

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

杨 靓¹, 牟 霄², 张崇森¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省食品药品检验研究院, 西安 710065)

摘要:为了探究食用植物油苯并(a)芘暴露给城乡居民带来的健康风险,通过对陕西省汉中市市售食用植物油进行抽样,利用 HPLC-荧光检测法检测苯并(a)芘含量,结合对各区县居民的问卷调查,研究食用植物油中的苯并(a)芘污染特征,计算经食用植物油途径的苯并(a)芘暴露限值,并定量评价食用植物油苯并(a)芘暴露给不同类型人群造成的增加寿命期癌风险(ILCR)。结果表明:市售食用植物油样品中苯并(a)芘的检出率为62.5%,苯并(a)芘含量均值为1.0 μg/kg,菜籽油和其他植物油中的苯并(a)芘含量不存在显著差异($p > 0.05$),食用植物油中苯并(a)芘含量与酸值存在显著相关性($p < 0.05$),与过氧化值之间不存在显著相关性($p > 0.05$);汉中市居民食用植物油平均摄入量为35.17 g/d,96.2%的居民主要食用植物油为菜籽油;汉中市男性和女性居民经食用植物油途径的苯并(a)芘慢性摄入量分别为0.52 ng/(kg·d)和0.59 ng/(kg·d),汉中市各区县居民的食用植物油苯并(a)芘暴露限值均大于10 000,表明汉中市各区县居民经食用植物油摄入苯并(a)芘的健康风险较低;食用植物油苯并(a)芘暴露导致男性和女性居民的ILCR分别在 $8.95 \times 10^{-7} \sim 1.53 \times 10^{-5}$ 和 $1.01 \times 10^{-6} \sim 1.74 \times 10^{-5}$ 范围内,99.6%汉中市男性居民和100%女性居民ILCR稍高于可接受风险水平(1.0×10^{-6}),汉中市其他区县居民食用植物油苯并(a)芘暴露产生的ILCR显著高于汉台区居民的($p < 0.05$)。综上,汉中市各区县居民经食用植物油摄入苯并(a)芘的健康风险较低,但存在一定的致癌风险,适当减少食用植物油的摄入量有助于降低风险。

关键词:苯并(a)芘;食用植物油;污染特征;暴露限值;增加寿命期癌风险

中图分类号:TS225.1;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)06-0106-06

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

YANG Jing¹, MOU Xiao², ZHANG Chongmiao¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Institute for Food and Drug Control, Xi'an 710065, China)

Abstract: To explore the health risk of benzo(a)pyrene exposure in edible vegetable oil to urban and rural residents, commercial edible vegetable oil in Hanzhong city, Shaanxi Province was sampled, and the content of benzo(a)pyrene was determined by HPLC-fluorescence detection method, and the pollution

收稿日期:2023-03-31;修回日期:2024-02-23

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022SF-244, 2020ZDLNY06-07);陕西省食品药品检验研究院青苗基金项目(SQM202108)

作者简介:杨 靓(1998),女,在读硕士,研究方向为污染物风险评价(E-mail)741762921@qq.com。

通信作者:张崇森,教授,博士(E-mail)cmzhang@xauat.edu.cn。

characteristics of benzo(a)pyrene in edible vegetable oil were investigated combined with a questionnaire survey of residents in various districts and counties. The margin of benzo(a)pyrene exposure through edible vegetable oil was calculated, and the increased lifetime cancer risk (ILCR) caused by benzo(a)pyrene exposure to different population types was quantitatively

