

上海市徐汇区市售海产品中多溴联苯醚污染水平

宋瑞, 许东, 姚嘉晖, 张晨彤, 张梅如, 胡孜元

上海市徐汇区疾病预防控制中心环境职业卫生科, 上海 200237

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2019.19155

摘要:

[背景] 多溴联苯醚 (PBDEs) 是一种广泛应用于电子产品的含溴阻燃剂。作为环境污染物, PBDEs 易通过食物富集并最终对人体多系统产生影响。海产品是人体通过食物蓄积 PBDEs 的重要途径。上海作为一座沿海城市, 居民对海产品的摄入不容小觑。而目前关于上海地区海产品中 PBDEs 污染水平的研究较少。

[目的] 本研究拟了解上海徐汇区市售海产品中 PBDEs 的现状, 为进一步开展相关调查研究和制订政策和措施提供依据。

[方法] 在徐汇区域内超市和农贸市场采集海产品, 包括海鱼、海虾和海贝共计 50 份, 采用气相色谱-串联质谱法 (GC-MS/MS) 对食品样品中最常见的 8 种 PBDEs 单体 (BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183 和 BDE-209) 进行含量检测, 并比较超市和农贸市场样品之间以及不同种类海产品之间 PBDEs 单体和总 PBDEs 的检出含量和检出率差异。

[结果] 本研究共计进行 50 件样品 (400 项次) 的检测, 检出 130 项次, 检出率为 32.5%。其中检出率最高的为 BDE-153 (64.0%), 检出含量中位数最高的亦为 BDE-153 (2.35 ng/kg), BDE-209 未检出。在总体检出率方面, 农贸市场和超市之间无统计学差异 ($\chi^2=0.73$, $P=0.39$), 但单体 BDE-47 在农贸市场的检出率高于超市 ($\chi^2=4.92$, $P=0.03$)。三种类型的海产品中, 海鱼的 Σ PBDEs 检出含量中位数为 62.00 ng/kg, 高于海虾 (54.20 ng/kg) 和海贝 (57.40 ng/kg) ($H=6.52$, $P=0.04$); 并且三种类型海产品在单体 BDE-99 ($\chi^2=12.29$, $P<0.01$)、BDE-100 ($\chi^2=11.91$, $P<0.01$)、BDE-153 ($\chi^2=9.66$, $P<0.01$) 的检出率之间的差异有统计学意义, 均以海鱼最高。

[结论] 徐汇区市售海产品中存在 PBDEs。虽然检出含量及检出率与其他研究相比处于较低水平, 但是由于食物是人类暴露于 PBDEs 的主要途径, 因此海产品中 PBDEs 的污染依然应引起重视。

关键词: 多溴联苯醚; 海产品; 气相色谱-串联质谱; 食品安全

Pollution levels of PBDEs in retail seafood in Xuhui District of Shanghai SONG Rui, XU Dong, YAO Jia-hui, ZHANG Chen-tong, ZHANG Mei-ru, HU Zi-yuan (Environmental and Occupational Health Department, Shanghai Xuhui District Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200237, China)

Abstract:

[Background] Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) are a class of brominated flame retardants widely used in electronic products. As a group of environmental pollutants, PBDEs can accumulate through diet and eventually affect multiple systems of human body. Seafood intake is an important way for human body to accumulate PBDEs through food. The intake of seafood of residents in Shanghai, a coastal city, should not be underestimated. At present, however, there are few studies on PBDEs pollution level in seafood in Shanghai.

[Objective] The purpose of this study is to evaluate the current PBDEs pollution in retail seafood in Xuhui District of Shanghai, and provide a basis for further investigation and policy making.

[Methods] A total of 50 seafood samples including sea fish, shrimp, and shellfish were collected from supermarkets and agricultural markets in Xuhui District. The concentrations of eight PBDEs monomers (BDE-28, BDE-47, BDE-99, BDE-100, BDE-153, BDE-154, BDE-183, and BDE-209) were determined by gas chromatography-tandem mass spectrometry (GC-MS/MS). The concentrations and detection rates of PBDEs monomers and total PBDEs were compared between supermarket and agricultural market samples and among different kinds of seafood.

