

加速溶剂萃取-超高效液相色谱荧光法测定 海产品中苯并(a)芘

曾楚莹*, 曹小云, 吕海燕, 王 露

(深圳市盐田区疾病预防控制中心, 深圳 518081)

摘要: **目的** 建立超高效液相色谱荧光(ultra performance liquid chromatography-fluorescence detection, UPLC-FLD)检测海产品中苯并(a)芘[benzo(a)pyrene, BaP]的方法。**方法** 乙腈加速溶剂萃取提取冻干海产品中的 BaP, 提取液用 UPLC-FLD 测定, 多环芳烃色谱柱(150 mm×2.1 mm, 3 μm)分离, 乙腈-水(75:25, V:V)为流动相, 流速 1 mL/min, 激发波长 261 nm, 发射波长 450 nm。**结果** BaP 在 0.2~40 μg/kg 浓度范围内线性良好, 相关系数 $r^2=0.9998$, 回收率 98.3%, 相对标准偏差为 1.34%, 最低检出限 0.06 μg/kg, 实际样品检测良好。**结论** 该法简便快捷, 溶剂用量少, 灵敏度高, 可用于海产品中 BaP 的检测。

关键词: 苯并(a)芘; 海产品; 加速溶剂萃取; 高效液相色谱荧光检测法

Determination of benzo(a)pyrene in marine products by accelerated solvent extraction and ultra performance liquid chromatography with fluorescence detection

ZENG Chu-Ying*, CAO Xiao-Yun, LV Hai-Yan, WANG Lu

(Disease Control and Prevention of Yantian in Shenzhen, Shenzhen 518081, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of benzo (a) pyrene (BaP) in seafood by ultra performance liquid chromatography-fluorescence detection (UPLC-FLD). **Methods** The BaP in freeze-dry samples was extracted by accelerated solvent extraction with acetonitrile. Then the extract was performed on UPLC with a PAHs column (150 mm×2.1 mm, 3 μm), using acetonitrile-water (75:25, V:V) as the mobile phase. The flow rate was 1 mL/min, the excitation wavelength was 261 nm, and the emission wavelength was 450 nm. **Results** The calibration curve of the BaP was linear in the range of 0.2–40 μg/kg, the correlation coefficient (r^2) was 0.9998, the recovery was 98.3%, the relative standard deviation (RSD) was 1.34%, and the detection limit was 0.06 μg/kg. The actual samples were well tested. **Conclusion** This method is simple, rapid, less solvent, high sensitive, which is suitable for determining BaP in marine products.

KEY WORDS: benzo(a)pyrene; marine products; accelerated solvent extraction; ultra performance liquid chromatography-fluorescence detection

基金项目: 深圳市科技创新委员会医疗卫生机构基础研究项目(JCYJ2015040, 3150326522)、深圳市盐田区产业发展项目(深盐产资纪20130210)

Fund: Supported by Basic Research Project of Medical and Health Institutions of Shenzhen Science and Innovation Commission (JCYJ2015040, 3150326522), and Project of Yantian Industrial Development Fund of Shenzhen (20130210)

***通讯作者:** 曾楚莹, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品卫生与检验、水质分析检测。E-mail: 12446650@qq.com

***Corresponding author:** ZENG Chu-Ying, Master, Technician, Yantian District Center for Disease Control and Prevention, No.2246, Shenyan Road, Yantian, Shenzhen, 518081 China. E-mail: 12446650@qq.com

