

# 太湖流域水产品中羟基多溴联苯醚污染情况调查

姚永青<sup>1</sup>, 刘欣<sup>2</sup>, 丁洪流<sup>1</sup>, 纪丽君<sup>1</sup>, 姚卫蓉<sup>2</sup>, 陈英<sup>1\*</sup>

(1. 苏州市产品质量监督检验所, 苏州 215104; 2. 江南大学食品学院, 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 调查太湖水域水产品中羟基多溴联苯醚(OH-PBDEs)的污染情况。**方法** 首先建立测定水产品中 OH-PBDEs 的方法, 之后分别测定了太湖流域中 17 种水产品和 3 种水生蔬菜中的 OH-PBDEs。**结果** 生活在 中下层和泥层的水产品体内的 OH-PBDEs 含量(ND~3.3839 ng/g(干重))高于中上层的(ND~1.6169 ng/g(干重)); 动物水产体内的 OH-PBDEs 含量高于植物水产的; 常见的鱼中草鱼、鳊鱼、花鲢和桂鱼体内的 OH-PBDEs 含量高于其他种类的鱼, 且 OH-PBDEs 多数集中在内脏的内膜脏层。**结论** 较系统地调查了太湖流域水产品中 OH-PBDEs 的污染情况。

**关键词:** 羟基多溴联苯醚; 含量; 太湖水产品; 污染

## Situation of hydroxy polybrominated diphenylethers contamination in aquatic of Taihu Lake basin

YAO Yong-Qing<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>, DING Hong-Liu<sup>1</sup>, JI Li-Jun<sup>1</sup>, YAO Wei-Rong<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>1\*</sup>

(1. Suzhou Product Quality Supervision and Inspection Institute, Suzhou 215104, China; 2. School of Food Science & Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the contamination of OH-PBDEs in aquatic products of Taihu Lake. **Methods** A method for the determination of OH-PBDEs in aquatic products was established firstly, and then the concentration of OH-PBDEs in 17 kinds of aquatic products and 3 species of aquatic vegetables in the Taihu lake basin was measured. **Results** Fish living in the middle and lower layers and mud had higher levels of OH-PBDEs(ND~3.3839 ng/g(dw))than the upper's(ND~1.6169 ng/g(dw)); there was higher level of OH-PBDEs in fish than plant. The concentration of OH-PBDEs in the grass carp, bream, bighead carp and siniperca chuatsi was higher than the other types of fish, and most OH-PBDEs was contained in the intima of the visceral. **Conclusion** The contamination of OH-PBDEs in aquatic products of Taihu Lake was surveyed systematically.

**KEY WORDS:** OH-PBDEs; contents; Taihu Lake aquatic; pollution

## 1 引言

羟基多溴联苯醚(OH-PBDEs)是一类持久性有机

污染物, 具有高毒性、环境持久性、生物累积性等, 可干扰性激素和甲状腺激素发挥作用, 如 Cao 等<sup>[1]</sup>发现 5-OH-BDE-47 可以像甲状腺素与转甲状腺素蛋白和

基金项目: 苏州质检所应用基础研究农业部分基金项目(SYN201214)

**Fund:** Supported by the Agricultural Part of the Application of Basic Research Funds of Suzhou Product Quality Supervision and Inspection Institute (SYN201214)

\*通讯作者: 陈英, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: chen\_yin\_g@163.com

\*Corresponding author: CHEN Ying, Senior Engineer, Suzhou Product Quality Supervision and Inspection Institute, Suzhou 215104, China. E-mail: chen\_yin\_g@163.com

甲状腺素结合球蛋白在相同的结合点结合, 影响甲状腺素的正常代谢; Meerts 等<sup>[2]</sup>用乳腺癌细胞系在体外模拟了 OH-PBDEs 的雌激素作用, 指出某些 OH-PBDEs 具有雌激素活性, 而另一些有抗雌激素活性。OH-PBDEs 对 DNA 也有损害作用, Van Boxtel 等<sup>[3]</sup>将斑马鱼胚胎暴露在 25 nmol 6-OH-BDE-47(体内)环境中, 发现斑马鱼有发育缺陷。Kyunghee 等<sup>[4]</sup>指出 OH-PBDEs 可以诱导产生活性氧, 破坏碱基使得染色体断裂, 增加的染色体畸变的数目。

