pyrene-related food safety risks is necessary. Consumers should prefer pre-packaged edible vegetable oils and reduce consumption of fried foods, smoked and barbecued meats and other high-temperature-processed products.

KEY WORDS: benzo(a)pyrene; risk assessment; edible vegetable oils; smoked and barbecued meat products; dietary exposure

0　引　言

苯并(a)芘化学性质稳定, 属于多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)类污染物[1], 是 PAHs 中致癌性最强的一种[2], 广泛存在于空气、土壤、水及食品中[3–5], 可通过呼吸、皮肤、饮食等多方面进入人体被吸收[6], 导致皮肤、乳腺、消化道、胃、肺、肝、肾等多器官发生癌变, 此外, 还具有神经毒性、生殖和发育毒性、遗传毒性等[7–10], 被国际癌症研究机构归为一类致癌物[11–13]。

食品中的苯并(a)芘主要来源于两个方面: (1)食品制作过程中经过高温烘烤、熏制等, 导致脂肪、胆固醇、蛋白质和碳水化合物等发生热裂解反应, 再经环化和聚合等反应生成苯并(a)芘[14], (2)工业生产和生活中煤炭、石油、天然气等燃料不完全燃烧产生的烟气中含有苯并(a)芘[15–16], 再通过接触进入食物中, 所以, 熏烤肉制品、煎炸油等都检出了含量较高的苯并(a)芘。而食用植物油作为高温烘烤及煎炸等食物必不可少的原料, 其苯并(a)芘的含量也备受关注。

目前, 我国对食品中苯并(a)芘的限量分别为熏烧烤肉制品中小于 5.0 μg/kg、植物油小于 10 μg/kg, 欧盟对苯并(a)芘的最大残留限量为熏烧烤肉制品 5.0 μg/kg、食用油 2.0 μg/kg[1,4,15]。因此利用快速、准确的检测方法评价各种食物中苯并(a)芘的污染情况, 对人们的饮食健康具有重要指导意义。目前, 高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)因其灵敏度高、操作便捷的优势成为苯并(a)芘检测的常用方法[17–19], GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》推荐了中性氧化铝固相萃取小柱或分子印迹固相萃取小柱进行样品净化, 分子印迹固相萃取小柱具有试剂消耗少, 省时高效, 净化效果好被采用进行样品前处理[14]。

近年来, 济南[20]、河南[21]、上海[1]等地对市售重点关注食品苯并(a)芘进行了膳食暴露风险评估, 为当地食品安全风险监测提供了理论依据, 但西北某省相关研究较为少见, 基于此, 本研究对西北某省 2023—2024 年共计 197 份高风险样品中苯并(a)芘含量进行检测分析并对其进行膳食风险评估, 以期对此类高风险样品提出预警, 为西北某省城乡居民健康风险研究提供基础数据和理论依据。

1　材料与方法

1.1　仪器、试剂与材料

1.1.1　仪器与设备

KQ800DE 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); IKAVortex 2 涡旋振荡器(艾卡设备仪器有限公司); XSR204 分析天平(分度值 0.0001 g, 瑞士梅特勒公司); SPE1000 全自动固相萃取装置(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); EFAA-DC24 水浴氮吹仪(上海安谱实验科技股份有限公司); 苯并(a)芘分子印迹柱(500 mg/6 mL, 北京美正生物科技有限公司); Shim pack GIST C_{18} 液相色谱柱(4.6 mm×250 mm,

5 μm)、岛津 LC-20AD 高效液相色谱仪配荧光检测器(日本岛津企业管理有限公司)。

1.1.2 实验试剂

乙腈中苯并(a)芘标准溶液(质量浓度 100 μg/mL, 北京美正生物科技有限公司); 二氯甲烷、乙腈(色谱纯, 德国 Merck 公司); 正己烷(色谱纯, 上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.1.3 待测样品

于 2023—2024 年在西北某省 5 个地级市随机抽取 197 批次样品。其中, 熏烤肉制品 91 份(包括鸡肉、鸭肉、羊肉、牛肉、兔肉等熏烤肉制品)、煎炸油 21 份、市售散装称重植物油 25 份、市售成品植物油 60 份, 采样环节包括大型餐饮部门、小型餐饮环节、农贸市场、大型超市、小型超市、小作坊。

