

长江口表层沉积物中多氯联苯残留和风险评价

黄宏^{1,2,3}, 尹方^{2,4}, 吴莹³, 尹大强¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 200090;
3. 华东师范大学河口海岸科学研究院, 上海 200062; 4. 奥本大学工程学院, 奥本 36849)

摘要: 采用 GC-ECD (gas chromatography-electron capture detector) 对 14 种多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 在长江口及东海近岸沉积物中的残留水平进行了测定, 对其分布、组分特征、来源及生态风险水平进行了探讨。结果表明: 多氯联苯在表层沉积物中的质量分数为 18.66 ~ 87.31 ng · g⁻¹ (平均值为 41.65 ng · g⁻¹), 以三氯和四氯联苯为主, 占多氯联苯总量的 32.49% ~ 96.43%; 相关性分析揭示总有机碳是影响沉积物中多氯联苯分布的重要原因; 主成分因子分析法对多氯联苯来源的研究显示多氯联苯污染主要来源于电力电容器的浸渍剂等工业品的生产; 采用毒性当量因子 (toxic equivalency factors, TEFs) 法和沉积物环境质量标准 ISQG (interim sediment quality guideline) 对多氯联苯污染状况进行了初步评价, 与国内外水体沉积物相比, 长江口及东海近岸多氯联苯污染水平或毒性当量处于中等水平, 具有一定的潜在生态风险, 应加强污染监管。

关键词: 长江口; 多氯联苯; 表层沉积物; 生态风险评价

中图分类号: X 131.2; X 52

文献标识码: A

Residual Characteristics and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in Surface Sediments from Yangtze Estuary and Nearshore of East China Sea

HUANG Hong^{1,2,3}, YIN Fang^{2,4}, WU Ying³, YIN Daqiang¹

(1. College of Environmental Science & Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China; 3. Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China 4. Department of Civil Engineering, Auburn University, Auburn, AL 36849, USA)

Abstract: Concentration of 14 polychlorinated biphenyls (PCBs) residues in sediments from Yangtze Estuary and

nearshore of the East China Sea were determined by gas chromatography-electron capture detector (GC-ECD). The concentration of PCBs in sediments were in the range of 18.66 - 87.31 ng · g⁻¹. This paper will discuss PCB polluted sediments in the research area in terms of the distribution of PCBs, the pollution level, and the PCBs sources. According to component analysis, the types of PCBs found in the surface sediments were mainly 3 & 4 CB PCBs, accounting for 32.49% - 96.43% of the total PCBs found. The principal factor analysis revealed that the PCBs in the sediments were mainly from industrial pollution. Correlation analysis revealed total organic carbon (TOC) content strongly influenced the distribution of OCPs in sediments. Compared with other regions around the world, the pollution level of PCBs was, in general, at a moderate level. The ecological risk assessment by the methods of calculating toxic equivalent quantity (TEQ_{PCB}) and comparing with interim sediment quality guideline (ISQG) and probable effect level (PEL) values of risk evaluation, indicates the PCB contaminated sediments from Yangtze River estuary and its nearshore of the East China Sea will have a medium ecological risk.

Key words: Yangtze Estuary; polychlorinated biphenyls; surface sediment; risk assessment

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是一系列氯化联苯化合物组成的合成工业品, 由于其化学性质稳定, 电导率低, 导热性好, 不易燃, 在 20 世纪 70 年代前在工业生产中有过广泛的用途, 但是由于其具有环境持久性、远距离迁移性和生物蓄积性等缺点, 给人体健康和生态系统造成了潜在的威胁^[1]。长江口是长江三角洲的主干, 水土资源富集, 经济活动高度活跃, 是我国工农业发达、人口密集的区域之一。但其污染物排入量也十分巨大, 有机

收稿日期: 2010-06-15

基金项目: 上海市教委高校第五期海洋环境工程重点学科 (J50702); 上海市科委项目 (10230502900); 上海市教委创新项目 (08YZ118); 上海市科委重点基金 (08JC1418900)