目前 OH-PBDEs 已在众多的环境介质中检出, 如鱼类、虾类、藻类, 地表水、人体血液、动物体内、母乳中等<sup>[5-11]</sup>, 如 Zhang 等<sup>[12]</sup>在辽东海湾底部沉积物中检测到两种 OH-PBDEs; Daisukeueno 等<sup>[13]</sup>的研究结果表明加拿大安大略省的地表水、雪和雨中有不同浓度的 OH-PBDEs; Karlisvalters 等<sup>[14]</sup>测定了从底特律河有机氯污染较严重的地段随机捕捞的 13 种鱼体内的 OH-PBDEs, 发现了 6-OH-BDE-47 和 2'-OH-BDE-68 两种主要的污染物; A. De la Torre 等<sup>[15]</sup>测定了从多伦多安大略湖采集的 117 个鱼血浆样品中的 OH-PBDEs, 结果显示 OH-PBDEs 平均含量是 1.46 ng/g(湿重)。

目前国际上对 OH-PBDEs 的研究及人们对它的认识均处于起步阶段, 国内的相关研究也相对滞后, 对水产品中 OH-PBDEs 污染情况的报道就更少, 更未见对整个太湖水域水产品中 OH-PBDEs 污染情况的系统研究, 又因 OH-PBDEs 可通过食物链进入人体内, 吃鱼较多的人血液中 OH-PBDEs 的质量分数要高一些, M. Athanasiadou 等<sup>[16]</sup>也指出儿童一个月吃 1~8 次鱼, 其体内 OH-PBDEs 的浓度是 4.1~120 pmol/g(湿重), 比那些不吃鱼的儿童体内的浓度(3.1~4.1 pmol /g(湿重))高很多, 因此本文在建立了 OH-PBDEs 检测方法的基础上对太湖及其周围水域的水产品中 OH-PBDEs 的污染情况进行了较系统的研究。

## 2 材料与方法

### 2.1 试剂与设备

液相串联质谱联用仪: AB SCIEX 4000 QTRAP 质谱仪, 配置岛津高效液相色谱仪, 美国 ABSCIEX 公司; 色谱柱(C<sub>18</sub> 反相柱, 150 mm × 2.00 mm, 3 μm), 美国 Waters; Si SPE(1 g/6 mL), 上海安谱公司;

IKAVORTEX3 漩涡混匀器, 德国 IKA 公司; 超声仪, 韩国 Elma 公司; HGC 型氮吹仪, 美国 Organomation 公司; PL2002 电子分析天平, 瑞士 Mettler 公司; 离心机, 德国 Eppendorf 公司。

正己烷, 乙腈, 甲基叔丁基醚, 异丙醇, 甲酸(色谱纯, 美国 TEDIA 公司); 二氯甲烷(DCM) (分析纯, 江苏强盛功能化学股份有限公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 样品采集及前处理

太湖水产品种类众多, 本文综合考虑水产品的产量、居民的日常食用习惯和市场消费情况等方面因素, 同时也兼顾品种的多样性原则, 从太湖及其周围养殖水塘采集了花鲢、白鱼、鳊鱼、鲫鱼、黑鱼、昂刺鱼、桂鱼、鲢鱼、草鱼、鲈鱼、泥鳅、河蚌、黄鳝、螺丝、螃蟹、激浪鱼、餐条鱼 17 种水产品和茭白、茨菰和莲藕 3 种水生类蔬菜, 鱼类每种至少 3 条, 植物每种 100 g 以上。

鱼室温解冻, 解剖去皮, 取整鱼脊背肌肉, 与适量无水硫酸钠均匀混合后, 用研钵搅匀取 2 g 于离心管中( $n=3$ ), 2 mL 异丙醇, 5 mL 正己烷/甲基叔丁基醚(1:1, v:v)萃取液, 振荡 2 min, 完全混合均匀后, 超声波提取 30 min, 6000 r/min 离心 4 min, 将上清液移走。此过程重复 2 次, 合并上清液, 氮吹干, 用 5 mL 正己烷振荡复溶, 然后过 SPE 硅胶小柱净化, 用 DCM 洗脱, 收集洗脱液并氮吹干, 然后用 1 mL 乙腈溶解, 过 0.22 μm 的有机滤膜, 装入小瓶待 UPLC-MS/MS 分析。