[Results] In this study, a total of 50 samples were tested 400 times, and 130 times were found

基金项目

上海市卫生健康委员会科研课题青年项目 (2016Y0034)

作者简介

宋瑞 (1987—), 女, 硕士, 主管医师; E-mail: songrui0912@163.com

通信作者

许东, E-mail: xudong4478@163.com

利益冲突 无申报

收稿日期 2019-03-19

录用日期 2019-08-15

文章编号 2095-9982(2019)11-1037-05

中图分类号 R155.5+5

文献标志码 A

引用

宋瑞, 许东, 姚嘉晖, 等. 上海市徐汇区市售海产品中多溴联苯醚污染水平 [J]. 环境与职业医学, 2019, 36 (11): 1037-1041.

► 本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2019.19155

Funding

This study was funded.

Correspondence to

XU Dong, E-mail: xudong4478@163.com

Competing interests None declared

Received 2019-03-19

Accepted 2019-08-15

► To cite

SONG Rui, XU Dong, YAO Jia-hui, et al. Pollution levels of PBDEs in retail seafood in Xuhui District of Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2019, 36(11): 1037-1041.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2019.19155

positive of PBDEs, with a detection rate of 32.5%. The highest detection rate was BDE-153 (64.0%), the highest median concentration was BDE-153 (2.35 ng/kg), and BDE-209 was below the limit of detection. There was no statistical difference in the overall detection rate between seafood samples from agricultural markets and supermarkets ($\chi^2=0.73$, $P=0.39$), but the detection rate of BDE-47 in agricultural market samples was significantly higher than that in supermarket samples ($\chi^2=4.92$, $P=0.03$). The median concentration of Σ PBDEs in sea fish samples was 62.00 ng/kg, significantly higher than the median concentrations in shrimp (54.20 ng/kg) and shellfish (57.40 ng/kg) ($H=6.52$, $P=0.04$); the detection rates of BDE-99 ($\chi^2=12.29$, $P<0.01$), BDE-100 ($\chi^2=11.91$, $P<0.01$), and BDE-153 ($\chi^2=9.66$, $P<0.01$) were significantly different among the three kinds of seafood, with the highest rates found in sea fish samples.

[Conclusion] PBDEs are detected positive in retail seafood in Xuhui District. Although the concentrations and detection rates of PBDEs are at a low level compared with studies in other areas, the pollution of PBDEs in seafood should be concerned as food intake is a main exposure pathway for PBDEs.

Keywords: polybrominated diphenyl ethers; seafood; gas chromatography-tandem mass spectrometry; food safety

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 是一种阻燃性能较好的含溴阻燃剂, 由于其阻燃效率高、热稳定性好、添加量少、对材料性能影响小、价格便宜, 而被广泛应用于电子、电器、化工、交通等领域^[1], 但是它却很难通过物理、化学或生物方法降解, 因而能在土壤或沉积物等环境介质中长期存在^[2], 并通过生物富集作用随食物链逐渐放大, 从而给人体健康带来潜在风险^[3-4]。研究显示, PBDEs 可能对人体的甲状腺系统、神经系统、免疫系统等多系统产生毒性作用, 并可能致畸、致癌和致突变等^[5-7], 尤其是具有高毒、致畸和致癌作用的四溴、五溴联苯醚严重威胁生物体健康^[8-9]。基于其严重的环境毒性, 许多国家和地区已严禁大型家用器具等 8 类机电产品含有 PBDEs 等有害物质^[10]。虽然我国已从 2007 年 3 月起逐步停止使用 PBDEs 部分产品, 但是我国依然是目前全球最大的 PBDEs 生产地之一^[11], 故对 PBDEs 的研究不容忽视。