evaluated. The results showed that the detection rate of benzo(a)pyrene in commercial edible vegetable oil samples was 62.5%, and the average content of benzo(a)pyrene was 1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$. There was no significant difference in the content of benzo(a)pyrene between rapeseed oil and other vegetable oil ($p > 0.05$). There was a significant correlation between benzo(a)pyrene content and acid value ($p < 0.05$), but no significant correlation between benzo(a)pyrene content and peroxide value ($p > 0.05$). The average intake of edible vegetable oil of residents in Hanzhong city was 35.17 g/d, and 96.2% of residents mainly consumed rapeseed oil. The chronic daily intakes of benzo(a)pyrene through edible vegetable oil of male and female residents in Hanzhong city were 0.52 ng/(kg·d) and 0.59 ng/(kg·d), respectively. The margin of exposure to benzo(a)pyrene in edible vegetable oil of residents in various districts and counties of Hanzhong city was greater than 10 000, indicating that the health risk of residents ingestion of benzo(a)pyrene through edible vegetable oil was low in Hanzhong city. The ILCR of male and female residents was within $8.95 \times 10^{-7} - 1.53 \times 10^{-5}$ and $1.01 \times 10^{-6} - 1.74 \times 10^{-5}$, respectively, and 99.6% of male residents and 100% of female residents in Hanzhong city had slightly higher ILCR than acceptable risk levels (1.0×10^{-6}). The ILCR of residents in other districts and counties were significantly higher than those of residents in Hantai district ($p < 0.05$). To sum up, residents of districts and counties in Hanzhong city have low health risk of benzo(a)pyrene intake through edible vegetable oil, but there is a certain cancer risk involved. Reducing the consumption of vegetable oil can assist in mitigating the associated risks.

Key words: benzo(a)pyrene; edible vegetable oil; contamination characteristics; margin of exposure; increased lifetime cancer risk

苯并(a)芘是一种由芘和苯稠合成的多环芳烃类化合物,被国际癌症研究机构(IARC)归为1类致癌物^[1],会导致肺癌^[2-3]、乳腺癌^[4]、结直肠癌^[5]等。苯并(a)芘主要来源于煤、石油等化石燃料的不完全燃烧^[6],油脂类食品在高温烘烤、干燥、熏制和烹调等过程中也会产生苯并(a)芘。饮食是人类暴露苯并(a)芘的重要途径^[7]。食用植物油是我国居民膳食的重要组成部分,其中的苯并(a)芘含量备受关注。我国现行标准 GB 2762—2017 中规定苯并(a)芘在油脂及其制品中的最大限量为 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。欧盟 208/2005 号文件规定食用油中苯并(a)芘的最大限量为 2.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。食用植物油中的苯并(a)芘来源与油料作物受到大气污染和油料加工工艺有关。研究表明,德国汉堡大气中苯并(a)芘含量最高为 388 $\mu\text{g}/1\ 000\ \text{m}^3$,日本大阪可达 106.5 $\mu\text{g}/1\ 000\ \text{m}^3$ ^[8]。袁毅^[9]研究表明,霉变的油茶籽翻炒加热过程会使制取的油茶籽油中苯并(a)芘含量大幅增加。

目前,关于食用植物油苯并(a)芘摄入导致的健康风险研究较少,尤其在暴露评估方面研究不足。因此,本研究以陕西省汉中市为例,通过对市售食用植物油苯并(a)芘含量进行检测,明确其污染特征,对汉中市各区县居民食用植物油的摄入情况进行调查,在此基础上定量评估食用植物油苯并(a)芘暴

露量及其致癌风险,为科学评价食用植物油苯并(a)芘暴露给城乡居民带来的健康风险提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

从陕西省汉中市各地的超市和农贸市场随机抽取食用植物油样品 224 份,其中菜籽油 191 份、其他植物油 33 份(包括芝麻油、花生油、大豆油、核桃油、调和油)。

苯并(a)芘标准品,美国默克公司;色谱级正己烷、异丙醇、乙腈,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

LC-2000 型高效液相色谱仪(配荧光检测器),日本岛津公司;Smart prep 全自动固相萃取装置,美国 Horizon 公司;FA2004 电子分析天平,上海舜宇恒平科技仪器有限公司;LC-DCY-12SY 水浴氮吹仪,立辰科技有限公司;0.22 μm 有机滤膜,天津腾公司。

1.2 实验方法

1.2.1 苯并(a)芘、酸值及过氧化值的测定

苯并(a)芘的测定参照 GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》;过氧化值的测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国

家标准《食品中过氧化值的测定》中滴定法;酸值的测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准食品中酸价的测定》中冷溶剂指示剂滴定法。

