

实验技术与方法

GC/MS法检测油条用煎炸油中8种多环芳烃

董新风,冯佩,吴命君,赵伟,马玲

(石家庄市疾病预防控制中心理化检验科,石家庄市化学毒物检测及风险预警技术创新中心,
河北 石家庄 050011)

摘要:目的 建立一种固相萃取-气相色谱/质谱法检测油条用煎炸油中8种多环芳烃的方法。方法 样品经氢氧化钾乙醇溶液皂化后加正己烷提取,采用Eu多环芳烃柱净化,气相色谱/质谱仪分析测试。结果 8种多环芳烃在10~250 ng/mL范围内线性关系良好,相关系数 $R>0.997$;检出限为0.10~0.20 $\mu\text{g/kg}$,定量限为0.35~0.70 $\mu\text{g/kg}$;3个浓度加标回收率为70.1%~110.7%,RSD为3.6%~10.9%。180份油条用煎炸油样品中8种多环芳烃有不同程度检出,90份未煎炸前油中检出苯并[a]芘4份,检出率最高的为蒽,检出32.2%;污染水平最高的为蒽,最高含量为12.7 $\mu\text{g/kg}$ 。90份多次煎炸后油中苯并[a]芘检出21份,蒽是最主要检出的多环芳烃,检出率为50.0%,污染水平最高为苯并[a]蒽(32.4 $\mu\text{g/kg}$)。结论 该方法数据可靠、方法灵敏度高,适用于油条用煎炸油中多环芳烃的测定。

关键词:油条用煎炸油;多环芳烃;固相萃取;气相色谱质谱联用仪

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2025)08-0722-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2025.08.005

Determination of 8 polycyclic aromatic hydrocarbons in fried oil for churros using GC-MS

DONG Xinfeng, FENG Pei, WU Mingjun, ZHAO Wei, MA Ling

(Shijiazhuang Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang Technology Innovation Center for
Chemical Poison Detection and Risk Early Warning, Hebei Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: Objective A method for the determination of PAH8 in fried oil for churros was developed by modified SPE-GC/MS. **Methods** The target analytes in samples were saponified by KOH/Ethanol, extracted with n-hexane and cleaned-up by solid phase extraction column, detected by GC-MS. **Results** The method shows satisfactory linearity ($R>0.99$) over the range assayed (10-250 ng/mL), and the limits of detection (LODs) range from 0.10-0.20 $\mu\text{g/kg}$, the limits of quantitation (LOQs) range from 0.35-0.70 $\mu\text{g/kg}$. The recoveries varied from 70.1% to 110.7% with relative standard deviation (RSDs) of 3.6% to 10.9% at spiked 3 levels. All PAH8 were detected in 180 samples. 4 benzo [a] pyrene was detected in 90 oil samples, the most detection rates of PAH8 was Chrysene (32.2%), and the highest mean concentration of PAH8 was 12.7 $\mu\text{g/kg}$ for Chrysene. In 90 fried oil, 21 samples were detected benzo [a] pyrene, and Chrysene was the most detection rates of PAH8, accounting for 50.0%, the highest content was 32.4 $\mu\text{g/kg}$ for benzo [a] anthracene. **Conclusion** The method has the characteristics of high sensitivity, low detection limit and good precision, and is suitable for rapid and accurate quantitative detection of PAH8 in Fried oil for churros.

Key words: Fried oil for churros; polycyclic aromatic hydrocarbons; solid-phase extraction; GC-MS

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类具有两个及以上苯环的中性或非极性有机化合物^[1],其中4~6个苯环的多环芳烃具有致癌性、致畸性和致突变性^[2]。PAHs可通过呼吸道、消化道等途径进入体内,并在体内代谢生成多种化合物,诱发人类癌症^[3],其中苯并(a)芘可导致消化道的肿

瘤^[4-5]。大量研究表明,人体可通过多种途径暴露于PAHs,其中以膳食暴露为主^[6],约占人体日暴露PAHs的70%以上,而从食用油中摄入量占到食物中摄入量的三分之一左右^[7-8],长期食入直接危害人体健康。

食用油中PAHs污染有两方面原因,其一食用

收稿日期:2024-08-21

基金项目:河北省医学科学研究课题(20231706)

