

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250402005

引用格式: 张楷淳, 董新风. 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. (in Chinese with English abstract).

高温煎炸对大豆油、花生油中酸价及多环芳烃含量的影响

张楷淳¹, 董新风^{2*}

(1. 重庆医科大学公共卫生学院, 重庆 400016; 2. 石家庄市疾病预防控制中心, 石家庄市化学毒物检测及风险预警技术创新中心, 石家庄 050011)

摘要: **目的** 研究不同煎炸温度、时间煎炸薯条后大豆油/花生油中酸价、苯并[a]芘、4种多环芳烃总量(4 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH4)以及16种多环芳烃总量(16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH16)含量的变化。**方法** 酸价以酚酞为指示剂, 用无水乙醚:异丙醇 (1:1, V:V)滴定; 多环芳烃测定, 样品经氢氧化钾乙醇溶液皂化3 min后冷却加正己烷提取, 采用Eu多环芳烃柱净化, 氮吹浓缩后经气相色谱-质谱仪分析测试。**结果** 随着煎炸温度、时间的增加, 酸价快速增大, 花生油变化更明显; 相同温度下, 苯并[a]芘、PAH4含量均随煎炸时间的延长呈现不规则的波动增长趋势, 温度越高增加越快; 随着煎炸时间延长、温度的升高PAH16含量快速增加, 其变化比苯并[a]芘、PAH4更加灵敏。同等条件下苯并[a]芘、PAH4以及PAH16在花生油中增加幅度比大豆油小。**结论** 同等条件下, PAH16变化比苯并[a]芘及PAH4变化更显著, 其限值更应受到关注。

关键词: 大豆油; 花生油; 煎炸; 酸价; 多环芳烃

Effects of high temperature frying on acid value and content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soybean oil and peanut oil

ZHANG Kai-Chun¹, DONG Xin-Feng^{2*}

(1. College of Public Health, Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China; 2. Shijiazhuang Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang Technology Innovation Center for Chemical Poison Detection and Risk Early Warning, Shijiazhuang 050011, China)

ABSTRACT: Objective To study the changes of acid value, benzo [a] pyrene, 4 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH4) and 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH16) content in frying french fries soybean oil/peanut oil at different temperatures and times. **Methods** The acid value in oils was titrated by anhydrous ether:isopropanol (1:1, V:V) using phenolphthalein as an indicator. The polycyclic aromatic hydrocarbons

收稿日期: 2025-04-02

基金项目: 河北省医学科学研究课题项目(20231706)

第一作者: 张楷淳(2006—), 男, 主要研究方向为食品风险监测。E-mail: 181160046@qq.com

*通信作者: 董新风(1978—), 女, 博士, 副主任技师, 主要研究方向为食品风险监测和食品安全。E-mail: dxfeng2002@163.com

in samples were saponified by KOH/ethanol, extracted with n-hexane and cleaned-up by solid-phase extraction column, detected by gas chromatography-mass spectrometer. **Results** With the increase of frying temperature and time, the acid value increased rapidly, and the changes in peanut oil were more sensitive. At the same temperature, both benzo [a] pyrene and PAH4 showed an irregular fluctuating growth with time, and the higher the temperature, the faster the increase. The content of PAH16 rapidly increased with time and temperature, and its changes were more sensitive than those of benzo [a] pyrene and PAH4. Under the same conditions, the increase of benzo [a] pyrene, PAH4 and PAH16 in peanut oil was less than that in soybean oil. **Conclusion** At the same conditions, PAH16 shows more significant changes compared to benzo [a] pyrene and PAH4, so the limits of PAH16 should be given more attention.

KEY WORDS: soybean oil; peanut oil; frying; acid value; polycyclic aromatic hydrocarbons

0 引言

煎炸是现代生活中常见的一种烹饪方式,在食品工业中也广泛使用^[1]。酥脆可口的煎炸食品深受广大消费者的喜爱。但是油脂经过长时间的高温煎炸会发生一系列复杂的化学变化,严重影响油脂品质,造成酸价、过氧化值、羰基价等指标升高^[2-3],并生成对人体有害的产物,如多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)等^[4-6]存在食品安全风险。因此,对煎炸油品质监控十分重要。