第一作者: 黄宏 (1974—), 女, 副教授, 博士后, 主要研究方向为痕量污染物残留及风险评价. E-mail hhuang@shou.edu.cn

污染物在长江口及东海近岸环境中的富集趋势及潜在的生态系统影响也日益严重,已成为了国内外环境研究学者高度关注的区域之一.目前,对长江口及近岸海域 POPs(持久性有机污染物),尤其 PCBs 研究报道较少,本文针对长江口及东海近岸表层沉积物中多氯联苯残留进行了调查研究,分析探讨 PCBs 的浓度残留、分布特征、污染程度及其生态风险影响,以期对长江口及东海近岸沉积物污染控制和风险评价提供科学依据.

1 材料与方法

沉积物样品是通过“北斗”号调查船利用箱式采样器于 2006 年 6 月采集,采样范围为东经 $120^{\circ} \sim 125^{\circ}$ 、北纬 $28^{\circ} \sim 34^{\circ}$,如图 1 所示.北纬 31.5° 将长江入海口划分为南北区域.采集的表层沉积物,置入洁净的自封袋内, -20°C 保存至预处理.

标准样品:14 种 PCBs 混标(包括 PCB18, 28, 31, 44, 52, 101, 118, 138, 149, 153, 170, 180, 194, 209)1 mL,购自美国 Chem Service 公司.内标物 2, 4, 5, 6-四氯间二甲苯购自 Ultra Scientific 公司.丙酮、正己烷和二氯甲烷、正戊烷等溶剂均为色谱纯,购自上海安谱科学仪器有限公司.

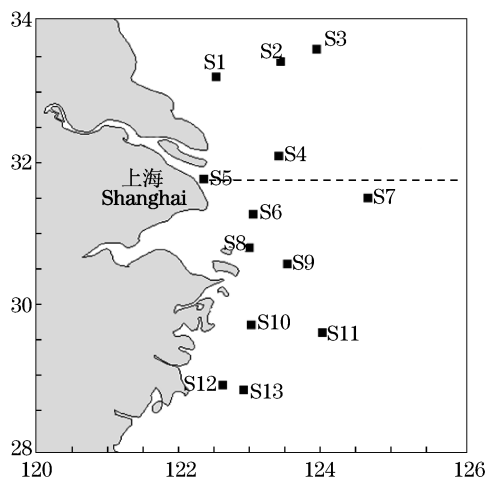


图 1 表层沉积物 13 个采样站位

Fig.1 Sampling locations of the surface sediments

PCBs 分析方法参照美国环境保护署标准 EPA8082,根据实验室条件稍作修改.取适量的沉积物,与无水硫酸钠、硅藻土混匀,用正己烷和丙酮(体积比 1:1)索氏提取后,过硅胶和无水硫酸钠(体积比 1:1)柱层析,同时加入少量的铜粉以去除硫的干扰,用正戊烷和二氯甲烷(体积比 1:1)洗脱,浓缩后

转移至棕色小瓶中保存,以备 GC-ECD (gas chromatography-electron capture detector)分析.

GC 条件:色谱柱为 Rtx-5 毛细管柱 ($30\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$).升温程序: 100°C 保持 4 min,以 $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 250°C ,保持 1 min,再以 $5^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 270°C ,维持 18 min,进样口和检测器温度分别为 225°C 和 320°C ,不分流进样,进样量为 $1\text{ }\mu\text{L}$.

PCBs 定性主要是依据色谱保留时间,同时参考标准物质的质谱图和质谱谱库(NISD)进行对照.采用多点校正曲线和内标法定量 PCB 单体.样品分析过程中,采用方法空白、加标空白和平行样进行质控.

