

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240912002

引用格式: 徐文英, 沈葆真, 曲世超, 等. 辽宁沿海经济鱼类的全氟化合物污染状况和风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 33–37.

XU WY, SHEN BZ, QU SC, *et al.* Pollution status and risk analysis of perfluorinated compounds in the commercial fishes in Liaoning coastal areas [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 33–37. (in Chinese with English abstract).

辽宁沿海经济鱼类的全氟化合物污染状况和 风险分析

徐文英, 沈葆真, 曲世超, 薛伟锋, 齐 欣*

(大连海关技术中心, 大连 116000)

摘 要: **目的** 调查辽宁沿海经济鱼类的全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)污染状况。**方法** 采集辽宁省主要经济海域旅顺、庄河、营口、锦州 4 个地区 6 种主要经济鱼类样品, 建立海洋生物样品的前处理规范程序, 用液相色谱-串联质谱法检测 PFCs, 研究这些经济鱼类中 PFCs 的污染水平, 并进行生物富集风险分析。**结果** 这些海域经济鱼类中 PFCs 污染主要为全氟辛磺酸(perfluorooctane sulfonates, PFOS)和全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)污染。PFOA 在鱼类样品中检出率达到 100%, PFOA 含量最大值达 30.30 ng/g ww, 最小值为 4.02 ng/g ww。PFOS 在鱼类内脏中的检出率达到 100%, 而在鱼肉组织未检出。黑鲷鱼、六线鱼、小黄鱼是所测试的这些经济鱼类中更易富集 PFOS、PFOA 的鱼种, 具有潜在的生物富集效应。**结论** 经济鱼类中广泛存在 PFCs 污染, PFCs 的检测工作应该持续开展, 对于 PFOS 及 PFOA 污染严重的地区应尽早采取防治措施, 持续进行这些污染物的监测及风险分析。

关键词: 全氟化合物; 全氟辛磺酸; 全氟辛酸; 污染水平; 生物富集

Pollution status and risk analysis of perfluorinated compounds in the commercial fishes in Liaoning coastal areas

XU Wen-Ying, SHEN Bao-Zhen, QU Shi-Chao, XUE Wei-Feng, QI Xin*

(Technology Center of Dalian Customs District, Dalian 116000, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the pollution status of perfluorinated compounds (PFCs) in commercial fish in Liaoning coastal areas. **Methods** The 6 species of marine commercial fish were collected from 4 coastal areas in Liaoning, including Lvshun, Zhuanghe, Yingkou, and Jinzhou. A standardized pre-processing procedure for marine fish samples was established. PFCs were detected using liquid chromatography-tandem mass spectrometry. The pollution levels of PFCs in the commercial fish were assessed, and the bioaccumulation risk analysis was conducted. **Results** The main PFCs pollutants in economic fish species in sea were perfluorooctanoic acid (PFOA) and

收稿日期: 2024-09-12

第一作者: 徐文英(1981—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: xiaozhewoshi@163.com

*通信作者: 齐欣(1984—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 110697186@qq.com

perfluorooctane sulfonates (PFOS). PFOA was detected in all fish samples, with maximum and minimum concentrations of 30.30 ng/g ww and 4.02 ng/g ww, respectively. PFOS was detected in 100% of fish viscera samples but was not found in muscle tissues. Among the tested species, *Sebastes fuscus*, *Hexagrammos otakii*, and *Larimichthys polyactis* were more prone to accumulating PFOS and PFOA, indicating potential bioaccumulation effects. **Conclusion** PFCs contamination is widespread in commercial fish. Continuous monitoring of PFCs shall be implemented, and control measures shall be taken in areas with severe PFOS and PFOA pollution. Ongoing monitoring and risk analysis of these pollutants are essential.

KEY WORDS: perfluorinated compounds; perfluorooctane sulfonates; perfluorooctanoic acid; pollution levels; bioaccumulation

0 引言

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)是一类新型持久性有机污染物,其中全氟辛磺酸(perfluorooctane sulfonates, PFOS)和全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)是两种最主要的PFCs。PFCs具有良好的表面活性和很高的化学稳定性,被广泛应用到工业生产多个领域^[1-3]。由于“碳-氟”键有很高的键能导致PFCs具有持久性、难降解性^[4],部分全氟化合物会蓄积在生物体内,对生物体的健康产生不良影响。毒理试验表明,PFCs具有肝脏毒性^[5]、神经毒性^[6]、生殖毒性^[7]、发育毒性^[6]、免疫毒性^[8]、内分泌干扰作用和潜在的致癌性^[9]。

