

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.01.019

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中苯并(a)芘含量的应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 150-157.

LI W T, LIU L, XIA J E, 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.

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中苯并(a)芘含量的应用

李文廷¹, 刘玲^{1,2}, 夏加恩³, 董玉英¹, 冉亚莉¹, 赵丽¹✉

(1. 昆明市疾病预防控制中心, 云南 昆明 650228;

2. 昆明医科大学 公共卫生学院, 云南 昆明 650500;

3. 昆明市东川区疾病预防控制中心, 云南 昆明 654100)

摘要: 建立优化的分子印迹固相萃取超高效液相色谱法测定植物油中苯并芘的检测方法。实验过程中通过对样品不同固相萃取净化效能、最佳检测波长、流动相体系及色谱柱使用的考察, 结果表明, 分子印迹固相萃取净化柱比较适合植物油样品的前处理萃取及净化, 最佳检测波长为激发波长 365 nm 和发射波长 410 nm, 苯并芘色谱峰在此条件下具有较高的响应值和信噪比, 在 90%乙腈-10%水流动相体系下, 目标峰具有较好的分离效果, 采用 150 mm 的短柱子能有效提高工作效率。苯并芘在浓度 0.3~20 μg/L 范围内具有良好的线性关系, 相关系数大于 0.999 9, 方法检出限为 0.05 μg/kg, 定量限为 0.10 μg/kg, 3 个添加浓度水平的平均回收率为 87.6%~95.9%, 相对标准偏差为 1.08%~2.16%。实际样品检测中, 苯并芘的检出率为 39.0%, 超标率为 2.4%, 合格率为 97.6%。该优化方法灵敏度高, 操作便捷, 快速准确, 可适用于植物油中苯并芘的批量检测及污染监测情况分析。

关键词: 苯并芘; 分子印迹柱; 植物油; 固相萃取; 高效液相色谱

中图分类号: TS252.7 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)01-0150-08

Optimization of Molecularly Imprinted Solid Phase Extraction-High Performance Liquid Chromatography and Its Application in Determination of Benzo (a) pyrene in Vegetable Oil

LI Wen-ting¹, LIU Ling^{1,2}, XIA Jia-en¹, DONG Yu-ying¹, RAN Ya-li¹, ZHAO Li¹✉

(1. Kunming Center for Disease Control and Prevention, Kunming, Yunnan 650228, China; 2. School of Ethnic Medicine, Yunnan Minzu University, Kunming, Yunnan 650500, China; 3. Kunming Dongchuan District Center for Disease Control and Prevention, Kunming, Yunnan 650228, China)

收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 昆明市卫生科技人才培养项目(2022-SW(带头)-16); 昆明市卫生科研课题(2020-12-06-001); 昆明市卫生科研课题(2022-12-06-001)

Supported by: Kunming Health Science and Technology Personnel Training Project (No. 2022-SW (leader)-16); Kunming Health Scientific Research Project (No.2020-12-06-001); Kunming Health Scientific Research Project(No.2022-12-06-001)

作者简介: 李文廷, 男, 1982 年出生, 硕士, 副主任技师, 研究方向为食品的理化检验及质量控制。E-mail: lwt0883@qq.com.

通讯作者: 赵丽, 女, 1984 年出生, 硕士, 副主任技师, 研究方向为水和食品中有机污染物监测。E-mail: 417640514@qq.com.

Abstract: An optimized method for the determination of benzo(a)pyrene in vegetable oil by molecular imprinting solid phase extraction with ultra-high performance liquid chromatography was established. During the experiment, through the investigation of different solid-phase extraction purification efficiency, optimal detection wavelength, mobile phase system and chromatographic column use, the results showed that the molecularly imprinted solid phase extraction purification column was more suitable for pretreatment extraction and purification of vegetable oil. The optimal detection the excitation wavelength and the emission wavelength were 365 nm and 410 nm, respectively. Under these conditions, the benzo(a)pyrene chromatographic peak had high response value and signal-to-noise ratio. Under the mobile phase system of 90% acetonitrile-10% water, the target peak had a good separation effect. Using 150 mm short columns can effectively improve work efficiency. Benzo(a)pyrene had a good linear relationship in the concentration range of 0.3~20 $\mu\text{g/L}$, and the correlation coefficient was greater than 0.999 9. The detection limit and quantitative limit of benzo(a)pyrene determination method were 0.1 $\mu\text{g/kg}$ and 0.3 $\mu\text{g/kg}$, respectively. The average recoveries of three added concentrations were 87.6%~95.9%, and the relative standard deviations were 1.08%~2.16%. In the actual sample detection, the detection rate of benzo(a)pyrene, the exceeding rate and the qualified rate were 39.0%, 2.4%, and was 97.6%, respectively. This optimization method is sensitive, convenient, rapid and accurate, and can be used for batch detection of benzo(a)pyrene in vegetable oil and analysis of pollution monitoring.

