

王炳一, 骆坚平, 马梅, 等. 2009 天津永定新河沉积物中多卤联苯的污染水平和生物有效性 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2427–2432
Wang B Y, Luo J P, Ma M, *et al.* 2009 Concentrations and bioavailability of polyhalogenated biphenyls in sediments from Yongding New River in Tianjin, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(11): 2427–2432

天津永定新河沉积物中多卤联苯的污染水平和生物有效性

王炳一^{1, 2}, 骆坚平¹, 马梅¹, 吴玉英², 王子健^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心国家水质学国家重点实验室, 北京 100085
2 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083
收稿日期: 2009-01-10 修回日期: 2009-04-22 录用日期: 2009-08-18

摘要: 通过测定天津市永定新河沉积物和同步采集的溞体内多氯联苯 (PCBs) 和多溴联苯 (PBBs) 含量, 初步评价此类持久性有机污染物的潜在生态风险. 结果显示, 经归一化处理后, 在永定新河沉积物中主要检出的 18 种 PCBs 和 14 种 PBBs 总含量分别为 492.4~3251.9 ng g⁻¹ 和 429.7~2950.0 ng g⁻¹ (以有机碳计), 而在溞体内 PCBs 和 PBBs 的总含量分别是 301.8~1765.4 ng g⁻¹ 和 309.7~1987.8 ng g⁻¹ (以脂肪计). 计算得到的 PCBs 和 PBBs 沉积物生物富集系数 (BSAF) 分别在 0.1~1.3 和 0.1~3.0 之间, 明显小于根据平衡分配模型的预测值和其他文献报道值. 同时, BSAF 数值与相应污染物的辛醇/水分配系数的对数 (logK_{ow}) 值之间无相关关系 ($p > 0.08$), 且在不同采样点间的变异系数相差较大 (20%~90%). 研究结果还表明, 与国内外已经发表数据相比, 永定新河沉积物中 PCBs 和 PBBs 均处在较高污染水平, 但是绝大部分目标污染物的 BSAF 数值偏低, 沉积物结合态污染物的生物有效性相对较低, 且在不同采样点间存在着较大差异.
关键词: 沉积物; 多氯联苯 (PCBs); 多溴联苯 (PBBs); 生物有效性; 天津

文章编号: 0253-2468 (2009) 11-2427-06 中图分类号: X131 文献标识码: A

Concentrations and bioavailability of polyhalogenated biphenyls in sediments from Yongding New River in Tianjin, China

WANG Bingyi^{1, 2}, LUO Jianping¹, MAM e¹, WU Yuying², WANG Zijian^{1,*}

1 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
2 College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083

Received 10 January 2009; **received in revised form** 22 April 2009; **accepted** 18 August 2009

Abstract Concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated biphenyls (PBBs) in sediments and simultaneously sampled daphnia from Yongding New River in Tianjin, China were determined to preliminarily assess their potential ecological risks. According to the results, 18 PCB congeners and 14 PBB congeners could be detected in all sediment samples, and their total concentrations ranged from 492.4 to 3251.9 ng g⁻¹ and 429.7 to 2950.0 ng g⁻¹ (normalized to total organic carbon), respectively. Their concentrations in daphnia samples were from 301.8 to 1765.4 ng g⁻¹ and 309.7 to 1987.8 ng g⁻¹ (normalized to lipids), respectively. The calculated in-situ bio-sediment accumulation factors (BSAFs) of PCBs and PBBs ranged from 0.1 to 1.3 and 0.1 to 3.0, respectively. Most BSAFs were much lower than those predicted by equilibrium partitioning theory, and no significant relationship between BSAF and logK_{ow} ($p > 0.08$) was found. It can be concluded that concentrations of PCBs and PBBs in sediments from Yongding New River were higher than many reported from other areas, but the bioavailability for most of sediment-associated PCBs and PBBs was low and varied greatly among different sampling sites (coefficients of variation: 20%~90%).

Keywords sediment; PCBs; PBBs; bioavailability; Tianjin

1 引言 (Introduction)

天津地区河流纵横交错,而且大部分河流都从天津沿岸入海.近年来,由于大量工业废水和生活污水的排放,天津地区大部分河流已受到了不同程度的污染(Shi *et al.*, 2005),这不仅导致当地水生生态系统的严重破坏,也使得天津海域水质和海岸沉积物受到不同程度的污染,对该地区农业、渔业发展造成了严重的影响(Hu *et al.*, 2005 刘文新等, 2005). 污染物可通过沉淀、吸附等作用积累到沉积物中,其含量也相对稳定,能够记录下水体长期的污染水平.同时,在一定的条件下污染物可经扩散、分配等过程重新释放到水相或通过食物链在生物体内富集(王子健等, 2005). 因此,沉积物对污染物在水生生物中的富集以及在整个水生生态系统中迁移转化起到了重要作用.