作者简介:董新风 女 副主任技师 研究方向为食品风险监测及食品安全 Email: dxfeng2002@163.com

油本身可能存在 PAHs,其二在高温煎炸的过程中也会产生 PAHs。近年来,许多学者注意到长时间煎炸的油中 PAHs 浓度显著增加。ZHU 等^[9]检测了大豆油和调和油中苯并[α]芘和 PAH4(苯并[α]芘、苯并[a]蒽、蒽、苯并[b]荧蒽)的含量在煎炸过程中的变化,结果发现煎炸后不同油中苯并[α]芘和 PAH4 浓度分别增长几倍甚至几十倍(苯并[α]芘浓度从 0.16~0.35 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 上升至 0.2~24.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$,PAH4 浓度从 2.97~3.16 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 上升至 1.1~11.27 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。石龙凯等^[10]对大豆油、米糠油和棕榈油煎炸油条的研究发现,煎炸 32 h 后 3 种油脂中苯并[α]芘、PAH4、PAH16(16 种多环芳烃之和)含量分别从 1.58~2.52 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、6.50~8.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、18.73~25.53 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 增加至 2.26~3.93 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、10.35~10.95 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、56.10~100.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。油条作为我国居民早餐中最普遍食物,大街小巷随处可见,油条用煎炸油用量很大,且存在多次煎炸使用的情况,因此煎炸油中 PAHs 对消费人群可能存在一定的健康风险。

国内外通常以苯并(a)芘、PAH4(苯并(a)芘、蒽、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽)和 PAH8(苯并(a)芘、蒽、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、二苯并(a,h)蒽、苯并(g,h,i)芘、茚并(1,2,3-cd)芘)作为食品中 PAHs 污染水平的指示物,其中 PAH4 是最合适的指示物^[11-12]。

为了解石家庄市油条用煎炸油中 PAHs 污染情况,本研究对全市 21 个县区采集的 180 份油条用煎炸油,其中 90 份未煎炸油和 90 份多次煎炸后的油进行 PAHs 检测分析,研究不同油脂煎炸前后多环芳烃含量的变化,对煎炸油中 PAHs 的健康风险进行初步评估,通过检测分析苯并(a)芘、PAH4 和 PAH8 的含量,揭示市场上油条用煎炸油煎炸前后的污染状况,以期为油条用煎炸油的选择提供参考,为全市人民身体健康保驾护航。

1 材料与方法

1.1 仪器、试剂与材料

样品采自河北省石家庄市 21 个县区,分别采集炸油条摊位处未煎炸油和经过多次煎炸的散装食用油。

气相色谱-质谱仪(7890A-5977,美国 Agilent 公司);分析天平(BSA2245-CW,德国 Sartorius 公司);漩涡混合仪(Multi Reax,德国 Heidolph 公司);氮吹浓缩仪(HCG-24A,天津恒奥科技公司);正己烷、二氯甲烷、乙酸乙酯、异辛烷、丙酮(色谱纯,美国 Fisher Technologies 公司);Eu 多环芳烃柱(东阳市康源科技有限公司);8 种多环芳烃标准溶液:质量

浓度为 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$,购于美国 O2Si 公司,5 种多环芳烃内标溶液:质量浓度为 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$,购于美国 O2Si 公司。

1.2 方法

1.2.1 标准溶液的配制

分别吸取 8 种多环芳烃标准溶液于 10 mL 容量瓶中,正己烷定容,配成 1 000 $\mu\text{g}/\text{L}$ 的混合标准储备液,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存。临用前配制成 10、20、25、40、50、100、125、250 ng/mL 混合标准工作液。5 种内标溶液用正己烷配制成 4.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

1.2.2 样品前处理

1.2.2.1 皂化提取

称取试样 1 g(精确至 0.001 g)于 50 mL 离心管中,加入 4.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 内标 10 μL 混匀。加入 5 mL 1.5 mol/L 氢氧化钾乙醇溶液,加盖涡旋混匀,放置 (70 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$ 水浴中进行皂化 3 min。皂化完成取出用自来水冷却至室温,加 4 mL 纯水、5 mL 正己烷,涡旋提取 2 min,以 10 000 r/min 离心 2 min(离心半径 9.5 cm),上层正己烷提取液待净化。

1.2.2.2 净化

在固相萃取柱上加 1 g 左右无水硫酸镁,依次用 3 mL 二氯甲烷、3 mL 正己烷淋洗活化柱子,活化结束后吸取上述正己烷提取液转移到固相萃取柱上,流速控制约 1.0 mL/min,待提取液全部通过填料层后,先用 5 mL 正己烷淋洗除杂,再用 5 mL 二氯甲烷-乙酸乙酯溶液体积比(1+1)洗脱,收集洗脱液于 15 mL 离心管内。洗脱液在 40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中用氮气吹至近干,加 0.2 mL 丙酮-异辛烷溶液(1+1)涡旋溶解残留物,并转移至锥底进样瓶中,进 GC-MS 测定。