Key words: benzo(a)pyrene; molecular imprinting column; vegetable oils; solid phase extraction; high performance liquid chromatography

食用植物油是居民膳食的重要组成部分，也是补充人体所需营养物质的重要来源^[1-2]。据报道中国居民平均每标准人日食用植物油的摄入量为 37.1 g，食用油与人们的生活、健康息息相关，随着经济社会的发展及人们营养健康意识的增强，植物油在人体健康与疾病预防方面的影响受到极大重视，食用油的质量和安全性问题主要来自油料作物的种植、收获、储存、加工和使用等环节，特别是食用油品在加工环节的污染状况引发人们的广泛关注^[3-5]。

苯并(a)芘[benzo(a)pyrene]为多环芳烃类化合物，是世界上排名前三的强烈致癌性物质。苯并芘是由脂肪、胆固醇、蛋白质和碳水化合物等在高温烘烤、干燥、熏制和烹调（煎、炸、烤、炒等）加工过程中，发生热裂解、环化和聚合等反应形成，主要通过饮食进入人体，对人体很多器官例如眼睛，乳腺等造成危害^[6-10]。我国标准 GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》^[11]规定了植物油中苯并(a)芘的限量为 10 $\mu\text{g/kg}$ 。许多植物油如芝麻油、亚麻籽油、菜籽油等加工工艺采用压榨法需要高温炒籽，若温

度控制不佳就易导致苯并(a)芘超出国家限量标准^[12-13]。地沟油中苯并芘的检出率及超标率均保持高位值，并且地沟油流入市场的事件也是时有发生^[14]，因此，对于食用植物油中苯并(a)芘的检测尤为重要，保障居民对植物油食用的安全性。

目前，苯并芘的检测方法主要有荧光分光光度法、高效液相色谱、气相色谱-质谱联用、液相色谱-质谱联用法等^[15-22]，荧光分光光度法的样品前处理步骤较为复杂，灵敏度较低，质谱法中苯并芘的碎片特征离子峰响应值较低，不易进行定性定量，而液相方法具有较高的灵敏度及较便捷的样品处理方法。食品安全国家标准方法 GB 5009.27—2016《食品中苯并(a)芘的测定》^[23]推荐的检测方法主要是利用中性氧化铝固相萃取小柱或分子印迹固相萃取小柱对样品进行净化。中性氧化铝固相萃取柱对于其他种类的样品较为理想，但通过实验分析后，对于食用植物油的处理仍存不足之处，样品过柱经氮吹或旋转蒸发浓缩时，油脂较难去除，耗时较多，影响后续上机测定分析，对于批量样品的监测较难开展，而使用分子印迹固相萃取净化柱进行样品前处理，具有

操作便捷, 有机试剂消耗较少, 省时高效, 样品处理后净化效果相对比较高, 干扰色谱峰较少。有文献报道采用分子印迹固相萃取小柱对植物油苯并芘的萃取净化效果验证^[24], 通过两种固相萃取净化柱比对植物油中苯并芘的净化效能^[25], 使用串联固相萃取净化小柱去除油脂干扰成分研究^[26], 而本文针对以上方法中存在的问题缺点以及结合实验分析过程中检测技术进行了研究, 通过两种固相萃取净化效果分析, 最佳检测波长的选择, 多种流动相配比分离效果研究以及不同规格色谱柱选择的考察, 最终确定相关色谱技术的优化条件, 针对植物油样品建立具有分析简单、高效便捷、准确性好、回收率高等优点测定苯并(a)芘的方法, 使其应用于特别是批量的食用植物油样品中苯并(a)芘的准确定量, 对相关基层检测部门具有指导意义, 为政府职能部门提供技术及数据支持, 保障居民的食品安全及大众健康。