一部分样品研磨后用 $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 酸化,使用 Vario EL III 元素分析仪测定有机碳(TOC)^[2],测定误差小于 10%.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中多氯联苯残留及污染水平

空白样品中没有检出目标化合物,内标物 2, 4, 5, 6-四氯间二甲苯的回收率为 $68.2\% \sim 74.8\%$,平行样平均误差为 $3.4\% \sim 10.0\%$,14 种 PCB 单体的检测限为 $0.40 \sim 0.75\text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,长江口及东海近岸表层沉积物中 14 种 PCB 单体质量分数经内标化合物的回收率校正后列于表 1.

由表 1 知,14 种 PCBs 化合物均有检出,表层沉积物中 PCBs 的质量分数介于 $18.66 \sim 87.31\text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (平均值为 $41.65\text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$).13 个采样站位中 PCBs 的质量分数最高值出现在 S10 站,质量分数为 $87.31\text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$;其次是 S5, S13 和 S12 站位,分别为 75.59 , 71.96 和 $69.85\text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$;其他站位 PCBs 均小于 $40\text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.推测这些站位紧靠海岸线,沿岸工农业相对发达,受近岸人类活动或陆源污染源排放影响严重所致.尤其 S10 站位,处于乐清磐石化工排污口和洞头北岙埭口排污口附近,PCBs 污染最为严重.在长江口以北,考虑黄海沿岸流附近的 S1, S2 和 S3 站位,其 PCBs 质量分数呈现一定的增加趋势,认为海洋环流对 PCBs 的分布造成了些影响,符合多氯联苯主要是通过大气传输以及海洋循环在全球环境中迁移的观点^[3].观察长江口以南采样站位,发现离海岸带越远,PCBs 质量分数呈显著减少趋势,这也与长江口以南,长江输送入东海的有机物以沿岸堆积为主的结果相符^[4].

表 1 长江口及东海近岸表层沉积物中的 PCBs 质量分数

Tab.1 Residues of PCBs in the surface sediments from Yangtze Estuary and nearshore of the east China sea

化合物	质量分数/(ng · g ⁻¹)												
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
PCB-18	0.70	5.92	1.63	13.00	23.87	6.21	0.62	0.90	0.89	25.69	3.32	11.11	17.19
PCB-28	2.23	0.75	0.60	2.30	7.19	5.49	0.55	0.74	0.87	6.34	0.55	2.25	5.43
PCB-31	4.10	3.86	9.05	5.04	10.90	8.92	3.36	8.43	4.27	14.77	5.94	8.58	15.60
PCB-52	1.60	2.02	1.30	2.79	7.93	4.37	0.64	1.96	2.34	9.45	1.07	4.43	22.76
PCB-44	1.53	1.19	1.20	4.87	15.97	12.87	1.11	2.32	1.13	14.58	0.87	2.88	8.41
PCB-101	0.40	0.55	0.49	0.60	0.62	0.53	0.65	1.90	0.61	0.74	0.68	0.87	0.72
PCB-118	0.51	0.68	0.62	0.69	0.71	—	0.66	2.06	0.96	1.15	0.76	1.66	—
PCB-149	0.37	0.85	0.67	0.53	0.49	0.38	0.85	1.40	0.47	0.61	1.33	3.75	0.76
PCB-153	0.69	0.66	0.52	0.90	0.64	0.45	0.74	0.62	0.63	0.76	0.44	0.88	0.61
PCB-138	0.65	1.00	0.59	1.00	0.97	0.21	0.86	0.99	1.06	1.77	0.65	1.57	0.15
PCB-180	1.67	1.73	0.96	1.59	1.57	0.02	2.08	1.41	1.31	2.82	1.08	4.46	—
PCB-170	1.63	1.89	0.14	1.72	1.46	0.04	1.80	2.47	2.52	2.71	0.06	2.68	0.04
PCB-194	0.95	1.15	0.12	0.86	0.81	0.07	1.36	6.63	1.06	1.81	0.13	5.36	0.06
PCB-209	2.74	2.27	2.99	2.51	2.46	—	4.05	2.98	2.72	4.11	1.78	19.37	0.23
PCBs 总量	19.77	24.52	20.88	38.40	75.59	39.56	19.33	34.81	20.84	87.31	18.66	69.85	71.96
w(TOC)	0.30	0.39	0.37	0.32	0.53	0.37	0.08	0.31	0.30	0.57	0.37	0.47	0.61