1.2.2 居民膳食问卷调查

针对陕西省汉中市 11 个区县(汉台区、南郑区、勉县、洋县、西乡县、宁强县、镇巴县、城固县、留坝县、略阳县、佛坪县)的居民发放调查问卷,问卷内容主要涉及购买食用植物油的种类、烹调用油量、就餐人数等。共发放调查问卷 352 份,回收有效问卷 290 份。问卷涉及汉台区、南郑区、城固县、洋县、西乡县、勉县、宁强县、略阳县、镇巴县、留坝县、佛坪县人数占调查问卷总人数比例分别为 57.9%、2.4%、9.7%、2.1%、7.9%、3.1%、1.0%、11.7%、1.0%、1.7%、1.4%。此外,本问卷调查人员年龄范围在 25~60 岁之间,其中城镇居民占比为 50.7%,乡村居民占比为 49.3%。

1.2.3 暴露评估方法

根据食用植物油中苯并(a)芘含量、居民膳食消费量和居民体质参数等数据计算居民经食用植物油途径的苯并(a)芘慢性摄入量(CDI)^[10],按照公式(1)计算 CDI。

$$I = \frac{C_i \times R}{W} \quad (1)$$

式中: I 为 CDI 值,ng/(kg·d); C_i 为食用植物油中苯并(a)芘含量,ng/kg; R 为人均食用植物油摄入量,kg/d^[11]; W 为平均体质量,取汉中市成年男性平均体质量 68 kg、成年女性平均体质量 60 kg^[12]。

使用苯并(a)芘的基准剂量置信下限(Lower confidence limit of the benchmark (a) dose, 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)^[13],来描述经食用植物油途径的苯并(a)芘的暴露风险。当 MOE 低于 10 000 时,可认为具有较高公共卫生关注度,应优先采取风险管理措施;当 MOE 高于 10 000 时,可认为具有较低公共卫生关注度。MOE 越小,说明有害物质对人群健康造成的危害风险越高^[14]。按照公式(2)计算苯并(a)芘的 MOE。

$$M = B_{10}/I \quad (2)$$

式中: M 为苯并(a)芘的 MOE 值; B_{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(BMDL₁₀),为 0.07 mg/(kg·d)^[15]。

1.2.4 致癌风险评价

采用增加寿命期癌风险(Increased lifetime

cancer risk, ILCR)对食用植物油苯并(a)芘暴露产生的致癌风险进行定量评价。根据美国国家环境保护局(USEPA)标准,当 ILCR 低于 1.0×10^{-6} 时,处于安全范围;ILCR 在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 之间时,具有致癌风险;当 ILCR 高于 1.0×10^{-4} 时,有较高的致癌风险^[16-17]。按照公式(3)计算苯并(a)芘的 ILCR。

$$L = I \times S \times C \quad (3)$$

式中: L 为苯并(a)芘的 ILCR 值; S 为苯并(a)芘经口摄入致癌斜率因子,为 $7.3 \text{ kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$ ^[18]; C 为换算系数,为 $10^{-6} \text{ mg}/\text{ng}$ 。

1.2.5 数据处理与统计分析

使用 Origin 2018 软件进行作图,用 SPSS 24.0 软件进行数据统计分析。符合正态分布的样本数据,采用独立样本 t 检验进行差异性分析;不符合正态分布的样本数据,进行 Mann-Whitney 检验及 Spearman 相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 食用植物油中苯并(a)芘的含量分布

本研究抽检的食用植物油样品中苯并(a)芘的检出率为 62.5%,其平均含量为 $1.0 \mu\text{g}/\text{kg}$,最大值为 $7.4 \mu\text{g}/\text{kg}$,最小值为 $0 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。所有食用植物油样品的苯并(a)芘含量符合我国现行标准 GB 2762—2017 中规定的最大限量($10 \mu\text{g}/\text{kg}$),但有 14.3% 的食用植物油样品中苯并(a)芘含量超过欧盟 208/2005 号文件规定的最大限量($2.0 \mu\text{g}/\text{kg}$)。菜籽油和其他植物油中的苯并(a)芘的检出率及含量情况如表 1 所示。

表 1 汉中市售食用植物油的苯并(a)芘检出情况

食用植物油	检出率/%	平均含量/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大含量/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
菜籽油	64.9	1.2	7.4
其他植物油	48.5	0.6	3.4