1 材料与方 法

1.1 实验样品

本实验样品: 市售抽查样品, 包括 30 件菜籽油、5 件花生油、4 件芝麻油、1 件玉米油、1 件核桃油, 共计 41 件, 其中 83% 的样品采集于农贸市场小作坊制作成品。

1.2 仪器与试剂

超高效液相色谱仪 U3000: 美国 ThermoFisher 公司; 分析天平 XS205DU: 瑞士 Mettler Toledo 公司; 智能台式高速冷冻离心机 3H16RI: 湖南赫西仪器装备有限公司。

标准物质苯并芘: 中国计量研究院; 中性氧化铝柱和分子印迹柱: 普瑞邦(中国)公司; 甲醇和乙腈均为色谱纯。

1.3 色谱条件

色谱柱为 Agilent Eclipse Plus C18 柱(4.6 mm×150 mm, 5.0 μm), 柱温为 35 °C, 激发波长: 365 nm, 发射波长 410 nm, 流动相 A 相: 乙腈, B 相: 水, 流动相配比为 90%乙腈+10%水, 流速为 1.0 mL/min, 进样体积为 20 μL, 分析运行时间为 10.0 min。

1.4 实验方法

1.4.1 标准溶液配制

乙腈中苯并(a)芘标准使用液(100 μg/L): 准确定量量取苯并(a)芘标准物质于 100 mL 容量瓶中, 用乙腈定容, 用于标准曲线制作实验分析, 避光保存在 0~5 °C 的冰箱中。

1.4.2 样品前处理

称取 0.400 g 植物油样品, 加入 5.0 mL 正己烷并旋涡混合 0.5 min, 采用苯并(a)芘分子印迹柱进行固相萃取净化, 先依次用 5.0 mL 二氯甲烷及 5.0 mL 正己烷将柱子活化, 样品溶液转移到柱子, 待液面降至柱床时, 用 6.0 mL 正己烷淋洗柱子, 弃去流出液。用 6.0 mL 二氯甲烷洗脱并收集, 接着在 40 °C 下氮气吹干, 准确吸取 1.0 mL 乙腈涡旋复溶 0.5 min, 过 0.22 μm 滤膜后待测。

1.5 数据分析

采集到的数据使用 Chromeleon 7.Ink 进行定性定量分析, 样品分析时通过样品色谱峰保留时间进行定性, 通过峰面积进行定量。

2 结果与分析

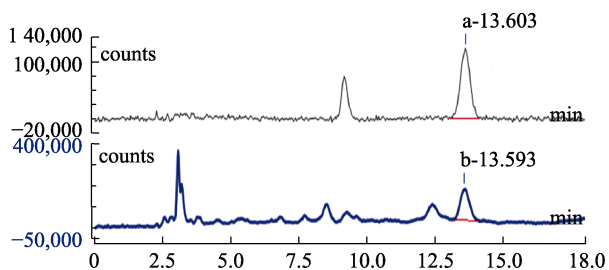
2.1 净化方法的选择

进行两种净化柱净化效果的考察, 样品经正己烷溶解过中性氧化铝柱, 洗脱后分别采取直接氮吹法和减压旋转蒸发法两种方法进行浓缩, 经 1 h 长时间的浓缩均较难将油脂彻底去除, 经乙腈复溶后, 提取效果欠佳, 整个前处理步骤所需溶剂及处理时间均较多, 严重影响工作效率, 不适宜批量样品的处理。苯并芘分子印迹柱净化实验则较为高效, 且净化效果相对较为理想, 样品通过柱子净化洗脱后, 可直接进行氮吹浓缩, 10 min 即可近干, 加入乙腈溶解过滤膜后即可上机测定分析, 所需试剂及处理时间均较少, 显著提高了工作效率, 特别适用于大批量样品的处理, 因此采取苯并芘分子印迹柱净化方法进行样品前处理, 净化效果如图 1 所示。