本研究沉积物中 PCBs 质量分数与国内外其他水域表层沉积物中 PCBs 污染状况相比,明显高于大亚湾^[5](0.85~27.40 ng · g⁻¹)与太湖北部湾^[6](1.26~3.13 ng · g⁻¹),与英国 Humber 河口^[7]的 PCBs 质量分数(<84 ng · g⁻¹)基本相当,远低于珠江三角洲^[8](11.54~485.45 ng · g⁻¹)和法国 Seine 河^[9](50~26 000 ng · g⁻¹).总体上,长江口及东海近岸表层沉积物中 PCBs 污染处于中等水平.

2.2 表层沉积物中多氯联苯与总有机碳的相关性

表 1 的 PCBs 总量与 TOC(总有机碳)的相关性分析结果表明(图 2),两者在 $P = 0.05$ 的置信水平上相关性显著($R^2 = 0.668$),说明总有机碳是影响

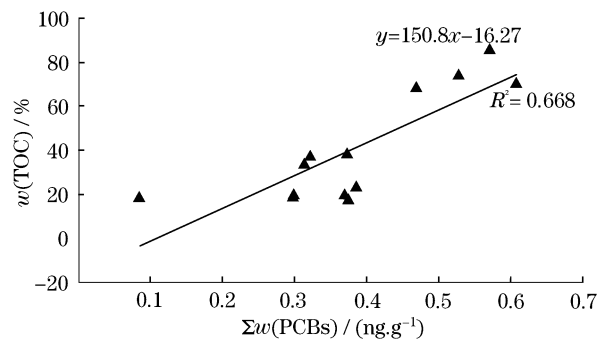


图 2 表层沉积物中 PCBs 与 TOC 的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between PCBs and TOC of surface sediments

沉积物中多氯联苯分布的重要因素. PCBs 具有高亲脂性、高辛醇-水分配系数的特点,因此易存留于沉积物的有机质和生物体中.总有机碳代表了沉积物中的有机质含量,有机质通过吸附、络合等作用对多氯联苯有着较高的富集性,对沉积物中多氯联苯的分布产生影响^[10].

2.3 表层沉积物中多氯联苯组分特征

按 PCBs 组成来看(图 3),三、四氯低氯代联苯质量分数(32.49%~96.43%)远高于五到十氯高氯代联苯质量分数(3.57%~67.51%),三、四氯联苯占 PCBs 质量分数的比例平均达到 63.91%.具体看来,除 S6 和 S13 站位三氯和四氯联苯质量分数较为接近外,在其余站位中,三氯联苯占比最高,其次是四氯、十氯和七氯联苯,其他 PCBs 占比很低.三氯联苯的质量分数范围为 4.53~46.8 ng · g⁻¹,占 PCBs 总量的 23.44%~55.51%,最高值出现在 S10;其次是 S5, S13, S12, S6 和 S4,其他站位均小于 20 ng · g⁻¹.四氯联苯的质量分数范围为 1.75~31.17 ng · g⁻¹,占 PCBs 总量的 9.05%~43.58%,最高值出现在 S13;其次是 S10, S5 和 S6,而在其他采样点质量分数较小,均小于 10 ng · g⁻¹.五氯联苯质量分数较低,范围在 0.53~3.96 ng · g⁻¹之间,而我国生产应用的多氯联苯以三氯联苯(90%)和五氯联苯(10%)为主^[11],这可能是由于五氯联苯在环境中容易降解脱氯所致^[12].另外,沉积物中有一定比例的

十氯联苯,平均质量分数占 PCBs 总量的 27.73%, 这可能与大气干、湿沉降过程带来的 PCBs 污染有关,有研究表明,大气颗粒物中有较高浓度的十氯联苯^[13].