由表 1 可以看出,菜籽油和其他植物油中的苯并(a)芘检出率、平均含量、最大含量分别为 64.9%、 $1.2 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $7.4 \mu\text{g}/\text{kg}$ 和 48.5%、 $0.6 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $3.4 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。经统计分析,菜籽油和其他植物油中苯并(a)芘含量无显著差异($p > 0.05$)。

近年来关于食用植物油中苯并(a)芘检出时有报道,如:徐明雅等^[19]报道杭州市售芝麻油中苯并(a)芘平均含量为 $10.94 \mu\text{g}/\text{kg}$;Pupin 等^[20]发现巴西市售大豆橄榄调和油中苯并(a)芘含量为 $0.9 \sim 9.7 \mu\text{g}/\text{kg}$,玉米橄榄调和油中苯并(a)芘含量为 $2.2 \sim 9.2 \mu\text{g}/\text{kg}$;Alomirah 等^[21]分析了科威特 115 份食用油样品中苯并(a)芘含量,结果表明,43% 的

样品检出苯并(a)芘,其平均含量为 $0.92 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。与国内外的报道相比,本研究抽样调查的食用植物油中苯并(a)芘的检出率偏高,且不同植物油样品平均含量相差较大。

2.2 苯并(a)芘含量与其他指标的相关性

经检测本研究抽检的食用植物油样品酸值(KOH)的范围为 $0.008 \sim 2.5 \text{ mg}/\text{g}$,过氧化值范围为 $0.0002 \sim 0.16 \text{ g}/100 \text{ g}$,按照GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》规定食用植物油中酸值(KOH)和过氧化值的限值分别为 $3 \text{ mg}/\text{g}$ 和 $0.25 \text{ g}/100 \text{ g}$,所有样品均符合标准。食用植物油中苯并(a)芘含量与过氧化值和酸值的相关性分析如图1所示。

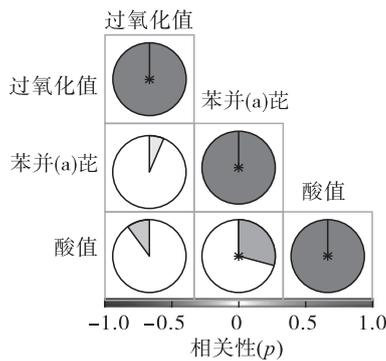


图1 食用植物油中苯并(a)芘含量与过氧化值和酸值的相关性

由图1可知,食用植物油中苯并(a)芘含量与酸值存在显著相关性($p < 0.05$),与过氧化值之间不存在显著相关性($p > 0.05$)。

2.3 汉中市居民食用植物油摄入情况

问卷调查结果表明,96.2%的汉中市居民的主要食用植物油为菜籽油。汉中市各区县居民人均食用植物油摄入情况如图2所示。

由图2可知,汉中市居民人均食用植物油摄入量为 $35.17 \text{ g}/\text{d}$,汉台区、城固县、佛坪县、留坝县、略阳县、勉县、南郑区、宁强县、西乡县、洋县和镇巴县居民人均食用植物油摄入量分别为 33.12 、 35.93 、 33.33 、 49.63 、 38.65 、 44.44 、 34.50 、 21.23 、 41.30 、 $37.66 \text{ g}/\text{d}$ 和 $45.93 \text{ g}/\text{d}$ 。统计分析结果表明,各区

县居民人均食用植物油摄入量与汉中市居民人均食用植物油摄入量无显著差异($p > 0.05$)。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 $25 \sim 30 \text{ g}/\text{d}$ ^[22]。据此来看,汉中市居民每日食用植物油摄入量普遍超过建议标准,这与汉中市居民喜好偏酸辣油香口味的饮食习惯有关。