PBDEs 暴露主要来源于食物的摄入, 世界卫生组织认为每天 PBDEs 背景摄入量的 90% 来源于饮食, 因此对食物中 PBDEs 的监测不容忽视。鲍彦等^[12]曾对我国居民进行 PBDEs 膳食暴露水平和风险评估, 发现 PBDEs 含量平均值最高的为蛋类、水产和肉类; 邱敬磊等^[13]的监测结果显示, 上海市淡水水产品中 PBDEs 的残留水平较相关研究低^[14-15]。国内其他省市也有关于该方面的研究, 如蒋友胜等^[16]对广东省深圳市的市售食物进行检测发现, PBDEs 污染水平较高的依次是蛋类、鱼类和猪肉, 并且食品样品中主要的污染物是 BDE-47, 但是该研究的样本量较低; 马新东^[17]发现, 大连海域贻贝样品中 BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154 和 BDE-183 均有检出, 并且以 BDE-28、BDE-47、BDE-99 和 BDE-100 为主; 而陈树科等^[18]对乐清湾海域 23 个鱼类样品的 PBDEs 污染水平进行检测发现, BDE-28、BDE-47、BDE-100 在所有

样品中均有检出, BDE-183 均未检出。

海产品对于海水中的化学污染物具有生物富集作用, 是机体摄入 PBDEs 的重要途径。上海属于近海城市, 居民对海产品的摄入量较高, 但是目前上海地区相关研究较少, 尤其上海市徐汇区目前没有关于该方面的研究, 因此本研究对上海市徐汇区市售海产品中 PBDEs 的污染水平进行调查, 初步探讨该区市售海产品中 PBDEs 的污染特征。

1 材料与方法

1.1 样品来源

于 2017 年 12 月至 2018 年 8 月对上海市徐汇区 8 家大型超市和 8 家农贸市场海产品进行采样, 采集的样品包括海鱼 27 件、海贝 16 件、海虾 7 件, 共计 50 件样品, 28 件来自大型超市, 22 件来自农贸市场; 产地方面, 浙江 31 件 (主要是舟山、宁波), 山东 5 件 (主要是威海、日照)、上海 5 件、福建 3 件 (福州、宁德)、进口 3 件、辽宁 2 件 (大连)、天津 1 件。为了增加区域代表性, 减少采样点对结果的影响, 每个采样点所采集样品数不多于 5 件。

1.2 检测指标

食品链中最主要的 8 种 PBDEs 污染物单体: BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183 和 BDE-209。

1.3 试剂与仪器

1.3.1 标准物质 8 种 PBDEs 混合标准溶液 (三溴至七溴联苯醚质量浓度为 20 $\mu\text{g/mL}$, 十溴联苯醚质量浓度为 200 $\mu\text{g/mL}$, AccuStandard, 美国): 三溴联苯醚 (BDE-28)、四溴联苯醚 (BDE-47)、五溴联苯醚 (BDE-99、BDE-100)、六溴联苯醚 (BDE-153、BDE-154)、七溴联苯醚 (BDE-183)、十溴联苯醚 (BDE-209); 内标物: 十氯联苯 (99.47%) 10 mg (Dr. Ehrenstorfer, 德国)。

1.3.2 试剂 正己烷 (农残级, 上海安谱实验科技股份

有限公司, 中国), 无水硫酸钠、浓硫酸(分析纯, 中国医药集团有限公司, 中国)。

1.3.3 固相萃取柱 中性氧化铝柱(上海安谱实验科技股份有限公司, 中国)。

1.3.4 仪器与设备 分析天平(ME204, Mettler-Toledo, 美国), 超声波清洗器(P120H, Elma, 德国), 旋转蒸发器(Hei-VAP Precision ML/G3, Heidolph, 德国), 氮吹仪(DC-24-RT, 上海安谱实验科技股份有限公司, 中国), 气相色谱-串联质谱联用仪(Agilent 7000, Agilent, 美国)。

1.4 实验方法

1.4.1 样品提取和净化 称取5g样品于70mL玻璃试管, 加入5g无水硫酸钠、15mL正己烷, 避光超声30min, 3880×g离心20min, 转移上清液至另一试管, 避光保存。于样品试管中再加入15mL正己烷, 重复提取一次, 合并两次提取液共30mL。于30mL提取液中缓慢加入3mL硫酸, 轻微混匀, 静置分层, 弃去硫酸, 于提取液中再加入3mL硫酸, 重复净化一次。转移上清液至150mL鸡心瓶中, 40℃、335kPa, 旋转蒸发器蒸发至1~2mL, 转移溶液至活化好的中性氧化铝柱上, 用10mL正己烷洗脱并收集至氮吹管中, 同时加入50μL 100μg/L的十氯联苯内标溶液, 氮吹至1mL, 过0.22μm滤膜后经气相色谱-串联质谱(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)分析。