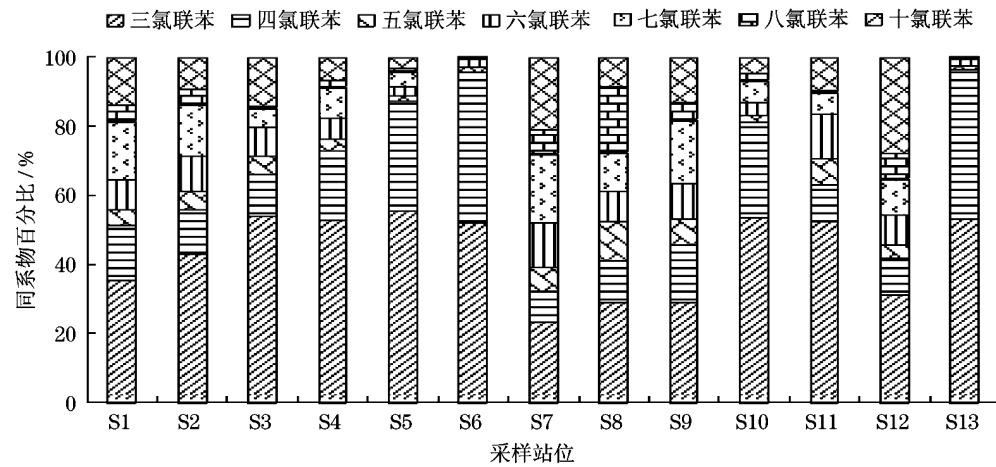


图3 样品中 PCBs 的同系物组成

Fig.3 Congener patterns of PCBs in different samples

2.4 表层沉积物中多氯联苯来源分析

我国 PCBs 的生产主要在 1965—1974 年间,总产量估计在 1 万 t 左右.其中三氯联苯产量在 9 kt 左右,主要用于电力电容器的浸渍剂.五氯联苯产量在 1 kt 左右,主要用作油漆等工业产品的添加剂.我国的 PCBs 还有一部分由国外输入,一些进口变压器油中 PCBs 质量分数可能高达 70% 以上,同时由于人为因素,PCBs 泄露现象时有发生^[1].本文采用因子分析方法对长江口及东海近岸表层沉积物中 PCBs 进行来源解析,并计算各来源对 PCBs 的贡献率.利用主成分分析提取因子,各因子的提取以特征根 > 1 为标准,通过方差最大化的旋转方法解释各因子的实际意义.统计分析软件为 SPSS 13.0.

因子分析结果见表 2.其中 4 个主成分的累计方差贡献率达到了 91.317%,基本上反映了原有数据的主要信息,因子 1 的方差贡献率为 42.495%,主要在 PCB-18, PCB-28, PCB-31, PCB-52 和 PCB-44 等三到四氯联苯上具有较高的因子载荷值;因子 2 的方差贡献率为 28.297%,主要在 PCB-153, PCB-138, PCB-180 和 PCB-170 等六到七氯联苯上有较高的因子载荷值;因子 3 的方差贡献率为 12.230%,主要在 PCB-101, PCB-118 和 PCB-194 等五氯联苯和八氯联苯上有较高因子载荷值;因子 4 的方差贡献率为 8.295%,主要在 PCB-149 和 PCB-209 等六氯和十氯联苯上有较高载荷值.其中,因子 1 在所有数据中占的贡献率最大,主要来源于三到四氯联苯的污染,推测本研究区域中主要源自于邻近地区工业生产中的电力电容器的浸渍剂、变压器油泄露和

造纸、采矿等企业的污水排放.同时,大气干、湿沉降也是长江口及东海近岸表层沉积物中 PCBs 的来源之一^[13-14].