2.2 检测波长的考察

根据文献查阅, 目前苯并芘的检测波长各异, 通过选择不同的激发波长(Excitation wavelength,

Ex) 和发射波长 (Emission wavelength, Em), 在相同色谱条件对 10.0 μg/L 苯并芘标准溶液进样 1.0 μL 进行测定考察分析, 如表 1 实验数据显示, 苯并芘的响应强度具有较大差异, 在 Ex / Em 384 nm/406 nm 的条件下, 虽然具有较大响应强度, 但也具有较高的噪声值, 进而使信噪比降低, 综合信噪比数据, 选择 Ex / Em 365 nm/410 nm 为苯并芘的测定波长, 具体色谱图见图 2。

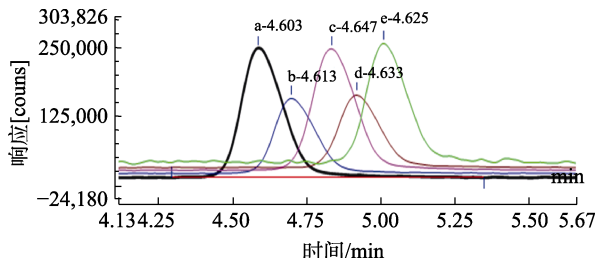


注: a 为加标样品经分子印迹柱净化, b 为加标样品经中性氧化铝净化

Note: a is the spiked sample purified by molecular blotting column, and b is the spiked sample purified by neutral alumina

图 1 加标样品经固相萃取净化后的色谱图

Fig.1 Chromatograms of spiked samples purified by solid phase extraction



注: a 为 Ex/Em 365/410 色谱图, b 为 Ex/Em 370/425 色谱图, c 为 Ex/Em 375/410 色谱图, d 为 Ex/Em 375/420 色谱图, e 为 Ex/Em 384/406 色谱图

Note: a is the chromatogram of Ex/Em 365/410, b is the chromatogram of Ex/Em 370/425, c is the chromatogram of Ex/Em 375/410, d is the chromatogram of Ex/Em 375/420 and e is the chromatogram of Ex/Em 384/406.

图 2 不同检测波长的色谱图

Fig.2 Chromatogram at different detection wavelengths

表 1 不同检测波长的色谱参数

Table 1 Chromatographic parameters for different detection wavelengths

激发波长/ nm	发射波长/ nm	峰面积/ (counts*min)	峰高/counts	信噪比
365	410	40 483	236 195	228.2
375	410	38 969	220 217	228.6
384	406	35 692	216 386	36.2
370	425	23 132	136 431	175.2
375	420	22 891	130 705	138.0

2.3 流动相考察

分别对流动相组成和配比进行考察, 如图 3 所示, 当有机相为乙腈时, 随着有机相比例增加, 苯并芘色谱峰保留时间逐渐变小。当有机相为甲醇时, 苯并芘的分离情况相对较差, 但混合乙腈时有较大改善, 具体实验数据见表 2。

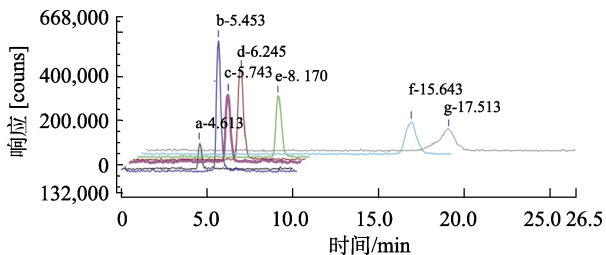
改变流动相配比情况进行目标化合物分离效果分析, 80%甲醇洗脱的色谱峰已经出现较大峰宽, 峰型出现前沿及不对称情况, 70%甲醇洗脱时已没有明显的色谱峰显示, 60%乙腈和 60%甲醇进行冲洗, 未检测到色谱峰, 根据色谱图出峰情况分析, 从图中可以看出, 乙腈作为流动相比较适合苯并芘的洗脱, 具有较高的响应, 甲醇作为洗脱流动相未有理想的洗脱效果, 因此选择 90%乙腈-10%水作为苯并芘的洗脱流动相。具体谱图情况如图 3 所示。