1.4.2 标准曲线的配制 分别取一定量的PBDEs混合标准溶液, 用正己烷稀释定容配制标准曲线工作溶液; BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183质量浓度为0.5、1、2、5、10、20μg/L; BDE-209质量浓度为50、100、200、500、1000μg/L。

1.4.3 内标溶液的配制 取一定量的内标物十氯联苯, 用正己烷稀释定容, 配制成质量浓度为100μg/L的内标溶液。

1.4.4 仪器条件 色谱柱为DB-5HT(15m×0.25mm×

0.1μm), 检测条件设置如下: 进样口温度300℃; 不分流进样; 进样体积4μL; 升温程序, 初始温度100℃, 保持1.0min, 50℃/min升至200℃, 再以20℃/min升至340℃, 保持2min; 载气为氦气; 流速为1.2mL/min; 传输线温度310℃; 离子源温度280℃; 四级杆温度150℃。

1.5 质量控制

本研究的样品检测参照CNAS-CL01-A002:2018《检测和校准实验室能力认可准则在化学检测领域的应用说明》^[19]进行质量控制, 每分析20个样品时进行质量控制, 方法包括方法空白、试剂空白、样品双平行测定和样品加标回收实验。

1.6 统计学分析

所有低于方法检测限的数据以检出限(limit of detection, LOD)的一半赋值。数据的表述和统计分析均采用SPSS 21.0。PBDEs各单体在三种海产品中检出含量的差异分析采用多个独立样本比较的Kruskal-Wallis检验, 对于检出含量有统计学意义的变量再通过校正P值进一步进行两两比较。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 PBDEs的总体检出情况

本研究中各PBDEs单体的LOD如表1所示, 在回收率和精密度的计算上, 对8种PBDEs均进行三水平加标, 每水平加标进行三平行测试, 回收率及精密度结果见表1。本研究完成50件样品(共计400项次)的检测, 检出130项次, 检出率为32.5%; PBDEs各单体均有未检出, 最高为158.43ng/kg, 该值来源于鲳鱼(浙江舟山)样品中的BDE-47。单体检出率最高的为BDE-153(64.0%), 其次为BDE-47(46.0%)、BDE-154(44.0%), 另外, BDE-209未检出。除BDE-209外, 50件海产品中PBDEs检出含量中位数最高的为BDE-153(2.35ng/kg), 该结果与各单体的检出率结果相一致。

表1 徐汇区市售海产品中PBDEs检出情况

PBDEs	LOD(ng/kg)	回收率(%)	精密度(%)	定量离子对			定性离子对			检出范围(ng/kg)	P_{50} (ng/kg)	检出数	检出率(%)
				母离子	子离子	碰撞能量	母离子	子离子	碰撞能量				
BDE-28	1	97.04	1.57	247.9	139.1	30	407.8	247.9	20	ND~13.27	0.50	10	20.0
BDE-47	1	105.14	2.34	325.9	137.9	45	485.5	329.9	20	ND~158.43	0.50	23	46.0
BDE-99	1	110.59	1.29	565.7	405.8	20	405.8	297.0	60	ND~84.02	0.50	17	34.0
BDE-100	1	105.74	3.50	565.7	405.8	20	405.8	297.0	60	ND~27.60	0.50	14	28.0
BDE-153	1	105.13	3.82	643.6	483.8	20	483.3	376.7	30	ND~144.58	2.35	32	64.0
BDE-154	1	113.01	2.67	643.6	483.8	20	483.3	376.7	30	ND~51.54	0.50	22	44.0
BDE-183	1	111.71	2.19	561.6	454.8	35	721.6	561.4	20	ND~36.47	0.50	12	24.0
BDE-209	100	105.84	1.93	799.5	720.5	35	799.5	639.5	55	ND	50.00	0	0.0

