

# 水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘来源及检测方法研究进展

## Research progress on the sources and detection methods of determination of benzo- $\alpha$ -pyrene in aquatic products

夏虹<sup>1,2</sup> 刘丽<sup>1,2</sup> 彭西甜<sup>1,2</sup> 彭立军<sup>1,2</sup> 林春<sup>1,3</sup>

XIA Hong<sup>1,2</sup> LIU Li<sup>1,2</sup> PENG Xi-tian<sup>1,2</sup> PENG Li-jun<sup>1,2</sup> LIN Chun<sup>1,3</sup>

(1. 湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 农产品营养品质与安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430064; 3. 长江大学, 湖北 荆州 434023)

(1. Research Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan, Hubei 430064, China; 2. Hubei Key Laboratory of Nutritional Quality and Safety of Agro Products, Wuhan, Hubei 430064, China; 3. Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

**摘要:**综述了水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘的来源和性质及苯并[ $\alpha$ ]芘暴露对水产品的危害,归纳了目前常用的检测苯并[ $\alpha$ ]芘的仪器分析方法,对各方法的优缺点进行了分析总结,并对苯并[ $\alpha$ ]芘未来检测方法的研究方向进行了展望。

**关键词:**水产品;苯并[ $\alpha$ ]芘;检测方法

**Abstract:** This review summarized the source, properties, as well as the harm of benzo- $\alpha$ -pyrene exposure to aquatic products. The commonly used instrumental analysis methods for the detection of benzo- $\alpha$ -pyrene were also discussed, and the future research direction of benzo- $\alpha$ -pyrene detection was prospected.

**Keywords:** aquatic product; benzo- $\alpha$ -pyrene; detection methods

水产品是海洋和淡水渔业生产的水产动植物产品及其加工产品的总称。水产品的生长过程与环境息息相关。然而一些水产品养殖环境(如水质、土壤等)遭受了不同程度的污染,严重影响了水产品质量。加之水产品养殖过程中不规范使用鱼用药物、饲料及加工过程中添加剂的过量使用,尤其是违禁药物的违规使用,导致水产品中有毒有害残留物质超标现象严重<sup>[1]</sup>。在众多污染物

中,苯并[ $\alpha$ ]芘暴露对水生生物的非特异性免疫能力和组织结构均会产生一定程度的负面影响,严重威胁水生生物的生存、进化及繁衍,进而威胁人类生命健康<sup>[2]</sup>。研究主要对水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘的来源、苯并[ $\alpha$ ]芘性质及其暴露对水产品的危害进行总结,分析各种苯并[ $\alpha$ ]芘检测方法的优势和不足之处,对水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘未来检测方法的研究方向进行展望,为水产品质量安全和水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘检测的实际应用提供参考。

### 1 水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘来源

水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘污染源主要包括水体污染和食品加工等。

苯并[ $\alpha$ ]芘通过吸附作用沉积在大气中的颗粒上,而这些颗粒又通过沉降、降水、冲洗等作用进入地面水,造成水体污染。据研究<sup>[3]</sup>报道,长三角和珠三角地区水体苯并[ $\alpha$ ]芘的污染程度显著高于其他地区,太湖中的苯并[ $\alpha$ ]芘污染程度稍重于长江和辽河,海洋中的苯并[ $\alpha$ ]芘含量明显高于淡水湖。苯并[ $\alpha$ ]芘的难降解性导致水体中苯并[ $\alpha$ ]芘的积累不断增多,生物积累作用使得苯并[ $\alpha$ ]芘的积蓄随水体中水生生物的生长发育不断加强,随后通过生物性迁移、生物放大作用逐渐扩大污染范围,最终危害整个水生生态系统和人类健康<sup>[4]</sup>。

烟熏和烧烤是水产品常见的加工方式,是将经腌制或熟制后的水产品以烟熏或明火为介质进行热加工。熏烤过程中,苯并[ $\alpha$ ]芘有可能伴着燃料木炭燃烧产生的烟雾进入到水产品中;与此同时,水产品自身的脂肪、糖等化学物质不完全燃烧、高温裂解,经热聚合反应也会形成苯并[ $\alpha$ ]芘。研究<sup>[5]</sup>表明,随着销售时间和贮存时间的延长,苯并[ $\alpha$ ]芘会由食物表层向内部渗透,时间越长,转移渗透量越大。在烟熏和烧烤过程中发生焦烤或炭化时,