多氯联苯(PCBs)是《斯德哥尔摩公约》禁止使用的 12 种持久性有机污染物之一,可经食物链富集到高等生物的脂肪或类脂性器官与组织中,严重威胁人类健康(Oliveira *et al.*, 2008). 毒理学研究表明,多氯联苯是一类典型的环境激素,有强致毒、致癌性能,对皮肤、肝脏、胃肠系统、神经系统、生殖系统、免疫系统的病变都有诱导效应,还可通过母体传递给子代,使子代畸形(Priha *et al.*, 2005 周景明等, 2007 詹翠琼等, 2007). 多溴联苯(PBBs)属于溴化阻燃剂中的一种,曾作为添加型阻燃剂广泛应用于家用电器、电子产品、塑料泡沫、家居装饰材料等行业,它在结构、性质等很多方面都与多氯联苯相似.

基于此,本研究通过分析天津市永定新河沉积物和溞中的多氯联苯和多溴联苯的累积水平,评价此类持久性有机污染物的污染水平及其生物富集状况,以期为流域生态风险评价以及改善该流域的生态环境提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 药品与试剂

有机溶剂:二氯甲烷、正己烷、丙酮均购自美国 Fisher Scientific 公司,为农残级. 27 种 PCBs 混合标样包括 PCB8、18、28、44、52、66、77、81、101、105、114、118、123、126、128、138、153、156、157、167、169、170、180、187、189、195、206、23 种 PBBs 混合标样包括 PBB1、2、3、4、7、9、10、15、18、26、29、30、31、38、

49、52、53、80、101、103、153、155、209 回收率指示物为 2,4,5,6-四氯间二甲苯(TMx)和 PCB209,内标为五氯硝基苯(PCNB). 以上标准样品均购自美国 Cambridge 同位素实验室.

2.2 样品采集

2007 年 7 月,于天津市永定新河布设 8 个采样点,具体位置坐标如表 1 所示. 其中, Y1 潮白新河采样点作为该地区的环境背景参考. 用抓斗式采样器采集表层沉积物样品(0~20 cm),用清洗干净的不锈钢容器密封后冷冻保存. 同时,采集溞的生物样品,冷冻保存. Y7 和 Y8 两个采样点由于无溞生长,未能采集到生物样品.

表 1 永定新河流域采样点具体位置坐标
Table 1 The specific location coordinates of sampling sites in the Yongding New River

位置编号	位置名称	北纬 (N)	东经 (E)
Y1	潮白新河	39°16'52"	117°22'22"
Y2	霍庄大桥	39°17'06"	117°19'04"
Y3	华北桥	39°16'38"	117°22'49"
Y4	永河桥	39°13'34"	117°32'10"
Y5	大张庄桥	39°16'59"	117°13'31"
Y6	唐津高速	39°10'11"	117°34'49"
Y7	永定新河闸	39°09'17"	117°38'08"
Y8	彩虹大桥	39°06'31"	117°43'27"

2.3 样品处理和净化

将采集到的沉积物和生物样品冷冻干燥. 沉积物研磨后过 40 目筛,加入相应的回收率指示物,用正己烷/丙酮(体积比 1:1)溶液索氏提取 24 h(每个样点设 3 个平行, $n=3$). 取生物样品索提液的 1/10 用于重量法测脂肪含量. 取沉积物样品 20 g 于 105 °C 下烘烤 12 h 再在马福炉中 550 °C 焙烧 1 h 利用减重法得到有机质百分含量(B_{101}),并通过式(1)计算有机碳百分含量(A_{OC})(Xue *et al.*, 2006).