表 2 因子负荷

Tab.2 Variance explained and loading of factors

化合物	主成分			
	1	2	3	4
PCB-18	0.906	0.324	-0.118	-0.004
PCB-28	0.934	0.044	-0.161	-0.151
PCB-31	0.912	-0.185	0.185	0.116
PCB-52	0.827	-0.274	-0.048	0.110
PCB-44	0.891	0.085	-0.081	-0.259
PCB-101	0.010	0.004	0.985	0.051
PCB-118	-0.185	0.508	0.774	0.258
PCB-149	-0.070	0.204	0.317	0.908
PCB-153	0.064	0.807	-0.037	0.271
PCB-138	0.061	0.901	0.245	0.184
PCB-180	-0.055	0.802	0.110	0.554
PCB-170	-0.102	0.878	0.377	0.023
PCB-194	-0.091	0.362	0.822	0.377
PCB-209	-0.045	0.485	0.126	0.846
方差贡献率/%	42.495	28.297	12.230	8.295
累计方差贡献率/%	91.317			

2.5 生态风险评价

在沉积物污染研究中一个最重要的环节就是对环境质量进行风险评估,但是沉积物污染标准的确定和风险评估是很困难的,主要是污染物种类多,生物效应有差异.迄今为止,国内还没有关于沉积物环

境质量评价的标准. 本文主要通过毒性当量因子 (toxic equivalency factors, TEFs) 法和加拿大沉积物环境质量标准 ISQG (interim sediment quality guideline) 法对研究区域沉积物中 PCBs 进行潜在生态风险评价.

毒性当量因子即将某 PCBs 的毒性与 2,3,7,8-TCDD(2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-D-dioxin) 的毒性相比得到的系数, 样品中某 PCBs 的质量浓度或质量分数与其毒性当量因子 TEF 的乘积, 即为其毒性当量 (toxic equivalent quantity, TEQ) 质量浓度或质量分数, 而样品的毒性大小就等于样品中各同类物 TEQ 的总和. 公式如下:

$$Q_{TEQ} = \sum F_{TEF,i} \cdot \rho_i$$

式中: Q_{TEQ} 为某 PCBs 毒性当量; $F_{TEF,i}$ 为某 PCBs 毒性当量因子; ρ_i 为某 PCBs 质量浓度.

通过查阅文献^[15-19], 本文选取世界卫生组织 (WHO) 提供的几种常见的指示性 PCBs 来计算沉积物中的 PCBs 毒性当量, 如表 3.

计算结果表明, 本研究 PCBs 毒性当量 (TEQ) 的

范围是 $0.06 \sim 0.46 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他水域表层沉积物中 PCBs 的毒性当量相比, 低于土耳其伊斯坦布尔海峡 ($0 \sim 15 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[20]、南非中部生活区和工业区 ($0.04 \sim 4.40 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[21], 稍高于南四湖 ($0.05 \sim 0.06 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[22]、日照近海 ($0.08 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[22]、烟台 ($0.05 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[22]、太湖 ($5.34 \times 10^{-3} \sim 22.8 \times 10^{-3} \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[14] 和太湖北部湾 ($4.96 \times 10^{-3} \sim 16.86 \times 10^{-3} \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[6]. 总体上, 长江口及东海近岸表层沉积物中 PCBs 毒性当量处于中等水平.

加拿大环境委员会根据大量实验数据制订了沉积物环境质量标准^[23], 用来为保持水生生态系统的长期稳定健康设立参考值 (表 4). 污染物浓度低于 ISQG 值, 对暴露的生物体的威胁尚可接受, 极少引起生物负效应; 污染物浓度介于 ISQG 和 PEL (probable effect level) 之间, 对暴露的生物体有潜在威胁, 偶尔会引起生物负效应; 污染物浓度高于 PEL, 对暴露的生物体有严重的或紧急的威胁, 会经常引起生物负效应.