目前许多研究表明全氟化合物已广泛存在于各种环境介质中^[10]。环境介质中的PFCs进入到动物体内,通过生物蓄积作用和食物链逐级放大^[11-12],最终在人体内富集从而产生潜在的生物毒性^[13]。饮食是PFCs的一种重要的暴露途径^[14-16],近年来通过饮用水^[17-20]和食品^[21-23]而摄入PFCs对人类健康引起风险也是研究的热点问题。对于沿海地区的居民来说海产品是日常饮食的重要组成部分,因此对海产品进行PFCs检测是一项很有必要进行的工作。

本研究采集了辽宁省主要经济海域旅顺、庄河、营口、锦州4个地区6种主要经济鱼类样品,研究这些经济鱼类中PFCs的污染水平,对可食用经济鱼类PFCs类物质污染情况进行生物富集风险分析,从人类健康角度,对减轻人类PFCs类物质负荷提出有效建议。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

2021年5月到2022年5月,收集辽宁省内旅顺、庄河、营口、锦州4个地区市售的6种主要经济海产鱼类样品,具体种类为:六线鱼(*Hexagrammos otakii*)、鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)、黑鲷鱼(*Sebastes schlegelii*)、小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)、鲷鱼(*Platycephalus indicus*)和

高眼鲷鱼(*Cleisthenes herzensteini*)。

PFOS钾盐(色谱纯)、PFOA(色谱纯,纯度为98%)(瑞士Fluka公司);全氟-1-辛烷磺酰胺(perfluoro-1-octanesulfonamide, FOSA)(色谱纯,加拿大Wellington Laboratories公司);四丁基硫酸氢铵(tetrabutylammonium hydrogen sulfate, TBAHS)、叔丁基甲醚(*tert*-butyl methyl ether, TBME)(优级纯,美国Sigma公司);玻璃纤维膜(上海安谱实验科技股份有限公司);HLB柱(美国Waters公司);乙腈(色谱纯,美国赛默飞世尔科技公司);NaOH、盐酸、醋酸铵(优级纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);高纯水:经脱PFCs处理。

N-EVAP-24 氮吹仪(美国Organomation公司); ZHWY334 往复式振荡器(苏州江东精密仪器有限公司); KQ3200DV 数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); PL203 电子天平(精度0.001 g, 瑞士梅特勒-托利多公司); Agilent6410B 液相色谱-串联质谱仪、Eclipse Plus C₁₈柱(2.1 mm×100 mm, 3.5 μm)(美国安捷伦公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理

称取0.1 g样品于15 mL离心管中,加入2 mL 0.5 mol/L NaOH溶液,振荡20 min,于80 °C水浴中消解12 h后取出静置,冷却至室温,用2 mol/L 盐酸溶液将消解液调至中性。向离心管中加入1 mL 0.5 mol/L 离子对试剂(TBAHS)、5 mL TBME,充分振荡20 min, 8000 r/min离心5 min,取上层有机相于另一离心管中,向消解液中再次加入5 mL TBME充分振荡20 min, 8000 r/min离心5 min,合并萃取液,氮气吹干。加入1 mL 乙腈复溶,待测。

1.2.2 液相色谱-串联质谱仪分析条件

色谱条件:分离柱:Eclipse Plus C₁₈柱(2.1 mm×100 mm, 3.5 μm);柱温:40 °C;流动相:乙腈+10 mmol 醋酸铵,梯度洗脱见表1;流速:0.25 mL/min;进样量:10 μL;运行时间:20 min。

质谱条件:电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI),负离子模式,源温120 °C;质谱条件见表2。

表 1 梯度洗脱程序		
Table 1 Gradient elution program		
时间/min	10 mmol/L 醋酸铵溶液/%	乙腈/%
0.00	60	40
9.00	10	90
12.00	10	90
12.01	60	40
20.00	60	40

表 2 质谱条件				
Table 2 Condition of mass spectrometry				
目标物名称	保留时间/min	母离子 (<i>m/z</i>)	子离子 (<i>m/z</i>)	碰撞能 /eV
PFOA	3.0	413	369 [*]	4
			169	16
PFOS	6.8	499	99 [*]	48
			80	72