$$A_{OC} = 0.485 \times B_{101} - 0.4 \tag{1}$$

索提液经过旋转蒸发浓缩并置换至 1 mL 正己烷,然后用多层硅胶柱净化. 硅胶柱组成为 2 g 无水硫酸钠、2 g 去活硅胶(纯净水含量 3.3%)、15 g 酸化硅胶(浓硫酸含量 44%)、3 g 碱性硅胶(Across Organics USA)、1 g 去活硅胶(纯净水含量 3.3%)、2 g 无水硫酸钠. 净化柱预先用 80 mL 正己烷淋洗,然后加入待净化样品. 第 1 部分用正己烷洗脱得到 PCBs,第 2 部分用二氯甲烷/正己烷(10%, 体积比)溶液洗脱得到 PBBs(Zhao *et al.*, 2008). 净化后的洗脱液经过旋转蒸发浓缩至 1 mL,室温下用柔和氮

气吹干,最后用正己烷定容至 200μL

2 4 仪器分析与条件

气相色谱 质谱联用仪 (GC/MS 美国 Agilent 5975), DB-5 MS毛细管色谱柱 (30m × 0.25mm × 0.25μm), 升温程序: 始温 90℃保留 1m in, 4℃ m in⁻¹升至 250℃, 再以 25℃ m in⁻¹升至 300℃, 保留 5m in, 进样口温度 260℃; 质谱采用 EI电离源, 电子能量 70eV; 离子源温度 230℃, 采用选择性离子扫描方式; 传输线温度 300℃; 载气为氦气, 采用恒流模式, 流速 1.5mL•m in⁻¹; 无分流进样 1μL, 溶剂延迟 4m in (Zhao *et al.*, 2008).

2 5 质量控制和保证 (QA/QC)

整个分析过程中设置方法空白、加标空白、基质加标、样品平行样. 多氯联苯的方法检测限为 0.02~ 0.12ng g⁻¹ (以干重计), 多溴联苯的方法检测限为 0.08~ 0.32ng g⁻¹ (以干重计), TMX、PCB209回收率分别为 70.4% ~ 92.5%、90.8% ~ 112.6%.

3 结果 (Results)

3 1 有机污染物在沉积物中的浓度

在被检测的 27种 PCBs和 23种 PBBs中, 主要检测到 18种 PCBs (包括 PCB8、18、28、44、52、66、77、81、101、118、123、128、153、157、169、187、195、206)和 14种 PBBs (包括 PBB1、2、3、7、10、15、26、29、30、31、38、80、153、155).

8个采样点沉积物中的总有机碳含量范围为 1.3% ~ 2.3%. 经过有机碳归一化处理后, 各采样点的 Σ PCBs和 Σ PBBs 含量分别为 492.4~ 3251.9 ng g⁻¹和 429.7~ 2950.0 ng g⁻¹ (以有机碳计), 其分布和组成如图 1所示. 从图 1可以看出, 各采样点沉积物中的 PCBs以 4、5、6个氯原子的 PCBs为主, 其所占比例分别为 17.8% ~ 41.0%、15.2% ~ 27.1%、11.5% ~ 27.8%; 而 PBBs则以 1、3个溴原子的 PBBs 为主, 其所占比例分别为 17.2% ~ 38.7%、32.0% ~ 48.2%.

国内外相关研究表明 (表 2), 天津永定新河沉积物中的 Σ PCBs含量 (以干重计) 高于 2003年的海河流域和太湖梅梁湾沉积物中水平, 同时, 也高于北京地区的通惠河和高碑店湖中的沉积物. 但低于大沽排污河以及韩国 Busan湾, 而与美国休斯顿航道沉积物和浙江电子垃圾集中地土壤的数据相比, 本研究中永定新河沉积物含量要小得多. 总体来看, 永定新河沉积物中的 Σ PCBs含量处于相对偏高