1.2 实验方法

1.2.1 溶液的配制

苯并(a)芘标准中间液(1.0 μg/mL): 吸取 0.1 mL 苯并(a)芘储备液(100 μg/mL), 用乙腈定容至 10 mL, 避光保存一个月。

混合标准系列: 将苯并(a)芘标准中间液用乙腈进行逐级稀释, 配制成 0.5、1.0、5.0、10.0、20.0 ng/mL 标准溶液, 临用现配。

1.2.2 样品处理

熏烧烤肉制品称取 1.0 g, 油脂及其制品称取 0.4 g 于离心管中, 加入 5 mL 正己烷提取, 涡旋, 超声 5 min, 4000 r/min 离心 5 min, 转移出上清液, 再次加入 5 mL 正己烷重复提取, 涡旋, 超声 5 min, 4000 r/min 离心 5 min, 合并两次提取液, 选择苯并(a)芘印迹小柱进行净化, 最后分别用 1.0 mL、0.4 mL 乙腈进行复溶。

1.2.3 检测条件的优化

色谱柱: Shim pack GIST C_{18} 液相色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm), 柱温: 35 ℃; 流动相: 乙腈/水; 流速为 1.0 mL/min; 进样量 20 μL; 激发波长(excitation wavelength, Ex): 380 nm, 发射波长(emission wavelength, Em): 410 nm。对流动相比例和检测波长进行优化时, 分别只改变流动相比例与检测波长, 不改变其余检测参数, 对苯并(a)芘进行色谱分析。

1.2.4 方法的回收率、精密度和仪器的重复性实验

按照优化好的检测条件, 在苯并(a)芘含量为 0.5~20.0 ng/mL 的线性范围内, 测标准溶液质量浓度(X, ng/mL)与峰面积(Y)之间的关系。在阴性样品中添加高、中、低不同浓度的目标化合物, 平行测定不少于 6 次, 计算回收率与精密度, 取高、中、低不同浓度的标准溶液分别测定不少于 6 次, 计算相对标准偏差(relative standard devision, RSD)。

1.2.5 暴露评估方法

按照公式(1)计算居民经食用植物油途径的苯并(a)芘慢性摄入量(chronic daily intake, CDI)[15,20]值。

$$\mathrm{CDI/[ng/(kg\cdot d)]}=\frac{C_i\times R}{W} \tag{1}$$

式中: C_i 为苯并(a)芘含量, μg/kg; R 为人均食用植物油摄入量, g/d, 采用西北某省成年居民人均每日食用油膳食摄入状况调查数据, 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[22]; W 为平均体质量, 18~44 岁、45~60 岁和 60 岁以上人群的体质量分别取 62、62、60 kg[23]。

按照公式(2)计算苯并(a)芘的 MOE。苯并(a)芘的基准剂量置信下限(lower confidence limit of the benchmark does, BMDL)与经食用植物油途径的苯并(a)芘慢性每日摄入量的比值作为苯并(a)芘的暴露限值(margin of exposure, MOE)[24], 来描述经食用植物油途径的苯并(a)芘暴露风险。通常认为当 MOE<10000 时, 存在一定的健康风险, 当 MOE≥10000 时, 健康风险较低[25–27]。

$$\mathrm{MOE}=\frac{\mathrm{BMDL_{10}}}{\mathrm{CDI}} \tag{2}$$

式中: $\mathrm{BMDL_{10}}$ 为导致原发性肝细胞癌发生率为 10% 的苯并(a)芘基准剂量 95% 置信区间下限值(benchmark does lower confidence limit for a 10% response), 为 70000 ng/(kg·d)[28–29]。

1.3 数据处理

使用 Excel 2013 进行数据处理与分析, 使用 Origin 2024 软件进行作图, 用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析, 以 P<0.05 为差异具有统计学意义, 不同种类样品中苯并(a)芘检出率比较使用卡方检验(χ^2)。

2 结果与分析

2.1 色谱条件分析

研究色谱流动相(乙腈/水)中乙腈的比例对峰高、峰面积、信噪比及出峰时间的影响, 检测数据如表 1 所示。当乙腈比例逐渐增加时, 可以看到出峰时间随之提前, 从 17.9 min 缩短至 6.7 min, 这与李文廷等[14]的研究结果一致, 检测时间的缩短, 极大地提高了检测效率, 降低了有机相的使用量, 降低实验成本, 也降低了有机废液的产生, 较短的保留时间, 还降低了峰纵向扩散效应, 减少了稀释效应, 对不稳定样品还可提高结果准确性。当乙腈比例较高时, 同样具有较高的信噪比值, 综合考虑, 选择 98%比例的乙腈/水做为流动相既能满足检测要求又最经济环保。