1.2.3 仪器工作条件

色谱条件:色谱柱 DB-EUPAH 毛细管柱(20 m \times 180 $\mu\text{m}\times$ 0.14 μm);升温程序:初始温度 70 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 250 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 315 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,最后以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 320 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 5 min;进样口温度:280 $^{\circ}\text{C}$;载气为高纯氦气(99.999%),流速 0.7 mL/min;不分流进样,进样量:1.0 μL 。

质谱条件:电子轰击(EI)离子源,电离能量 70 eV,离子源温度 250 $^{\circ}\text{C}$,四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度 280 $^{\circ}\text{C}$,溶剂延迟 16.5 min,测定方式:选择离子模式监测,监测离子详见表 1。

1.3 基质匹配标准溶液的制备

取空白样品,按以上实验方法提取后,在提取液中加入多环芳烃混标溶液作为标准溶液,同时加 4.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 内标 10 μL ,对待测样品浓度加以校正以消除基质影响。本实验选用基质匹配标准(浓度

为 50 ng/mL)与纯溶剂标准进行比较,基质效应应用基质参数 MF^[13]来表示,即:MF=(A-B)/A,A:纯溶剂标准的峰面积;B:空白样品提取液标准的峰面积。

1.4 方法验证试验
取空白样品,分别加入低、中、高浓度的混标,涡旋 1 min,放置 2 h 后按上述实验方法操作,计算回收率和精密度。

表1 多环芳烃和内标保留时间及监测离子

Table 1 Retention time and qualitative/quantitative ions of PAHs and deuterated internal standard					
名称	保留时间/min	监测离子	内标	保留时间/min	监测离子
苯并[a]芘	27.60	250(22),253(21)	D12-苯并[a]芘	27.42	260(20)、264*(100)
		252*(100)			
苯并[a]蒽	22.71	226(28),229(20)	D12-苯并[a]蒽	22.52	236(25)、240*(100)
		228*(100)			
蒽	23.01	226(28),229(17)	D12-蒽	22.89	236(25)、240*(100)
		228*(100)			
苯并[b]荧蒽	26.36	250(23),253 (20)	D12-苯并[b]荧蒽	26.21	260(20)、264*(100)
		252*(100)			
苯并[k]荧蒽	26.46	250(25),253 (20)			
		252*(100)			
茚并[1,2,3-cd]芘	30.66	274(20),277(20)			
		276*(100)			
二苯并[a,h]蒽	31.55	276(20),279(26)	D12-茚并[1,2,3-cd]芘	30.51	284(20)、288*(100)
		278*(100)			
苯并[ghi]芘	31.77	274(25),277(23)			
		276*(100)			

注:*定量离子

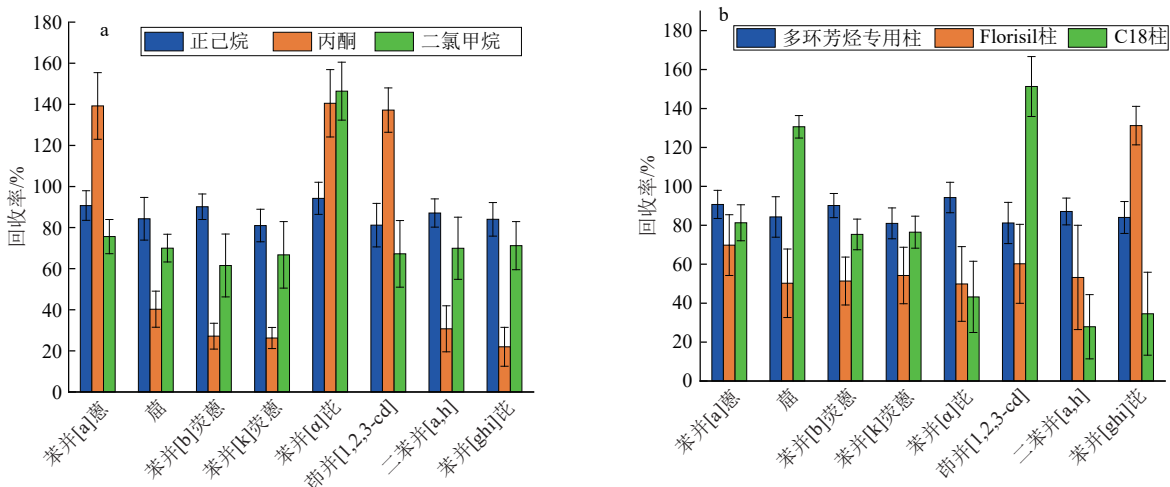
2 结果与讨论

2.1 样品前处理

2.1.1 提取

煎炸油成分复杂,存在大量脂肪及其伴随物使得提取难度大。从煎炸油中提取多环芳烃主要采用有机溶剂。本实验选用 3 种常用的有机溶剂(正己烷、二氯甲烷、丙酮)作为提取溶剂,其他条件不变,只改变提取溶剂,平行测定 7 次,计算平均回收率及相对标准偏差。通过考查不同溶剂提取后的