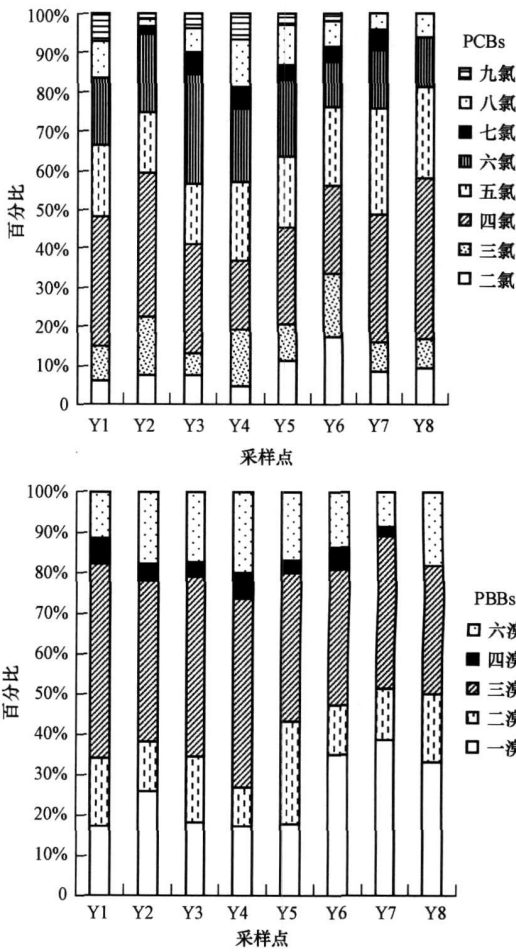


图 1 天津永定新河沉积物中 PCBs和 PBBs的组成分布

Fig 1 Distribution of PCBs and PBBs in sediments from Yongding New River in Tianjin, China

的水平.

近年来, 国内外关于 PBBs的检测数据较少, 国外研究主要集中在美国密歇根州, 而且主要只针对 PBB153 这是由于 1973 年在这一地区发生了严重的 PBBs污染事件, 而污染物的主要成分就是 PBB153 (Yun *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2005). 从表 2 可以看出, 美国密歇根州 PBB153 的最高含量出现在 Pine河流域的土壤中, 达到了 13.5 ng g⁻¹ (以干重计). 而本研究中, 各采样点沉积物中 PBB153 的含量范围在 0.8~ 5.2 ng g⁻¹ (以干重计), 在主要检出的 14种 PBBs中, 含量最大的是 Y6 唐津高速采样点处沉积物中的 PBB1, 含量为 8.8 ng g⁻¹ (以干重计). 与 Zhao 等 (2008) 的研究结果相比较, 本研究中的 PBBs总含量与浙江电子垃圾集中地区土壤中 PBBs的总量相近, 由此可以推断, 天津永定新河流域存在一定程度的 PBBs污染.

表 2 国内外各地区沉积物 (或土壤) 中 Σ PCBs 和 Σ PBBs 含量比较
Table 2 Comparison of concentrations of Σ PCBs and Σ PBBs in different areas

污染物	地点	<i>n</i>	含量 / (ng g ⁻¹) (以干重计)	文献来源
PCBs	海河 (天津)	19	0.8~4.4	张庆华, 2004
	大沽排污河 (天津)	19	44.3~153.7	张庆华, 2004
	太湖梅梁湾 (江苏)	19	1.0~5.9	张庆华, 2004
	电子垃圾集中地土壤 (浙江)	23	12.6~739.0	Zhao <i>et al.</i> , 2008
	高碑店湖 (北京)	25	3.1~18.1	Wang <i>et al.</i> , 2007
	通惠河 (北京)	12	0.8~8.5	Zhang <i>et al.</i> , 2004
	休斯顿航道 (美国)	18	0.5~1418.0	Howell <i>et al.</i> , 2008
	Busan湾 (韩国)	22	5.7~199.0	Hong <i>et al.</i> , 2005
	永定新河 (天津)	18	7.8~64.2	本研究
PBBs	电子垃圾集中地土壤 (浙江)	13	8.2~58.4	Zhao <i>et al.</i> , 2008
	Shiawassee河 (美国密歇根州)	1	<0.001	Yun <i>et al.</i> , 2008
	Saginaw河 (美国密歇根州)	1	nd~4.7	Yun <i>et al.</i> , 2008
	Saginaw海湾 (美国密歇根州)	1	nd~0.4	Yun <i>et al.</i> , 2008
	Pine河土壤 (美国密歇根州)	1	13.5	Yun <i>et al.</i> , 2008
	Michigan湖 (美国)	1	0.05	Zhu <i>et al.</i> , 2005
	Erie湖 (美国)	1	0.02	Zhu <i>et al.</i> , 2005
	永定新河 (天津)	14	6.8~47.2	本研究

注: *n* 为检测的目标化合物数目; nd表示未检出.