2.2 检测波长分析

在对苯并(a)芘的检测中, 仪器 Ex 和 Em 的选择直接决定了检测的灵敏度和选择性。对 Ex 和 Em 进行优化, 得到如表 2 所示检测数据。在 Ex/Em 380 nm/410 nm 的条件下具有最大的峰高和峰面积, 同时也具有较高的信噪比值, 检测波长的变化对出峰时间影响不大。

表 1　不同比例有机相的色谱参数
Table 1　Chromatographic parameters with varying ratios of organic phase

乙腈比例/%	出峰时间/min	峰高	峰面积	*S*/*N*
80	17.9	69798	1497243	874.40
85	13.5	93216	1467498	752.17
88	11.5	108322	1444584	743.56
93	8.7	138862	1417369	657.39
98	6.7	172420	1406313	847.68

表 2　不同检测波长的色谱参数
Table 2　Chromatographic parameters at different detection wavelengths

Ex/nm	Em/nm	出峰时间/min	峰高	峰面积	*S*/*N*
365	406	6.597	158848	1251276	535.64
375		6.598	172663	1400670	608.15
380		6.600	183812	1425429	659.28
384		6.773	172420	1376313	847.68
390		6.611	132872	1099794	392.37
380	400	6.606	105574	814153	385.02
	410	6.603	185739	1431678	727.42
	420	6.593	103124	782197	538.64

2.3　方法的回收率、精密度和仪器的重复性实验结果

按优化后的检测参数进行检测，苯并(a)芘在 0.5~20.0 ng/mL 的范围内具有良好的线性关系，线性方程为 Y=154876X+4443.07，相关系数 r 为 0.9999135，苯并芘的检出限为 0.2 μg/kg，定量限为 0.5 μg/kg，方法的平均回收率为 88.0%~95.1%，相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)为 1.02%~2.19%。用 RSD 来评价方法的重复性，RSD 为 1.21%，表明重复性较好。优化检测方法后的苯并(a)芘色谱图如图 1 所示，质量浓度为 20.0 ng/mL。