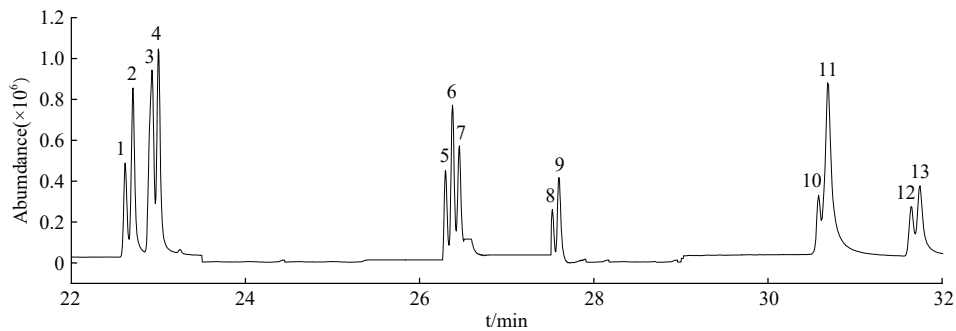
回收率确定提取溶剂,结果详见图 1a,实验结果发现,正己烷提取回收率效果最好,二氯甲烷次之,丙酮最差。其原因有可能是,大部分多环芳烃极性弱,更易溶于弱极性溶剂中;丙酮作为提取溶剂时,基质效应太强,其原因可能是丙酮提取时共提物太多导致回收率不稳定。而二氯甲烷对实验人员和环境有害,所以本实验选用正己烷作为提取液,得到较好的回收率和相对不错的基质匹配,基质匹配标准曲线见图 2。



注:a.不同提取溶剂对回收率的影响 b.不同萃取柱对回收率的影响

图1 前处理条件对多环芳烃回收率的影响(n=7)

Figure 1 Comparison of effect of different methods (n=7)



注: 1.D-12 苯并[a]蒽 2. 苯并[a]蒽 3. 蒽 4.D-12 蒽 5.D-12 苯并[b]荧蒽 6. 苯并[b]荧蒽 7. 苯并[k]荧蒽 8.D-12 苯并[a]芘 9. 苯并[a]芘 10.D-12 茚并[1,2,3-cd]芘 11. 茚并[1,2,3-cd]芘 12. 二苯并[a,h]蒽 13. 苯并[ghi]芘

图 2 多环芳烃色谱图

Figure 2 Chromatograms of PAHs

2.1.2 净化

由于煎炸油基质复杂,目标物经有机溶剂提取后,还需进一步净化。本实验选取固相萃取(Solid-phase extraction, SPE)作为净化手段。分别选用多环芳烃专用柱、C18 柱和 Florisil 柱净化,以二氯甲烷-乙酸乙酯溶液(1+1)作为洗脱液测定回收率。实验结果见图 1b,结果显示,多环芳烃专用柱净化 8 种多环芳烃的回收率要远高于其他两种固相萃取柱。其原因可能是使用 Florisil 柱净化时,最终仍有残余的油脂,不仅影响方法灵敏度和准确度,对色谱柱和离子源损伤也大;C18 柱虽然除脂效果很好,但是 C18 柱除吸附多环芳烃外,同时还会吸附一些不皂化成分,这些成分会影响检测灵敏度,尤其是 5 环芳烃回收率非常低,这可能与空间结构有一定的关系。而多环芳烃专用柱能够克服前两种净化条件的缺陷,因此本实验选用多环芳烃专用柱进行净化取得不错的结果。

2.1.3 样品基质效应的消除

基质成分复杂在上机检测过程中对离子化有较强的抑制作用,影响实验的重现性和准确度。为消除样品基质效应,采用空白样品提取液作为标准溶液的稀释液,以有效降低不同基质效应的影响,使标准和样品溶液具有相同的离子化条件,从而降低样品基质效应。结果显示,对于保留时间几乎没有影响;但是待测物含量有一定的变化,只有 3 种多环芳烃(苯并[a]蒽、蒽、苯并[α]芘)基质效应在 20% 以内,其他都超过 20%。