注: *为定量离子对。

1.2.3 质量控制

本研究中所用的仪器和实验用具的聚四氟乙烯材料都进行了隔离处理, 所有器具均用色谱级甲醇预洗后再使用, 固相萃取柱使用前用脱 PFCs 水及甲醇进行处理。

1.3 数据处理

使用 Office Excel 2007 软件进行数据处理。

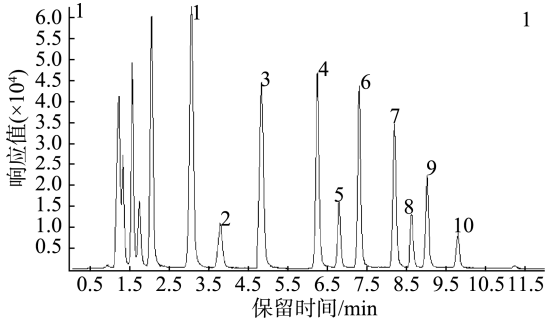
2 结果与分析

2.1 PFCs 检测结果质量分析

在最佳的流速和洗脱梯度条件下, PFCs 标准溶液的总离子质谱图如图 1 所示, 保留时间可接受, 分离效果理想。结合 PFCs 标准溶液的总离子质谱图, 本研究测定了主要经济鱼类样品中 PFCs 含量, 结果主要为 PFOA 和 PFOS, 因此本研究主要针对于这 2 种物质展开论述。PFOA 和 PFOS 的定量限(10 倍信噪比)分别为 7 pg/g 和 46 pg/g。满足痕量检测要求。

2.2 辽宁省主要经济海域鱼类 PFOS 和 PFOA 污染现状

PFOA 在各种鱼类样品中检出率达到 100%。PFOS 在鱼类内脏中的检出率达到 100%, 而在鱼肉组织未检出(见表 3)。这表明了 PFCs 污染在辽宁省主要经济海域的这些特色海产品中普遍存在。在所有检测的鱼类样品中 PFOA 含量按以下顺序递减: 黑鲷鱼肝>小黄鱼>黑鲷鱼>六线鱼>鲷鱼肝>鲷鱼卵>鲈鱼肝>高眼鲈鱼>鲈鱼>鲷鱼, PFOS 的含量按以下顺序递减: 鲷鱼卵>鲷鱼肝>黑鲷鱼肝>鲈鱼肝。



注: 1. PFOA; 2. PFHxS(全氟己烷磺酸, perfluorohexanesulfonate); 3. PFNA(全氟壬酸, perfluorononanoic acid); 4. PFDA(全氟癸酸, perfluorodecanoic acid); 5. PFOS; 6. PFUDA(全氟十一酸, perfluoroundecanoic acid); 7. PFDDA(全氟十二酸, perfluorododecanoic acid); 8. PFDS(全氟癸烷磺酸, perfluorodecanesulfonate); 9. PFTrDA(全氟十三酸, perfluorotridecanoic acid); 10. PFTeDA(全氟十四酸, perfluorotetradecanoic acid)。

图 1 PFCs 类混合物的总离子图

Fig.1 Total ion diagram of PFCs mixtures

表 3 鱼类样品中 PFOA 和 PFOS 的含量(ng/g ww)
Table 3 Concentrations of PFOA and PFOS in fish samples (ng/g ww)

采集地点	样品名称	描述指标	PFOA	PFOS
旅顺	黑鲷鱼	含量范围	5.90~15.50	ND
		平均值±标准偏差	10.20±2.82	ND
		含量范围	61.10~102.00	8.62~15.25
	黑鲷鱼肝	平均值±标准偏差	84.80±13.50	11.31±2.10
		含量范围	6.62~12.10	ND
	六线鱼	平均值±标准偏差	9.66±1.55	ND
庄河	高眼鲈鱼	含量范围	4.02~8.07	ND
		平均值±标准偏差	6.69±1.35	ND
		含量范围	13.90~30.30	ND
	小黄鱼	平均值±标准偏差	23.10±4.77	ND
		含量范围	4.13~7.35	ND
	鲈鱼	平均值±标准偏差	5.88±0.82	ND
营口	鲈鱼肝	含量范围	5.66~9.02	3.39~6.28
		平均值±标准偏差	6.86±0.96	4.87±1.01
		含量范围	4.30~7.89	ND
	鲷鱼	平均值±标准偏差	5.82±1.00	ND
		含量范围	5.68~10.80	8.55~15.78
	鲷鱼肝	平均值±标准偏差	7.52±1.62	11.94±2.05
锦州	鲷鱼卵	含量范围	5.40~10.30	95.27~158.74
		平均值±标准偏差	7.36±1.27	125.35±20.91