3.2 有机污染物在溞体内的富集

沉积物生物富集系数 (bio-sediment accumulation factor, BSAF), 即污染物在水生生物中的脂肪归一化含量与沉积物的有机碳归一化含量的比值, 是评价沉积物中污染物生态风险的一个主要指标, 它可反映污染物的生物有效性和可富集程度. 本研究中各点的生物样品脂肪含量为 1.0% ~ 1.4%, 经过脂肪归一化处理后, 各点溞体内 Σ PCBs 和 Σ PBBs 含量分别为 301.8~1765.4 ng•g⁻¹ 和 309.7~1987.8 ng•g⁻¹ (以脂肪计), 所求得 18 种 PCBs 和 14 种 PBBs 的 BSAF 值分别在 0.1~1.3 和 0.1~3.0 之间 (表 3), 由于个别数据低于方法检测限, 将其 BSAF 值取为 0.

根据平衡分配模型的预测值 (1.0) 以及文献报道值, 有机污染物的 BSAF 值应在 1.0~4.0 之间 (Belfroid *et al.*, 1996; Van der Kooij *et al.*, 1991). 研究显示, 23 种 PCBs 在淮河信阳和淮南段鲤鱼中的 BSAF 值大都在 2 以下 (王子健等, 2001); Aroclor1254 在海洋生物中的 BSAF 值在 0.5~4.5 范围内, 个别生物种的 BSAF 可高达 10 以上 (Maruya *et al.*, 1998); 9 种 PCBs 在鳗鱼和梭鱼体内的 BSAF 值范围分别为 0.16~10.10 和 1.98~

12.20 (Stuart *et al.*, 1997); 17 种 PCBs 在肯塔基湖贻贝中的 BSAF 值为 0.84~13.00 (Bommanna *et al.*, 2008).

本研究所得到的数据普遍小于平衡分配模型的预测值和文献报道值, 并且 BSAF 值与各物质的 log_{ow} 值之间无相关关系 (*p* > 0.08), 同时发现, 各目标污染物的 BSAF 在各点间存在着较大的变化, 变异系数 (标准偏差与平均值的比值) 在 20% ~ 90% 之间, 说明各点沉积物中 PCBs 和 PBBs 的有效性存在着较大差异. 这可能是由于持久性有机污染物在土壤、沉积物等固体介质中的吸附-解吸过程较为复杂, 传统的平衡分配机理在很多情况下并不适用. 同时, 由于污染物自身性质以及沉积物组成等多方面因素的作用, 使得有机污染物的生物可利用性和生物可及性受到影响, 并导致与辛醇-水分配系数 *K*_{ow} 相关性的偏差.

4 结论 (Conclusions)

1) 与国内外研究相比, 天津永定新河沉积物中的 PCBs 和 PBBs 含量都处在一个相对较高的水平, 接近于国内外典型污染地区的污染水平. 在污染物组成上, 以 4、5、6 个氯原子的 PCBs 和 1、3 个溴原子

表 3 各点 PCBs 和 PBBs 的沉积物生物富集系数 (BSAF) 及各物质的 logK_{ow} 值 (Zhou et al., 2005)

Table 3 Bio-sediment accumulation factors (BSAF) of PCBs and PBBs and octanol water partition coefficient (logK_{ow})