**基金项目:**湖北省自然科学基金项目(编号:2021CFB387);湖北省重点研发计划项目(编号:2020BBB078)

**作者简介:**夏虹,女,湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所研究员。

**通信作者:**刘丽(1988—),女,湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所副研究员,博士。

E-mail: liuli@hbaas.com

彭西甜(1984—),男,湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所副研究员,博士。

E-mail: pxitian@aliyun.com

**收稿日期:**2022-03-11 **改回日期:**2022-08-09

苯并[α]芘生成量显著增加<sup>[6]</sup>。

## 2 苯并[α]芘的性质及暴露对水产品的危害

苯并[α]芘,是含苯环的稠环芳烃,分子式为  $C_{20}H_{12}$ , 相对分子质量为 252.32。苯并[α]芘是高活性分子,具有很强的致畸性、致癌性和致突变性,被国际癌症研究机构(IARC)列为 I 类致癌物<sup>[7]</sup>。研究<sup>[8]</sup>表明,低浓度苯并[α]芘暴露会使水产品体内自由基的生成与消除失衡,引发机体应激反应,进而对机体产生毒性作用;随着苯并[α]芘暴露浓度继续升高,水产品体内自由基持续积累,机体损伤加重。苯并[α]芘暴露会对水产品肝、肾抗氧化和非特异性免疫能力及组织结构产生一定程度的负面影响<sup>[9]</sup>。

陈好<sup>[10]</sup>以贝类马氏珠母贝为研究对象,研究了苯并[α]芘暴露对贝类的毒性效应。结果表明,苯并[α]芘暴露对马氏珠母贝的个体发育、免疫系统、胁迫应答、代谢途径等方面均具有毒性效应,且马氏珠母贝消化腺和鳃组织对苯并[α]芘暴露的响应具有组织特异性。崔倩<sup>[11]</sup>以海水青鲭为研究对象探讨了苯并[α]芘暴露后青鲭肝细胞产生活性氧的免疫毒性机制,苯并[α]芘暴露产生的活性氧对免疫信号通路 NF-κB 有抑制作用。李丹妮<sup>[12]</sup>研究了苯并[α]芘暴露对中华绒螯蟹机体内 I 相代谢酶 CYP 基因(CYP2A、CYP2B、CYP4)和 II 相代谢酶 GST 基因及其相关酶的响应情况,苯并[α]芘暴露可诱导 CYP2A、CYP2B、CYP4 基因的表达,并呈现出显著浓度效应和时间效应,苯并[α]芘暴露对中华绒螯蟹的肝组织具有明显的损伤作用。林芳等<sup>[13]</sup>将翡翠贻贝胚胎暴露于苯并[α]芘中,利用综合生物标志物响应指数对苯并[α]芘暴露的综合毒理效应进行评价。结果表明,苯并[α]芘胁迫显著影响翡翠贻贝胚胎抗氧化酶和非特异性免疫酶的活性。潘鲁青等<sup>[14]</sup>研究发现,在高浓度的苯并[α]芘暴露下,栉孔扇贝表现出抗雌激素效应而造成生殖毒性。苯并[α]芘暴露能够延缓栉孔扇贝的性腺发育,损伤卵巢。

由此可见,苯并[α]芘是一种在体内反应较为复杂的化合物,苯并[α]芘暴露会造成慢性中毒。此外,水生生物所摄取的苯并[α]芘会发生富集,并在较高级生物体内更高倍数的富集<sup>[15]</sup>。通过饮食暴露,苯并[α]芘会导致动物脑、肺和结肠的氧化应激<sup>[16]</sup>,可诱发肺癌和结肠癌,造成遗传毒性。苯并[α]芘暴露不仅对水产品危害非常严重,食用含有苯并[α]芘的水产品还会严重影响人体健康和生命安全。世界各国或组织对食品中苯并[α]芘的残留量进行了非常严格的限制,制定了苯并[α]芘的限量标准。GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定水产动物及其制品(熏、烤水产品)中苯并[α]