1 引言

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类含一个苯环以上的芳香化合物, 具有致畸、致癌和致突变作用, 其主要来源为工业生产、石油不完全燃烧等^[1]。PAHs 约有 200 多种, 其中苯并(a)芘(benzo(a)pyrene, BaP)的致癌性最强, 分布最广, 常被当作环境 PAHs 污染的代表。苯并(a)芘广泛存在于大气、水体和土壤中, 其毒性一直受到广泛关注^[2,3], 只需纳克级别的苯并(a)芘, 就可改变 DNA 的结构、方向和功能, 细胞可能发生癌变, 其毒性远超黄曲霉毒素, 2005 年国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将 BaP 由人类可疑致癌物升级为人类确定致癌物^[4]。由于工农业用水和生活污水的大量排放, 大气沉降及降雨、海上航运排污、石油泄漏污染水体^[5]等, BaP 含量逐渐上升并在水生动植物内富集, 导致水产品 BaP 污染。欧盟指令 1881/2006 EC^[6]中规定水产品 BaP 的限量鲜重为 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 烟熏水产品为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 韩国的标准中鱼类 BaP 含量需低于 2.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 蛤蜊需低于 10.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 软体和甲壳类需低于 5.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[7]; 我国规定水产品及其制品、熏、烤水产品中 BaP 含量需低于 5.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[8]。

BaP 在食品中的污染状况研究多集中于米面油^[9-11]和烟熏、烧烤食品^[12,13], 水产品^[7]、海产品^[14,15]的报道较少, 其检测方法主要有表面增强拉曼光谱检测法^[16]、液质联用法^[13]、气质联用法^[15]和液相色谱-荧光法^[7,9-12]等。表面增强拉曼光谱检测法具有操作简便、快速、散射效应较强、检测灵敏度高和对样品无损伤等优点, 但还存在定量分析不够准确、不同材料吸附有差异、重现较困难等问题^[17]; 用液质联用或气质联用检测特异性强, 但仪器较昂贵, 难以普及; 用液相色谱-荧光法^[9-12]测定时多为正己烷等弱极性溶剂通过涡旋、超声等常规方法提取, 油脂干扰严重, 必须经固相萃取净化, 步骤繁琐耗时长, 且其检测时间需 7.5 min 至 20 min 不等。本研究通过优化萃取方式、萃取溶液和色谱条件, 建立加速溶剂萃取-超高效液相色谱荧光法快速测定海产品中 BaP 含量, 以期为市场监督提供有力支持, 对开展检测进行风险评估具有重要意义。

2 材料与amp;方法

2.1 仪器与试剂

Dionex Ultimate 3000 超高效液相色谱仪[美国热电(戴安)公司]; E-916 加速溶剂萃取仪、Multivapor P-6 平行蒸发仪(瑞士 Buchi 公司); GX-274 固相萃取仪(美国吉尔森

公司); BTP-8ZL00X 冻干机(美国 SP Scientific 公司)。

甲醇中苯并(a)芘溶液标准物质[GBW(E) 080476 中国计量科学研究院]; 海鲈鱼中 6 种多环芳烃标准物质[GBW(E)100130, 中国计量科学研究院]; 甲醇、乙腈、正己烷、乙酸乙酯、二氯甲烷、丙酮(美国 Merk 公司); MIP-BaP、MIP-PAHs、HLB 固相萃取专用小柱(6 mL, 德国 CNW 科技公司)。海产品来自于深圳市各区采集的食品安全风险监测样品。

2.2 样品处理

2.2.1 样品预处理

鱼类去鳞去头去内脏、剔骨去皮; 虾类去头去壳; 蟹和贝类去壳, 均取可食部分, 切碎混匀, 平铺于蒸发皿中, $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱预冻 0.5 h, 放入冻干机中, 温度 $-101\text{ }^{\circ}\text{C}$, 真空度 200 mT 冻干后, 再次粉碎成粉末备用, 冻干前后记录鲜重与干重的数据。

2.2.2 样品提取

称取 2.000 g(鲜重, 按干重比例折算)样品于 22 mL 萃取池中, 以乙腈为溶剂, 在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、100 bar 下加速溶剂萃取, 循环 3 次; 萃取液于 300 mbar 真空浓缩定容至 4 mL。

