

白洋淀鱼类体内多氯联苯积累特征及其毒性评价

胡国成¹, 李雪梅², 彭晓武¹, 郭 庶¹, 刘 芸¹, 许木启³, 戴家银³, 麦碧娴⁴,
许振成^{1*}

(1.环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2.北京城市排水集团有限责任公司水质检测中心, 北京 100124; 3.中国科学院动物研究所, 北京 100080; 4.中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘 要:针对持久性有机污染物在水生生物体内易于积累的特性,利用气相色谱与质谱联用技术(GC-MS),检测了白洋淀 8 种鱼类体内多氯联苯(PCBs)含量,并分析了同系物组成特征。根据白洋淀鱼类检测到同系物情况,计算毒性当量(TEQ)并进行评价。白洋淀 8 种鱼类体内 PCBs 平均含量范围是 55.85~1 485.74 ng·g⁻¹ 脂肪重,从高到低的顺序依次为黄颡>黄鳝>乌鳢>泥鳅>鲤鱼>鳊鱼>鲫鱼>鲢鱼。在 8 种鱼类 PCB 同系物组成中,四氯联苯和五氯联苯是主要的同系物,其相对百分含量为 52.0%~84.3%。这种组成模式反映了白洋淀地区有多氯联苯工业品的使用历史。8 种鱼类体内 PCBs 的毒性当量(TEQ)范围是 0.09~1 412.87 pg TEQ·g⁻¹ 脂肪重,其大小顺序依次为鳊鱼>鲫鱼>鲢鱼>黄颡>黄鳝>鲤鱼>乌鳢>泥鳅。结果表明,白洋淀淀区部分鱼类已经受到 PCBs 一定程度的污染,应引起重视。

关键词:多氯联苯;生物积累;组成模式;毒性;白洋淀

中图分类号:X835 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0667-06

Bioaccumulation and Toxicity Assessment of Polychlorinated Biphenyls in Freshwater Fish from Baiyangdian Lake, North China

HU Guo-cheng¹, LI Xue-mei², PENG Xiao-wu¹, GUO Shu¹, LIU Yun¹, XU Mu-qi³, DAI Jia-yin³, MAI Bi-xian⁴, XU Zhen-cheng^{1*}

(1.South China Institutes of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2.Water Quality Analysis Center, Beijing Municipal Drainage Co. Ltd, Beijing 100124, China; 3.Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 4.Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aquatic species easily accumulate persistent organic pollutants (POPs). Bioaccumulation is important to transfer behaviors of POPs in tissues of aquatic species. Polychlorinated biphenyls (PCBs) are typical POPs. The concentrations of PCBs in muscle of eight freshwater fish species from Baiyangdian Lake were determined by gas chromatography coupled with mass spectrometer (GC/MS). The compositional patterns of PCB congeners were observed, and the toxic equivalent values (TEQs) were calculated for these freshwater fishes. The concentrations of PCBs in various fish species were in the range of 55.85~1 485.74 ng·g⁻¹ lipid weight (lw). The order of PCBs concentrations was as follow: yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)>ricefield eel (*Monopterus albus*)>northern snakehead (*Channa argus*)>loach (*Misgurnus anguillicaudatus*)>common carp (*Cyprinus carpio*)>bighead carp (*Aristichthys nobilis*)>crucian carp (*Carassius auratus*)>oriental sheatfish (*Parasilurus asotus*). PCB profiles were dominated by congeners of Tetra-CB and Penta-CB, which relative abundance accounted for 52.0%~84.3% of the total congener concentration. The compositional patterns indicated that regions around Baiyangdian Lake have been contaminated by PCBs commercial products used previously. The TEQs ranged from 0.10 to 1 412.90 pg TEQ·g⁻¹ lipid weight. The highest and the lowest TEQs were observed for bighead carp (*Aristichthys nobilis*) and loach (*Misgurnus anguillicaudatus*), respectively. The results suggested that part of freshwater fish from Baiyangdian Lake were contaminated by PCBs to some extent. The residents and government should be pay attention to contamination of PCBs in this region.