芘的最大残留限量为 5.0 μg/kg,苯并[α]芘的检测是食品质量安全的重点工作。

## 3 苯并[α]芘的检测方法

### 3.1 高效液相色谱法

高效液相色谱法(HPLC)是一种较先进的检测方法,可实现对物质的分离、检测和分析<sup>[17]</sup>。彭小东等<sup>[18]</sup>以乙腈饱和的正己烷—正己烷饱和的乙腈为萃取试剂,采用液相萃取—反相高效液相色谱法对植物油中苯并[α]芘含量进行测定,检出限为 0.40 μg/kg。液相萃取避免了使用固相萃取成本高、自制层析柱柱效不稳定的问题。黄坤等<sup>[19]</sup>建立了基于 HPLC 的大米和小麦粉中苯并[α]芘的检测方法。环己烷提取浓缩后用 Phenomenex Luna C<sub>18</sub> 色谱柱分离,荧光检测器检测,方法检出限和定量限分别为 0.10、0.30 μg/kg。黄鸾玉等<sup>[20]</sup>建立了基于 HPLC 荧光法测定水产品中苯并[α]芘的方法,样品以正己烷为提取剂,采用 Florisil 固相萃取柱净化、蒸发浓缩,荧光检测器检测(激发波长 297 nm,发射波长 405 nm),方法最低检测限为 0.09 μg/kg。HPLC 检测方法准确度高,但是食品样品成分复杂、前处理选择性差、难以有效识别。

杜金凤等<sup>[21]</sup>建立了超声萃取-HPLC 方法测定黑参中的苯并[α]芘。以正己烷为萃取剂,分子印迹固相萃取柱为净化柱,荧光检测器检测(激发波长 365 nm,发射波长 410 nm),检出限为 0.20 μg/kg。王丽君等<sup>[22]</sup>建立一种分子印迹固相萃取柱-HPLC 测定植物油中苯并[α]芘含量的方法。分子印迹技术(MIT)是模拟酶—底物或抗体—抗原之间的相互作用,对印迹分子进行专一识别的技术。MIT 具有预定性、识别性和实用性,在色谱分离和固相萃取等方面被广泛应用<sup>[23]</sup>。植物油中苯并[α]芘经正己烷溶解,通过分子印迹柱吸附,二氯甲烷洗脱,C<sub>18</sub> 反相色谱柱分离,荧光检测器检测(激发波长 384 nm,发射波长 406 nm),检出限为 0.10 μg/kg。MIT 的引入,使得该方法特异性强,结果稳定。林亚楠等<sup>[24]</sup>合成了苯并[α]芘分子印迹固相萃取填料,并以此建立了烟熏鲟鱼中苯并[α]芘的超高效液相色谱—串联质谱联用测定方法。基于 MIT 的 HPLC 检测方法抗干扰能力强,能选择性提取目标物,与传统 HPLC 法相比,该方法的检出限更低。

### 3.2 气相色谱法

气相色谱法(GC)是指用气体作为流动相的色谱法,是检测挥发性有机物的强有力技术手段。质谱分析法(MS)是一种测量离子质荷比(质量/电荷比)的分析方法,通过对试样中各组分离子基团的鉴定可获得极高的灵敏性。将 GC 和 MS 有机整合连接起来,能够做到优势互补,实现对复杂化合物有效分离的同时对未知成分进行分析检测<sup>[25]</sup>。杨玲等<sup>[26]</sup>对比了 GC-MS 和 HPLC 两种方法对苯并[α]芘的检测。两种方法均能很好的满足环

境水样中苯并[ $\alpha$ ]芘的分析要求。王磊等<sup>[27]</sup>运用在线凝胶渗透色谱(GPC)-GC-MS技术集合选择离子扫描模式,建立了一种花生油样品中苯并[ $\alpha$ ]芘残留检测的方法。基于 GPC 对花生油样品进行分离净化,采用 GC-MS 检测,具有抗基质干扰能力强、灵敏度高、分析速度快的优点。