位置编号	PCB8	PCB18	PCB28	PCB44	PCB52	PCB66	PCB77	PCB81	PCB101	PCB118	PCB123	PCB128	PCB153	PCB157	PCB169	PCB187	PCB195	PCB206
Y1	0.40	0.81	0.41	0.74	0.44	0.26	0.35	0.38	0.44	0.00	0.24	0.49	0.66	0.63	0.50	0.00	0.46	0.48
Y2	0.14	0.22	0.43	0.62	1.06	0.75	0.46	0.94	0.80	0.56	0.80	0.96	0.59	0.77	0.62	0.73	1.26	0.94
Y3	0.05	0.21	0.43	0.50	0.18	0.38	0.40	0.32	0.26	0.36	0.41	0.64	0.59	0.23	0.39	0.29	0.60	0.35
Y4	0.17	0.43	0.54	0.55	0.38	0.43	0.24	0.43	0.66	0.92	0.53	0.55	0.41	0.32	0.55	0.35	0.46	0.56
Y5	0.20	0.27	0.41	0.44	0.46	0.52	0.42	0.32	0.38	0.27	0.40	0.33	0.46	0.55	0.47	0.42	0.51	0.45
Y6	0.47	0.96	0.90	0.75	0.93	1.34	1.16	1.04	0.76	0.95	0.92	1.08	1.20	1.12	0.67	1.10	1.14	1.11
平均值	0.24	0.48	0.52	0.60	0.57	0.61	0.51	0.57	0.55	0.51	0.55	0.68	0.65	0.60	0.53	0.48	0.74	0.65
标准偏差	0.16	0.32	0.19	0.13	0.34	0.39	0.33	0.33	0.22	0.38	0.26	0.29	0.29	0.32	0.10	0.38	0.36	0.31
logK _{ow}	5.0	5.2	5.6	5.6	5.7	6.2	6.4	6.4	6.2	6.7	6.7	6.6	6.7	7.1	7.5	7.0	7.5	7.8
位置编号	PBB1	PBB2	PBB3	PBB7	PBB10	PBB15	PBB26	PBB29	PBB30	PBB31	PBB38	PBB80	PBB153	PBB155				
Y1	0.50	0.46	1.60	0.58	0.72	0.83	0.72	0.00	0.88	0.60	0.52	0.59	0.55	0.93				
Y2	0.75	0.58	0.59	0.64	0.59	0.52	0.62	0.71	0.53	0.77	0.57	0.90	0.61	0.69				
Y3	0.32	0.36	0.61	0.53	0.46	0.53	0.33	0.42	0.37	0.56	0.47	0.46	0.40	0.48				
Y4	0.65	0.43	0.39	0.47	0.54	0.67	0.37	0.38	0.67	0.62	0.48	0.48	0.68	0.53				
Y5	0.66	0.58	0.63	0.58	0.91	0.00	0.53	0.49	0.14	1.14	0.70	0.70	0.58	1.08				
Y6	1.07	1.75	3.00	1.15	1.78	1.01	1.55	1.27	1.55	1.98	1.65	2.01	1.22	1.62				
平均值	0.66	0.69	1.14	0.66	0.83	0.60	0.68	0.54	0.69	0.95	0.73	0.86	0.28	0.89				
标准偏差	0.25	0.53	1.01	0.25	0.49	0.35	0.45	0.42	0.49	0.55	0.46	0.59	0.67	0.43				
logK _{ow}	4.6	4.9	5.0	5.3	5.5	5.7	6.0	6.1	6.4	6.7	6.9	7.3	8.8	8.9				

的 PBBs为主.

2)绝大部分 PCBs和 PBBs的 BSAF 值小于理论预测值和文献报道值,表明各点沉积物中 PCBs和 PBBs的有效性偏低.各采样点的 BSAFs变化较大,且与目标污染物的 $\log K_{ow}$ 值之间没有相关关系.

责任作者简介:王子健(1953—),男,博士,研究员,博士生导师.主要从事天然水体和水处理过程中的水质转化、相关毒性和毒理变化以及环境污染引起的健康和生态风险研究.

E-mail wangzj@rees.ac.cn

参考文献 (References):