[注] BDE-209未检出, 按1/2 LOD计算。

2.2 不同采样点检出情况

如表 2 所示, 农贸市场与超市的总体检出率差异没有统计学意义 ($\chi^2=0.73$, $P=0.39$); 其中 BDE-47 在农贸市场的检出率高于超市 ($\chi^2=4.92$, $P=0.03$)。

2.3 不同种类海产品 PBDEs 检出情况

如表 3 所示, 海鱼中 BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154 和 Σ PBDEs 的检出含量中位数为 2.10、0.70、4.20、2.10、62.00 ng/kg, 均高于海虾和海贝 ($P<0.05$); 海鱼中 BDE-99、BDE-100 的检出率为 55.6%、48.2%, 亦均高于海虾和海贝 ($P<0.05$); 海贝中 BDE-153 的检出率为 81.3%, 高于海鱼和海虾 ($P<0.05$)。

表 2 不同采样地点海产品中 PBDEs 检出情况分析

PBDEs	超市 (n=28)		农贸市场 (n=22)		χ^2	P
	检出数	检出率 (%)	检出数	检出率 (%)		
BDE-28	7	25.0	3	13.6	0.41	0.52
BDE-47	9	32.1	14	63.6	4.92	0.03
BDE-99	10	35.7	7	31.8	0.86	0.35
BDE-100	8	28.6	6	27.3	0.01	0.92
BDE-153	18	64.3	14	63.6	0.00	0.96
BDE-154	13	46.4	9	40.9	0.15	0.70
BDE-183	4	14.3	8	36.4	3.29	0.07
BDE-209	0	0.0	0	0.0	—	—
Σ PBDEs	20	71.4	18	81.8	0.73	0.39

表 3 不同种类海产品 PBDEs 检出含量和检出率

PBDEs	海鱼 (n=27)						海虾 (n=7)						海贝 (n=16)						平均检出含量		检出率	
	均数	标准差 (ng/kg)	中位数	最大值	检出数	检出率 (%)	均数	标准差 (ng/kg)	中位数	最大值	检出数	检出率 (%)	均数	标准差 (ng/kg)	中位数	最大值	检出数	检出率 (%)	H	P	χ^2	P
BDE-28	1.78	2.88	0.50	13.30	8	29.6	0.50	0.00	0.50	0.50	0	0.0	0.73	0.63	0.50	2.50	2	12.5	3.91	0.14	3.88	0.14
BDE-47	16.75	37.58	2.00	158.40	15	55.6	0.61	0.30	0.50	1.30	1	14.3	2.88	4.18	0.50	16.00	7	43.8	5.00	0.08	3.86	0.15
BDE-99	9.41	18.36	2.10	84.00	15	55.6	0.57	0.19	0.50	1.00	1	14.3	0.93	1.70	0.50	7.30	1	6.3	10.22	<0.01	12.29	<0.01
BDE-100	6.11	8.30	0.70	27.60	13	48.2	0.50	0.00	0.50	0.50	0	0.0	1.06	2.25	0.50	9.50	1	6.3	12.47	<0.01	11.91	<0.01
BDE-153	22.20	43.45	20.00	144.60	18	66.7	0.60	0.26	0.50	1.20	1	14.3	3.09	3.70	2.60	16.30	13	81.3	9.36	<0.01	9.66	<0.01
BDE-154	9.10	14.36	2.10	51.50	15	55.6	0.64	0.38	0.50	1.50	1	14.3	1.62	3.07	0.50	12.90	6	37.5	7.08	0.03	4.25	0.12
BDE-183	5.39	9.65	0.50	36.50	8	29.6	1.07	1.51	0.50	4.50	1	14.3	1.64	3.49	0.50	14.40	3	18.8	1.66	0.44	1.07	0.59
BDE-209	50.00	0.00	50.00	50.00	0	0.0	50.00	0.00	50.00	50.00	0	0.0	50.00	0.00	50.00	50.00	0	0.0	0.00	1.00	—	—
Σ PBDEs	120.73	126.97	62.00	529.90	20	74.1	54.50	1.38	54.20	57.50	5	71.4	61.95	15.58	57.40	117.80	13	81.3	6.52	0.04	0.38	0.83