Keywords: polychlorinated biphenyls; bioaccumulation; compositional pattern; toxicity; Baiyangdian Lake

收稿日期:2011-10-31

基金项目:国家环境保护公益性行业科研专项项目(201009026);环境保护部华南环境科学研究所公益项目(zx_200910_26);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403306)

作者简介:胡国成(1978—),男,河北承德人,博士,工程师,主要研究方向为水生生态毒理学。E-mail:huguocheng@scies.org

* 通讯作者:许振成 E-mail:xuzhencheng@scies.org

持久性有机污染物(Persistent organic pollutants, POPs)是指通过各种环境介质(大气、水、土壤等)能够长距离迁移并长期存在于环境中,对人类健康和环境具有严重危害的天然或人工合成的有机污染物质,具有难降解性、生物蓄积性、半挥发性及高毒性,对生态环境和人类健康造成极大影响而备受关注^[1]。多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)是列入《斯德哥尔摩公约》中重要的持久性有机污染物。该类化合物是人工合成的氯代芳烃类,曾被广泛应用于变压器及电容器的绝缘油、阻燃剂、液压油、增塑剂等^[2]。PCBs具有亲脂性,能在生物体内蓄积,通过食物链传递产生生物放大。PCBs导致的环境污染及其对人体健康的威胁已经引起广泛关注。动物模型试验显示:PCBs具有致癌性、免疫毒性、内分泌干扰毒性、生殖毒性和神经毒性等^[3-8]。我国自1965年开始生产和大量使用PCBs,1974年多数工厂已经停产并开始使用替代产品,10年间累计生产PCBs约10 000 t,其中三氯联苯9 000 t,五氯联苯1 000 t^[9]。一些场地存放的废旧电容器,成为PCBs污染的主要来源。

水体是POPs迁移转换的重要环境介质,水生生物可经过鳃或者皮肤从水体富集POPs,并通过食物链传递作用最终危害人体健康。白洋淀是我国华北平原上最大的淡水湖泊,在拦蓄洪水、调节气候、改善生态环境、发展旅游事业等方面发挥了重要作用,故有“北国江南”、“华北明珠”之称。关于白洋淀环境介质中重金属和POPs的研究已有报道^[10-14],但是关于白洋淀鱼类体内PCBs积累的研究资料较少。本文选择白洋淀8种鱼类作为研究对象,初步分析PCBs在水生生物体内的含量及组成特征,初步探讨PCBs的污染来源,并对其毒性进行评价,以期为白洋淀生态环境保护提供基础。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

2007年7月,在白洋淀淀区及淀区相连的河道中采集8种鱼类,包括鲤鱼、鲫鱼、鳊鱼、乌鳢、鲇鱼、黄颡、黄鳝和泥鳅。为保证采集到白洋淀野生鱼类,首先咨询当地渔民了解情况,然后在淀区内渔民家中购买鲤鱼、鳊鱼、乌鳢、鲇鱼和黄颡等鱼类;而鲫鱼、黄鳝和泥鳅由淀区内渔民用地笼网现场捕获。样品基本信息如表1所示。现场采集的鱼类样品用清水冲洗后,再用锡箔包好放入密封袋,然后放在带冰的泡沫盒中带回实验室。鱼类样品室温下解冻,称量体重,体长,做好原始记录,解剖,去除鱼鳞,刮去鱼皮,取肌肉。将肌肉样品冷冻干燥、研磨,-20℃保存备用。

1.2 样品前处理

准确称取大约1.0 g肌肉组织样品,加入回收率指示剂(PCB65),用180 mL混合溶剂(正己烷/丙酮=1:1, V/V)索氏抽提48 h。抽提液转换溶剂并浓缩至10 mL,取1 mL测定肌肉组织中脂肪含量。利用凝胶渗透色谱柱(GPC)和硅胶固相萃取柱(Isolute, International Sorbent Technology, UK)分离纯化。然后用正己烷和二氯甲烷混合溶剂淋洗、氮吹、定容至50 μL,待测。仪器分析前添加内标化合物PCB82。