由于样品基质较为复杂, 从样品加标回收实验的色谱图图 4 可以看出, 前期有较大的溶剂杂质峰, 若再增加有机相的比例, 目标峰和杂质峰将会重叠, 达不到目标峰的分离效果, 所以不适合用纯的有机相进行苯并芘的洗脱。

表 2 流动相考察

Table 2 Mobile phase inspection

有机相 比例/%	流动相配比									
	90%乙腈	70%甲醇-20%乙腈	80%甲醇-10%乙腈	90%甲醇	80%乙腈	70%乙腈	80%甲醇	70%甲醇	60%甲醇	60%乙腈
甲醇	0	70	80	90	0	0	80	70	60	0
乙腈	90	20	10	0	80	70	0	0	0	60
水	10	10	10	10	20	30	20	30	40	40
保留时间/min	4.61	5.51	5.82	6.31	8.25	15.6	17.6	60.12	未出峰	未出峰



注: a 为 90%乙腈流动相色谱图, b 为 70%甲醇-20%乙腈流动相色谱图, c 为 80%甲醇-10%乙腈流动相色谱图, d 为 90%甲醇流动相色谱图, e 为 80%乙腈流动相色谱图, a-e 的分析时间均为 10min, f 为 70%乙腈流动相色谱图, g 为 80%甲醇流动相色谱图。

Note: a is the chromatogram of 90% acetonitrile as mobile phase, b is the chromatogram of 70% methanol-20% acetonitrile, c is the chromatogram of 80% methanol-10% acetonitrile, d is the chromatogram of 90% methanol-10% acetonitrile, e is the chromatogram of 80% acetonitrile, the analysis time of a-e is all 10min, f is the chromatogram of 70% acetonitrile, g is the chromatogram of 80% methanol.

图 3 不同流动相的色谱图

Fig.3 Chromatogram of different mobile phases

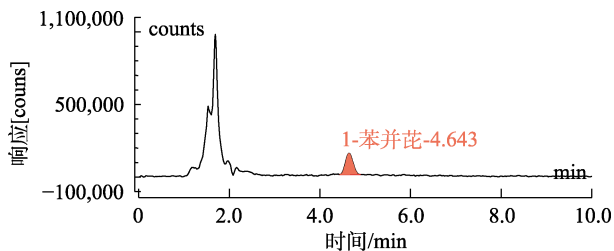


图 4 样品加标回收色谱图

Fig.4 Standard-added recovery chromatogram

2.4 色谱柱选择

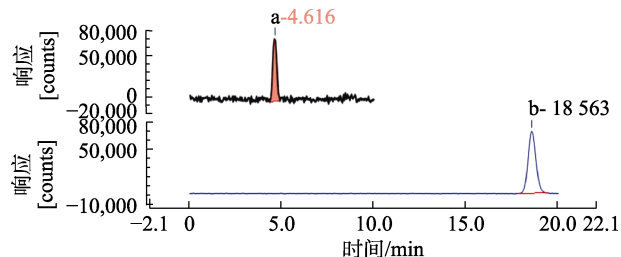
分别考察了采用 Phenomenex C18 柱(4.6 mm×250 mm, 5.0 μm) 250 mm 及 Agilent Eclipse Plus C18 柱(4.6 mm×150 mm, 5.0 μm) 对样品进行检测分析情况,根据检测结果分析不同色谱柱柱效,使用相同的流动相条件进行洗脱时,短柱子能有效提高工作效率,减少试剂的使用量,经济环保。如图 5 显示,色谱峰保留时间具有较大差异,所以选择 150 mm 的柱子进行实验分析。

2.5 方法学考察

2.5.1 线性关系

用乙腈将苯并芘标准使用液稀释制备成浓度为 0.3、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0 μg/L 的标准系列溶液,在上述条件下进行测定,以浓度 X 为横坐标、峰面积 Y 为纵坐标绘制标准曲线进

行线性回归,在 0.3~20 μg/L 范围内具有良好的线性关系,线性方程为 $y=6\ 640.404\ 4x+0.301\ 7$,相关系数 $r=0.999\ 9$ 。标准曲线色谱图重叠图见图 6 所示,保留时间标准偏差为 0.35%,说明重复性较稳定,以 3 倍信噪比计算得方法检出限 0.05 μg/kg,以 10 倍信噪比得方法定量限 0.10 μg/kg,满足实验室检测定量要求。