表 3 各 PCBs 对应 TEFs 值

Tab.3 Toxic equivalency factors (TEFs) of different PCBs

PCBs 同系物	PCB-28	PCB-52	PCB-101	PCB-118	PCB-153	PCB-138	PCB-170	PCB-180
TEFs 值	0.000 002	0.000 005	0.000 030	0.000 030	0.000 010	0.000 020	0.000 100	0.000 010

表 4 加拿大沉积物 PCBs 评价质量标准

Tab.4 Canadian sediment quality guidelines for PCBs

项目	质量分数/(ng · g ⁻¹)		< ISQG 值/%	ISQG 值~PEL 值/%	>PEL 值/%
	ISQG	PEL			
标准参考值	21.5	189			
长江口及毗邻海域 PCBs 质量分数	18.67~87.32		38.46	61.54	0

与加拿大环境委员会制订的沉积物中 PCBs 质量分数参考值比较, 发现长江口及毗邻海域沉积物中 PCBs 的质量分数为 38.46% 小于 ISQG 值, 过半介于 ISQG 和 PEL 值之间 (大多位于海岸附近), 说明长江口沉积物中的 PCBs 含量具有一定的潜在生态风险, 可能引起生物负效应.

3 结论

长江口及东海近岸沉积物中 14 种 PCBs 均有检出, 质量分数范围为 $18.66 \sim 87.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (平均值为 $41.66 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 在全球范围污染水平内处于中等. PCBs 组成分析表明, 三到四氯低氯代联苯质量分数 (32.49%~96.43%) 远高于五到十氯高氯代联

苯质量分数 (3.57%~67.51%), 三到四氯联苯占 PCBs 总量的比例均值达 63.91%. 以北纬 31.5° 为分界线观察, 在长江口以北, 多氯联苯主要是通过大气传输以及海洋循环在全球环境中迁移, 长江口以南采样站位, 多氯联苯以沿岸堆积为主. 主成分分析结果显示, 三到四氯联苯的因子贡献率较大, 方差贡献率达到 42.495%, 表明 PCBs 多来源于邻近地区工业生产中的电力电容器的浸渍剂、变压器油泄露和造纸、采矿等企业的污水排放, 同时, 也不排除大气干湿沉降带来的 PCBs 污染. 通过毒性当量因子法和加拿大的沉积物 PCBs 评价质量标准分析, 显示长江口及东海近岸海域沉积物中 PCBs 风险水平中等, 存在一定的生态危险, 可能引起生物负效应. 考虑到长江口特殊的地理位置和经济地位, 应加强对长江口

及东海近岸的区域环境监督与管理.

参考文献:

- [1] 邢颖,吕永龙,刘文彬,等.中国部分水域沉积物中多氯联苯污染物的空间分布、污染评价及影响因素分析[J].环境科学,2006,27(2):228.
XING Ying, LV Yonglong, LIU Wenbin, et al. Assessment of PCB pollution in spatial distribution and analysis of the PCB sources in sediments in China [J]. Environmental Science, 2006, 27(2):22.
- [2] Wu Y, Zhang J, Liu S M, et al. Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2007, 71(1/2):13.
- [3] Hope B, Scatolini S, Titus E, et al. Distribution patterns of polychlorinated biphenyl congeners in water, sediment and biota from midway atoll (North Pacific Ocean) [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(7):548.
- [4] 朱纯,潘建明,卢冰,等.长江口及邻近海域现代沉积物中正构烷烃分子组合特征及其对有机碳运移分布的指示[J].海洋学报:中文版,2005,27(4):59.
ZHU Chun, PAN Jianming, LU Bing, et al. Compositional feature of n-alkanes in modern sediment from the changjiang estuary and adjacent area and its implication to transport and distribution of organic carbon [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4):59.
- [5] Zhou J L, Maskouki K, Qiu Y W, et al. Polychlorinated biphenyl congeners and organochlorine insecticides in the water column and sediments of daya bay, china [J]. Environmental Pollution, 2001, 113(3):373.
- [6] 计勇,陆光华,吴昊,等.太湖北部湾多氯联苯分布特征及生态风险评估[J].生态环境学报,2009,18(3):839.
JI Yong, LU Guanghua, WU Hao, et al. The distribution and risk assessment of polychlorinated biphenyl in surface sediments in the northern of Tai Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3):839.
- [7] Tyler A O, Millward G E. Distribution and partitioning of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and polychlorinated biphenyls in the Humber Estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, 32(5):397.
- [8] 康跃惠,麦碧娴,盛国英,等.珠江三角洲河口及邻近海区沉积物中含氯有机污染物的分布特征[J].中国环境科学,2000,20(3):245.
KANG Yuehui, MAI Bixian, SHENG Guoying, et al. The distributing characteristics of organochlorine compounds contaminants in sediments of Pearl River Delta and nearby sea area [J]. China Environmental Science, 2000, 20(3):245.
- [9] Chevreuil M, Blanchard M, Teil M J, et al. Polychlorobiphenyl behaviour in the water/sediment system of the Seine River, France [J]. Water Research, 1998, 32(4):1204.
- [10] Brownawell B J, Farrington J W. Biogeochemistry of PCBs in interstitial waters of a coastal marine sediment [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(1):157.
- [11] 阙明学,温青,刘广民,等.多氯联苯在自然水体中的分布现状与处理工艺[J].中国给水排水,2006,22(24):10.
QUE Mingxue, WEN Qing, LIU Guangmin, et al. Distribution and treatment process of polychlorinated biphenyls in natural waters [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(24):10.
- [12] 孙振中,戚隽渊,曾智超,等.长江口九段沙水域环境及生物体内多氯联苯分布[J].环境科学研究,2008,21(3):92.
SUN Zhenzhong, QI Juanyuan, ZENG Zhichao, et al. Polychlorinated biphenyls in the water, soil and aquatic animals from the Jiuduansha Wetland of Yangtze River estuary [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(3):92.
- [13] 熊幼幼,李欣年,徐殿斗,等.上海嘉定地区大气颗粒物中有机卤素污染物的测定[J].核化学与放射化学,2006,28(3):139.
XIONG Youyou, LI Xinnian, XU Diandou, et al. Determination on organohalogen in aerosol in Jiading District, Shanghai [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2006, 28(3):139.
- [14] 陈燕燕,尹颖,王晓蓉,等.太湖表层沉积物中PAHs和PCBs的分布及风险评估[J].中国环境科学,2009,29(2):118.
CHEN Yanyan, YIN Ying, WANG Xiaorong, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyl in surface sediments of Taihu Lake: the distribution, sources and risk assessment [J]. China Environmental Science, 2009, 29(2):118.
- [15] Ahlborg U G, Becking G C, Birnbaum L S, et al. Toxic equivalency factors for dioxin-like pcsbs -report on a who-eceh and ipc consultation, December 1993 [J]. Chemosphere, 1994, 28(6):1049.
- [16] Safe S. Development, validation and limitations of toxic equivalency factors [J]. Chemosphere, 1992, 25(12):61.
- [17] Berg M V D, Birnbaum L S, Denison M, et al. The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds [J]. Toxicological Sciences, 2006, 93(2):223.
- [18] Yang J M, Salmon A G, Marty M A. Development of TEFs for PCB congeners by using an alternative biomarker—thyroid hormone levels [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2010, 56(2):225.
- [19] Berg M V D, Birnbaum L, Bosveld A T C, et al. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife [J]. Environmental Health Perspectives, 1998, 106(12):775.
- [20] Okay O S, Karacik B, Basak S, et al. PCB and PCDD/F in sediments and mussels of the Istanbul Strait (Turkey) [J]. Chemosphere, 2009, 76(2):159.
- [21] Nieuwoudt C, Quinn L P, Pieters R, et al. Dioxin-like chemicals in soil and sediment from residential and industrial areas in central South Africa [J]. Chemosphere, 2009, 76(6):774.
- [22] 杨永亮,史双昕,潘静,等.南四湖沉积物中二噁英类化合物的分布[J].环境化学,2004,23(5):549.
YANG Yongliang, SHI Shuangxin, PAN Jing, et al. Congener distributions of dioxin-like compounds in sediments from the Nansi Lakes, China [J]. Environmental Chemistry, 2004, 23(5):549.
- [23] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updated [S]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.