### 3.3 表面增强拉曼光谱法

表面增强拉曼光谱法(SERS)是一种利用光的拉曼散射效应来对目标组分进行痕量分析的技术<sup>[28-30]</sup>。肖海波<sup>[31]</sup>以制得的苯膦酸锆包金(Au@ZrPP)核壳结构作为 SERS 基底检测苯并[ $\alpha$ ]芘。内核纳米粒子电磁场具有表面增强拉曼光谱活性,表层大量苯环与苯并[ $\alpha$ ]芘分子中苯环存在  $\pi-\pi$  电子堆积作用,以此对苯并[ $\alpha$ ]芘进行捕获、预浓缩,降低检出限。肖旺<sup>[32]</sup>制备了银纳米点阵列 SERS 活性基底,然后在其表面修饰一层硫醇分子,结合 MIT 实现了苯并[ $\alpha$ ]芘的快速分离和检测。王珊<sup>[33]</sup>以柠檬酸三钠还原氯金酸合成纳米金颗粒,将其用于修饰经氨基改性的硅烷化硅藻土型红色担体,制备了新型 SERS 基底应用于苯并[ $\alpha$ ]芘的拉曼光谱检测。与色谱法相比,SERS 在检出限或精密度上不具优势,但是 SERS 可以使用便携式拉曼光谱仪,且测试时间短,有利于实现现场检测<sup>[34]</sup>。

### 3.4 酶联免疫吸附分析法

酶联免疫吸附分析法(ELISA)是免疫学检测的重要方法<sup>[35]</sup>。邓安平<sup>[36]</sup>通过化学基团修饰技术在苯并[ $\alpha$ ]芘的 3 个不同位点末端连接活性羧基基团,以苯并[ $\alpha$ ]芘—牛血清白蛋白偶合物为免疫原对 BALB/c 小鼠进行免疫,再将成功免疫的小鼠脾细胞和瘤细胞进行融合,在培养液中培养融合后的细胞,用间接 ELISA 筛选出合格的抗体并鉴定其特性,建立用于检测苯并[ $\alpha$ ]芘的 ELISA 分析法。该方法的检出限为 0.02  $\mu\text{g/L}$ ,因此高效快速、特异性好、准确度高。

### 3.5 胶体金免疫层析法

胶体金免疫层析法(GICT)是利用硝酸纤维素膜的层析性能和纳米材料的迁移性实现可视化快速检测的一种技术。刘波等<sup>[37]</sup>通过合成功能化修饰羧基的苯并[ $\alpha$ ]芘半抗原,研发了一种基于 GICT 原理的苯并[ $\alpha$ ]芘快速检测试纸条,该试纸条检测限可达 5~10  $\text{ng/mL}$ ,且该试纸条与大部分苯并[ $\alpha$ ]芘结构类似物无交叉反应,可实现对当前食用油中苯并[ $\alpha$ ]芘的快速、准确判定。

综上所述,高效液相色谱法和气相色谱—质谱联用是直接分析定量法,具有灵敏度高、检出限低的优点,但是分析过程繁琐复杂、工作量大,需要昂贵的仪器和较长的分析周期。表面增强拉曼光谱检测无需样品前处理,但定量结果不准确。免疫分析法基于抗原与抗体的特异性、可逆性结合反应,将抗体作为生物化学检测器对待测

物进行分析,是快速筛选定性法,这种方法简单快速、特异性强、灵敏度高,但是综合成本较高,容易出现假阳性。因此,开发出高效且可靠的检测方法并应用于苯并[ $\alpha$ ]芘的检测刻不容缓。

## 4 总结与展望

苯并[ $\alpha$ ]芘具有高度致癌性且化学性质稳定,容易通过各种途径对水产品及其制品造成污染,与苯并[ $\alpha$ ]芘相关的水产品质量安全问题已引起人们的广泛关注。研究者已经对苯并[ $\alpha$ ]芘暴露对水产品的毒性效应进行了大量研究,并取得了较大进展,但是有关苯并[ $\alpha$ ]芘暴露引起的氧化应激作用机理、雌激素效应以及内分泌干扰作用机制等问题仍需要进一步深入研究。