1.3 仪器分析

用安捷伦气相色谱质谱联用仪(Agilent 6890-5973)内标法定量分析PCBs。色谱柱为DB-ms(60 μm × 250 μm × 0.25 μm)毛细管柱;载气为高纯氮气;进样口和检测器温度分别为280℃和300℃;升温程序:120℃保持1 min,然后以6℃·min⁻¹升至180℃,1℃·min⁻¹升至240℃,最后以6℃·min⁻¹升至290℃,保持15 min。进样量为1 μL,无分流进样。

表1 白洋淀鱼类样本基本信息(平均值±标准差)

Table 1 Basic information of freshwater fish samples from Baiyangdian Lake, North China (Mean±SD*)

中文名	英文名	学名	样本量	体重/g	体长/cm	脂肪含量/%
鲤鱼	common carp	<i>Cyprinus carpio</i>	4	882.1 ± 152.0	35.0 ± 3.1	10.6 ± 2.4
鲫鱼	crucian carp	<i>Carassius auratus</i>	4	244.5 ± 21.3	23.7 ± 0.8	9.1 ± 1.6
鳊鱼	bighead carp	<i>Aristichthys nobilis</i>	4	614.6 ± 102.6	37.8 ± 2.6	4.5 ± 1.0
乌鳢	northern snakehead	<i>Channa argus</i>	12	440.7 ± 189.4	35.7 ± 4.8	9.2 ± 1.3
鲇鱼	oriental sheatfish	<i>Parasilurus asotus</i>	5	524.6 ± 55.4	43.8 ± 4.4	38.3 ± 7.6
黄颡	yellow catfish	<i>Pelteobagrus fluviodraco</i>	4	70.1 ± 43.9	16.2 ± 4.0	4.6 ± 1.8
黄鳝	ricefield eel	<i>Monoperus ablus</i>	4	36.1 ± 8.7	35.8 ± 3.3	9.3 ± 0.7
泥鳅	loach	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	2**	17.7 ± 4.0	12.0 ± 1.1	10.4 ± 2.1

注:*SD; Standard Deviation; ** 混合样, pooling samples.

1.4 质量控制和质量保证

用方法空白、加标空白、基质加标、基质加标平行样进行质量控制,同时,在分析前所有样品添加回收率指示物标样。在所有样品中,回收率范围为 75.8%~112.0%。空白加标和基质加标中目标化合物回收率分别为 61.6%~107.5%和 63.5%~97.7%。样品的分析结果未经回收率校正。仪器检测限(LOD)定义为 3 倍信噪比(S/N),LOD<0.003 ng·g⁻¹ 脂肪重。

1.5 数据分析

采用 SPSS11.5 软件,利用单因素方差分析(ANOVA)比较 PCBs 在不同鱼类体内的含量差异,显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 PCBs 含量水平

本研究中根据氯原子数不同,结合鱼体内检测到 PCB 同系物的实际情况,将 PCB 分为二氯联苯(DiCB)、三氯联苯(TriCB)、四氯联苯(TetraCB)、五氯联苯(PentaCB)、六氯联苯(HexaCB)和七氯联苯(HeptaCB),这些同系物在白洋淀鱼类体内均不同程度被检出,其含量用脂肪重量校正(ng·g⁻¹ lw)表示,如表 2 所示。

白洋淀 8 种鱼类体内 PCBs 的含量范围为 38.38~2 198.31 ng·g⁻¹ lw。统计分析显示,黄颡体内 PCBs 含量(1 485.74 ng·g⁻¹ lw)显著高于其他鱼类体内 PCBs 的含量($P<0.05$);鲇鱼体内 PCBs 的平均含量最低,平均含量为 55.85 ng·g⁻¹ lw。PCBs 平均含量