PAHs 是目前已知最大的致癌物质类别^[7],长期接触 PAHs 的人群,患癌风险增加^[8-9],尤其是肺癌、皮肤癌等^[10-12]。另外有文献报道 PAHs 可能影响并干扰免疫系统、生殖系统以及内分泌系统的正常功能^[13-15]。为此,欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)确定了 16 种欧盟重点 PAHs,其中 PAH4(苯并[a]芘、苯并[a]蒽、蒽、苯并[b]荧蒽)为与食品中 PAHs 污染最相关的指标^[16-18]。国内外出台相关标准对食用油中 PAHs 进行限量要求。其中欧盟委员会发布法规(EU)No.2023/915 规定了油脂中苯并[a]芘最大限量 2.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, PHA4 总量为 10.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

大量研究表明,饮食接触的 PAHs 主要是从食用油中摄入,其摄入量占到总摄入量的 1/3 左右^[19-20],长期食入直接危害人体健康。许多学者报道了煎炸油、煎炸食品中检出 PAHs。路杨等^[21]检测河北省 136 份煎炸熏烤食品中 PAHs,结果显示煎炸用油中 PAHs 检出值范围与检出率均明显高于原油,其中苯并[a]芘 100%检出。程莉等^[22]检测 120 份油炸食品,结果 15 种 PAHs 的检出率为 98.33%,其中苯并[a]芘平均污染水平为 0.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$,检出率为 17.5%。煎炸食品的消费量逐年递增,随着人们对食品安全意识的提高,对煎炸油及煎炸食品的关注度也逐渐增加^[23]。我国目前只对煎炸油中极性组分、酸价进行限量。有些国家将极性组分、酸值、羰基价等作为煎炸油的废弃指标^[24],目前文献还未检测到将煎炸油中 PAHs 的含量作为油脂废弃的参考依据,因此对煎炸油中 PAHs 进行系统的研究,对煎炸油废弃标准的完善具有重大意义。

本研究选取花生油和大豆油作为煎炸用油,以薯条为原料,分析油炸温度和时间对煎炸油中酸价和 PAHs 含量的影响,结合国内外的油脂废弃指标,模拟分析煎炸油废弃点 PAHs 含量,为煎炸食品中 PAHs 控制提供理论依据,以期餐饮业合理使用煎炸油提供参考。

1 材料与方法

1.1 试剂、仪器与材料

大豆油采自超市,花生油为家用自榨油。

7890A-5977 气相色谱-质谱仪、DB-EUPAH 毛细管柱(20 m \times 180 μm , 0.14 μm)(美国 Agilent 公司); Multi Reax 多管涡旋仪(德国 Heidolph 公司); BSA2245-CW 万分之一天平(德国 Sartorius 公司); HCG-24A 氮吹仪(天津恒奥科技公司); Eu 多环芳烃柱(东阳市康源科技有限公司)。

异辛烷、正己烷、乙酸乙酯、丙酮、二氯甲烷、乙醇(色谱纯,北京迪科马科技有限公司);无水乙醚、异丙醇、氢氧化钾(优级纯,国药集团化学试剂有限公司);无水硫酸镁(优级纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);氢氧化钾标准溶液(0.1 mol/L,北京海岸鸿蒙标物中心);16 种 PAHs 标准溶液(质量浓度为 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$,天津阿尔塔科技有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 煎炸油样品制备

5 L 大豆油/花生油加热至指定温度,薯条称取约 50 g,煎炸 5 min,间隔 15 min;再炸,每天炸 6 h,连续煎炸 5 d,每 2 h 取一次油样。油样冷却后放入-20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱待测。

1.2.2 酸价的测定

大豆油/花生油的酸价按照 GB/T 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》分析方法进行测定。

1.2.3 多环芳烃的测定

(1)标准溶液的配制

准确吸取 0.25 mL PAHs 标准溶液于 50 mL 容量瓶中,正己烷定容,配成 1000 $\mu\text{g}/\text{L}$ 的混合标准储备液,4 $^{\circ}\text{C}$ 保

存。再分别吸取 0.01、0.02、0.05、0.10、0.20、0.50 mL 标准储备液到 10 mL 容量瓶,正己烷分别定容,即配制成为 1、2、5、10、20、50 ng/mL 混合标准工作液,4 °C 保存,备用。

(2) 提取净化

称取试样 1 g(精确至 0.001 g)于 50 mL 离心管中,加 5 mL 氢氧化钾乙醇溶液(临用现配)涡旋混匀后于 70 °C 水浴皂化 3 min。取出冷却至室温,在上述样品中加 4 mL 纯水和 5 mL 正己烷涡旋 2 min,以 10000 r/min 离心 5 min,正己烷提取液待净化。