SPE 硅胶小柱用 5 mLDCM+5 mL 正己烷活化, 上样弃去流出液, 5 mL 正己烷淋洗, 6mLDCM 洗脱, 收集洗脱液。

#### 2.2.2 色谱-质谱条件

流动相: 乙腈和 0.1%甲酸, 梯度洗脱: 0~10 min, 乙腈由 65%增至 75%, 10~12 min, 乙腈保持 75%, 12~17min, 乙腈由 75%降至 65%; 流速: 0.25 mL/min; 进样量: 10 μL; 柱温: 35℃。电喷雾负离子扫描模式(ESI), 多重反应监测(MRM); 离子喷雾电压: 4500 V; 离子源温度 T: 500 ℃; 雾化气 Gas1: 25; 雾化气 Gas2: 20。

## 3 结果与分析

用建立好的检测 OH-PBDEs 的方法分别检测了上述各种水产品及水生蔬菜中 OH-PBDEs 的含量。

### 3.1 不同水域层的水产品的污染情况

根据各种鱼生活的水域层不同, 分别在水域的中上层、中下层和泥层捕捞的各种水产品中 OH-PBDEs 的含量见表 1。

从水域中上层捕捞的花鲢、白鱼、餐条鱼、激浪鱼只有花鲢体内检出了目标污染物, 且种类高达 5 种, 含量也相对较高; 从水域中下层捕捞的 10 种鱼中有 7 种鱼体内可检出 OH-PBDEs, 且只有昂刺鱼和黑鱼体内检出 1 种 OH-PBDEs, 其余 5 种鱼体内都检出了多种, 含量也较高; 泥层中分别在河蚌和黄鳝体内检出了 2 种目标物。

在水域的中上层只有花鲢受到 OH-PBDEs 污染, 而在中下层和泥层的多数鱼都受污染, 这可能是由于在中下层和泥层有常年积累的各种沉积物, 而生活在中下层和泥层的鱼有直接以这些沉积物为食的, 有捕食以这些沉积物为食的小鱼小虾的, 也有以生活在水域底部的藻类为食的, OH-PBDEs 进而通过食物链进入其体内, 而生活在中上层的鱼受到类似污染的可能性小些; 而有“水中清道夫”雅名的花鲢对水质的清洁作用可能导致自身比其他生活在水域中上层的鱼受污染严重些。因此生活在水域中下层和泥层的鱼体内的 OH-PBDEs 含量高种类也多, 而生活在中上层的鱼体内的污染物 OH-PBDEs 含量少种类也少些。

### 3.2 水产品(动物)和水生蔬菜(植物)中的污染情况

对动物样品检测的同时也对植物样品茭白、茨菰和莲藕进行了 OH-PBDEs 的检测, 检测结果显示: 17 种动物样品中有 10 种可以检测出若干种 OH-PBDEs(见表 1), 而三种常见的水生蔬菜中均不含目标污染物, 这可能是因为这几种水生蔬菜在水中生长的时间不够长, 不像鱼类大多数可在水中生活 2~3 龄才被捕捞, 有的鱼甚至到 4~5 龄(或以上)才被捕捞, 有较长的接触目标污染物的时间; 也有可能是由于植物纤维含量较高, 脂肪含量较低, 不利于植物组织对该类亲脂性的有机污染物的积累; 即 OH-PBDEs 是随时间在生物体内积累的, 亲脂性的 OH-PBDEs 不宜在纤维组织中积累。

### 3.3 不同品种的鱼的污染情况

在本文检测的 13 种鱼中有 9 种鱼体内有目标污染物(见表 1), 其中花鲢、鳊鱼、鲫鱼、桂鱼和鲈鱼体内可检出 4 种以上的 OH-PBDEs, 草鱼体内虽只有两种 OH-PBDEs, 但含量很高, 6-OH-BDE-47 达到 3.1928 ng/g(干重), 比其他鱼体内的高一个数量级, 其余的 3 种都可检测出少量的 OH-PBDEs。图 1 是对不同种类的鱼体内含有的 OH-PBDEs 总含量的比较, 从图中可以很直观的看出: 草鱼体内污染物的总含量最高, 约达到 3.5 ng/g(干重), 鳊鱼和花鲢相

表 1 不同水域层中水产品的 OH-PBDEs 含量( $n=3$ )  
Table 1 The concentration of OH-PBDEs in aquatic of different water layers ( $n=3$ )