2.3 色谱条件

色谱柱: (150 mm \times 2.1 mm, 3 μm)Hypersil GREEN PAH; 流动相: 乙腈-水(75:25, V:V), 流速 1 mL/min, 柱温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 检测波长: 激发波长 261 nm, 发射波长 450 nm, 进样量 10 μL 。

3 结果与分析

3.1 样品预处理

真空冻干法是将样品先预冷冻至冰点以下, 放入冻干机, 在较低温度、较高真空度的条件下, 以辐射或加热板加热的方式令固态的水分子直接升华, 升华的水蒸气通过真空泵抽走, 直至完成冻干。对样品进行冻干、粉碎处理, 可使样品由低温保存变为常温保存, 大大减少了样品体积, 提取时溶剂用量也大幅度减少。该法在食品加工中已得到广泛使用, 但尚未有文献报道其对海产品中 BaP 的影响。本实验发现若为 5 g 鲜重的样品, $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱预冻 0.5 h, 放入冻干机中, 温度 $-101\text{ }^{\circ}\text{C}$, 真空度 200 mT 约需 30 min 即可冻干。以不同溶剂配制 BaP 的标准溶液, 添加至带鱼中混匀冻干, 其回收率如表 1。在低沸点的甲醇、乙腈溶液中, BaP 随溶剂的挥发、升华而损失, 在高沸点的油脂中损失很少。BaP 在海产品脂肪中富集, 真空冻干海产品对其含量的测定影响很小。

表 1 冻干测定结果及回收率($n=6$)

溶剂	添加量 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	测定值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均回 收率/%	RSD%
甲醇	5.00	3.42	68.4	8.3
乙腈	5.00	3.75	75.0	7.8
花生油	5.00	4.86	97.2	4.7

3.2 样品前处理方法的研究

3.2.1 萃取方法的选择

加速溶剂萃取(accelerated solvent extraction, ASE)是近年兴起的样品前处理技术,通过升温、加压以及循环提取的方式,提高待测物的萃取效率。该法优点突出:溶剂用量少,一般仅需 10~15 mL;无需多次提取,用时少,完成一次萃取全过程仅需 15 min。用乙腈为提取溶剂,分别采用 ASE、超声 30 min、均质 5 min 或涡旋 2 min 等方法,提取标准样品海鲈鱼中的 BaP。除 ASE 外,其余方法均需离心分离上清液,且需多次提取残渣以提高回收率,步骤繁琐耗时长,回收率约为 85%~90%。比 ASE 的 98%低,故

选择加速溶剂萃取。其提取参数为温度 100 $^{\circ}\text{C}$, 压力 100 psi, 加热时间 4 min, 静置萃取时间 3 min, 循环次数 3 次, 氮气吹扫 1 min。

3.2.2 提取溶剂的选择

BaP 不溶于水,微溶于甲醇、乙醇,易溶于丙酮、氯仿、苯等,文献中多以正己烷^[9-12]进行提取。尝试以甲醇、乙腈、丙酮、乙腈:丙酮(1:1, V:V)、乙酸乙酯、二氯甲烷、正己烷为提取溶剂,提取标准样品海鲈鱼中的 BaP(标准值为 90 $\mu\text{g}/\text{kg}$),发现提取溶剂为甲醇、乙腈、丙酮、乙腈:丙酮(1:1, V:V)的颜色较为澄清,无色或略带淡黄色,而乙酸乙酯、二氯甲烷、正己烷的颜色逐渐加深,最后变为黄色混浊,二氯甲烷、正己烷的提取液经真空浓缩至 5 mL 后有较多油脂。7 种溶剂均可提取标准样品海鲈鱼中的 BaP,回收率如表 2。乙酸乙酯、正己烷、二氯甲烷提取溶液的颜色加深,油脂含量增加,不能直接进行测定,必须经固相萃取净化,步骤较多,影响了回收率。乙腈:丙酮(1:1, V:V)和乙腈提取的溶液颜色最为澄清,杂质含量少,回收率最高,考虑到提取液需上超高效液相色谱(ultra performance liquid chromatography, UHPLC),选乙腈为提取溶剂。