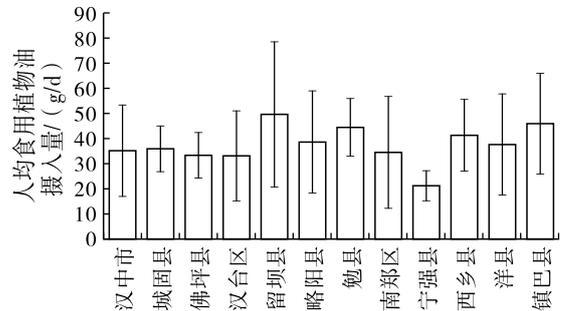


图2 汉中市各区县居民人均食用植物油摄入量

2.4 汉中市居民经食用植物油途径的苯并(a)芘摄入量和暴露限值

汉中市各区县成年男性和成年女性居民经食用植物油途径的苯并(a)芘慢性摄入量如图3所示。

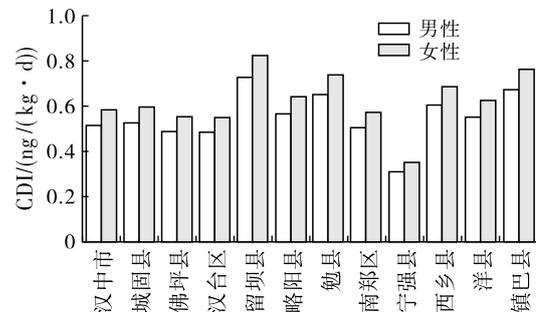


图3 汉中市各区县成年男性和成年女性居民的苯并(a)芘慢性摄入量

由图3可知,汉中市男性居民经食用植物油途径的苯并(a)芘慢性摄入量为 $0.52 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,女性居民则为 $0.59 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,其中留坝县居民的苯并(a)芘慢性摄入量最高,男性居民为 $0.73 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,女性居民为 $0.83 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

汉中市各区县居民苯并(a)芘 MOE 如表2所示。

表2 汉中市各区县居民苯并(a)芘 MOE

性别	汉中市	汉台区	城固县	佛坪县	留坝县	略阳县	勉县	南郑区	宁强县	西乡县	洋县	镇巴县
男性	135 362	143 710	132 495	142 800	95 910	123 159	107 100	137 982	224 163	115 242	126 398	103 645
女性	119 437	126 803	116 907	126 000	84 627	108 670	94 500	121 748	197 791	101 684	111 528	91 452

由表2可知,汉中市各区县居民食用植物油苯并(a)芘 MOE 均大于 $10\ 000$,表明汉中市各区县居民经食用植物油摄入苯并(a)芘的健康风险较低。

2.5 食用植物油中苯并(a)芘的致癌风险

经计算,汉中市男性居民食用植物油苯并(a)芘暴露产生的 ILCR 为 $8.95 \times 10^{-7} \sim 1.53 \times 10^{-5}$,

女性居民的 ILCR 在 $1.01 \times 10^{-6} \sim 1.74 \times 10^{-5}$ 范围内,其中有 99.6% 汉中市男性居民和 100% 女性居民的 ILCR 在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 之间,表明汉中市居民通过食用植物油摄入苯并(a)芘存在一定的致癌风险。汉中市主城区汉台区和其他区县男性、女性居民的 ILCR 如图 4 所示。

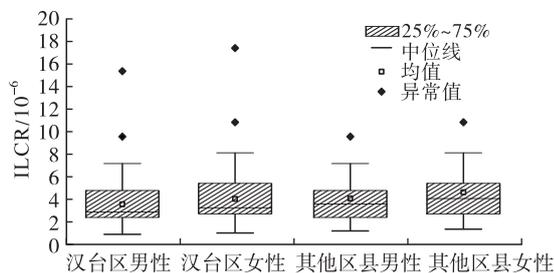


图 4 汉台区和其他区县居民食用植物油中苯并(a)芘暴露产生的 ILCR

由图 4 可知:汉台区男性和女性 ILCR 的 25% 分位数、50% 分位数、75% 分位数分别为 2.39×10^{-6} 、 2.86×10^{-6} 、 4.77×10^{-6} 和 2.70×10^{-6} 、 3.24×10^{-6} 、 5.41×10^{-6} ;其他区县男性和女性 ILCR 的 25% 分位数、50% 分位数、75% 分位数分别为 2.39×10^{-6} 、 3.57×10^{-6} 、 4.77×10^{-6} 和 2.72×10^{-6} 、 4.03×10^{-6} 、 5.42×10^{-6} 。Mann Whitney 检验结果表明,汉中市其他区县居民食用植物油苯并(a)芘暴露产生的 ILCR 显著高于汉台区居民的 ILCR ($p < 0.05$)。