水域层		各化合物的含量 (ng/g(干重))						
		2'-OH-BDE-68	5-OH-BDE-47	6-OH-BDE-47	3-OH-BDE-47	4-OH-BDE-42	6-OH-BDE-85	6'-OH-BDE-99
中上层	花鲢	ND	0.3336	0.6632	0.2124	ND	0.2232	0.1845
中下层	桂鱼	ND	0.2611	0.1334	0.1728	ND	0.2417	0.7183
	鳊鱼	0.2338	0.2994	0.4636	0.3694	ND	0.4256	0.5237
	鲫鱼	ND	0.2130	0.2857	0.1970	ND	ND	0.1863
	昂刺鱼	0.1762	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	草鱼	ND	0.1911	3.1928	ND	ND	ND	ND
	鲈鱼	ND	0.2946	0.8580	ND	ND	0.1533	0.1611
	黑鱼	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.1120
泥层	河蚌	ND	ND	0.1726	ND	ND	ND	0.1253
	黄鳝	ND	0.2065	ND	0.3198	ND	ND	ND

注: ND 表示在检测限以下。

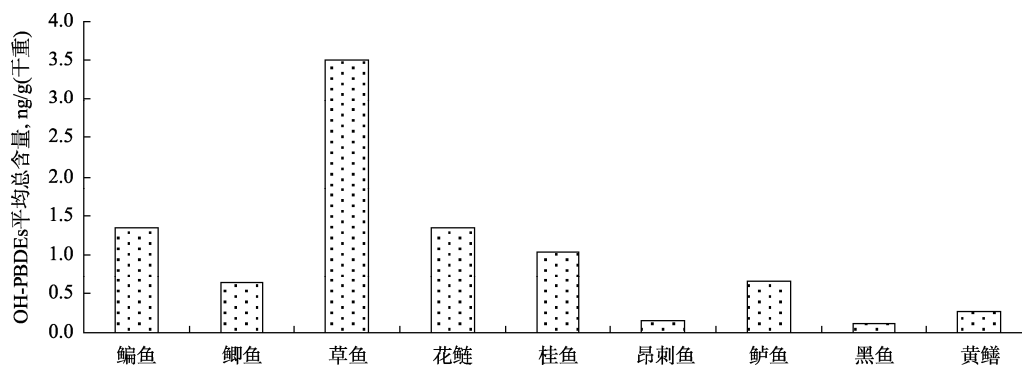


图 1 9 种鱼体内 OH-PBDEs 的总含量

Fig. 1 The total content of OH-PBDEs in 9 kinds of fish

当, 桂鱼稍低些, 约达 1.1 ng/g(干重), 之后鲫鱼和鲈鱼的相当, 约达 0.7 ng/g(干重), 昂刺鱼、黑鱼和黄鳝的污染情况比较乐观。这可能与其自身的组织结构对 OH-PBDEs 积累能力的强弱有关, 草鱼、鳊鱼、鲫鱼、花鲢、桂鱼、鲈鱼对 OH-PBDEs 的积累能力较强, 而其他的鱼种相对较弱; 也可能是由于各种鱼生活的局部水域环境不同所致。

### 3.4 鱼体内不同组织的污染情况

在 3.3 的基础上研究了以上 9 种鱼体内 OH-PBDEs 的分布情况, 分别测了鱼的脊背肌肉、脂肪含量较高的肚子处的组织、鱼皮、鱼鳍、鱼鳞、内脏中的肝脏、肠、鱼鳔和内膜脏层(俗称黑膜)9 处 OH-PBDEs 的含量。体内检测到 OH-PBDEs 的 9 种鱼可分为两类: 有黑膜的鳊鱼、鲫鱼、草鱼和花鲢及没有黑膜的昂刺鱼、黑鱼、黄鳝、桂鱼和鲈鱼。

检测结果显示有黑膜的鳊鱼、鲫鱼、草鱼和花鲢的黑膜中都有目标污染物检出, 而且黑膜中的目标物总量最多, 鱼鳔(俗称鱼泡)次之(见图 2); 其中鳊鱼的黑膜中检出了 5-OH-BDE-47 和 6-OH-BDE-47 两种污染物, 6-OH-BDE-47 含量最高, 高达 0.4366 ng/g(干重), 内脏鱼鳔和肝脏中也有目标物检出, 其中检出的 6-OH-BDE-47 含量均低于黑膜中的, 鱼鳔中还检出了微量 6'-OH-BDE-99(0.1098 ng/g(干重)), 脊背肌肉中也检出了 OH-PBDEs, 但不如内脏中的多; 鲫鱼的黑膜和鱼鳔中也都检出了 OH-PBDEs, 但种类不同, 黑膜中也检出了 5-OH-BDE-47 和 6-OH-BDE-47, 与鳊鱼一样, 但含量有些差别, 鱼鳔中仅检出了微量 6-OH-BDE-85(0.1516 ng/g(干重)), 鱼体的其它部位仅在鱼皮中检出了 0.1698 ng/g(干重)6-OH-BDE-47;