2.2 方法评价

2.2.1 方法的线性关系及检出限

在确定的最佳分离条件下,配制一系列不同浓度的基质匹配混合标准溶液进行测定绘制标准曲线。8 种多环芳烃在 10~250 ng/mL 范围内线性关系良好,相关系数 r 均>0.997(表 2),可以满足定量分析的要求。以 3 倍信噪比计算煎炸油中 8 种多

环芳烃的检出限(Limit of detection, LOD)为 0.10~0.20 μg/kg。根据 $S/N=10$ 确定定量下限(Limit of quantitation, LOQ)为 0.35~0.70 μg/kg。

表 2 多环芳烃方法检出限、定量限及线性范围

Table 2 Linear equation, LODs and LOQs of the 8 PAHs

化合物	线性关系		LOD/ (μg/kg)	LOQ/ (μg/kg)
	回归方程	r		
苯并[a]蒽	$Y=1.60X-0.06$	0.999 9	0.20	0.66
蒽	$Y=1.93X-0.14$	0.998 9	0.20	0.60
苯并[b]荧蒽	$Y=1.29X-0.06$	0.999 5	0.20	0.63
苯并[k]荧蒽	$Y=1.13X-0.11$	0.999 8	0.20	0.63
苯并[α]芘	$Y=1.35X-0.05$	0.999 7	0.20	0.63
茚并[1,2,3-cd]芘	$Y=1.89X-0.12$	0.999 3	0.20	0.70
二苯并[a,h]蒽	$Y=3.47X+0.03$	0.997 2	0.20	0.70
苯并[ghi]芘	$Y=1.25X+0.01$	0.999 5	0.10	0.35

2.2.2 回收率和精密度

在空白的样品中分别加入 1.0、10.0、50.0 μg/kg 的混合标准溶液,涡旋 1 min,放置 2 h 后进行提取和测定,计算回收率。详见表 3。由表 3 可以看出,8 种多环芳烃的回收率为 70.1%~110.7%,RSD 为 3.6%~10.9%,说明该方法准确度较高、重复性较好。

2.3 实际样品检测

为监测石家庄市油条用煎炸油中多环芳烃的污染情况,2023 年从河北省石家庄市 21 个县区分别采集炸油条摊位处未煎炸油和经过多次煎炸的散装食用油,每县区煎炸前后各采 3~5 份,共计 180 份。通过对实际样品的测定,煎炸原料油中本实验检测的 8 种多环芳烃有不同程度的检出,具体结果详见表 4。从实验结果看,煎炸前油中只有(37/90)份未检出多环芳烃,不到二分之一。由此可见,市场上油条用煎炸原料油多环芳烃的污染程度很高。PAH4 有不同程度的检出,其中检出苯并[α]芘 4 份,检出率为 4.5%,含量为 1.46~5.36 μg/kg,均低于我国 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[14]规定的油脂及其制品中苯并(a)芘限量值(10 μg/kg),但其中 3 份样高于欧盟标准

表3 多环芳烃方法加标回收率及精密度(n=7)
Table 3 Recovery and RSD of 8 PAHs in spiked oil (n=7)

化合物	1.0 μg/kg		10.0 μg/kg		50.0 μg/kg	
	回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%
苯并[a]蒽	77.6	10.1	90.2	7.3	88.6	4.3
蒽	76.5	8.4	85.3	10.2	91.0	3.6
苯并[b]荧蒽	79.2	7.1	90.4	6.3	92.1	4.2
苯并[k]荧蒽	72.8	6.1	80.1	7.1	107.1	8.1
苯并[α]芘	72.1	10.7	94.8	7.4	110.7	8.4
茚并[1,2,3-cd]芘	70.1	6.4	82.3	10.9	102.6	10.4
二苯并[a,h]蒽	80.4	5.3	87.2	7.0	86.6	10.2
苯并[ghi]芘	72.	10.3	84.7	7.9	86.4	5.5

[Regulation(EU)No. 2023/915]^[15]中油脂类苯并(a)芘限量值(2 μg/kg)。苯并[a]蒽 21 份,检出率 23.3%;蒽 29 份,检出率 32.2%,苯并[b]荧蒽 2 份,检出率 2.2%;PAH4 30 份,检出率 33.3%,含量在 1.02~31.6 μg/kg,其中 4 份>10 μg/kg,超出欧盟标准

[Regulation(EU)No. 2023/915]^[15]中油脂类 PAH4 限量值(10 μg/kg)。污染水平最高的是蒽(12.7 μg/kg)和苯并[a]蒽(9.94 μg/kg)本实验煎炸原料油中苯并(a)芘及 PAH4 污染水平与 SHI 等^[18](苯并(a)芘 0.12~6.28 μg/kg、PAH4 1.48~27.84 μg/kg)的研究相当。