表 2 不同溶剂提取样品测定结果及回收率($n=6$)Table 2 Results and recoveries with different solvents($n=6$)

序号	溶剂	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	回收率%	RSD%
1	乙腈:丙酮(1:1, V:V)	88.9	98.8	1.07
2	乙腈	88.5	98.3	1.34
3	丙酮	85.9	95.4	3.13
4	甲醇	85.3	94.8	2.06
5	乙酸乙酯	85.0	94.4	1.31
6	正己烷	83.4	92.6	2.68
7	二氯甲烷	82.4	91.6	3.98

3.2.3 净化方式的选择

用乙腈为提取溶剂,加速溶剂萃取法提取标准样品海鲈鱼中的 BaP,提取液备用。MIP-BaP 柱、MIP-PAHs 和 HLB 3 种固相萃取小柱均先用 5 mL 二氯甲烷活化,5 mL 乙腈平衡,提取液上样,分别用 5 mL 乙腈、5 mL 正己烷淋洗,用 10 mL 二氯甲烷洗脱,氮吹浓缩后用 2 mL 乙腈溶解残渣,0.45 μm 滤头过滤后上机,其回收率见表 3,其色谱图见图 1。由表 3 可见,HLB 柱为非专用柱,其损失最大,MIP-BaP、MIP-PAHs 小柱也会对回收率造成一定的损失;由图 1 可见,乙腈极性较大,直接提取海鱼的杂质含量并不高,固相萃取虽然有一定的净化效果,但也引入了新的杂质,且步骤繁琐,溶剂使用量大,故可简化净化步骤,用乙腈直接提取即可。

3.3 液相条件优化

尚未有文献报道用 UPLC 进行测定,一般的色谱柱多为 150 mm \times 4.6 mm, 5 μm 或 250 mm \times 4.6 mm, 5 μm , 其出峰时间在 7.5 min 至 20 min。本实验选用 150 mm \times 2.1 mm, 3 μm 的 PAH 专用柱,令出峰时间大为缩短。流动相中乙腈的比例对 BaP 出峰时间影响较大,乙腈比例高,则出峰早,但与杂质不能达到基线分离;乙腈比例低,则各杂质峰分离度较好,但目标物保留时间长,峰形拉宽,检出限变大;若进行梯度洗脱,则会引起基线漂移,影响低浓度水平目标物的定量。实验中设定流动相乙腈-水(75+25, V:V),出峰时间适中,无杂质干扰,达到基线分离。文献报道的激发波长和发射波长不一致,有 297 nm/405 nm^[7]或 384 nm/406 nm^[12]

等, 采用固定激发波长扫描发射波长和固定发射波长扫描激发波长的方式, 找到目标物响应最大的波长, 其响应强度约为文献报道的 1.3 倍, 提高了灵敏度。最后选定 2.3 的色谱条件, 目标物出峰时间为 3.532 min。

3.4 线性范围和检出限

甲醇中苯并(a)芘溶液标准物质(GBW(E) 080476)浓度为 5.19 $\mu\text{g/mL}$, 逐级稀释成 0.1038、0.2076、0.4152、0.8304、1.2456、1.6608、2.076、4.152、8.304、12.456、16.608、20.76 ng/mL 标准系列溶液, 在 2.3 的条件下测定并以响应值为纵坐标, 浓度为横坐标绘制标准曲线, 拟合得曲线方程为 $Y=6807.8X+345.8$, 线性范围 0.1~20 ng/mL , $r^2=0.9998$; 取 0.1038 ng/mL 的标准溶液进样 12 次, 利用标准曲线得其浓度并计算标准偏差为 0.0097 ng/mL , 以 3 倍标准偏差为仪器定性限 0.03 ng/mL , 10 倍标准偏差为仪器定量限 1.0 ng/mL 。以取样 2 g, 最后定容体积为 4 mL 计算, 则该方法线性范围