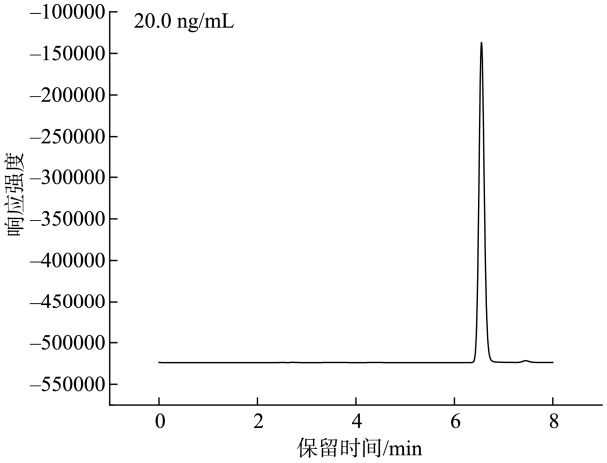


图 1　优化后的苯并(a)芘色谱图
Fig.1　Optimized chromatogram of benzo(a)pyrene

2.4　不同种类样品中苯并(a)芘的含量分析

对表 3 数据进行分析，总体上，不同种类样品中苯并(a)芘的检出率差异有统计学意义(χ^2=49.31, P<0.05)。197 份样品中，总体检出率为 61%，平均值为 0.59 μg/kg。其中，市售散装植物油的检出率最高，达到 84%，平均值含量也最高为 1.49 μg/kg；定型包装植物油的检出率相对较低，为 42%，平均含量为 0.54 μg/kg，从数据可以看出正规厂家生产的植物油苯并(a)芘检出率要远低于散装植物油，可能原因是定型包装植物油采用密封容器包装，隔绝氧气及保存和运输过程中可能接触到的灰尘等因素，这与路杨等[17]的研究结果一致。熏烧烤肉制品的检出率虽然低于散装植物油，但仍达到 71%，GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定熏、烧、烤肉类及熏、烤水产品中苯并(a)芘限量为 5.0 μg/kg，本次熏烧烤肉制品检测出 1 份超标样品，含量为 9.8 μg/kg。熏烧烤肉制品在加工过程中可能接触到炭火，导致食物受到污染，因此对肉制品进行熏烧烤时选择电加热等比直接明火加热得到的食物苯并(a)芘污染更小，这与路杨等[17]的研究结果一致。煎炸过程用油苯并(a)芘检出率接近于定型包装植物油，但其苯并(a)芘含量高于定型包装植物油，煎炸过程用油往往都需要进行高温加热，而高温加热也是苯并(a)芘产生的一种原因，因此控制煎炸过程的温度，可以降低食物中苯并(a)芘的污染。

2.5 不同样品中苯并(a)芘的膳食暴露水平

由表 4 可知, 各年龄段(18~44 岁 45~60 岁、60 岁以上)苯并(a)芘的膳食暴露量平均值和 P_{95} 分别为 0.34、0.40、0.40 ng/(kg·d)和 1.15、1.36、1.37 ng/(kg·d), 其中由市售散装植物油中摄入的苯并(a)芘的平均值和 P_{95} 都是最高的, 这是因为散装植物油中苯并(a)芘的含量高, 而同类型样品中, 60 岁以上人群苯并(a)芘的慢性摄入量平均值和 P_{95} 是最高的, 其原因可能是 60 岁以上人群体重较轻, 以及相对较高的食用油膳食摄入量, 导致膳食风险高于其他年龄段人群。

2.6 不同样品中苯并(a)芘的膳食暴露风险评估

由表 5 可知, 不同年龄段居民(18~44 岁、45~60 岁、60 岁以上)经膳食摄入苯并(a)芘的暴露限值平均值分别为 205472、173899、173203, 其中, 18~44 岁年龄段人群膳食苯并(a)芘暴露的 MOE(平均值和 P_{95})高于 45~60 岁和 60 岁以上年龄段的居民, 表明 18~44 岁年龄段人群的健康风险更低, 但西北某省各年龄段居民苯并(a)芘 MOE 平均值和 P_{95} 均大于 10000, 表明居民摄入苯并(a)芘的健康风险整体较低, 在可接受范围内, 说明西北某省市售重点食品总体安全程度较高。

表 3 不同种类样品中苯并(a)芘的含量分析

Table 3 Analysis of benzo(a)pyrene content in different types of sample

食物种类	总样品量	检出数量	检出率/%	检出值/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	P_{95}/(μg/kg)	中位数/(μg/kg)	超标率/%
熏烧烤肉制品	91	65	71	ND~9.8	0.54	2.53	0.35	1.1
市售散装植物油	25	21	84	ND~6.0	1.49	3.80	1.00	0
煎炸过程用油	21	9	43	ND~5.0	0.74	3.60	0.10	0
定型包装植物油	60	25	42	ND~3.0	0.54	2.00	0.10	0
合计	197	120	61	ND~9.8	0.59	2.00	0.10	0.5

注: ND 为未检出。

表 4 苯并(a)芘的 CDI 水平[ng/(kg·d)]

Table 4 CDI level of benzo(a)pyrene [ng/(kg·d)]

食物种类	18~44 岁		45~60 岁		60 岁以上	
	平均值	P_{95}	平均值	P_{95}	平均值	P_{95}
熏烧烤肉制品	0.31	1.46	0.37	1.73	0.37	1.73
市售散装植物油	0.86	2.19	1.02	2.59	1.02	2.60
煎炸过程用油	0.43	2.08	0.50	2.46	0.51	2.47
定型包装植物油	0.31	1.15	0.37	1.36	0.37	1.37
合计	0.34	1.15	0.40	1.36	0.40	1.37

表 5 西北某省不同年龄段居民膳食苯并(a)芘暴露的 MOE

Table 5 MOE of dietary benzo(a)pyrene exposure by age group in a certain province in Northwest China

食物种类	18~44 岁		45~60 岁		60 岁以上	
	平均值	P_{95}	平均值	P_{95}	平均值	P_{95}
熏烧烤肉制品	224498	47916	190000	40553	189240	40391
市售散装植物油	81361	31902	68859	27000	68583	26892
煎炸过程用油	163823	33674	138649	28500	138094	28386
定型包装植物油	224498	60614	190000	51300	189240	51094
合计	205472	60614	173899	51300	173203	51904