表4 实际样品测定结果
Table 4 PAHs concentrations in oil samples

PAHs	检出份数(检出率%)		检出均值/(μg/kg)		检出最小值/(μg/kg)		检出最大值/(μg/kg)	
	原料油	煎炸后	原料油	煎炸后	原料油	煎炸后	原料油	煎炸后
苯并[a]芘	4(4.5)	21(23.3)	3.04	3.59	1.46	1.44	5.36	19.4
苯并[a]蒽	21(23.3)	41(45.6)	3.57	4.74	2.06	1.88	9.94	32.4
蒽	29(32.2)	45(50.0)	3.40	4.49	1.02	1.14	12.7	17.2
苯并[b]荧蒽	2(2.2)	2(2.2)	2.22	18.5	0.78	3.74	3.66	33.2
苯并[k]荧蒽	27(30.0)	29(32.2)	3.67	3.54	1.07	1.18	27.7	33.7
茚并[1,2,3-cd]芘	22(24.2)	24(26.7)	6.02	5.53	1.03	1.14	30.6	35.5
二苯并[a,h]蒽	8(8.9)	10(11.1)	5.99	5.59	1.17	1.74	8.66	10.7
苯并[ghi]芘	5(5.6)	7(7.8)	2.41	2.41	1.12	1.00	6.78	7.36
PAH4	31(34.4)	53(58.9)	6.67	9.79	1.02	1.14	31.6	102
PAH8	54(60.0)	61(67.8)	9.57	13.1	1.18	1.14	68.5	167

煎炸油中 PAHs 污染来源于两方面,一是食用植物油本身含有 PAHs。白瑞^[16]检测 15 种食用油中苯并[a]芘最高含量达 9.20 μg/kg,接近我国国标限量值;16 种多环芳烃总量为 0~72.47 μg/kg。路杨等^[17]检测市售的 96 份食用油中 51% 的样品中检出不同含量的多环芳烃。二是食用油在反复高温煎炸过程中发生氧化、分解等一系列复杂的化学反应产生的 PAHs。黄飞飞等^[11]检测 158 份煎炸油发现,苯并[a]芘的检出率高达 83.5%,其他多环芳烃也有不同程度的检出。石龙凯等^[10]研究发现在一定的煎炸温度下,煎炸时间越长,食用油中苯并[a]芘含量越高。刘国艳等^[19]实验发现煎炸温度越高、时间越长,茶叶籽油中苯并(a)芘含量越多。与原料油相比较,多次煎炸后食用油中 8 种多环芳烃只有(26/90)份未检出,实验结果显示煎炸后食用油中不仅多环芳烃含量增加,有些样品原料油中未检出煎炸后也有检出。PAH4 中苯并[α]芘 21 份,检出率为 23.3%,与原料油相比增加 4 倍多,相比其他多环芳烃增加比例最高。但只有一份 19.9 μg/kg,超出我国 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[14]规定;苯并[a]蒽 41 份,检出率

45.6%;与原料油相比增加近一倍;蒽 45 份,检出率 50%,与原料油相比增加 50% 多;苯并[b]荧蒽 2 份,检出率 2.2%;与原料油相同;PAH4 53 份,检出率 58.9%,与原料油相比增加近 50%,含量为 1.14~102 μg/kg,19 份样品含量>10 μg/kg,超出欧盟标准 [Regulation(EU)No. 2023/915]^[15]限量值,占总监测数量的五分之一。污染水平最高的是苯并[a]蒽(32.4 μg/kg)和苯并(a)芘(19.9 μg/kg)。本实验煎炸后样品中苯并(a)芘和 PAH4 污染水平稍高于黄飞飞等^[11]和 YOUSEFI 等^[20]结果;苯并(a)芘水平低于 HAO 等^[21]结果(均值 31.9 μg/kg,最高值 99.9 μg/kg),PAH4 水平也低于 HAO 等^[21]研究结果(均值为 30.4 μg/kg,最高值 121.3 μg/kg)。本研究煎炸前、后样品中检出率最高的都是苯并[a]蒽和蒽这两种多环芳烃,污染水平最高也是这两种化合物。研究结果与黄飞飞等^[11]、曹梦思等^[22]和 MOLLE 等^[23]的研究结果类似,蒽都是检出最多的化合物。

3 结论

本研究采集的 180 份煎炸前后油条用煎炸油样品中普遍存在 PAHs 污染,煎炸前后样品中蒽都

是检出最多的化合物,其次是苯并[a]蒽。许多国家制定食用油中苯并[a]芘的限量要求,欧盟还规定PAH4的总量限制要求,但尚无对其他多环芳烃的限量要求。从本实验检测情况看,我市油条用煎炸油中的PAHs安全质量还存在一定的差距,食品安全风险需要引起关注。尽管绝大部分食用油能够满足我国国家标准的限量要求,但是苯并[a]芘含量已超过一些国际限量要求,一些样品中PAH4也超过国际限量要求。