草鱼中也仅仅在内脏部分检测到了目标污染物, 黑膜中检出了较高含量的 6-OH-BDE-47, 高达 2.932 ng/g(干重), 这比其它鱼体内的污染物含量高一个数量级, 草鱼的鱼鳔和肠也都仅检出了 6-OH-BDE-47; 花鲢的黑膜中检出了 5 中目标污染物, 其中 6-OH-BDE-47 的含量最高(0.6632 ng/g(干重)), 而其它部位均没有检出。这可能由于黑膜是鱼腹中的“保护层”, 不但可以起到鱼腹与器官隔离的作用, 还可以防止内脏器官分泌吸收的有害物质通过肠壁渗透到肌肉中去, 因此这层黑膜可能就是该类有害物质的汇集处。

检测结果显示体内没有黑膜的鲈鱼、昂刺鱼、黄鳝、黑鱼和桂鱼鱼体内各种 OH-PBDEs 多数集中在可食的肌肉部分, 如图 3 所示。其中鲈鱼的内脏部分和鱼体肌肉部分都有目标物, 脊背肌肉中含有的种类最多, 高达 5 种, 含量最高的是 6-OH-BDE-47 (0.1855 ng/g(干重)); 昂刺鱼体内的 OH-PBDEs 主要集中在脊背肌肉和鱼鳍中, 含量最高的是 5-OH-BDE-47, 也检测到少量的 6'-OH-BDE-99, 但没有检测到 6-OH-BDE-47; 黄鳝的肚子肌肉处检测到了 5-OH-BDE-47 和 3-OH-BDE-47, 而没有检测到在其它鱼体内含量较高的 6-OH-BDE-47; 桂鱼脊背肌肉处检测到 5 种目标物, 6'-OH-BDE-99 的含量最高, 高达 0.7183ng/g(干重), 而其它部位不含; 黑鱼的鱼皮中有较低含量的 6'-OH-BDE-99。由以上检测结果可知没有黑膜鱼体内 OH-PBDEs 大多数分布在可食肌肉中, 进一步说明黑膜很可能是该种有害物质的汇集处, 所以, 食用鱼时剖鱼后要刮干净黑膜, 反复冲洗干净, 这样不仅可以减少腥味, 还可以尽可

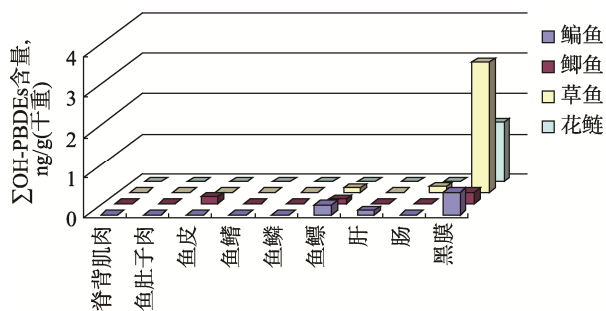


图 2 有黑膜的鱼体内各部位 OH-PBDEs 的含量

Fig. 2 The content of OH-PBDEs in various parts in fish with the intima of the visceral.

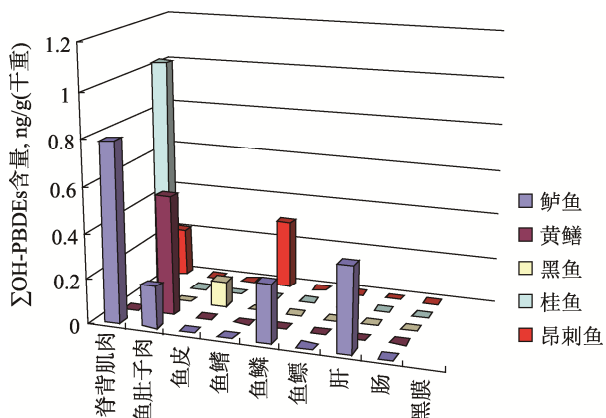


图 3 没有黑膜的鱼体内各部位 OH-PBDEs 含量

Fig. 3 The content of OH-PBDEs in various parts in fish without the intima of the visceral.