从高到低顺序为黄颡>黄鳊>乌鳢>泥鳅>鲤鱼>鳊鱼>鲫鱼>鲇鱼。从 PCBs 同系物组成来看,鲤鱼、鲫鱼、黄颡、黄鳊体内四氯联苯(TetraCB)含量较高,分别为 155.10、129.87、739.94、472.09 ng·g⁻¹ lw;而鳊鱼、乌鳢、鲇鱼和泥鳅体内五氯联苯含量较高,分别为 59.65、85.01、22.70、117.76 ng·g⁻¹ lw。不同水生生物对 PCBs 的富集能力不同。本研究发现白洋淀鱼类更容易富集四氯联苯和五氯联苯等低氯代化合物,这主要是因为低氯代联苯易于迁移、溶解和生物积累,而高氯代联苯具有较低的挥发性、水溶性和较强的吸附性,相对较稳定。另外,高氯代联苯因其相对分子量和分子结构较大,不易通过组织半透膜进入生物体,即使产生积累的部分污染物质也有可能在生物体内代谢、降解、脱氯生成低氯代产物。研究资料显示:PCBs 在水生生物体内富集程度与其氯原子个数呈现抛物线关系,即中等氯原子取代的同系物在生物体内的富集因子高于低氯、高氯原子取代的 PCB 同系物^[15]。本文的研究结果基本符合这一规律,白洋淀鱼类中以四氯和五氯取代的 PCBs 同系物为主。高等水生哺乳动物对高氯代 PCBs 的富集性较强。研究资料显示广东大鹏湾海豚体内以高氯代 PCBs 为主要同系物^[16]。这与 PCBs 在生物体内代谢有关。高氯代 PCB 在食物链传递中有更强的脂溶性和抗生物转化能力,在经过多级食物链传递后,最终进入处于食物链顶端的生物体内。

根据 GB 2762—2005《食品中污染物限量》规定^[17], PCBs 在海产鱼类、贝类、虾及藻类中的允许最大浓度

表 2 白洋淀鱼类体内 PCBs 含量及毒性当量
Table 2 Concentrations of PCBs in muscles of freshwater fish from Baiyangdian Lake, North China

种类	PCB 含量/ng·g ⁻¹ lipid weight							WHO-TEQ/pg TEQ·g ⁻¹ lipid weight
	DiCB	TriCB	TetraCB	PentaCB	HexaCB	HeptaCB	Σ PCB	
鲤鱼	10.01~17.50 (13.89)	9.16~27.49 (15.53)	116.16~217.10 (155.10)	27.98~68.76 (46.86)	0.63~8.96 (5.70)	nd~6.93 (2.57)	181.80~342.67 (239.66)	14.62
鲫鱼	6.40~8.95 (7.35)	7.14~9.78 (8.36)	116.52~156.62 (129.87)	6.20~7.94 (7.14)	0.25~0.58 (0.41)	nd~15.76 (10.58)	148.92~199.29 (163.71)	700.39
鳊鱼	10.74~25.97 (16.31)	13.87~20.12 (17.27)	21.22~91.09 (43.78)	39.95~74.63 (59.65)	7.14~23.09 (15.97)	24.45~36.54 (32.43)	162.23~226.64 (185.40)	1 412.87
乌鳢	31.27~86.82 (54.87)	7.58~228.29 (31.03)	11.98~420.33 (67.02)	11.75~278.07 (85.01)	12.20~142.70 (40.40)	nd	116.39~830.47 (278.33)	0.35
鲇鱼	2.54~14.59 (7.54)	5.11~21.63 (12.41)	5.21~13.61 (8.64)	15.64~36.02 (22.70)	1.01~3.24 (1.75)	1.62~5.00 (2.82)	38.38~80.25 (55.85)	142.30
黄颡	29.13~111.16 (60.49)	41.33~183.29 (107.00)	426.00~897.54 (739.94)	193.77~883.54 (471.59)	31.55~231.10 (106.72)	nd	723.85~2 198.31 (1 485.74)	81.47
黄鳊	26.40~68.89 (47.49)	45.12~108.36 (68.15)	385.18~549.57 (472.09)	149.59~307.41 (248.91)	16.87~30.41 (24.56)	7.48~10.71 (8.79)	646.61~1 070.43 (869.99)	45.60
泥鳅	33.56	33.14	56.25	111.76	20.23	13.66	268.59	0.09