目前常用于检测苯并[ $\alpha$ ]芘的方法包括色谱法、光谱法和免疫分析法等。色谱法基于苯并[ $\alpha$ ]芘进行直接分析,准确度高、精密度好,但是需要昂贵的设备,且检测步骤繁琐、耗时;免疫分析法可实现苯并[ $\alpha$ ]芘的快速可视化检测,但仍需对样品中主要杂质进行分离,且此类检测是基于反应动力学抑制的间接分析法,检测耗时仍然较长,同时无法精确定量;光谱法是基于苯并[ $\alpha$ ]芘分子结构信息,可实现实时、原位探测,且数据处理简单,灵敏度、准确率高,可满足现场快速检测的需求,但是该方法技术还不够成熟。鉴于水产品基质复杂,上述方法在用于水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘检测时还存在许多问题。随着分析化学技术的不断进步,对于水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘的检测手段,可集中在样品前处理上,配套改进仪器分析条件来提高分离度,以降低检出限。开发设计基于不同机理的水产品中苯并[ $\alpha$ ]芘快检试剂盒,用于水产品活体现场快检,在水产品流入市场前获得准确结果将是未来发展方向之一。

## 参考文献

- [1] 付勇浩, 赵黎明. 水产品质量安全检测体系存在的问题与对策[J]. 乡村科技, 2021(4): 103-104.
- [2] FU Y H, ZHAO L M. Problems and countermeasures of aquatic product quality and safety inspection system[J]. Xiang Cun Ke Ji, 2021(4): 103-104.
- [3] JINADASA B K K, MONTEAU F, FOWLER S W. Review of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish and fisheries products; a Sri Lankan perspective[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 20 663-20 674.
- [4] 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, 2019, 38(3): 50-54.
- [5] GUAN R Z, WU H L, WANG J, et al. Status of benzo( $\alpha$ )pyrene pollution and its biotoxic effects[J]. Journal of Yanan University, 2019, 38(3): 50-54.
- [6] 刘丽. 苯并芘对环境的影响及其检测方法研究进展[J]. 清洗世界, 2020, 36(3): 31-32.