提前在固相萃取柱上添加约 1 g 无水硫酸镁,分别用二氯甲烷、正己烷各 3 mL 活化固相萃取柱,活化后上样,流速 1.0 mL/min 左右,5 mL 正己烷淋洗,5 mL 二氯甲烷-乙酸乙酯溶液(体积比为 1:1)洗脱,收集洗脱液。洗脱液氮吹至近干之后加 0.2 mL 丙酮-异辛烷溶液(体积比为 1:1)溶解残留物,通过气相色谱-质谱仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)测定。

(3) 仪器工作条件:

色谱条件:升温程序:70 °C 保持 2 min,以 10 °C/min 的速度升温到 250 °C,保持 2 min,以 8 °C/min 的速度升温到 315 °C,保持 5 min,最后以 20 °C/min 的速度升温到 320 °C 并保持 5 min;色谱柱:DB-EUPAH 毛细管柱(20 m×180 μm,0.14 μm);进样口温度:280 °C;载气:高纯氮气(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(electron impact, EI)离子源,电离能量 70 eV,离子源温度 250 °C,四极杆温度 150 °C,传输线温度 280 °C,溶剂延迟 16.5 min,测定方式:选择离子模式(selected ion monitoring, SIM)监测,详见表 1。

1.3 数据处理

采用安捷伦 Mass hunter 工作站软件对数据进行采集、定性和定量分析。所有统计学数据均使用 Origin 2018 软件计算和作图。

2 结果与分析

2.1 煎炸过程中酸价的变化

油脂经过长时间反复煎炸,特别是与空气中的水分和氧气接触时,会发生一系列的水解、聚合等复杂化学反应,从而导致游离脂肪酸等对人体有害的成分含量升高。本研究测定并分析了大豆油和花生油在 0~30 h 的时间范围内加热温度分别为 160、180、200 °C 时酸价的变化情况,如图 1 所示。研究发现加热温度相同时酸价随加热时间增加呈上升趋势,经过 30 h 的煎炸后,大豆油的酸价从 0.21 mg/g 分别增长到 4.39、4.77 和 5.97 mg/g,花生油的酸价从 0.25 mg/g 分别增长到 4.12、5.31 和 6.32 mg/g。相同时间随着煎炸温度升高,酸价迅速增大。酸价增大的

原因除甘油三酯氧化而生成游离脂肪酸,造成上升外,还因为薯条中的水分导致其容易发生水解,而使酸价上升。尽管酸价大幅增长,但在 160 °C 30 h 两种煎炸油脂中酸价均未超过 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》规定的煎炸过程中的植物油限量值(≤ 5 mg/g),这与王澍等^[3]的实验结果相同。大豆油 200 °C 煎炸至 26 h 后才超过限量值,为 5.25 mg/g;花生油 180 °C 煎炸至 28 h 超过限量值(5.13 mg/g),200 °C 煎炸至 26 h 超过限量值(5.92 mg/g)。本研究结果和王澍等^[3]以及李安等^[2]研究酸价变化趋势相同,但是煎炸油酸价超过限量值时煎炸时间及温度都有所不同,这可能与选择的原料油不同有关,也可能与选择的加热方式有关。王澍等^[3]选用棕榈油 180 °C 条件下煎炸 24 h 后超过限量值,在煎炸 36 h 后酸价为 6.84 mg/g。李安等^[2]选用大豆油 220 °C 加热 48 h 时达 6.138 mg/g。

表 1 16 种 PAHs 保留时间及定性/定量离子
Table 1 Retention time and qualitative/quantitative ions of 16 kinds of PAHs

序号	名称	保留时间 /min	定性/定量离子对
1	苯并[c]芘	19.476	213 (20)、215 (70)、216* (100)
2	苯并[a]蒽	22.296	226 (28)、229 (20)、228* (100)
3	环戊并[c,d]芘	22.523	224 (22)、227 (18)、226* (100)
4	蒽	22.585	226 (28)、229 (17)、228* (100)
5	5-甲基蒽	24.077	239 (36)、241 (55)、242* (100)
6	苯并[b]荧蒽	25.994	250 (23)、253 (20)、252* (100)
7	苯并[k]荧蒽	26.064	250 (25)、253 (20)、252* (100)
8	苯并[j]荧蒽	26.156	250 (26)、253 (20)、252* (100)
9	苯并[a]芘	27.218	250 (22)、253 (21)、252* (100)
10	茚并[1,2,3-cd]芘	30.177	274 (20)、277 (20)、276* (100)
11	二苯并[a,h]蒽	31.153	276 (20)、279 (26)、278* (100)
12	苯并[ghi]芘	31.174	274 (25)、277 (23)、276* (100)
13	二苯并[a,i]芘	35.556	300 (46)、303 (25)、302* (100)
14	二苯并[a,e]芘	37.114	300 (21)、303 (27)、302* (100)
15	二苯并[a,i]芘	38.098	300 (18)、303 (25)、302* (100)
16	二苯并[a,h]芘	38.635	300 (21)、303 (24)、302* (100)