参考文献

- [1] 杜瑞,万丽斌,高火亮,等.固相萃取-高效液相色谱法检测植物油中15种多环芳烃[J].粮食与油脂,2022,35(1):158-162.
DU R, WAN L B, GAO H L, et al. Determination of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetable oils by solid phase extraction coupled with high performance liquid chromatography [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(1): 158-162.
- [2] 阳文武,谭顺中,郭娅,等.多环芳烃分子印迹柱-高效液相色谱荧光检测法快速测定烤肉中15种多环芳烃[J].肉类研究,2018,32(11):47-52.
YANG W W, TAN S Z, GUO Y, et al. Determination of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons in barbecued meat by molecularly imprinted solid-phase extraction combined with high performance liquid chromatography-fluorescence detection [J]. Meat Research, 2018, 32(11): 47-52.
- [3] 卢宇翹,杨森,曹鑫,等.四种多环芳烃低剂量联合暴露对大鼠毒性作用的初步研究[J].中国食品卫生杂志,2021,33(6):743-748.
LU Y X, YANG M, CAO X, et al. Preliminary study on toxicity of low-dose exposure of four polycyclic aromatic hydrocarbons combined in rats [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(6): 743-748.
- [4] MALLAH M A, CHANGXING L, MALLAH M A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: an updated review[J]. Chemosphere, 2022: 133948.
- [5] 曾庆红,朱荣,王珺冀,等.烧烤肉制品中多环芳烃和杂环胺的污染水平及健康风险评估[J].微量元素与健康研究,2025,42(3):9-13.
ZENG Q H, ZHU Z, WANG J J, et al. Contamination levels and health risk assessment of PAHs and HAs in barbecued meat products [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2025, 42(3): 9-13.
- [6] 杨森,卢宇翹,曹鑫,等.8种多环芳烃联合暴露致大鼠肝脏毒性及BMDL推导[J].中国食品卫生杂志,2023,35(6):813-819.
YANG M, LU Y X, CAO X, et al. Hepatotoxicity and BMDL derivation in rats under combined exposure to eight kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(6): 813-819.
- [7] 钟冬莲,喻宁华,王玫鹏,等.分子印迹固相萃取-气相色谱-串联质谱法测定油茶籽油中16种多环芳烃[J].中国油脂,2022(10):118-123,129.
ZHONG D L, YU N H, WANG M J, et al. Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in oil-tea camellia seed oil using molecularly imprinted solid-phase extraction coupled with GC-MS/MS[J]. China Oils and Fats, 2022(10): 118-123, 129.
- [8] 宫春波,王朝霞,董峰光,等.食用植物油中多环芳烃的污染情况及健康风险评估[J].中国油脂,2013,38(5):75-79.
GONG C B, WANG Z X, DONG F G, et al. Contamination degree and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible vegetable oil[J]. China Oils and Fats, 2013, 38(5): 75-79.
- [9] ZHU Y, LI X, HUANG J H, et al. Correlations between polycyclic aromatic hydrocarbons and polar components in edible oils during deep frying of peanuts[J]. Food Control, 2018, 87: 109-116.
- [10] 石龙凯,刘玉兰,王莹辉,等.油脂煎炸过程中多环芳烃含量的变化[J].现代食品科技,2015,31(4):311-315.
SHI L K, LIU Y L, WANG Y H, et al. A study examining changes in polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) content of edible oils upon frying[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(4): 311-315.
- [11] 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 F F, LIU Z P, 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.
- [12] European Food Safety Authority (EFSA). Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on polycyclic aromatic hydrocarbons in food[J]. The EFSA Journal, 2008, 724(1): 1-114.
- [13] JIANG H L, CAO H C, ZHANG Y, et al. Systematic evaluation of supported liquid extraction in reducing matrix effect and improving extraction efficiency in LC-MS/MS based bioanalysis for 10 model pharmaceutical compounds[J]. Journal of Chromatography B, 2012, 891-892, 71-80.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中污染物限量:GB 2762—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
National Health Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. National Food Safety Standard Food Contaminants MRLs: GB 2762—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [15] COMMISSION REGULATION (EU) 2023/915, Maximum levels for certain contaminants in food[S]. 2023: 5.1.11.
- [16] 白瑞. GC-MS法测定多种食用油中的多环芳烃[J].食品工业,2024,45(3):275-278.
BAI R. Determination of PAHs in various edible oils by GC-MS [J]. The Food Industry, 2024, 45(3): 275-278.
- [17] 路杨,刘印平,王丽英,等.高效液相色谱-荧光检测法检测植物性食品中14种欧盟优控多环芳烃[J].食品安全质量检测学报,2020,11(18):6594-6600.
LU Y, LIU Y P, WANG L Y, et al. Determination of 14 European Union superior controlled polycyclic aromatic hydrocarbons in plant-origin foods by high performance liquid chromatography-fluorescence detector [J]. Journal of Food Safety & Quality,