- Belfroid A C, Sijn D T, Van Gestel C A M. 1996 Bioavailability and toxicokinetics of hydrophobic aromatic compounds in benthic and terrestrial invertebrates [J]. *Environmental Reviews*, 4: 276—299
- Bomanna G L, Kurunthachalam S K, Shigeki M, *et al*. 2008. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls in sediment and mussel samples from Kentucky Lake, USA [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 54: 20—30
- Hong S H, Yin H, Shin W J *et al*. 2005. Congener-specific survey for polychlorinated biphenyls in sediments of industrialized bays in Korea: Regional characteristics and pollution sources [J]. *Environmental Science & Technology*, 39: 7380
- Howell N L, Suarez M P, Rai H S, *et al*. 2008. Concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) in water, sediment and aquatic biota in the Houston Ship Channel, Texas [J]. *Chemosphere*, 70: 593—606
- Hu J Y, Wan Y, Shao B *et al*. 2005. Occurrence of trace organic contaminants in Bohai Bay and its adjacent Nanpau River, North China [J]. *Marine Chemistry*, 95: 1—13
- 刘文新, 陈江麟, 林秀梅, 等. 2005. 渤海表层沉积物中 DDTs, PCBs 及酞酸酯的空间分布特征 [J]. *环境科学学报*, 25(1): 58—63
- Liu W X, Chen J L, Lin X M, *et al*. 2005. Spatial distribution characteristics of DDTs, PCBs and phthalates in surface sediments from Bohai Sea, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(1): 58—63 (in Chinese)
- Maniya K A, Lee R F. 1998. Bio-sediment accumulation and trophic transfer factors for extremely hydrophobic polychlorinated biphenyls [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 17(12): 2463—2469
- Oliveira R, Vollaie Y, Coulet E, *et al*. 2008. Bioaccumulation of polychlorinated biphenyls in the eel (*Anguilla anguilla*) at the Camargue Nature Reserve, France [J]. *Environmental Pollution*, 153: 424—431
- Priha E, Hellman S, Sorvari J. 2005. PCB contamination from polysulphide sealants in residential areas: exposure and risk assessment [J]. *Chemosphere*, 59: 537—543
- Shi Z, Tao S, Pan B, *et al*. 2005. Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Pollution*, 134: 97—111
- Stuart J H, David J S. 1997. Bioaccumulation factors (BAFs) and biota to sediment accumulation factors (BSAFs) for PCBs in pike and eels [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(4): 189—193
- Van der Kooij L A, Van de Meent D, Van Leeuwen C J *et al*. 1991. Deriving quality criteria for water and sediment from aquatic toxicity tests and product standards: Application of the equilibrium partitioning method [J]. *Water Research*, 25: 697—705
- Wang Y, Li X, Li A, *et al*. 2007. Effect of municipal sewage treatment plant effluent on bioaccumulation of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the recipient water [J]. *Environmental Science & Technology*, 41: 6026—6032
- 王子健, 黄圣彪, 马梅, 等. 2005. 水体中溶解有机物对多氯联苯在淮河水体沉积物上的吸附和生物富集作用的影响 [J]. *环境科学学报*, 25(1): 39—44
- Wang Z J, Huang S B, Ma M, *et al*. 2005. Influences of dissolved organic carbon on the partitioning and bioconcentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in Huaihe River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(1): 39—44 (in Chinese)
- 王子健, 王毅, 马梅. 2001. 淮河信阳和淮南段沉积物中 PCBs 的生态风险评估 [J]. *中国环境科学*, 21(3): 262—265
- Wang Z J, Wang Y, Ma M. 2001. Assessing the ecological risk of sediment-associated polychlorinated biphenyls in Huaihe River [J]. *China Environmental Science*, 21(3): 262—265 (in Chinese)
- Xue N D, Zhang D R, Xu X B. 2006. Organochlorinated pesticide multiresidues in surface sediments from Beijing Guanting reservoir [J]. *Water Research*, 40: 183—194
- Yun S H, Addink R, McCabe J M, *et al*. 2008. Polybrominated diphenyl ethers and polybrominated biphenyls in sediment and floodplain soil of the Saginaw River Watershed, Michigan, USA [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 55: 1—10
- 詹翠琼, 黄黎洁, 方展强, 等. 2007. 多氯联苯对孔雀鱼卵黄蛋白原的诱导及检测 [J]. *生态毒理学报*, 2(3): 333—338
- Zhan C Q, Huang X J, Fang Z Q, *et al*. 2007. Induction and determination of vitellogenin in male guppies (*Poecilia reticulata*) after exposed to polychlorinated biphenyls [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2(3): 333—338 (in Chinese)
- Zhao G F, Wang Z J, Dong M H, *et al*. 2008. PBBs, PBDEs and PCBs levels in hair of residents around e-waste disassembly sites in Zhejiang Province, China, and their potential sources [J]. *Science of the Total Environment*, 397: 46—57
- Zhang Z, Huang J, Yu G, *et al*. 2004. Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 130(2): 249—261
- 张庆华. 2004. 太湖和海河流域天津段二恶英类化合物污染特征的研究 [D]. 北京: 中国科学院. 65—96
- Zhang Q H. 2004. Study on characteristics of dioxin-like compounds in Taihu Lake and Haihe River Basin in Tianjin [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. 65—96 (in Chinese)
- 周景明, 秦晓飞, 秦占芬, 等. 2007. 多氯联苯 (Aroclor 1254) 对非洲爪蟾变态发育的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2(1): 111—116
- Zhou J M, Qin X F, Qin Z F, *et al*. 2007. Effects of polychlorinated biphenyls (Aroclor 1254) on metamorphic development of *Xenopus laevis* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2(1): 111—116 (in Chinese)
- Zhou W, Zhai Z, Wang Z, *et al*. 2005. Estimation of n-octanol/water partition coefficients (K_{ow}) of all PCB congeners by density functional theory [J]. *Journal of Molecular Structure*, 755: 137—145
- Zhu L Y, Hites R A. 2005. Brominated flame retardants in sediment cores from Lakes Michigan and Erie [J]. *Environmental Science & Technology*, 39: 3488—3494