注: a 为 150mm C18 柱色谱图, b 为 250mm C18 柱色谱图

Note: a is the chromatogram of 150mm C18 column, b is the chromatogram of 250mm C18 column

图 5 不同柱长的分离色谱图

Fig.5 Separation chromatograms of different column lengths

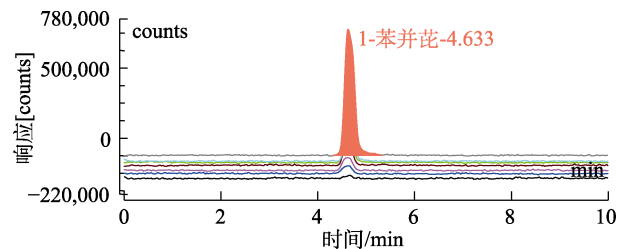


图 6 标准曲线色谱重叠图

Fig.6 Standard curve chromatogram overlay

2.5.2 方法回收率

选取苯并芘本底值未检出的样品,进行分子印迹柱净化方式的加标回收实验,加入标准物质使浓度为 1.0、5.0、10.0 ng/mL,按照样品前处理条件进行处理并上机测定,每个添加浓度做 6 个平行实验,方法的平均回收率为 87.6%~95.9%,RSD 为 1.08%~2.16%,数据见表 3,实验数据表明分子印迹柱净化方法具有较高的回收率,相对标准偏差较小,处理植物油中苯并芘较为理想。

表 3 苯并芘的加标回收率和精密度 (n=6)

Table 3 Scaling recovery rate and precision of benzopyrene (n=6)

净化柱	加标 1.0 ng/mL		加标 5.0 ng/mL		加标 10.0 ng/mL	
	回收率	RSD	回收率	RSD	回收率	RSD
分子印迹柱	87.6	2.16	91.3	1.08	95.9	1.14

2.5.3 方法重复性

选取苯并芘本底值检出的样品进行重复性实验分析,精确称取样品6份,按照样品前处理条件进行实验分析,计算相对标准偏差作为方法的精密度,精密度为1.13%,表明实验方法的重复性较强。检测数据见表4。

表4 苯并芘的精密度(n=6)
Table 4 Precision of benzopyrene (n=6)

名称	序号						RSD/%
	1	2	3	4	5	6	
苯并芘/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	2.8	2.75	2.77	2.8	2.81	2.84	1.13

2.6 实际样品检测

按照上述实验方法对市场销售的41份样品进行检测,检出16份,检出率为39.0%。其中菜籽油检出为13份,菜籽油检出率为43.3%,占检出样品的81.2%;花生油、芝麻油和核桃油各检出1份,分别占检出样品的6.2%。散装样品检出9份,散装样品检出率为47.4%,占检出样品的56.2%;预包装样品检出7份,预包装样品检出率为38.9%,占检出样品的43.8%。根据国家标准GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》规定,植物油中苯并(a)芘的限量为10 $\mu\text{g}/\text{kg}$,共计1份样品超过标准限值,超标率为2.4%。检测结果说明散装植物油的检出率比预包装的高,菜籽油的检出率远高于其它类型的植物油,超标的样品为榨油小作坊制造的散装菜籽油。实验测定结果表明,所采集的植物油合格率为97.6%,整体上植物油的食用较为安全。

3 结论


通过优化的分子印迹固相萃取超高效液相色谱检测方法对植物油中苯并(α)芘含量进行检测分析,实验结果表明,分子印迹固相萃取柱更加适合处理植物油样品,样品经分子印迹柱萃取净化后干扰基质较少,采用优化的检测波长及流动相条件,苯并芘具有较好的色谱峰响应值及信噪比,选择短程柱子能有效提高工作效率。该方法具有回收率高,精密度好,结果稳定,操作过程便捷,所需时间及试剂均较少,对环境比较友