为 0.2~40 $\mu\text{g/kg}$, 检出限为 0.06 $\mu\text{g/kg}$, 定量限为 0.2 $\mu\text{g/kg}$ 。

3.5 加标回收率和精密度

在带鱼样品中添加 1.04、5.19、15.6、31.1 $\mu\text{g/kg}$ 浓度水平的标准溶液, 每个浓度做 6 个平行样品, 以及准确称取海鲈鱼标样按本方法进行实验。带鱼样品按鲜重折算称取 2.000 g, 海鲈鱼标样称取 0.500 g, 用乙腈加速溶剂萃取后浓缩至 4 mL, UPLC-FLD 测定, 计算公式为公式(1), 结果见表 4。其回收率在 96.2%~99.4%之间, 平均为 98.0%, 相对标准偏差小于 5%, 回收率、精密度良好。色谱图如图 2 所示。

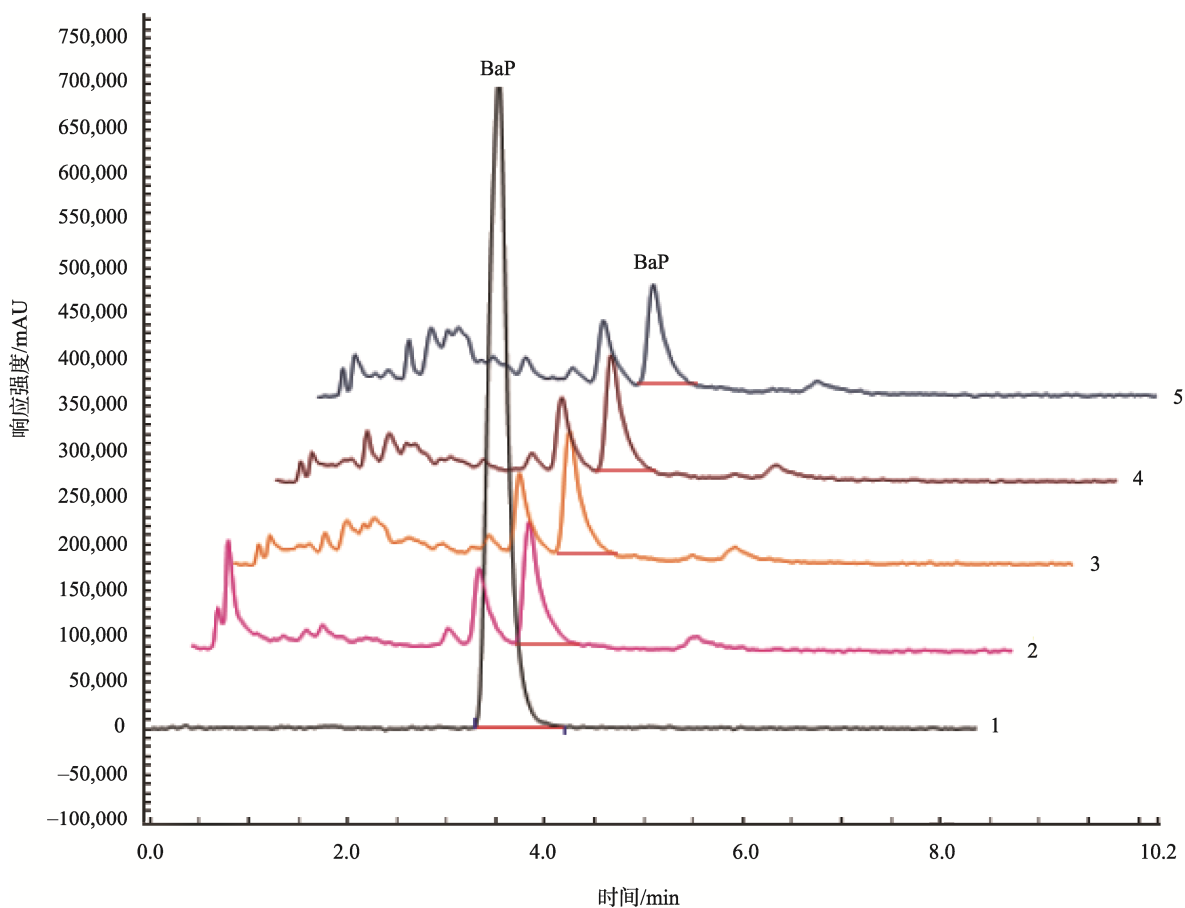
$$X = C \times V / m \quad (1)$$