注:*为定量离子;括号内为质谱碎片丰度。

2.2 油脂煎炸对多环芳烃的影响

2.2.1 油脂煎炸对苯并[a]芘的影响

大豆油、花生油中苯并[a]芘变化详见图 2,由图 2 可知不同温度煎炸,苯并[a]芘含量随时间变化呈现不规律的波动增长趋势,且温度越高、时间越长,苯并[a]芘含量增加越明显。有学者研究表明在高温条件下,油脂与薯条中的一些成分(如糖类、淀粉等)发生聚合、分解等化学反应加速苯并[a]芘的形成^[25]。实验结果发现,在相同条件下,

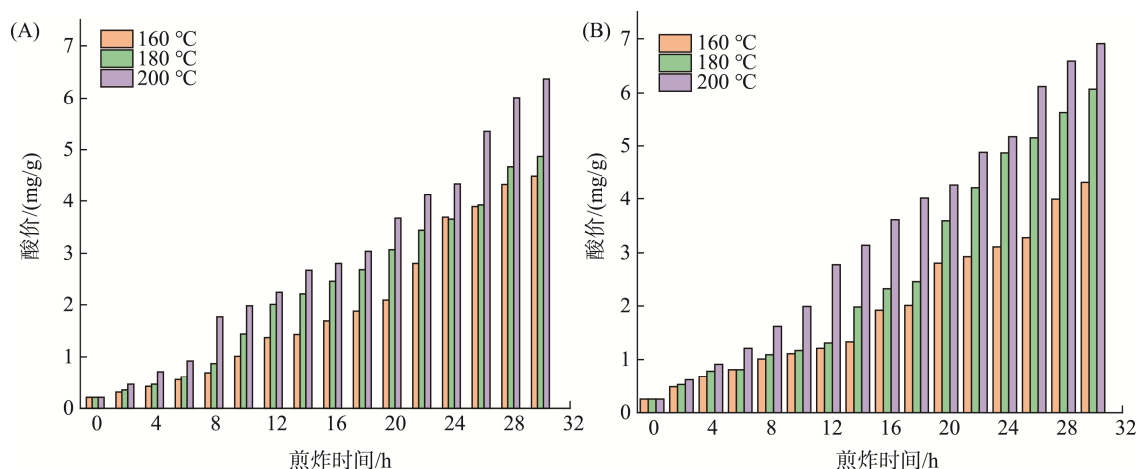
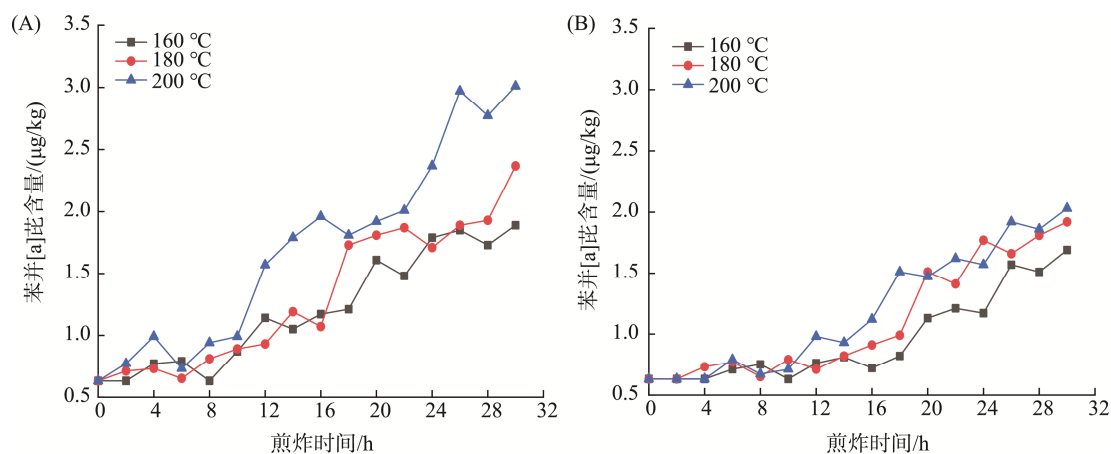