为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (湿重计), 约为 $5\,263 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \text{ lw}$ (脂肪含量以本文鱼类样品中最大值 38% 计算)。在本研究的分析结果中, 所有样品中的 PCBs 含量均未超出《食品中污染物限量》中规定的标准值 ($2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 湿重计)。与国内外其他地区鱼类 PCBs 含量相比, 白洋淀鱼类 PCBs 含量低于美国密歇根湖^[18]、瑞典波罗的海^[19]及我国电子废弃物附近水体中鱼类 PCBs 含量^[15,20]; 与美国菲尼克斯^[21]、普吉湾^[22]及北京高碑店湖^[23]鱼类 PCBs 含量相当; 略高于南极^[24]及我国东南沿海^[25-26]鱼类 PCBs 的含量, 如表 3 所示。

2.2 PCBs 同系物组成

不同氯原子取代的 PCBs 具有不同的物理化学性质。对样品中 PCBs 同系物的组成分析从一定程度上可以了解其来源。指示性 PCBs (PCB28、PCB52、PCB101、PCB138、PCB153 和 PCB180) 的含量在一定程度上能反映研究区域 PCBs 的污染状况。在白洋淀鱼类中, 检测到 5 种指示性 PCB 同系物 (PCB28、PCB52、PCB101、PCB138 和 PCB153) 相对百分含量范围为 1.5%~35.0%。相关分析表明 5 种指示性 PCBs 含量与 PCBs 总含量具有良好的线性关系 ($P < 0.01$, $R = 0.802\,8$), 如图 1 所示。这表明指示性 PCBs 能够反映白洋淀地区 PCBs 的污染情况。白洋淀鱼体内 PCBs 的组成模式如图 2 所示。在鲤鱼、鲫鱼、黄颡和黄鲢中, PCBs 同系物组成中以四氯联苯 (TetraCB) 为主, 其相对百分含量范围是 52.9%~72.4%; 在鳊鱼、乌鳢、鲇鱼和泥鳅中, PCBs 同系物组成以五氯联苯 (PentaCB) 为主, 其相对百分含量为 31.7%~41.9%。

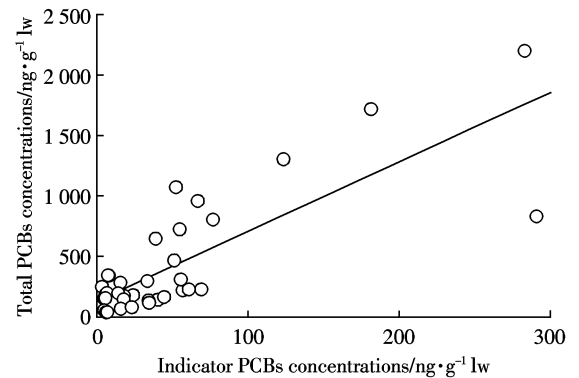


图 1 白洋淀鱼类指示性 PCBs 含量与总 PCBs 含量相关性
Figure 1 Correlation of indicator PCB congeners concentrations and total PCBs concentrations in muscles of freshwater fish from Baiyangdian Lake, North China

综上所述, 白洋淀 8 种淡水鱼类中 PCBs 以四氯联苯 (TetraCB) 和五氯联苯 (PentaCB) 为主, 其相对百分含量为 52.0%~84.3%。这一研究结果与广东沿海鱼类样品中 PCBs 的研究结果基本一致^[26]。白洋淀鱼类中 PCBs 的组成模式可能反映了该地区有 PCBs 工业品使用历史, 而且这些工业品的主要成分为 5 个氯原子以下的 PCBs 同系物。同时, PCBs 的这种组成模式也反映了我国历史上 PCBs 的使用主要以低氯代为主。爬行类和哺乳类等高等生物中 PCBs 组成模式以高氯代为主, 与鱼类体内 PCBs 的组成模式有差异, 这与各种生物在生态系统中所处的生态位不同有关。