注: ND 为未检出。

有研究^[24]测定了胶州湾典型野生海产品, PFOS 检出率 100%, 所有的海产品中 PFOS、PFOA 含量分别达 4.77 ng/g 和 0.85 ng/g, 结果表明 PFOS 较 PFOA 来说更容易发生生物累积现象。而贝类样品中的 PFOA 含量高于 PFOS^[24-25]。另一研究^[26]显示 PFOS 是胶州湾水生生物中最主要的 PFASs, 含量为 0.87~16.15 ng/g ww, 鱼类中 PFOS 的含量最高(6.39 ng/g ww), 其次是乌贼(2.01 ng/g ww)、虾(1.79 ng/g ww)、贝类(1.23 ng/g ww)和浮游植物(1.13 ng/g ww)。

本次调查研究中的鱼肉样品中, PFOA 含量最大值 30.30 ng/g ww 出现在采集于营口的小黄鱼中, 最小值为 4.02 ng/g ww 是采集于庄河的高眼鲈鱼, 二者之间相差 7.5 倍。这种差异与物种差异和所在海域的污染情况密切相关, 这也体现了本次调查研究的必要性。

有研究^[27]对渤海湾鱼类进行全氟化合物检测, 结果表明易于分配在生物的内脏器或肝脏内。本调查研究中, 表 3 的检测结果数据对比也表明了 PFOS 对于 PFOA 来说更容易在鱼类肝脏中累积。在鲮鱼卵中 PFOS 含量达到 125.35 ng/g ww, 明显高于其肝脏中含量 11.94 ng/g ww, 表明卵中 PFOS 的生物蓄积更高。

2.3 不同鱼种的 PFCs 生物富集风险分析

生物富集是指生物从环境介质(水、土壤、沉积物和大气等)和食物中摄取污染物, 使得生物体内污染物的含量超过环境介质中该污染物含量的过程^[28-29]。污染物在生物体内的富集能力通常可以用生物浓缩因子(bioconcentration factor, BCF)或者生物富集因子(bioaccumulation factor, BAF)等参数来评估^[28-29]。BAF 是生物体内某污染物的浓度和水中该污染物浓度的比值。当计算某污染物的 BAF 值高于 5000 时, 该污染物被认为具有生物富集效应; 当 BAF 值在 2000~5000 时, 该污染物被认为具有潜在的生物富集效应^[28,30]。

本研究调查的特色经济鱼类中对 PFOA 的生物富集因子从高到低依次为: 黑鲷鱼肝>黑鲷鱼>六线鱼>小黄鱼>高眼鲈鱼>鲮鱼卵>鲮鱼肝>鲈鱼肝>鲈鱼>鲮鱼, 对 PFOS 的生物富集因子从高到低依次为: 黑鲷鱼肝>鲮鱼卵>鲮鱼肝>鲈鱼肝。黑鲷鱼、六线鱼、小黄鱼对 PFOA 有较明显的富集作用, 黑鲷鱼肝、鲮鱼肝、卵对 PFOS 有较明显的富集作用。除了鱼种差异, 所在海域污染情况等因素, 喂食习惯, 生活习惯, 营养级层都会影响 PFCs 在这些海产品中的累积和分布情况^[31-32]。

从表 4 的数据可以看出, 相对于鱼肉来说, PFCs 更容易富集于鱼类的内脏中。一般鱼类内脏不会作为人类食用部分, 不构成饮食健康负担。但对于食用内脏的特殊人群来说, 这是需要引起注意的。

表 4 不同鱼种的 BAF
Table 4 BAF of different fish species

鱼种	PFOA	PFOS
黑鲷鱼(肝)	3375 (28830)	(23208)
六线鱼	3286	-
小黄鱼	2253	-
鲈鱼(肝)	416 (485)	(497)
鲮鱼(肝、卵)	410 (519、526)	(1227、12893)
高眼鲈鱼	920	-

注: -为未有相关数据。

3 结 论

本次研究建立了海洋生物样品的前处理规范程序, 采用液相色谱-串联质谱法检测 PFCs。通过对采集于旅顺、营口、锦州、庄河当地海域特色经济鱼类的检测, 发现这些海域经济鱼类中存在广泛的 PFCs 污染, 主要为 PFOS 和 PFOA 污染。黑鲷鱼、六线鱼、小黄鱼是所测试的这些海域特色经济鱼类中更易富集 PFOS、PFOA 类物质的鱼种, 具有潜在的生物富集效应。出于对人类长期的健康考虑, 针对这些特色经济鱼类中 PFCs 的检测工作应该持续开展, 对于 PFOS 及 PFOA 污染严重的地区应尽早采取防治措施, 持续进行这些污染物的监测及风险分析。

参考文献

[1] GHOSH N, ROY S, MONDAL JA. On the behavior of perfluorinated persistent organic pollutant (POP) at environmentally relevant aqueous interfaces: An interplay of hydrophobicity and hydrogen-bonding [J]. *Langmuir*, 2020, 36(14): 3720-3729.