3 讨论与结论

本研究对西北某省 2023—2024 年的 197 份样品进行苯并(a)芘含量的分析, 同时对苯并(a)芘的检测条件进行了优化, 得到了更优的苯并(a)芘检测条件, 并对比了西北某省与其他省的暴露风险。杨晓倩等[20]研究表明济南市居民成人(>18 岁)膳食油脂苯并(a)芘的暴露限值平均值为 47945, 李赵平等[21]对河南市城市和农村居民植物油中苯并(a)芘暴露风险进行了评估, 结果为城市居民苯并(a)芘的暴露限值为 137255, 农村居民苯并(a)芘的暴露限值为 142857, 黄飞飞等[30]的研究表明我国全人群经煎炸油摄入的苯并(a)芘暴露限值平均值为 70707, 宇盛好等[1]的研究发现上海市居民(18~59 岁)每日通过食用植物油摄入苯并(a)芘的暴露限值平均值为 340638, ≥60 岁居民每

日通过食用植物油摄入苯并(a)芘的暴露限值平均值为377580, 本研究结果表明西北某省居民(18~44 岁、45~60岁、60 岁以上)经膳食摄入苯并(a)芘的暴露限值平均值分别为 205472、173899、173203, 通过比较发现西北某省苯并(a)芘的暴露风险低于济南、河南及我国全人群的苯并(a)芘暴露风险, 但高于上海市苯并(a)芘暴露风险, 可能原因是本研究所取年龄段人群体重质量低于上海, 且西北地区居民饮食习惯重油重辣, 食用油膳食摄入量较高, 导致苯并(a)芘经膳食暴露风险高于上海, 但根据 MOE 越大, 暴露风险就越小可以判断西北某省重点关注食品具有很高的安全性。

本次评估具有一定的局限性。首先, 所研究样品均在流通环节进行购买, 没有覆盖到居民自制煎炸油、散装食用油及熏烧烤肉制品等; 其次样本量相对较少, 没有考虑到其他食品和只考虑到苯并(a)芘经食物途径的摄入, 且只涵盖近两年的数据; 最后本研究只考虑 PAHs 中致癌性最高的苯并(a)芘, 未对其他 PAHs 类物质进行研究。针对西北某省重点关注食品中苯并(a)芘的污染现状, 结合本次评估结果, 提出风险控制建议: (1)尽量选择定型包装食用油, 从源头减少苯并(a)芘的摄入; (2)对于日常生活中油炸类和熏烤类食品的摄入, 尽量选择非明火熏烤食品; (3)仍要加强苯并(a)芘的检测、监管工作和苯并(a)芘的科普宣传, 让消费者认识到苯并(a)芘对身体健康造成的危害, 主动减少食用苯并(a)芘含量较高的食物。

参考文献

[1] 宇盛好, 李亦奇, 彭少杰. 上海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.

[2] GALVEZ-PERALTA M, SHI ZQ, CHEN J, *et al*. Oral benzo(a)pyrene in Cyp1a1/1b1(–/–) double-knockout mice: Microarray analysis during squamous cell carcinoma formation in prenuptial gland duct [J]. International Journal of Cancer, 2013, 132(9): 2065–2075.

[3] HU TP, MAO Y, KE YP, *et al*. Spatial and seasonal variation of PAHs in soil, air, and atmospheric buck deposition along the plain to mountain transect in Hubei province, central China: Air-soil exchange and long-rang atomspheric transport [J]. Environmental Pollution, 2021, 291: 118139.

[4] 冯亚净, 王瑞鑫, 李书国. 食品中苯并芘的来源及减控方法的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(2): 72–75.
FENG YJ, WANG RX, LI SG. Review on the sources and reducing strategies of benzo(a)pyrene in foods [J]. Cereals & Oils, 2017, 30(2): 72–75.

[5] SARAVANAKUMAR K, SIVASANTOSH S, SATHIYAS-EELAN A, *et al*. Impact of benzo [a] pyrene with other pollutants induce the molecular alternation in the biological system [J]. Environmental Pollution, 2022, 304: 119207.