式中 X -BaP 含量, $\mu\text{g/kg}$;

C -根据标准曲线计算提取液中 BaP 的浓度, ng/mL ;

V -提取液定容体积, mL ;

m -样品质量, g 。



注: 1: 20.76 $\mu\text{g/L}$ BaP; 2: 4.5 $\mu\text{g/L}$ 海鲈鱼标样乙腈直接提取; 3: 4.5 $\mu\text{g/L}$ 海鲈鱼标样 BaP 柱 SPE 净化; 4: 4.5 $\mu\text{g/L}$ 海鲈鱼标样 PAH 柱 SPE 净化; 5: 4.5 $\mu\text{g/L}$ 海鲈鱼标样 HLB 柱 SPE 净化。

图 1 不同净化方式色谱图

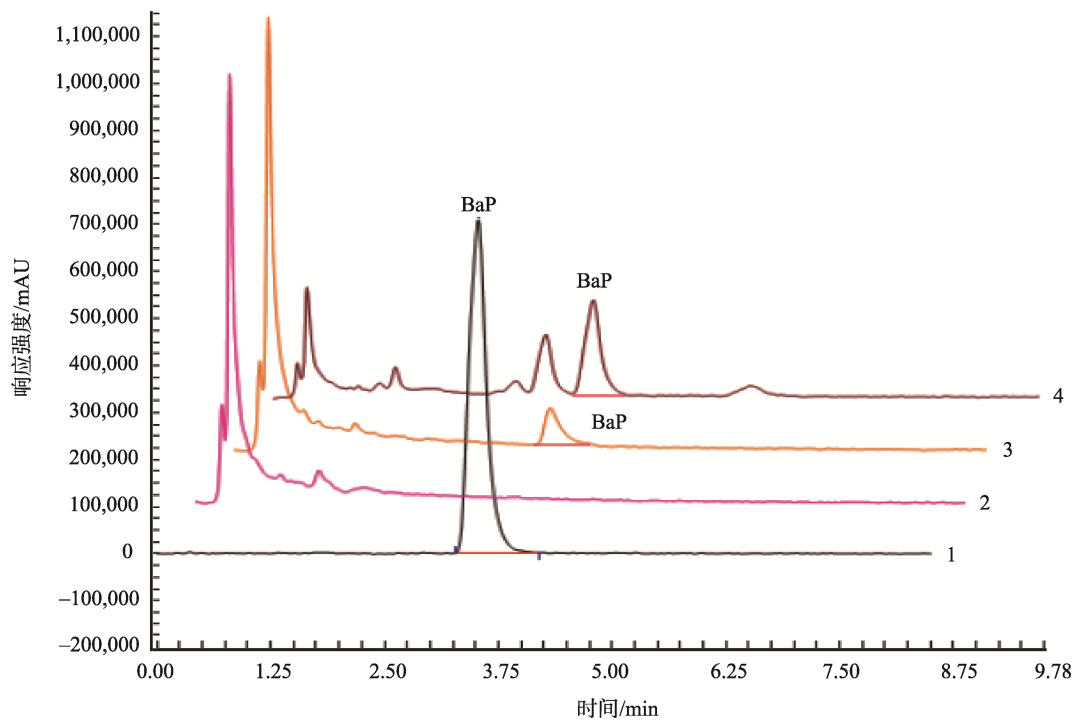
Fig.1 Chromatogram of different purification methods