[2] MUMTAZ M, BAO YX, LIU LQ, *et al.* Per-and polyfluoroalkyl substances in representative fluorocarbon surfactants used in Chinese film-forming foams: Levels, profile shift, and environmental implications [J]. *Environmental Science and Technology Letters*, 2019, 6(5): 259-264.

[3] SONG XW, ROBIN V, SHI YL, *et al.* Emissions, transport, and fate of emerging per-and polyfluoroalkyl substances from one of the major fluoropolymer manufacturing facilities in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17): 9694-9703.

[4] 杨圣舒, 刘美, 张迪. 地表水中典型全氟化合物的污染特性及降解机理研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, 42(3): 39-42.

YANG SS, LIU M, ZHANG D. Pollution characteristics and degradation mechanism of typical fluorine compounds in surface Water [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(3): 39-42.

[5] 李侃. 典型全氟化合物在食物中的生物有效性及对小鼠的肝毒性、致毒机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.

LI K. Typical perfluoroalkyl substances bioavailability in foods, and their exposure caused mice liver toxicity, and mode of action [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.

[6] GABALLAH S, SWANK A, SOBUS JR, *et al.* Evaluation of developmental toxicity, developmental neurotoxicity, and tissue dose in zebrafish exposed to Genx and other PFAS [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, 128(4): 47005.

[7] CASSONE CG, VONGPHACHAN V, CHIU S, *et al.* effects of perfluorohexane sulfonate and perfluorohexanoate on pipping success,