2.3 PCBs 毒性评价

根据 GB/T 5009.205—2007《食品中二噁英及其

表 3 国内外不同地区鱼类 PCBs 含量比较

Table 3 Comparison of PCBs in fish from different regions in the world

地区	采样种类	采样时间	PCBs 含量 $*/\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	参考文献
美国菲尼克斯	罗非鱼	1998	<50	[21]
美国密西根湖	鲑鱼	1996	1 450	[18]
美国普吉湾	大马哈鱼	2006	53	[22]
瑞典波罗的海	3 种鱼类	1998	337~1 514	[19]
南极	2 种南极鱼	2007	1	[24]
北京高碑店湖	4 种鱼类	2006	8~62	[23]
天津	7 种鱼类	2002	1.3~5.6	[25]
上海	7 种鱼类	2002	0.8~11.4	[25]
广东省	13 种鱼类	2004	0.02~7.6	[26]
广东电子废物处置区	3 种鱼类	2007	8 338~16 512	[15]
浙江电子废物处置区	2 种鱼类	2006	270~903	[20]
河北白洋淀	8 种鱼类	2007	8.4~80.9	本研究

注: *PCBs 含量以湿重计算。

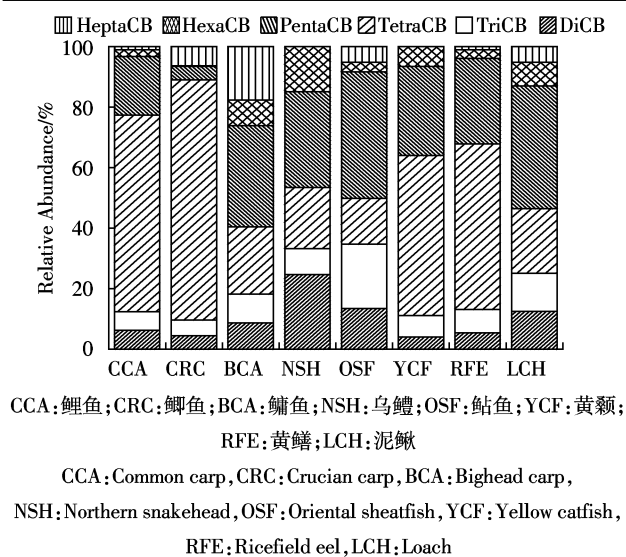


图2 白洋淀鱼类 PCBs 同系物组成模式

Figure 2 Composition patterns of PCB congeners in muscles of freshwater fish from Baiyangdian Lake, North China

类似物毒性当量的测定》^[27],在白洋淀8种鱼类体内检测出7种二噁英样多氯联苯(DL-PCBs),其中包括3种非邻位PCBs(PCB77、PCB81和PCB126)和4种单邻位PCBs(PCB105、PCB118、PCB123和PCB167)。鲤鱼、鲫鱼、乌鳢、鲇鱼和泥鳅分别检测到1种DL-PCBs;鳊鱼、黄鳊和黄颡分别检测到2、4种和5种DL-PCBs。根据世界卫生组织(WHO)2005年公布的PCBs的毒性当量因子(TEFs),分别计算白洋淀8种鱼类样品中PCBs的毒性当量(TEQs),见表2。白洋淀8种鱼类PCBs的TEQ在0.10~1 412.9 pg TEQ·g⁻¹ lw之间,从高到低的顺序为鳊鱼>鲫鱼>鲇鱼>黄颡>黄鳊>鲤鱼>乌鳢>泥鳅。鳊鱼体内PCBs的毒性当量最高,比泥鳅体内PCBs的毒性当量高4个数量级。白洋淀8种鱼类中TEQ从高到低的顺序与PCBs含量的顺序不一致,这可能与不同鱼类及其体内检测到的DL-PCBs有关。鳊鱼和鲫鱼体内都检测到PCB126,其毒性当量因子最高(0.1),从而导致鳊鱼和鲫鱼体内PCBs的毒性当量较高;而其他6种鱼类中不同程度检测出PCB77、PCB81、PCB105、PCB118、PCB123和PCB167,毒性当量因子比较低,从而导致其他鱼类体内PCBs具有较低的毒性当量。在黄颡和黄鳊体内,PCBs的TEQ主要来自非邻位的PCB81,其贡献率分别为73.9%和85.3%,而且PCB81的TEQ与总的TEQ具有良好的线性关系($P<0.01, R=0.9349$),这说明PCB81对黄颡和黄鳊体内PCBs的污染状况具有良好的指示作用。