3 结论

(1)汉中市市售食用植物油中苯并(a)芘检出率为 62.5%,苯并(a)芘含量范围为 $0 \sim 7.4 \mu\text{g}/\text{kg}$,平均值为 $1.0 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。菜籽油和其他植物油中的苯并(a)芘含量无显著差异($p > 0.05$),食用植物油中苯并(a)芘含量与酸值存在显著相关性($p < 0.05$),与过氧化值之间无显著相关性($p > 0.05$)。

(2)96.2% 汉中市居民的主要食用油为菜籽油,居民人均食用植物油摄入量为 $35.17 \text{ g}/\text{d}$ 。汉中市成年男性和女性居民经食用植物油苯并(a)芘慢性摄入量分别为 $0.52 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和 $0.59 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。汉中市各区县居民食用植物油苯并(a)芘暴露限值(MOE)均大于 10 000,表明汉中市各区县居民经食用植物油摄入苯并(a)芘的健康风险较低。

(3)汉中市各区县男性和女性居民食用植物油苯并(a)芘暴露产生的 ILCR 分别在 $8.95 \times 10^{-7} \sim 1.53 \times 10^{-5}$ 和 $1.01 \times 10^{-6} \sim 1.74 \times 10^{-5}$ 范围内,表明苯并(a)芘可能通过食用植物油产生潜在致癌性。汉中市其他区县居民食用植物油苯并(a)芘暴露产生的 ILCR 显著高于汉台区居民的 ILCR ($p < 0.05$)。

汉中市各区县居民经食用植物油摄入苯并(a)芘存在一定的致癌风险,适当减少每日食用植物油摄入量有助于降低风险。

参考文献:

- [1] GIANELLE V, COLOMBI C, CASERINI S, et al. Benzo(a)pyrene air concentrations and emission inventory in Lombardy region, Italy[J]. Atmos Pollut Res, 2013, 4 (3): 257 - 266.
- [2] SALEM M L, EL - ASHMAWY N E, ABD EL - FATTAH E E, et al. Immunosuppressive role of benzo[a]pyrene in induction of lung cancer in mice [J/OL]. Chem Biol Interact, 2021, 333: 109330 [2023 - 03 - 31]. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2020.109330>.
- [3] LING J, WANG Y, MA L, et al. KIF11, a plus end - directed kinesin, as a key gene in benzo(a)pyrene - induced non - small cell lung cancer [J/OL]. Environ Toxicol Pharmacol, 2022, 89: 103775 [2023 - 03 - 31]. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2021.103775>.
- [4] AMADOU A, PRAUD D, COUDON T, et al. Risk of breast cancer associated with long - term exposure to benzo[a]pyrene (BaP) air pollution: Evidence from the French E3N cohort study [J/OL]. Environ Int, 2021, 149: 106399 [2023 - 03 - 31]. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106399>.
- [5] FAROMBI E O, AJAYI B O, ADEDARA I A. 6 - Gingerol delays tumorigenesis in benzo[a]pyrene and dextran sulphate sodium - induced colorectal cancer in mice [J/OL]. Food Chem Toxicol, 2020, 142: 111483 [2023 - 03 - 31]. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111483>.
- [6] ZHAO J J, YOU X Y. Probabilistic health risk assessment of exposure to carcinogens of Chinese family cooking and influence analysis of cooking factors [J/OL]. Sci Total Environ, 2021, 779: 146493 [2023 - 03 - 31]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146493>.
- [7] 乌日娜, 金芬, 苏杭. 北京地区食用植物油中多环芳烃污染特征与健康风险评价[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(6): 843 - 849.
- [8] 岳敏, 谷学新, 邹洪. 多环芳烃的危害与防治[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 40 - 44, 31.
- [9] 袁毅. 不同工序油茶籽油中苯并(α)芘含量的变化[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(4): 38 - 41.
- [10] 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.
- [11] CULP S J, MELLICK P W, TROTTER R W, et al. Carcinogenicity of malachite green chloride and leucomalachite green in $B_6C_3F_1$ mice and F344 rats [J]. Food Chem Toxicol, 2006, 44(8): 1204 - 1212.