[注] BDE-209 未检出, 按 1/2 LOD 计算。

3 讨论

本研究对上海市徐汇区市售海产品中 PBDEs 的污染水平进行了分析, 除 BDE-209 外, 其他单体均有检出, 以六溴联苯醚 BDE-153 的检出率最高, 其次为四溴联苯醚 BDE-47 和六溴联苯醚 BDE-154。高溴联苯醚 BDE-209 容易在水体等环境介质中残留, 但也很容易经降解转化为低溴联苯醚, 并经食物链蓄积在动物体内, 因此食物中以低溴联苯醚的蓄积为主, 而较少有高溴联苯醚 BDE-209 的检出^[20-21]。在检出水平方面, 国内的研究中, 蒋友胜等^[16]发现我国南方某市鱼类 PBDEs 总含量平均值为 189.50 ng/kg, 刘斌等^[22]检测发现深圳市售海水鱼 PBDEs 总含量平均值为 123.2 ng/kg。上述两研究所检测的 PBDEs 单体与本研究相同。虽然根据采样点和样品的不同, PBDEs 在生物体内的水平在 ng/g~ μ g/g (以每 g 脂重计) 的范围不等^[23], 并且不同研究所检测的 PBDEs 单体不同, 但是总体来看, 本研究海产品中 PBDEs 含量还是处于较低水平。

本研究对采样点分析显示, BDE-47 外, 其他 PBDEs 单体及总 PBDEs 在农贸市场和超市之间的检出率均无统计学差异, 因此居民在购买海产品时可以在超市和农贸市场之间自由选择, 但是依然建议居民选

择质量及口碑较好的超市或农贸市场, 保证食品来源的安全性, 降低产品被污染的可能性。本研究如 BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154 和 Σ PBDEs 的检出含量中位数和检出率在不同种类海产品中有所不同, 以海鱼中 Σ PBDEs 的含量最高。这提示居民在选择海产品种类时除了考虑个人喜好外, 应更多地考虑选择受污染较少的产品种类去代替那些可能积蓄污染物的产品种类。另外, 研究表明, 除环境中 PBDEs 迁移进入食品外, 包装材料渗出也是食品中 PBDEs 污染的重要途径^[24], 因此应尽量减少外卖类食物的食用, 以减少因包装材料外渗而摄入的 PBDEs。

本研究还存在一定的局限性。首先, 本研究的样本量较少, 仅在一定程度上代表徐汇区市售海产品中 PBDEs 污染水平, 未来应通过扩大样本量对徐汇区市售海产品中整体 PBDEs 污染水平进行进一步监测; 其次, 本研究的样品产地多集中于浙江舟山, 不能体现产地对 PBDEs 水平的影响大小。

虽然本研究显示上海市徐汇区市售海产品中 PBDEs 的含量不高, 但是由于上海是一座沿海城市, 居民的水产品食用量相对较高, 而食物是人体暴露于 PBDEs 的主要途径, 因此对该市水产品中 PBDEs 的监