3 结论

(1)白洋淀8种淡水鱼类体内PCBs的含量较低,其平均含量范围是55.85~1 485.74 ng·g⁻¹ lw,符合GB 2762—2005《食品中污染物限量》中的要求。

(2)8种鱼体内PCBs同系物组成以四氯和五氯取代的多氯联苯为主,其相对百分含量为52.0%~84.3%。这种组成模式反映了白洋淀地区有多氯联苯工业品使用历史。

(3)8种鱼类二噁英样PCBs的毒性当量大小顺序依次为鳊鱼>鲫鱼>鲇鱼>黄颡>黄鳊>鲤鱼>乌鳢>泥鳅。这说明白洋淀淀区部分鱼类已经受到PCBs一定程度污染,当地居民如果长期连续摄入含有低浓度PCBs的鱼类,可能对健康产生影响,应引起相关部门重视。

参考文献:

- [1] 余刚,牛军峰,黄俊.持久性有机污染物:新的全球性环境问题[M].北京:科学出版社,2005.
YU Gang, NIU Jun-feng, HUANG Jun. Persistent organic pollutants: New global environmental problem[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] Schuhmacher M, Nadal M, Domingo J L. Levels of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in soils and vegetation in an area with chemical and petrochemical industries[J]. *Environmental Science Technology*, 2004, 38(7): 1960–1969.
- [3] Lai I, Chai Y T, Simmons D, et al. Acute toxicity of 3, 3', 4, 4', 5-pentachlorobiphenyl (PCB 126) in male Sprague-Dawley rats: Effects on hepatic oxidative stress, glutathione and metals status[J]. *Environment International*, 2010, 36(8): 918–923.
- [4] Park H, Ahn I Y, Lee J K, et al. Molecular cloning, characterization, and the response of manganese superoxide dismutase from the Antarctic bivalve *Laternula elliptica* to PCB exposure[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2009, 27(3): 522–528.
- [5] Cohn B A, Cirillo P M, Sholtz R I, et al. Polychlorinated biphenyl (PCB) exposure in mothers and time to pregnancy in daughters[J]. *Reproductive Toxicology*, 2011, 31(3): 290–296.
- [6] Vitalone A, Catalani A, Cinque C, et al. Long-term effects of developmental exposure to low doses of PCB 126 and methylmercury [J]. *Toxicology Letters*, 2010, 197(1): 38–45.
- [7] Berg V, Lyche J L, Gutleb A C, et al. Distribution of PCB 118 and PCB 153 and hydroxylated PCB metabolites (OH-CBs) in maternal, fetal and lamb tissues of sheep exposed during gestation and lactation[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(10): 1144–1150.
- [8] Glynn A, Larsdotter M, Aune M, et al. Changes in serum concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs), hydroxylated PCB metabolites and pentachlorophenol during pregnancy[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(2): 144–151.
- [9] Mai B X, Zeng E Y, Luo X J, et al. Abundances, Depositional fluxes, and