- [12] 任琳, 裴磊磊, 颜虹, 等. 陕西汉中农村居民超重肥胖现状调查[J]. 中国医学科学院学报, 2013, 35(1): 47-51.
- [13] FAKHRI Y, BJØRKLUND G, BANDPEI A M, et al. Concentrations of arsenic and lead in rice (*Oryza sativa* L.) in Iran: A systematic review and carcinogenic risk assessment[J]. Food Chem Toxicol, 2018, 113: 267-277.
- [14] 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 B₁ 膳食暴露及风险评估[J]. 中国油脂, 2022, 47(1): 131-136.
- [15] EFSA. Polycyclic aromatic hydrocarbons in food - scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain [J]. EFSA J, 2008, 6(8):81-86.
- [16] YOUSEFI M, SHEMSHADI G, KHORSHIDIAN N, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content of edible vegetable oils in Iran: A risk assessment study [J]. Food Chem Toxicol, 2018, 118: 480-489.
- [17] WANG S, JI Y, ZHAO J, et al. Source apportionment and toxicity assessment of PM_{2.5} - bound PAHs in a typical iron - steel industry city in northeast China by PMF - ILCR [J/OL]. Sci Total Environ, 2020, 713: 136428[2023-03-31]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136428>.
- [18] NI H G, GUO J Y. Parent and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in seafood from South China and implications for human exposure [J]. Food Chem, 2013, 61(8): 2013-2018.
- [19] 徐明雅, 潘丹杰, 金米聪. 凝胶渗透色谱法测定食用植物油中苯并(a)芘[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 240-243.
- [20] PUPIN A M, TOLEDO M C F. Benzo(a)pyrene in olive oils on the Brazilian market [J]. Food Chem, 1996, 55(2): 185-188.
- [21] ALOMIRAH H, AL - ZENKI S, HUSAIN A, et al. Benzo [a] pyrene and total polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) levels in vegetable oils and fats do not reflect the occurrence of the eight genotoxic PAHs [J]. Food Addit Contam Part A, 2010, 27(6): 869-878.
- [22] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022: 94.
-
- (上接第90页)
- [28] BRENNER D, BLASER H, MAK T W. Regulation of tumour necrosis factor signalling: Live or let die [J]. Nat Rev Immunol, 2015, 15(6): 362-374.
- [29] MARION - LETELLIER R, BUTLER M, DÉCHELOTTE P, et al. Comparison of cytokine modulation by natural peroxisome proliferator - activated receptor gamma ligands with synthetic ligands in intestinal - like Caco - 2 cells and human dendritic cells: Potential for dietary modulation of peroxisome proliferator - activated receptor gamma in intestinal inflammation [J]. Am J Clin Nutr, 2008, 87(4): 939-948.
- [30] OH D Y, TALUKDAR S, BAE E J, et al. GPR120 is an omega - 3 fatty acid receptor mediating potent anti - inflammatory and insulin - sensitizing effects [J]. Cell, 2010, 142(5): 687-698.
- [31] ALNAHDI A, JOHN A, RAZA H. Augmentation of glucotoxicity, oxidative stress, apoptosis and mitochondrial dysfunction in HepG2 cells by palmitic acid [J/OL]. Nutrients, 2019, 11(9): 1979[2023-06-16]. <https://doi.org/10.3390/nu11091979>.
- [32] KIHARA A. Very long - chain fatty acids: Elongation, physiology and related disorders [J]. J Biochem, 2012, 152(5): 387-395.
- [33] BONEN A, CHABOWSKI A, LUIKEN J J F P, et al. Mechanisms and regulation of protein - mediated cellular fatty acid uptake: Molecular, biochemical, and physiological evidence [J]. Physiology, 2007, 22(1): 15-28.
- [34] WANG Z, WANG D H, GOYKHMANN Y, et al. The elongation of very long - chain fatty acid 6 gene product catalyses elongation of n - 13:0 and n - 15:0 odd - chain SFA in human cells [J]. Br J Nutr, 2019, 121(3): 241-248.
- [35] WANG Z, PARK H G, WANG D H, et al. Fatty acid desaturase 2 (FADS2) but not FADS1 desaturates branched chain and odd chain saturated fatty acids [J/OL]. Biochim Biophys Acta Mol Cell Biol Lipids, 2020, 1865(3): 158572[2023-06-16]. <https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2019.158572>.