- development, mRNA expression and thyroid hormone levels in chicken embryos [J]. *Toxicological Sciences*, 2012, 127(1): 216.
- [8] 周茜, 刘征辉, 孟宪华, 等. 全氟辛酸免疫毒性研究进展[J]. *环境与职业医学*, 2019, 36(3): 266–271.
- ZHOU X, LIU ZH, MENG XH, *et al.* Research progress on immunotoxicity of perfluorooctanoic acid [J]. *Journal of Environmental and Occupational*, 2019, 36(3): 266–271.
- [9] MANDANA G, MANHAI L, DURITAM R, *et al.* Polymorphism in xenobiotic and estrogen metabolizing genes, exposure to perfluorinated compounds and subsequent breast cancer risk: A nested case-control study in the Danish National Birth Cohort [J]. *Environmental Research*, 2017, 154: 325–333.
- [10] 姚谦, 田英. 中国人群全氟化合物健康风险评估研究进展[J]. *上海交通大学学报(医学版)*, 2021, 41(6): 803–808.
- YAO Q, TIAN Y. Research progress in health risk assessment of perfluorinated compounds among Chinese population [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science)*, 2021, 41(6): 803–808.
- [11] 徐倩云. 海河流域全氟烷基化合物的人体健康水质基准研究与健康风险评估[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- XU QY. Human health ambient water quality criteria and health risk assessment of perfluoroalkyl substances in haihe basin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [12] 肖少可. 传统和替代全氟化合物在北部湾的空间分布、生物富集及营养级迁移[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- XIAO SK. Spatial distribution, bioaccumulation and trophic transfer of legacy and alternative per-and polyfluoroalkyl substances in the Beibu Gulf [D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [13] 朱永乐, 汤家喜, 李梦雪, 等. 全氟化合物污染现状及与有机污染物联合毒性研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2021, 16(2): 86–99.
- ZHU YL, TANG JX, LI MX, *et al.* Contamination status of perfluorinated compounds and its combined effects with organic pollutants [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(2): 86–99.
- [14] 高雪娜. 我国居民全氟及多氟化合物的暴露评估[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- GAO XY. Exposure assessment of per-and polyfluoroalkyl substances in Chinese residents [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [15] 张恣意, 曹文成, 周妍, 等. 湖北某典型地区动物源食品中全氟及多氟烷基化合物的污染现状和膳食暴露评估[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 214–222.
- ZHANG ZY, CAO WC, ZHOU Y, *et al.* Pollution status and dietary exposure assessments of per-and polyfluoroalkyl substances in animal food from a typical area in Hubei Province [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 214–222.
- [16] MENG J, LIU SF, ZHOU YQ, *et al.* Are perfluoroalkyl substances in water and fish from drinking water source the major pathways towards human health risk? [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 181: 194–201.
- [17] 王鑫璇, 张鸿, 王艳萍, 等. 中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 703–710.
- WANG XX, ZHANG H, WANG YP, *et al.* Perfluoroalkyl acid pollution levels and drinking water exposure risk in seven major river basins of China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 703–710.
- [18] BOONE JS, VIGO C, BOONE T, *et al.* Per-and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of the United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653(FEB.25): 359–369.
- [19] ZHANG SY, KANG QY, PENG H, *et al.* Relationship between perfluorooctanoate and perfluorooctane sulfonate blood concentrations in the general population and routine drinking water exposure [J]. *Environment International*, 2019, 126: 54–60.
- [20] LU ZB, LU R, ZHENG HY, *et al.* Risk exposure assessment of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water and atmosphere in central Eastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(10): 9311–9320.
- [21] 郑翌, 冷桃花, 潘煜辰, 等. 全氟化合物在食品中的污染情况及检测方法研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(10): 314–333.
- ZHENG Y, LENG TH, PAN YC, *et al.* Research progress on contamination and determination methods of perfluorinated compounds in food [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(10): 314–333.
- [22] 张恣意, 龚艳, 曹文成, 等. 我国主要食品中全氟烷基化合物的污染现状及膳食暴露评估研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 410–416.
- ZHANG ZY, GONG Y, CAO WC, *et al.* Research progress of concentrations and exposure assessment of perfluorinated alkyl substances in main food in China [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 410–416.
- [23] 刘晓湾, 张鸿, 李静, 等. 中国沿海地区鸡蛋中全氟化合物污染水平及分布[J]. *食品科学*, 2016, 37(4): 191–196.
- LIU XW, ZHANG H, LI J, *et al.* Investigation of contamination levels of perfluorinated compounds in eggs from nine coastal provinces of China [J]. *Food Science*, 2016, 37(4): 191–196.
- [24] HAN T, GAO L, CHEN J, *et al.* Spatiotemporal variations, sources and health risk assessment of perfluoroalkyl substances in a temperate bay adjacent to metropolis, North China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265(Pt A): 115011.
- [25] GUO M, ZHENG G, PENG J, *et al.* Distribution of perfluorinated alkyl substances in marine shellfish along the Chinese Bohai Sea coast [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 2019, 54(4): 271–280.
- [26] 韩同竹. 胶州湾海水和生物体中全氟化合物的分布特征及来源解析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2018.
- HAN TZ. Distribution and potential sources of perfluoroalkyl substances (PFASs) in Jiaozhou bay [D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, People's Republic of China, 2018.
- [27] 杨丽萍. 渤海湾海产品中全氟化合物的生物积累与组织分布[C]//持久性有机污染物论坛 2012 暨第七届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集. 天津: 中国化学会, 2012: 56–57.
- YANG LP. Bioaccumulation and distribution of perfluoroalkyl acids in seafood products from Bohai Bay[C]//The Persistent Organic Pollutant Forum 2012. Tianjin: Chinese Chemical Society, 2012: 56–57.
- [28] 吴江平, 管运涛, 李明, 等. 全氟化合物的生物富集效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5): 1246–1252.
- WU JP, GUAN YT, LI M, *et al.* Recent research advances on the bioaccumulation potentials of perfluorinated compounds [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5): 1246–1252.
- [29] GOBAS FAPC, MORRISON HA. Bioconcentration and biomagnification in the aquatic environment [M]. Boca Raon, FL: Lewis Publishers, 2000.
- [30] UNEP. Final act of the conference of plenipotentiaries on the stockholm convention on persistent organic pollutants [Z]. 2001.
- [31] DU D, LU YL, ZHOU YQ, *et al.* Bioaccumulation, trophic transfer and biomagnification of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in the marine food web of the South China Sea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405: 124681.
- [32] 杜获, 吕永龙, 陈春赐, 等. 气候变化条件下全氟化合物对海岸带可持续发展的影响及管控策略[J]. *生态学报*, 2022, 42(12): 4719–4728.
- DU D, LU YL, CHEN CC, *et al.* Impacts of perfluoroalkyl substances on sustainable development of coastal marine ecosystems under climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12): 4719–4728.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)