好,便于提高日常检测工作效率,更加满足于当前快节奏、多任务和样品量多的检测要求,适用于食用植物油中苯并芘的批量检测及污染监测情况分析。但该方法中所使用的固相萃取柱存在成本问题,后续可开展液液萃取样品中苯并芘的研究,减少检测成本的投入,更加简化样品的前处理步骤,提高工作效率。

参考文献:

- [1] 邓莉,何静仁,何毅,等.气相色谱-质谱联用法测定植物油中脂肪酸组成[J].中国调味品,2019,44(6):157-159+167.
DENG L, HE J R, HE Y, et al. Determination of fatty acid composition in vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry[J]. China Condiment, 2019, 44(6): 157-159+167.
- [2] 景璐璐,马传国,闫亚鹏.植物油中生物活性物质及其营养特性概述[J].中国油脂,2021,46(12):56-61.
JING L L, MA C G, YAN Y P. Overview on bioactive substances in vegetable oil and their nutritional characteristics[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(12): 56-61.
- [3] 余盖文,史训旺,黄庆德,等.浅析食用油脂中苯并芘的产生来源及控制措施[J].粮食与油脂,2019,32(10):82-84.
YU G W, SHI X W, HUANG Q D, et al. Analysis on the source and control measures of benzopyrene in edible oils and fats[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(10): 82-84.
- [4] 陈冬兰,石叶蓉,陈晓岚.高效液相色谱法测定食用油中苯并(a)芘[J].现代农业科技,2018(21):254+256.
CHEN D L, SHI Y R, CHEN X L, et al. Determination of Benzo (a)pyrene in edible oil by high performance liquid chromatography[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(21): 254+256.
- [5] 杨朝慧,吴炜亮,张朵,等.2015—2020年我国食用植物油质量安全风险因素分析[J].中国油脂,2021,46(12):69-78.
YANG Z H, WU W L, ZHANG D, et al. Quality and safety risk factors of edible vegetable oil in China from 2015 to 2020[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(12): 69-78.
- [6] 赵亮,牛宏亮,杨金部,等.不同油籽生产工艺中苯并芘含量变化研究[J].食品与发酵科技,2020,56(4):26-31.
ZHAO L, NIU H L, YANG J B, et al. Study on the change of benzopyrene content in different oilseed production processes[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2020, 56(4): 26-31.
- [7] 刘笑笑,张菁菁,吴福祥,等.食用油中苯并[α]芘净化技术的优化及高效液相检测方法的建立[J].甘肃科技,2019,35(4):78-81.
LIU X X, ZHANG Q Q, WU F X, et al. Optimization of purification technology of benzo [α] pyrene in edible oil and establishment of HPLC detection method[J]. Gansu Science and