能少地摄入各种有害物质。

图 4 是这 9 种鱼的可食部分中总 OH-PBDEs 的

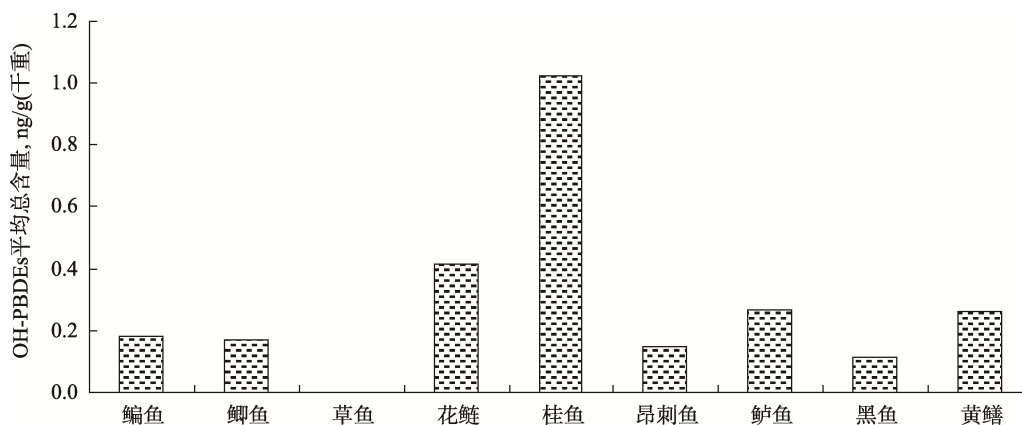


图 4 9 种鱼体内可食部分的 OH-PBDEs 含量

Fig. 4 The content of OH-PBDEs in 9 kinds of fish of edible parts

含量图, 与图 1 对比可知: 虽草鱼体内的 OH-PBDEs 含量最高, 但其可食部分不含该类物质; 有黑膜的其它 3 种鱼的可食部分均含有目标物, 但其含量比总含量少很多, 由此可见大多数的 OH-PBDEs 都集中在黑膜中; 后 5 种没有黑膜的鱼的可食部分的 OH-PBDEs 含量与体内总的含量相差无异; 综上所述: 没有黑膜的桂鱼含量最高, 达到 1.0 ng/g(干重)左右, 花鲢次之, 这与它们的生活习性息息相关, 桂鱼生活在江河湖泊中的近底层, 可能受底层的沉积物的污染比较严重, 而花鲢的清洁水质的作用很可能导致其自身的 OH-PBDEs 含量高些; 剩余 6 种的含量相近, 污染情况较为乐观, 而草鱼的可食部分不含 OH-PBDEs。

综上所述通过对有黑膜和无黑膜的鱼的各个部位的检测, 进一步证实了黑膜是一层“保护膜”, 可以防止内脏器官分泌和吸收的有害物质通过肠壁渗透到肌肉中去, 而没有“保护膜”的鱼的可食部分中 OH-PBDEs 含量较高, 其含量根据自身肌肉组织对该类污染物的富集情况有些差异。

#### 4 膳食建议

水产品和水生类蔬菜营养丰富, 蛋白质丰富, 含有多种人体必需的微量元素, 尤其是有些鱼体内的不饱和脂肪酸含量较高, 因此是人们餐桌上常见的佳肴。在污染日益严重的环境中生长的动物和植物也受到了不同程度的污染, 通过食物链污染物便可进入人体内, 为了保证摄入丰富营养的同时尽可能

少的摄入有害污染物, 依据本研究提出以下膳食建议: (1)去有质量口碑的大型超市或菜市场购买, 在一定程度上保证来源的安全性, 降低购买的鱼有被严重污染的可能性; (2)由于黑膜很可能是各种有害物质的汇集处, 所以, 在食用鱼时解剖鱼后要刮干净黑膜, 反复冲洗干净, 这样不仅可以减少腥味, 还可以尽可能少地摄入各种有害物质; (3)一些鱼类的内脏中含有一定量的有害污染物, 所以应尽量不吃或者少吃鱼类的肝脏部分; (4)在选择鱼种类时除了考虑个人喜好问题外, 应更多地考虑选择那些受污染少的鱼类去代替那些可能积累污染物多的鱼类, 如: 若所需营养相当的话, 可用昂刺鱼等来代替花鲢和桂鱼等; (5)由于水生类蔬菜的纤维含量较高不利于亲脂性的 OH-PBDEs 富集, 所以通常水生类蔬菜中不含有 OH-PBDEs, 可放心食用。