测依然不容忽视。

参考文献

- [1] ZHANG S, XU X, WU Y, et al. Polybrominated diphenyl ethers in residential and agricultural soils from an electronic waste polluted region in South China: distribution, compositional profile, and sources [J]. *Chemosphere*, 2014, 102: 55-60.
- [2] 刘汉霞, 张庆华, 江桂斌, 等. 多溴联苯醚及其环境问题 [J]. *化学进展*, 2005, 17 (3): 554-562.
- [3] MA X, ZHANG H, YAO Z, et al. Bioaccumulation and trophic transfer of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in a marine food web from Liaodong Bay, North China [J]. *Mar Pollut Bull*, 2013, 74 (1): 110-115.
- [4] WANG HS, JIANG GM, CHEN ZJ, et al. Concentrations and congener profiles of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in blood plasma from Hong Kong: implications for sources and exposure route [J]. *J Hazard Mater*, 2013, 261: 253-259.
- [5] CHEN Q, YU L, YANG L, et al. Bioconcentration and metabolism of decabromodiphenyl ether (BDE-209) result in thyroid endocrine disruption in zebrafish larvae [J]. *Aquat Toxicol*, 2012, 110-111: 141-148.
- [6] HERBSTMAN JB, SJÖDIN A, KURZON M, et al. Prenatal exposure to PBDEs and neurodevelopment [J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118 (5): 712-719.
- [7] KURIYAMA SN, TALSNESS CE, GROTE K, et al. Developmental exposure to low-dose PBDE-99: effects on male fertility and neurobehavior in rat offspring [J]. *Environ Health Perspect*, 2005, 113 (2): 149-154.
- [8] MORRISSEY CA, ELLIOTT JE, ORMEROD SJ. Local to continental influences on nutrient and contaminant sources to river birds [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44 (5): 1860-1867.
- [9] WONG MH, WU SC, DENG WJ, et al. Export of toxic chemicals - a review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling [J]. *Environ Pollut*, 2007, 149 (2): 131-140.
- [10] MA J, ADDINK R, YUN S, et al. Polybrominated dibenzo-*p*-dioxins/dibenzofurans and polybrominated diphenyl ethers in soil, vegetation, workshop-floor dust, and electronic shredder residue from an electronic waste recycling facility and in soils from a chemical industrial complex in eastern China [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43 (19): 7350-7356.
- [11] YU G, BU Q, CAO Z, et al. Brominated flame retardants (BFRs): A review on environmental contamination in China [J]. *Chemosphere*, 2016, 150: 479-490.
- [12] 鲍彦, 尹帅星, 张磊, 等. 中国居民多溴联苯醚的膳食暴露水平和风险评估 [J]. *环境化学*, 2016, 35 (6): 1172-1179.
- [13] 邱歆磊, 卢大胜, 冯超, 等. 上海市淡水水产品中多溴联苯醚和多氯联苯的监测研究 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9 (5): 1178-1184.
- [14] LIU YP, LI JG, ZHAO YF, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in marine fish from four areas of China [J]. *Chemosphere*, 2011, 83 (2): 168-174.
- [15] CHEUNG KC, ZHENG JS, LEUNG HM, et al. Exposure to polybrominated diphenyl ethers associated with consumption of marine and freshwater fish in Hong Kong [J]. *Chemosphere*, 2008, 70 (9): 1707-1720.
- [16] 蒋友胜, 张建清, 周健, 等. 中国南方某市几种市售食品中多溴联苯醚污染状况研究 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2010, 20 (2): 259-261.
- [17] 马新东. 海洋沉积物和生物中多溴联苯醚的方法研究及应用 [D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [18] 陈树科, 沈晓飞, 江锦花. 乐清湾海域鱼类中多溴联苯醚的分布特征 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37 (23): 11040-11043.
- [19] 检测和校准实验室能力认可准则在化学检测领域的应用说明: CNAS—CL01—A002 [S]. 北京: 中国合格评定国家认可委员会, 2018.
- [20] 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 等. 多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 [J]. *环境科学*, 2014, 35 (8): 3175-3182.
- [21] 詹蔚, 陈来国, 范瑞芳, 等. 东江野生鱼中多溴联苯醚的污染特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (7): 1309-1314.
- [22] 刘斌, 张立实, 张建清, 等. 深圳市市售鱼类和禽蛋类食品中多溴联苯醚污染状况分析 [J]. *中华预防医学杂志*, 2011, 45 (12): 1068-1072.
- [23] WANG J, LIN Z, LIN K, et al. Polybrominated diphenyl ethers in water, sediment, soil, and biological samples from different industrial areas in Zhejiang, China [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 197: 211-219.
- [24] 周相娟, 赵玉琪, 常宇文, 等. 凝胶渗透色谱净化-GC-MS测定食品包装印刷油墨中多溴联苯及多溴联苯醚 [J]. *现代仪器*, 2007, 13 (6): 28-31.

(英文编辑: 汪源; 编辑: 汪源; 校对: 陈姣)