- Technology, 2019, 35(4): 78-81.
- [8] 刘霞. 高效液相色谱法测定食用植物油中苯并(a)芘含量的研究[J]. 现代食品, 2020(11): 200-202.
LIU X. Determination of Benzo (a) pyrene in edible vegetable oil by HPLC[J]. Modern Food, 2020(11): 200-202.
- [9] 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 Y J, WANG R X, LI S G. Review on the sources and reducing strategies of benzo(a)pyrene in foods[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(2): 72-75.
- [10] 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 R Z, WU H L, WANG J. Status of benzopyrene pollution and its biotoxic effects[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition) 2019, 38(3): 49-54.
- [11] 国家卫生和计划生育委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard- Limits of contaminants in food: GB 2762—2017[S]. Bei Jing: China Standard Press, 2017.
- [12] 江露, 汪善良. 反相高效液相色谱法测定植物油中苯并芘的研究[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(5): 91-94.
JIANG L, WANG S L. Reversed phase high performance liquid chromatography method was developed for determination of benzopyrene in vegetable oil[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(5): 91-94.
- [13] 金雪峰, 薛昆鹏, 任兴发, 等. 串联分子印迹固相萃取-高效液相色谱法测定食用油中苯并(a)芘[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2697-2701.
JIN X F, XUE K P, REN X F, et al. Determination of benzo(a) pyrene in cooking oil by tandem molecularly imprinted solid phase extraction-high performance liquid chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(9): 2697-2701.
- [14] 卢晓蕊, 班楠, 崔杉, 等. 食用植物油抽检过程质量控制措施[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(19): 7813-7817.
LU X R, BAN N, CUI S. Quality control measures for sampling process of edible vegetable oil[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(19): 7813-7817.
- [15] 李单单. 超高效液相色谱法测定秋葵籽油中苯并芘的含量[J]. 食品安全导刊, 2020(34): 64-67.
LI D D. Determination of benzopyrene in okra seed oil by ultra-high performance liquid chromatography[J]. China Food Safety, 2020(34): 64-67.
- [16] 黄丹丹, 段云鹏, 付滔, 等. 评定高效液相色谱法测定植物油中苯并芘的不确定度[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 7011-7014.
HUANG D D, DUAN Y P, FU T, et al. Evaluate the uncertainty of determination of benzo (a) pyrene in vegetable oil by high performance liquid chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(20): 7011-7014.
- [17] 文永平, 武怡, 雷英杰, 等. 高效液相色谱-荧光法测定食用油中苯并(a)芘残留量[J]. 中国油脂, 2021, 46(11): 99-103.
WEN Y P, WU Y, LEI Y J, et al. Determination of benzo(a) pyrene residues in edible oil by HPLC-fluorescence method[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(11): 99-103.
- [18] 林亚楠, 李诗言, 崔益玮, 等. 分子印迹固相萃取/液-质谱联用法测定烟熏鲟鱼中苯并芘[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 251-257.
LIN Y N, LI S Y, CUI Y W, et al. Determination of Benzo[a]pyrene in smoked sturgeon (acipenser sinensis) using molecular-imprinted solid-phase extraction liquid chromatography tandem mass spectrometry method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(3): 251-257.
- [19] 王丽君, 禹洁, 周佳, 等. 分子印迹固相萃取柱-HPLC 测定植物油中苯并芘[a]的含量[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(2): 112-116.
WANG L J, YU J, ZHOU J, et al. Determination of Benzopyrene [a] in vegetable oil by molecular imprinting column and HPLC[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2020, 56(2): 112-116.
- [20] 高玮, 邓智辉. 检测食品中苯并芘的方法研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(8): 69-73.
GAO W, DENG Z H. Study on test method of benzopyrene in food[J]. Grain science and technology and economy, 2018, 43(8): 69-73.
- [21] 彭小东, 王欢, 李红洲, 等. 液相萃取-反相高效液相色谱法联用测定植物油中的苯并芘[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 112-114.
PENG X D, WANG H, LI H Z, et al. Determination of benzopyrene in vegetable oil by liquid-phase extraction-RP-HPLC[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(10): 112-114.
- [22] 王邱, 刘德群, 周铭林, 等. 高效液相色谱法对食品中苯并芘含量测定的不确定度评定[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 173-179.
WANG Q, LIU D Q, ZHOU M L, et al. Uncertainty evaluation of benzopyrene determination in foods by HPLC[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29 (1): 173-179.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定: GB 5009.27—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard- Determination of benzo(a)pyrene in food: GB 5009.27—2016[S]. Bei Jing: China Standard Press, 2016.
- [24] 许蓓蓓, 王振涛, 程晓宏, 等. 分子印迹固相萃取小柱-高效液相色谱法测定植物油中苯并(a)芘[J]. 福建分析测试, 2018,

- 27(5): 30-33.
- XU B B, WANG Z T, CHENG X H, et al. Determination of Benzo (a) pyrene in vegetable oil combined molecularly imprinted solid phase extraction microcolumn with HPLC[J]. *Fujian Analysis & Testing*, 2018, 27(5): 30-33.
- [25] 伍先绍. 分子印迹固相萃取高效液相色谱法测定植物油中苯并(a)芘的研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(7): 127-132.
- WU X S. Determination of Benzo (a) pyrene content in vegetable oils by high performance liquid chromatography with molecularly imprinted solid phase extraction[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(7): 127-132.
- [26] 金雪锋, 薛昆鹏, 任兴发, 等. 串联分子印迹固相萃取-高效液相色谱法测定食用油中苯并(a)芘[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(9): 2697-2701.
- JIN X F, XUE K P, REN X F, et al. Determination of benzo(a) pyrene in cooking oil by tandem molecularly imprinted solid phase extraction-high performance liquid chromatography[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(9): 2697-2701. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。