表 3 不同净化方式测定结果及回收率($n=6$)
Table 3 Results and recoveries with different purified methods($n=6$)

序号	净化方法	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	回收率/%	RSD/%
1	乙腈直接提取	88.9	98.3	1.34
2	MIP-BaP	85.0	94.4	3.49
3	MIP-PAHs	80.6	89.6	3.69
4	HLB	65.7	73.0	6.64

表 4 实际样品加标回收率和精密度($n=6$)
Table 4 Actual sample recovery and precision ($n=6$)

序号	浓度水平/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	实测值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	回收率/%	RSD/%
1	1.04	1.00	96.2	4.35
2	5.19	5.03	97.0	2.18
3	15.6	15.5	99.4	2.60
4	31.1	30.6	98.4	0.72
5	90(海鲈鱼标样)	88.9	98.3	1.34



注: 1: 20.76 $\mu\text{g}/\text{L}$ BaP; 2: 带鱼本底; 3: 带鱼加标; 4: 海鲈鱼标样。

图 2 实际样品加标色谱图

Fig.2 Chromatogram map of spiked sample

3.6 实际样品的测定

运用本方法, 随机测定了 12 份双壳类(带子、圣子、花甲)海产、16 份黄花鱼和 24 份带鱼样品, 计算公式同上, 发现黄花鱼样品均未检出 BaP, 而有 12 份带鱼样品检出,

其中 6 份含量水平在 0.20~0.64 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间, 另 6 份样品含量在 0.10~0.17 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的定性范围内, 12 份双壳类海产中有 10 份检出, 其中 7 份含量水平在 0.23~0.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间, 另 3 份样品含量在 0.13~0.17 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的定性范围内。海产品体

内 BaP 含量水平可能与其的生活习性^[18]有关, 越靠近海底, BaP 淤积越严重, 生物体内更易富集, 含量越高。

4 结 论

用乙腈以加速溶剂萃取的方式提取冻干海产品的 BaP, 可无须净化, 用 UPLC-FLD 进行检测, 考察了方法的检出限、线性范围、加标回收、精密度等指标, 并对海鲈鱼标样和实际样品进行测定。结果表明, 该方法样品前处理简单, 回收率高, 稳定性好, 分析时间缩短, 3.5 min 即可出峰, 峰形、分离度均较好, 适用于海产品中 BaP 的含量测定及 BaP 的膳食风险评估工作。

参考文献

- [1] 曹小云, 曾楚莹, 古文媚, 等. 气相色谱-三重四极杆串联质谱法测定海产品中 18 种多环芳烃[J]. 现代预防医学, 2018, 45(13): 2424-2429.
Cao XY, Zeng CY, Gu WM, *et al.* Determination of 18 polycyclic aromatic hydrocarbons in seafood by gas chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. Mod Prev Med, 2018, 45(13): 2424-2429.
- [2] Mansour RA, Yousef M, Jalal P, *et al.* Additive toxicity of co-exposure to pristine multi-walled carbon nanotubes and benzo(a)pyrene in lung cells [J]. Environ Res, 2020, 183: 109219.
- [3] 乔晓芳, 魏俊妮, 路殿英, 等. 苯并[a]芘亚急性染毒对雄性 Wistar 大鼠心血管的影响[J]. 卫生研究, 2020, 49(1): 8-13, 27.
Qiao XF, Wei JN, Lu DY, *et al.* Effects of benzo[a]pyrene subacute administration on the cardiovascular of male Wistar rats [J]. J Hyg Res, 2020, 49(1): 8-13, 27.
- [4] Straif K, Baan R, Grosse Y, *et al.* On behalf of the WHO International agency for research on cancer monograph working group. Carcinogenicity of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Lancet Oncol, 2005, 6: 931-932.
- [5] John W, Farrington. Need to update human health risk assessment protocols for polycyclic aromatic hydrocarbons in seafood after oil spills [J]. Mar Pollu Bull, 2020, 150: 110744.
- [6] Commission Regulation (EC). No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs [S]. 2006.
- [7] 黄鸾玉, 黎小正, 秦振发. 固相萃取/高效液相色谱荧光法测定水产品中苯并芘[J]. 分析实验室, 2009, 28(12): 63-66.
Huang LY, Li XZ, Qin ZF. The study on determination of benzopyrene in aquatic products by SPE high performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. Chin J Anal Lab, 2009, 28(12): 63-66.
- [8] GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
GB 2762-2017 National food safety standard-Limit of pollutants in food [S].
- [9] 胡加文, 李天宝, 王春利, 等. 固相萃取-液相色谱法测定方便面中苯并芘[J]. 化学分析计量, 2014, 23(3): 25-27.
Hu JW, Li TB, Wang CL, *et al.* Detection of benzopyrene in instant noodles by solid-phase extraction-high performance liquid chromatography [J]. Chem Anal Meterage, 2014, 23(3): 25-27.
- [10] 郝媛媛. 高效液相色谱法测定野山茶油中苯并芘的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2018, 54(7): 816-818.