- 2020, 11(18): 6594-6600.
- [18] SHI L K, ZHANG D D, LIU Y L. Incidence and survey of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible vegetable oils in China [J]. Food Control, 2016, 62(10): 165-170.
- [19] 刘国艳, 刘莉, 孙欣果, 等. 不同煎炸条件对茶叶籽油苯并(a)芘含量的影响[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 97-102.
- LIU G Y, LIU L, SUN X G, et al. Effect of different frying conditions on content of benzo (a) pyrene in tea seed oil [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(11): 97-102.
- [20] 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 and Chemical Toxicology, 2018, 118(5): 480-489.
- [21] HAO X W, JING L, YAO Z L. Changes in PAHs levels in edible oils during deep-frying process [J]. Food Control, 2016, 66(2): 233-240.
- [22] 曹梦思, 王君, 张立实, 等. 我国食用油脂中欧盟优控15+1种多环芳烃的污染状况分析[J]. 中国食品学报, 2016, 16(12): 198-205.
- CAO M S, WANG J, ZHANG L S, et al. Analysis of EU 15+1 PAHs pollution in edible fats and oils of China [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(12): 198-205.
- [23] MOLLE D R D, ABBALLE C, GOMES F M L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in canola, sunflower and corn oils and estimated daily intake [J]. Food Control, 2017, 81(5): 96-100.

《中国食品卫生杂志》顾问及第五届编委会名单

顾问: 陈君石、黄璐琦、江桂斌、李林、沈建忠、吴清平、Jianghong Meng(美国)、Patrick Wall(爱尔兰)、Samuel Godefroy(加拿大)、Gerald Moy(美国)、Paul Brent(澳大利亚)、Marta Hugas(比利时)、Yukikko Yamada(日本)、Tom Heilandt(德国)、Andreas Hensel(德国)、Christopher Elliott(英国)、Christine Nelleman(丹麦)

主任委员: 李宁

副主任委员: 王竹天、孙长颢、王涛、谢剑炜、应浩、丁钢强、张峰、张永慧

主编: 吴永宁

编委(按姓氏笔画排序)

丁钢强(中国疾病预防控制中心营养与健康所)

于洲(国家食品安全风险评估中心)

于维森(青岛市疾病预防控制中心)

马宁(国家食品安全风险评估中心)

马会来(中国疾病预防控制中心)

马群飞(福建省疾病预防控制中心)

王君(国家食品安全风险评估中心)

王茵(浙江省医学科学院)

王涛(浙江清华长三角研究院)

王硕(南开大学医学院)

王慧(上海交通大学公共卫生学院)

王永芳(国家卫生健康委员会卫生健康监督中心)

王竹天(国家食品安全风险评估中心)

王松雪(国家粮食和物资储备局科学研究院)

王晓英(中国动物疫病预防控制中心)

计融(国家食品安全风险评估中心)

邓小玲(广东省疾病预防控制中心)

卢江(国家食品安全风险评估中心)

匡华(江南大学食品学院)

朱心强(浙江大学医学院)

应浩(中国科学院上海营养与健康所)

张丁(河南省疾病预防控制中心)

张峰(中国检验检疫科学研究院)

张卫兵(南通市疾病预防控制中心)

张立实(四川大学华西公共卫生学院)

张永慧(广东省疾病预防控制中心)

张旭东(国家卫生健康委员会医院管理研究所)

张剑峰(黑龙江省疾病预防控制中心)

张朝晖(中国海关科学技术研究中心)

张惠媛(中国海关科学技术研究中心)

张遵真(四川大学华西公共卫生学院)

陈波(湖南师范大学化学化工学院)

陈颖(中国检验检疫科学研究院)

陈卫东(广东省市场监督管理局)

邵兵(北京市疾病预防控制中心)

武爱波(中国科学院上海营养与健康所)

赵舰(重庆市疾病预防控制中心)

赵云峰(国家食品安全风险评估中心)

赵贵明(中国检验检疫科学研究院)

钟凯(科信食品与营养信息交流中心)

(下转第734页)