图 1 不同煎炸条件对大豆油(A)和花生油(B)中酸价的影响

Fig.1 Effects of different frying on acid value of soybean oil (A) and peanut oil (B)



注: 绘图时样品未检出的以检出限 $0.63 \mu\text{g}/\text{kg}$ 计算, 下同。

图 2 不同煎炸条件对大豆油(A)和花生油(B)中苯并[a]芘含量的影响

Fig.2 Effects of different frying on benzo [a] pyrene content of soybean oil (A) and peanut oil (B)

大豆油中苯并[a]芘增幅明显大于花生油。经过 30 h 的煎炸, 160、180、200 °C 时大豆油中苯并[a]芘含量从未检出分别增加至 1.89、2.37、3.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 这与石龙凯等^[26]、沈梦瑜^[27]、LIU 等^[28]研究结果相似。而花生油中苯并[a]芘含量从未检出分别增加至 1.69、1.92、2.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。这可能与油脂本身的脂肪酸及抗氧化成分的含量有关。根据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中相关规定, 本研究中检测的所有煎炸油脂中苯并[a]芘含量都符合我国国家标准限量要求($\leq 10 \mu\text{g}/\text{kg}$)。对照欧盟 (EU)No.2023/915 号法规, 食品中 PAHs 最高含量中苯并[a]芘含量 $\leq 2 \mu\text{g}/\text{kg}$ 的规定, 本研究检测用的大豆油经 30 h 煎炸后, 除 160 °C 外其他两种条件苯并[a]芘含量皆超标; 在 200 °C 下煎炸 22 h 时, 苯并[a]芘含量就达到 2.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 花生油只有在 200 °C 下煎炸至 30 h 时, 苯并[a]芘含量达到 2.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 超过限量值。尽管花生油中苯并[a]芘随煎炸时间变化较小, 但是许多学者发现商品用花生油由于加工方

式的原因其原料油中 PAHs 含量较高^[29], 经过长时间煎炸后可能会更高, 本研究因为选取的花生油为家用自制花生油, 原料油本身未检出苯并[a]芘, 因此经过 30 h 煎炸后苯并[a]芘几乎未超过限量值。

2.2.2 油脂煎炸对 PAH4 的影响

图 3 展示大豆油、花生油中 PAH4 含量随温度、时间变化的情况。结果显示 PAH4 的变化规律与苯并[a]芘相似, 也呈现不规律的波动增长趋势, 随着时间的延长、温度的升高 PAH4 含量逐渐增加, 但由于待测物种类增加, PAH4 的变化更明显, 加热 20 h 后花生油波动幅度变小, 3 个加热温度下几乎都是随时间加长 PAH4 含量逐渐增加, 温度越高变化越明显。大豆油不同温度煎炸 30 h PAH4 的含量从原油的 1.89 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 分别增加至 4.21、5.44 和 5.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 含量增加 2~3 倍, 花生油煎炸前未检出 PAH4, 经过 30 h 的煎炸分别增加至 2.77、2.91 和 4.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。与欧盟 (EU)No.2023/915 号法规中 PAH4 限量 $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ 的标准

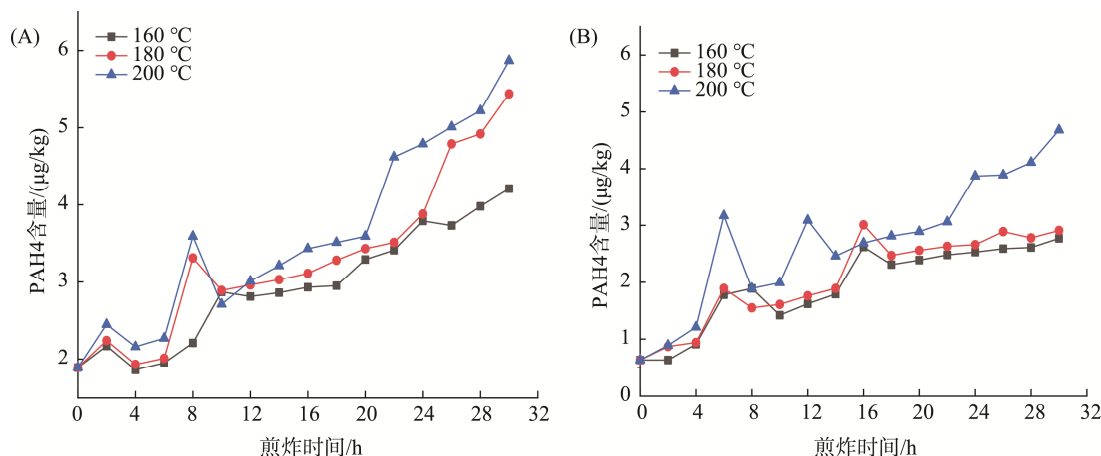


图 3 不同煎炸条件对大豆油(A)和花生油(B)中 PAH4 含量的影响

Fig.3 Effects of different frying on PAH4 content of soybean oil (A) and peanut oil (B)