- LIU L. Research progress on the influence of benzopyrene on environment and its detection methods[J]. *Cleaning World*, 2020, 36(3): 31-32.
- [5] 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( $\alpha$ )pyrene in foods[J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(2): 72-75.
- [6] 白雪, 惠腾, 王振宇, 等. 高效液相色谱—荧光检测法检测烤肉制品中 5 种硝基多环芳烃[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(5): 1 055-1 062.
- BAI X, HUI T, WANG Z Y, et al. Determination of 5 nitropolycyclic aromatic hydrocarbons in roasted meat products by high performance liquid chromatography-fluorescence detection[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 1 055-1 062.
- [7] 傅孝美, 李宗军, 赵志友, 等. 使用槟榔中苯并芘检测方法研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 216-219.
- FU X M, LI Z J, ZHAO Z Y, et al. Research progress of determination of benzo( $\alpha$ )pyrene in edible areca nut[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(8): 216-219.
- [8] 陈剑杰, 曹谨玲, 贺鑫晋, 等. 苯并芘(BaP)对鲤鱼肝、肾抗氧化、非特异性免疫能力及组织结构的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(3): 623-630.
- CHEN J J, CAO J L, HE X J, et al. Effects of benzopyrene on the capacity of antioxidases, non-specific immunity and organization structure in liver and kidney of carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(3): 623-630.
- [9] 赵莎莎, 袁华根. 苯并芘对鲤鱼肾脏 SOD 和 CAT 的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(24): 168-170.
- ZHAO S S, YUAN H G. Effects of benzopyrene on SOD and CAT in kidney of carp[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(24): 168-170.
- [10] 陈好. 马氏珠母贝对苯并芘 Benzo[ $\alpha$ ]pyrene 胁迫的响应及基于组学的毒性机制研究[D]. 海口: 海南大学, 2017: 12-67.
- CHEN H. Studies of response of benzo( $\alpha$ )pyrene exposure on the pearl oyster *Pinctada martensii* and mechanism based on omics technology[D]. Haikou: Hainan University, 2017: 12-67.
- [11] 崔倩. 苯并芘暴露诱导海水青鲂免疫应答的信号通路及其免疫调控机制研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019: 55-184.
- CUI Q. Mechanism of immunotoxicity and regulation of immune signaling pathways on *Oryzias melastigma* under benzo( $\alpha$ )pyrene exposure[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019: 55-184.
- [12] 李丹妮. 中华绒螯蟹解毒基因及其相关酶对多环芳烃的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2017: 12-81.
- LI D N. Response of detoxification genes and related enzymes activities of Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*) to polycyclic aromatic hydrocarbons [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017: 12-81.
- [13] 林芳, 毛楷林, 江秀, 等. BaP 和 DDT 暴露对翡翠贻贝胚胎重要酶活性影响的比较研究[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(3): 129-137.
- LIN F, MAO K L, JIANG X, et al. Comparative studies of the critical enzymes activity of *Perna viridis* embryo exposed to BaP and DDT[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(3): 129-137.
- [14] 潘鲁青, 徐睿邑, 邓旭旭. 苯并[ $\alpha$ ]芘对栉孔扇贝生殖毒性效应的研究[J]. *中国科技论文*, 2017(12): 3 006-3 012.
- PAN L Q, XU R Y, DENG X X. Effects on reproductive toxicity of scallop *Chlamys farreri* exposed to benzo( $\alpha$ )pyrene[J]. *China Science Paper*, 2017(12): 3 006-3 012.
- [15] 汪敏. 肉及肉制品中苯并芘研究进展[J]. *肉类工业*, 2016(10): 49-51.
- WANG M. Research progress on benzopyrene in meat and meat products[J]. *Meat Industry*, 2016(10): 49-51.
- [16] KHAN S, ARIF S H, NASEEM I. Interaction of aminophylline with photoilluminated riboflavin leads to ROS mediated macromolecular damage and cell death in benzopyrene induced mice lung carcinoma[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2019, 302: 135-142.
- [17] 宋炳莹, 胡晓楠. 食品中苯并芘的高效液相色谱法探究[J]. *现代食品*, 2019(3): 145-148.
- SONG B Y, HU X N. HPLC study on benzo pyrene in food[J]. *Modern Food*, 2019(3): 145-148.
- [18] 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 Oil and Fats*, 2018, 43(10): 112-114.
- [19] 黄坤, 王幸平, 尹佳, 等. 高效液相色谱法测定大米和小麦粉中的苯并[ $\alpha$ ]芘[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(10): 86-88.
- HUANG K, WANG X P, YIN J, et al. Determination of benzo( $\alpha$ )pyrene in rice and wheat flour by high performance liquid chromatography[J]. *Cereals & Oils*, 2018, 31(10): 86-88.
- [20] 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]. *分析试验室*, 2009, 28(12): 63-66.
- HUANG L Y, LI X Z, QIN Z F. The study on determination of benzopyrene in aquatic products by SPE high performance liquid chromatography with fluorescence detection[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2009, 28(12): 63-66.
- [21] 杜金凤, 刘洪亮, 郭航宏, 等. 超声萃取—反相高效液相色谱—荧光法测定黑参中的苯并芘[J]. *理化检验: 化学分册*, 2021, 57(4): 315-317.
- DU J F, LIU H L, GUO H H, et al. Determination of benzopyrene in black ginseng by ultrasonic extraction-reversed phase high performance liquid chromatography with fluorescence detector[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis*, 2021, 57(4): 315-317.
- [22] 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[ $\alpha$ ]的测定[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[ $\alpha$ ] in vegetable oil by molecular imprinting column and HPLC[J].