[6] 张海容. 煎炸条件对食用油苯并芘影响评价[J]. 食品安全导刊, 2024(16): 135–138, 144.
ZHANG HR. Effects assessment of frying conditions on benzopyrene in edible oil [J]. China Food Safety Magazine, 2024(16): 135–138, 144.

[7] 管融资, 吴航利, 王佳, 等. 苯并芘污染现状及其生物毒性效应[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 49–54.
GUAN RZ, WU HL, WANG J, *et al*. Status of benzopyrene pollution and its biotoxic effects [J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2019, 38(3): 49–54.

[8] 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.

[9] SHI ZQ, DRAGIN N, MILLER ML, *et al*. Oral benzo[a]pyrene-induced cancer: Two distinct types in different target organs deend on the mouse *Cypl* genotype [J]. Internatiaonal Journal of Cancer, 2010, 127(10): 2334–2350.

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

[11] 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.

[12] WAND 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.

[13] ZHENG Z, PARK JK, KWON OW, *et al*. The risk of gastrointestinal cancer on daily intake of low-dose BaP in C57BL/6 for 60 days [J]. Journal of Korean Medical Science, 2022, 37(30): e235.

[14] 李文廷, 刘玲, 夏加恩, 等. 分子印迹固相萃取-高效液相色谱法的优化及在测定植物油苯并(a)芘含量的应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 150–157.
LI WY, LIU L, XIA JEN, *et al*. Optimization of molecularly imprinted solid phase extraction-high performance liquid chromatography and its application in determination of benzo[a]pyrene in vegetable oil [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 150–157.

[15] 杨靓, 牟霄, 张崇淼. 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 J, 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.

[16] HAO JJ, YOU XY. Probabilistic health risk assessment of exposure to carcinogens of Chinese family cooking and influence analysis of cooking factors [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146493.

[17] 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.

[18] FALSAFI Z, RAOFIE F, ARIYA PA, *et al*. Supercritical fluid extraction followed by supramolec ular solvent microextraction as a fast and efficient preconcentration method for determination of polycycilic aromatic hydrocarbons in apple peels [J]. Journal of Separation Science, 2020, 43(6): 1154–1163.

[19] TOMASZ K, DYMITR C, JOLANTA I. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in waxes by high performance liquid chromatography with fluorimetric detection [J]. Journal of Analytical Chemistry, 2020, 75(4): 495–502.

[20] 杨晓倩, 于志刚, 刘仲, 等. 济南市居民膳食油脂多环芳烃暴露定量风险评估[J]. 现代预防医学, 2018, 45(17): 3114–3117.
YANG XQ, YU ZG, LIU Z, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons dietary exposure from edible fats and oils, Jinan [J]. Modern Preventive Medicine, 2018, 45(17): 3114–3117.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] FAKHRI Y, BJORKLUND G, BANDPEI AM, *et al*. Concentrations of arsenic and lead in rice (*Oryza sativa* L.) in Iran: A systematic review and carcinogenic risk assessment [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 113: 267–277.

[25] 梁馨予, 陈凤, 黎强, 等. 广西玉林市小作坊花生油中黄曲霉毒素 B_1 膳食暴露及风险评估[J]. 中国油脂, 2022, 47(1): 131–136.
LIANG XY, CHEN F, LI Q, *et al*. Dietary exposure and risk assessment of aflatoxin B_1 in the peanut oil of small workshops in Yulin City, Guangxi [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(1): 131–136.

[26] European Food Safety Authority. Opinion of the scientific committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic [J]. EFSA Journal, 2005, 3(10): 282.

[27] 程恒怡, 钟延旭, 陈杰, 等. 暴露限值法评估广西食用植物油中黄曲霉毒素 B_1 的暴露风险[J].中国食品卫生杂志, 2017, 29(4): 496–499.
CHENG HY, ZHONG YX, CHEN J, *et al*. Exposure risk assessment of aflatoxin B_1 in edible vegetable oil by using the margin of exposure in Guangxi [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2017, 29(4): 496–499.

[28] EFSA. Polycyclic aromatic hydrocarbons in food-scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain [J]. EFSA Journal, 2008, 6(8): 81–86.

[29] SMITH A, JOHNSON B, LEE C. Risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in food: A review of benchmark dose approaches [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(15): 2567–2582.

[30] 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.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)