Hao YY. Determination of benzopyrene in camellia oil by high performance liquid chromatography [J]. Phys Test Chem Anal (Part B: Chem Anal), 2018, 54(7): 816-818.

- [11] 魏利清, 郝全英, 俞寅. 油料中苯并(a)芘含量的测定[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 146-148.
Wei LQ, Hao QY, Yu Y. Determination of benzo(a)pyrene in oilseed [J]. China Oils Fats, 2019, 44(4): 146-148.
- [12] 刘孝英, 王毅. 全自动固相萃取-高效液相色谱法测定熏烤肉制品中苯并(a)芘含量[J]. 肉类研究, 2020, 34(3): 63-67.
Liu XY, Wang Y. Determination of benzo(a)pyrene in smoked and roasted meat products by automated solid phase extraction-high performance liquid chromatography [J]. Meat Res, 2020, 34(3): 63-67.
- [13] 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 YN, Li SY, Cui YW, *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]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20(3): 251-257.
- [14] 刘晓晨, 齐琳, 孙文平, 等. 高效液相色谱荧光法检测海产品中苯并(a)芘及其代谢产物[J]. 中国食品卫生杂志, 2013, 25(2): 152-154.
Liu XC, Qi L, Sun WP, *et al.* Determination of benzo(a)pyrene and its metabolite in seafood by high performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. Chin J Food Hyg, 2013, 25(2): 152-154.
- [15] 王建华, 宫萍, 田良良, 等. 同位素稀释气相色谱串联质谱法测定海产品中的苯并(a)芘的残留量[J]. 化学分析计量, 2012, 21(1): 24-26.
Wang JH, Gong P, Tian LL, *et al.* Determination of benzo(a)pyrene in seafood by gas chromatography tandem mass spectrometry with isotope dilution [J]. Chem Anal Metrol, 2012, 21(1): 24-26.
- [16] 傅书悦, 张琦, 陈璐. 表面增强拉曼散射光谱同时检测 4 种痕量多环芳烃[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2016, 45(6): 705-710.
Fu SY, Zhang Q, Chen L, *et al.* Surface enhanced raman scattering technique for simultaneous detection of four trace polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. J Shanghai Norm Univ (Nat Sci), 2016, 45(6): 705-710.
- [17] 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 ZH. Study on test method of benzopyrene in food [J]. Grain Sci Technol Econ, 2018, 43(8): 69-73.
- [18] Piccardo MT, Coradeghini R, Valerio F. Polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in native and caged mussels [J]. Mar Pollu Bull, 2001, 42(10): 951-956.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



曾楚莹, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品卫生与检验、水质分析检测。
E-mail: 12446650@qq.com