- Food and Fermentation Sciences & Technology, 2020, 56(2): 112-116.
- [23] 韩爽, 丁雨欣, 冷秋雪, 等. 分子印迹电化学传感器在食品检测中的研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 205-210.  
HAN S, DING Y X, LENG Q X, et al. Research progress of molecularly imprinted electrochemical sensors in the field of determination in food safety[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 205-210.
- [24] 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( $\alpha$ )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.
- [25] 蔡洁云, 王惠平, 刘巍, 等. 胶基型嚼烟中 19 种多环芳烃的气相色谱-串联质谱技术法测定[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 89-94.  
CAI J Y, WANG H P, LIU W, et al. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in gum-based chewing tobacco by GC MS/MS[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 89-94.
- [26] 杨玲, 张姝姝, 林蔓. 气质联用法和高效液相色谱法测定苯并芘的对比研究[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版), 2016, 36(4): 11-13.  
YANG L, ZHANG S S, LIN M. Study on comparing of analytical technique for benzo( $\alpha$ )pyrene by GC-MS and HPLC[J]. Journal of Hubei Normal University (Natural Science), 2016, 36(4): 11-13.
- [27] 王磊, 樊蕊. 凝胶色谱-气质联用测定花生油中苯并芘残留[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 322-324.  
WANG L, FAN R. Determination of benzo( $\alpha$ )pyrene in peanut oil by gel permeation chromatography-gas chromatography/mass spectrometry[J]. The Food Industry, 2019, 40(5): 322-324.
- [28] 钱立. 表面增强拉曼光谱法用于食用油中苯并芘的快速检测[D]. 扬州: 扬州大学, 2020: 9-12.  
QIAN L. Surface enhanced Raman spectroscopy for rapid detection of benzo( $\alpha$ )pyrene in cooking oil[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020: 9-12.
- [29] ZHOU Z F, LU J L, WANG J Y, et al. Trace detection of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental waters by SERS[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 234(15): 118 250-118 256.
- [30] 邸志刚, 杨健俊, 王彪, 等. 基于表面增强拉曼散射的多环芳烃检测技术[J]. 激光杂志, 2021, 42(1): 1-6.  
DI Z G, YANG J T, WANG B, et al. Detection technology of polycyclic aromatic hydrocarbons based on surface enhanced Raman scattering[J]. Laser Journal, 2021, 42(1): 1-6.
- [31] 肖海波. 利用新型核壳纳米粒子作为 SERS 基底检测苯并芘[D]. 厦门: 集美大学, 2012: 13-40.  
XIAO H B. Detection of benzo( $\alpha$ )pyrene using novel core-shell nanoparticles as SERS substrate[D]. Xiamen: Jimei University, 2012: 13-40.
- [32] 肖旺. 基于表面增强拉曼光谱技术快速检测苯并芘的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 14-55.  
XIAO W. Rapid detection of benzo( $\alpha$ )pyrene based on surface-enhanced Raman spectroscopy technique [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 14-55.
- [33] 王珊. 表面增强拉曼光谱技术(SERS)快速检测食用油苯并( $\alpha$ )芘的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 16-39.  
WANG S. Study on the Rapid determination of benzo( $\alpha$ )pyrene in edible oil by surface enhanced raman spectroscopy (SERS) [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 16-39.
- [34] 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(8): 69-73.  
GAO W, DENG Z H. Study on test method of benzo( $\alpha$ )pyrene in food[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2018(8): 69-73.
- [35] 史巧巧. 苯并芘的免疫学快速检测技术研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014: 5.  
SHI Q Q. Study of benzo( $\alpha$ )pyrene immunological rapid detection method[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014: 5.
- [36] 邓安平. 酶联免疫吸附分析法测定苯并( $\alpha$ )芘和多氯联苯[J]. 环境化学, 2006, 25(3): 340-343.  
DENG A P. Enzyme linked immuno sorbent assay for the analysis of benzo ( $\alpha$ ) pyrene and polychlorobiphenyl [J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(3): 340-343.
- [37] 刘波, 王宇, 戚平, 等. 食用油中致癌物苯并芘的快速免疫检测胶体金层析试纸条研制[J]. 中国油脂, 2016, 41(7): 68-72.  
LIU B, WANG Y, QI P, et al. Development of colloidal gold immunochromatographic strip for rapid detection of carcinogens benzo( $\alpha$ )pyrene in edible oil[J]. China Oils and Fats, 2016, 41(7): 68-72.
- [37] GAO M, WANG D, DENG L, et al. High-crystallinity covalent organic framework synthesized in deep eutectic solvent: potentially effective adsorbents alternative to macroporous resin for flavonoids[J]. Chemistry of Materials, 2021, 33(20): 8 036-8 051.
- [38] KYRIAKIDOU A, MAKRI S D P, LAZARIDOU A, et al. Physical properties of chitosan films containing pomegranate peel extracts obtained by deep eutectic solvents[J]. Foods, 2021, 10(6): 1 362.

(上接第 216 页)

- [35] ZHANG X, SU J, CHU X, et al. A green method of extracting and recovering flavonoids from *acanthopanax senticosus* using deep eutectic solvents[J]. Molecules, 2022, 27(3): 923.
- [36] FU N, LV R, GUO Z, et al. Environmentally friendly and non-polluting solvent pretreatment of palm samples for polyphenol analysis using choline chloride deep eutectic solvents[J]. J Chromatogr A, 2017, 1 492: 1-11.