- homologue patterns of polychlorinated biphenyls in dated sediment cores from the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(1):49-56.
- [10] 杨 卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):945-951.
- YANG Zhuo, LI Gui-bao, WANG Dian-wu, et al. Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):945-951.
- [11] Chen C Y, Pickardt P C, Xu M Q, et al. Mercury and arsenic bioaccumulation and eutrophication in Baiyangdian Lake, China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 190(1):115-127.
- [12] Hu G C, Dai J Y, Mai B X, et al. Concentrations and accumulation features of organochlorine pesticides in the Baiyangdian freshwater food web, North China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58(3):700-710.
- [13] 胡国成, 郭建阳, 戴家银, 等. 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的含量分布、来源及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3):321-326.
- HU Guo-cheng, GUO Jian-yang, DAI Jia-yin, et al. Distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(3):321-326.
- [14] 胡国成, 李凤超, 戴家银, 等. 府河和白洋淀沉积物中 DDTs 的分布特征和风险评估[J]. 环境科学研究, 2009, 22(15):891-896.
- HU Guo-cheng, LI Feng-chao, DAI Jia-yin, et al. Characteristics of distribution and risk assessment of DDTs in surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(15):891-896.
- [15] Wu J P, Luo X J, Zhang Y, et al. Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers(PBDEs) and polychlorinated biphenyls(PCBs) in wild aquatic species from an electronic waste(e-waste) recycling site in South China[J]. *Environment International*, 2008, 34(8):1109-1113.
- [16] 黄健生, 贾晓平, 甘居利. 广东大鹏湾海域糙齿海豚体内多氯联苯的分布特征与毒性评价[J]. 中国水产科学, 2007, 14(6):974-980.
- HUANG Jian-sheng, JIA Xiao-ping, GAN Ju-li. Distribution and toxicity assessment of polychlorinated biphenyls(PCBs) in tissues of rough-toothed dolphin (*Steno bredanensis*) from Dapeng Bay, Guangdong, China[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(6):974-980.
- [17] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中污染物限量[S]. 北京, 2005.
- Ministry of Health of the People's Republic China, Standardization Administration of the People's Republic China. Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing, 2005.
- [18] Manchester-Neesvig J B, Valters K, Sonzogni W C. Comparison of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Lake Michigan salmonids[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(6):1072-1077.
- [19] Burreau S, Zebuhr Y, Broman D, et al. Biomagnification of PBDEs and PCBs in food webs from the Baltic Sea and the northern Atlantic Ocean [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 366(2-3):659-672.
- [20] 张晓岭, 杨方星, 闻 胜, 等. 电子废物污染地区水生生物体内多氯联苯的异构体分布特征和毒性[J]. 水生生物学报, 2009, 23(5):811-817.
- ZHANG Xiao-ling, YANG Fang-xing, WEN Sheng, et al. Congeners pattern and toxicity of polychlorinated biphenyls in aquatic organisms from an electronic and electrical waste area[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 23(5):811-817.
- [21] Barber L B, Keefe S H, Antweiler R C, et al. Accumulation of contaminants in fish from wastewater treatment wetlands[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(2):603-611.
- [22] O'Neill S M, West J E. Marine distribution, life history traits, and the accumulation of polychlorinated biphenyls in Chinook Salmon from Puget Sound, Washington[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2009, 138(2):616-632.
- [23] Wang Y W, Li X M, Li A, et al. Effect of municipal sewage treatment plant effluent on bioaccumulation of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the recipient water[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(17):6026-6032.
- [24] Borghesi N, Corsolini S, Focardi S. Levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and organochlorine pollutants in two species of Antarctic fish (*Chionodraco hamatus* and *Trematomus bernacchii*)[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(2):155-160.
- [25] Yang N Q, Matsuda M, Kawano M, et al. PCBs and organochlorine pesticides (OCPs) in edible fish and shellfish from China[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(8):1342-1352.
- [26] Meng X Z, Zeng E Y, Yu L P, et al. Persistent halogenated hydrocarbons in consumer fish of China: Regional and global implications for human exposure[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 40(6):1821-1827.
- [27] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品中二噁英及其类似物毒性当量测定[S]. 北京, 2007.
- Ministry of Health of the People's Republic China, Standardization Administration of the People's Republic China. Determination of toxic equivalencies of dioxin and dioxin-like compounds in foods[S]. Beijing, 2007.