#### 参考文献

- [1] Cao J, Lin Y, Guo LH, *et al.* Structure-based investigation on the binding interaction of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers with thyroxine transport proteins [J]. *Toxicol*, 2010, 277: 20–28.
- [2] Meerts IATM, Letcher RJ, Hoving S, *et al.* In vitro estrogenicity of polybrominated diphenyl ethers, hydroxylated PBDEs, and polybrominated bisphenol A compounds [J]. *Environ Health Perspect*, 2001, 109: 399–407.
- [3] Van BAL, Kamstra JH, Cnijn PH, *et al.* Microarray analysis reveals a mechanism of phenolic polybrominated diphenyl ether toxicity in zebrafish [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(5): 1773–1779.
- [4] Kyunghye J, Kyungho C, John PG, *et al.* Genotoxicity of several polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and hydroxylated PBDEs, and their mechanisms of toxicity [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 5003–5008.
- [5] 任国发, 于志强, 孙延枫, 等. 电子垃圾拆解工人血清中多溴联苯醚代谢产物的识别及其特征[J]. *上海大学学报*, 2010, (165): 331–336.  
Ren GF, Yu ZQ, Sun YF, *et al.* Preliminary study of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers (OH PBDEs) metabolites in human serum of electronics dismantling workers [J]. *J Shanghai Univ (Natu Sci)*, 2010, (165): 331–336.
- [6] Wang HS, Jun Dub, Ka-Lok Ho. Exposure of HongKong residents to PBDEs and their structural analogues through market fish consumption [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 192: 374–380.
- [7] Chang H, Wu FC, Jin F, *et al.* Picogram per liter level determination of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers in water by liquid chromatography–electrospray tandem mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2012, 1223: 131–135.
- [8] Malmvarn A, Marsh G, Kautsky L, *et al.* Hydroxylated and methoxylated brominated diphenyl ethers in the red algae *Ceramium tenuicorne* and blue mussels from the Baltic Sea [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 2990–2997.
- [9] Kei N, Yukiko U, Satoko H, *et al.* Organohalogen compounds and their metabolites in the blood of Japanese amberjack (*Seriola quinqueradiata*) and scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) from Japanese coastal waters [J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 315–321.
- [10] Verreault J, Geir WG, Chu SG, *et al.* Flame retardants and methoxylated and hydroxylated polybrominated diphenyl ethers in two norwegian arctic top predators: glaucous gulls and polar bears [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 6021–6028.
- [11] Silvia L, Michael G, Ikonomou. Occurrence and congener specific profiles of polybrominated diphenyl ethers and their hydroxylated and methoxylated derivatives in breast milk from Catalonia [J]. *Chemosphere*, 2009, 74: 412–420.
- [12] Zhang K, Wan Y, Paul DJ, *et al.* Occurrences and fates of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers in marine sediments in relation to trophodynamics [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46: 2148–2155.
- [13] Daisukeeno, Colindarling, Mehranalae, *et al.* Hydroxylated polybrominated diphenyl ethers (OH-PBDEs) in the abiotic environment: surface water and precipitation from Ontario, Canada [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 1657–1664.
- [14] Karlisvalters, Hongxiali, Mehranalae, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and hydroxylated and methoxylated brominated and chlorinated analogues in the plasma of fish from the detroit river [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 5612–5619.
- [15] A De LT, Pacepavicius G, Martínez MA, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and their methoxylated and hydroxylated analogs in Brown Bullhead (*Ameiurus nebulosus*) plasma from Lake Ontario [J]. *Chemosphere*, 2013, 90: 1644–1651.
- [16] Atheanasiadou M, Cuadra SN, Marsh G, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and bioaccumulative hydroxylated PBDE metabolites in young humans from Managua, Nicaragua [J]. *Environ Health Perspect*, 2008, 116: 400–408.

(责任编辑: 杨翠娜)

#### 作者简介



姚永青, 助理工程师, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: yaoyong\_qing@163.com



陈英, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: chen\_yin\_g@163.com