相比较,本研究选用的两种油脂在 3 个温度条件下 30 h 煎炸后, PAH4 的含量均小于 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 都符合该标准要求。同苯并[a]芘,花生油中 PAH4 增加幅度比大豆油小,其原因可能与油脂中脂肪酸不同有关。XU 等^[30]研究发现油脂中饱和脂肪酸碳链越长, PAH4 增加越明显,不饱和脂肪酸的不饱和程度越高, PAH4 越容易生成。

2.2.3 油脂煎炸对 PAH16 的影响

煎炸温度、时间对 PAH16 含量变化详见图 4。研究结果发现, PAH16 含量随着煎炸时间延长、温度的升高逐渐增加,几乎不再出现苯并[a]芘和 PAH4 的波动变化。由于 PAHs 组分增加至 16 种,不同煎炸条件的变化对其含量的增加更加敏锐。大豆油在不同温度下煎炸 30 h PAH16 的含量从原来的 3.37 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 分别增加至 22.6、27.3 和 36.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 分别增加 6.7、8.1 和 10.7 倍,花生油原料油未检出 PAH16 煎炸 30 h 后 PAH16 分别增加至 13.7、16.5 和 20.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。油脂中的脂肪酸、甘油酯在长时间高温下,容易发

生脱氢、脱羧、侧链断裂和自由基重组,最终促进芳香环的扩增和 PAHs 的形成。尽管花生油中 16 种 PAHs 总量增加幅度比大豆油小,但从实验结果看,无论原料油中是否含 PAHs,经过长时间高温煎炸后都会生成 PAHs,其含量的变化与油脂本身有一定关系,但是主要还是受煎炸条件影响,因此,为控制煎炸油中 PAHs 的生成,在食用煎炸食品时一定要选择合适的煎炸条件,勿过度煎炸。

目前研究油脂中 PAH16 的总量限量的标准很少,但是从本研究的结果看, PAHs 种类越多,煎炸对油脂中 PAHs 的总量影响越大。在长时间的高温条件下煎炸, PAH16 的含量变化较苯并[a]芘及 PAH4 更显著。如果参照食用油中酸价的限量指标判定无论是大豆油还是花生油 200 °C 煎炸 26 h 都超过限量值,大豆油 PAH16 超过 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$,花生油 PAH16 超过 15 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 就应该作为其限量值,但是不同食用油由于 PAH16 本底值有很大差别,要制定食用油中 PAH16 限量值还需进行大量研究,综合参考。

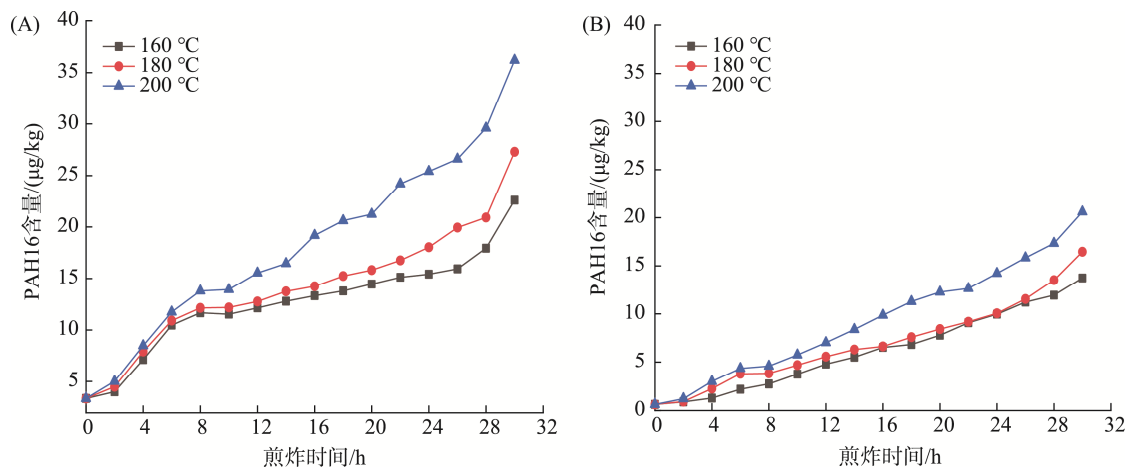


图 4 不同煎炸条件对大豆油(A)和花生油(B)中 PAH16 含量的影响

Fig.4 Effects of different frying on PAH16 content of soybean oil (A) and peanut oil (B)

3 结 论

本研究以大豆油和花生油为研究对象进行了煎炸试验, 考察了不同煎炸温度和时间, 通过对油脂中酸价和 PAHs 含量的检测分析, 结果表明: 加热温度相同时酸价随加热时间增加呈上升趋势, 经过 30 h 的煎炸后, 大豆油的酸价从 0.21 mg/g 增长到 4.39、4.77 和 5.97 mg/g, 花生油的酸价从 0.25 mg/g 增长到 4.12、5.31 和 6.32 mg/g。相同时间随着煎炸温度升高, 酸价迅速增大。相同温度时, 随着煎炸时间的延长, 大豆油和花生油中苯并[a]芘、PAH4、PAH16 含量都呈现明显的上升趋势。煎炸 30 h 后, 大豆油中苯并[a]芘、PAH4、PAH16 含量分别从未煎炸时的未检出、1.89 μg/kg 和 3.37 μg/kg 增加至 1.89~3.01、4.21~5.87 和 22.6~36.2 μg/kg; 花生油中苯并[a]芘、PAH4、PAH16 含量分别从未煎炸时未检出增加至 1.69~2.03、2.77~4.68 和 13.7~20.6 μg/kg。从研究结果看, 同等条件下大豆油变化幅度比花生油大。为降低煎炸油及煎炸食品中 PAHs 的风险, 保证煎炸油脂及煎炸食品的食用安全性, 适度煎炸(即较低温度和较短时间煎炸)是非常必要的。本研究结果也为将来制定食用油中 PAHs 的限量值及煎炸油的废弃限量值提供一定的数据支撑。

参考文献

- [1] 马宇翔, 陆启玉. 食用油煎炸过程中多环芳烃的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 128-135.
MA YX, LU QY. Research progress on polycyclic aromatic hydrocarbons in edible oils during deep-frying process [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 128-135.
- [2] 李安, 哈益明, 李庆鹏, 等. 高温加热大豆油中反式脂肪酸分析及理化指标变化研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 237-242.
LI AN, HA YM, LI QP, *et al.* Detection of trans-fatty acid in soybean oil heated with high temperature and analysis of physical and chemical indicators [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(3): 237-242.
- [3] 王澍, 周玮婧, 刘梦婷, 等. 棕榈油在面制品煎炸过程中的品质变化[J]. 食品工业, 2022(2): 110-114.
WANG S, ZHOU WJ, LIU MT, *et al.* The quality change of palm oil in the process of frying flour products [J]. The Food Industry, 2022(2): 110-114.
- [4] 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.
- [5] 金龙, 黄德伟, 程慧琳, 等. 间歇炸制油循环次数对炸鸡腿风味和多环芳烃形成的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 267-273.
JIN L, HUANG DW, CHENG HL, *et al.* Effect of intermittent deep fat frying cycles on the flavor and the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried chicken drumsticks [J]. Food Science, 2025, 46(8): 267-273.
- [6] 王赛, 杨冠华, 任晶晶, 等. 4 种亲水多糖对油炸调理鸡排品质的影响[J]. 肉类研究, 2021, 35(2): 13-18.
WANG S, YANG GH, REN JJ, *et al.* Effects of four hydrophilic polysaccharides on the quality of fried prepared chicken cutlets [J]. Meat Research, 2021, 35(2): 13-18.
- [7] 万莉, 龙超, 向琴, 等. 4 种药食两用物质多环芳烃污染状况及膳食摄入健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 151-158.
WAN L, LONG C, XIANG Q, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination and health risk assessment of dietary intake of 4 kinds of medicinal and edible substances [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 151-158.
- [8] 朱鹏崑, 张娜维, 刘雅莉, 等. 降雨强度对土壤中不同形态多环芳烃淋溶过程的影响研究[J]. 环境科学学报, 2025: 1-10. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2025.0127
ZHU PK, ZHANG NW, LIU YL, *et al.* Impact of rainfall intensity on the leaching process of different forms of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025: 1-10. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2025.0127
- [9] 鞠香, 陈克云, 李海霞, 等. 同位素稀释-气相色谱-串联质谱法同时测定肉制品中 16 种欧盟优控多环芳烃[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 179-187.
JU X, CHEN KY, LI HX, *et al.* Simultaneous determination of 16 kinds of European priority polycyclic aromatic hydrocarbons in meat products by isotope dilution-gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 179-187.
- [10] MALLAH MA, CHANGXING L, MALLAH MA, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview [J]. Chemosphere, 2022, 296: 133948.
- [11] SHUKLA S, KHAN R, PROSUN B, *et al.* Concentration, source apportionment and potential carcinogenic risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in roadside soils [J]. Chemosphere, 2022, 292(4): 133413.
- [12] 王玉娇, 冯馥慧, 冯胜楠, 等. 液相色谱-串联质谱法定量检测油脂中 16 种多环芳烃[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 20-30.
WANG YJ, FENG XH, FENG SN, *et al.* Quantitative determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in fats and oils by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 20-30.
- [13] SINGH L, AGARWAL T, SIMAL GJ. Summarizing minimization of polycyclic aromatic hydrocarbons in thermally processed foods by different strategies [J]. Food Control, 2023, 146: 109514.
- [14] 刘宇星, 刘蕙萍, 宋阳, 等. 食用油中持久性有机污染物的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(4): 18-20, 50.
LIU YX, LIU HP, SONG Y, *et al.* Research progress on persistent organic pollutants in edible oils [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(4): 18-20, 50.
- [15] 方丽, 江晓, 李雪莹, 等. 气相色谱-三重四极杆质谱法同时测定乌梅中 25 种多环芳烃及其污染源分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 74-82.
FANG L, JIANG X, LI XY, *et al.* Simultaneous determination of 25 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons in mume fructus by gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry and their pollution source analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(2): 74-82.

- [16] 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.
- [17] 陈焱, 王翔宇, 尤梦圆, 等. 基于现行标准实施后市售一级大豆油品质分析[J]. *中国油脂*, 2025, 50(1): 21–25.
CHEN Y, WANG XY, YOU MY, *et al.* Quality analysis of commercially available grade 1 soybean oils after the national standard revision [J]. *China Oils and Fats*, 2025, 50(1): 21–25.
- [18] 冯桂蓉, 李红, 黄先亮, 等. 基于色谱技术的食品中多环芳烃检测方法研究进展[J]. *分析测试学报*, 2024, 43(12): 2031–2042.
FENG GR, LI H, HUANG XL, *et al.* Advance in chromatographic techniques for polycyclic aromatic hydrocarbons detection in food [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2024, 43(12): 2031–2042.
- [19] 钟冬莲, 喻宁华, 王玫鹃, 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 DL, YU NH, WANG MJ, *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.
- [20] 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 CB, WANG ZX, DONG FG, *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.
- [21] 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.
- [22] 程莉, 甘源, 唐晓琴, 等. 油炸食品中多环芳烃污染状况分析及健康风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(15): 1909–1913.
CHENG L, GAN Y, TANG XQ, *et al.* Pollution analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried food [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2021, 31(15): 1909–1913.
- [23] 刘海兰, 刘玉兰, 陈刚, 等. 油脂煎炸过程质量安全风险研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(11): 103–107.
LIU HL, LIU YL, CHEN G, *et al.* Review on quality and safety risks of frying oil [J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(11): 103–107.
- [24] 王兴国, 金青哲. 煎炸过程的科学管理及煎炸油品质控制[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(1): 1–5.
WANG XG, JIN QZ. Scientific management of frying process in catering industry and quality control of frying oil [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(1): 1–5.
- [25] IWEGBUE CMA, OSIJAYE KO, IGBUKU UA, *et al.* Effect of the number of frying cycles on the composition, concentrations and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetable oils and fried fish [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 94: 103633.
- [26] 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 LK, LIU YL, WANG YH, *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.
- [27] 沈梦瑜. 煎炸薯条的大豆油中四种多环芳烃的化学转化和物理迁移机制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
SHEN MY. Study on chemical conversion and physical migration mechanisms of four polycyclic aromatic hydrocarbons in soybean oil during frying french fries [M]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [28] LIU XF, SHEN MY, XU XX, *et al.* Study on migration behavior and mechanism of strong carcinogenic PAHs in oil to fume during frying using stable isotope method [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 187: 1508–1516.
- [29] JI JM, ZHANG YX, SUN SD, *et al.* Concentrations of the 16 US EPA PAHs in 86 vegetable oil samples [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2022, 42(10): 7336–7353.
- [30] XU XX, LIU XF, WANG S, *et al.* Relationship between PAH4 formation and thermal reaction products in model lipids and possible pathways of PAHs formation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133374.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)