ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第10期
2013年10月15日

目 次

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析

聂海峰[1,2,3]，成杭新[2,3]，赵传冬[2,3]，刘应汉[2,3]，杨柯[1,2,3]，李括[2,3]，彭敏[2,3]，刘飞[1,2,3]

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京　100083；2. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室，廊坊　065000；3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所，廊坊　065000)

摘要：为揭示多溴二苯醚(PBDEs)在东北主要河流流域内的污染现状，通过采集该地区流域内表层沉积物样品，采用 GC-NCI-MS 技术对沉积物中 41 种 PBDEs 同类物进行分析. 结果发现沉积物中 BDE209 含量低于检出限，其它 40 种 PBDEs 同类物总含量(不包含 BDE209)范围(干重)为 0.91～17.67 $ng \cdot g^{-1}$. 其中第二松花江吉林市上游和下游沉积物样品中 PBDEs 的检出含量最高，分别为 15.86 $ng \cdot g^{-1}$、17.67 $ng \cdot g^{-1}$，以 BDE207 和 BDE47 为主，分别占 PBDEs 总量的 86.5% 和 76.6%；其它河流沉积物中各同族体含量差异并不明显. 实验结果与国内外最近的文献报道值相比较，再结合生态风险分析显示，东北主要河流沉积物中 PBDEs 的含量处于低污染水平，目前不存在生态风险.

关键词：多溴二苯醚；沉积物；生态风险；暴露水平；污染；东北主要河流

中图分类号：X522；X820.4　**文献标识码**：A　**文章编号**：0250-3301(2013)10-3825-07

Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin

NIE Hai-feng[1,2,3], CHENG Hang-xin[2,3], ZHAO Chuan-dong[2,3], LIU Ying-han[2,3], YANG Ke[1,2,3], LI Kuo[2,3], PENG Min[2,3], LIU Fei[1,2,3]

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 3. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: To investigate the polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) pollution status, sediment samples were collected from major rivers in northeast China. Contents of 41 PBDEs congeners in sediments were measured using GC-NCI-MS. BDE209 was not detected, measured level of total PBDEs (excluding BDE209) ranged from 0.91 to 17.67 $ng \cdot g^{-1}$ dry weight, the highest concentrations of PBDEs were detected in the sediment samples from upstream and downstream of Jilin City in the Second Songhua River Basin, with 15.86 and 17.67 $ng \cdot g^{-1}$. BDE207 and BDE47 were the predominant PBDE congeners, with their concentrations accounting for 86.5% and 76.6% of the total PBDEs concentration measured in the samples. Each congener content difference was not obvious in other river sediments. PBDEs levels monitored in the present study were compared to those reported recently for districts located at home and abroad, and with ecological risk analysis. PBDEs content is at a low level in sediments of Northeast China River Basin and there is no ecological risk.

Key words: PBDEs; sediment; ecological risk; exposure level; pollution; Northeast China River Basin

东北地区是我国重工业、农业地区. 随着经济的迅速发展，城市人口密度加大，人类活动加剧，能源消耗量增大，环境污染问题也随之而来. 多溴二苯醚(PBDEs)属于溴代阻燃剂的一种，其热稳定性好，阻燃效率高，因此被当作添加型阻燃剂应用于包括纺织、家具、建材和电子等产品中，由于本身没有化学键的束缚，以致易从其应用产品(如电子产品)向环境中释放. 河流传输是环境污染物特别是 POPs 的主要迁移途径之一，PBDEs 在河流沉积物中主要以颗粒相式存在且长期停留在水环境中，这使得 PBDEs 易通过食物链由水生物转移到人体当中. 又由于 PBDEs 与多氯联苯、二噁英具有相似的化学性质和毒性、生物富集性，故过量的 PBDEs 对人体内分泌调节、神经和生殖等会产生严重的负面影响[1~3].

就东北地区主要河流沉积物中 PBDEs 的研究，之前有林忠胜等[4]、史鑫源[5]学者做过相关研究，但未把松花江、嫩江、辽河、大凌河、辽河大辽河、浑河等重要支流纳入一个整体的研究范围，而且随着人们生产活动及城镇工业化的变化发展，环境生

收稿日期：2012-08-11；**修订日期**：2013-04-18
基金项目：全国土壤现状调查及污染防治专项项目(1210823804)；国土资源大调查项目(1212011220055)
作者简介：聂海峰(1979～)，男，博士研究生，工程师，主要研究方向为资源勘查、环境地球化学，E-mail：niehaifeng_@163.com

态也随之变化,过去的评价未必能及时反映当前的生态水平. 本研究主要目的是在查明东北地区主要河流沉积物中 PBDEs 分布的基础上,通过对 PBDEs 的来源解析,评价其生态风险状况,以期为制定整个东北地区河流中 PBDEs 污染的防控措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据东北地区辽河水系和松花江水系分布状况和沿江城市的分布,于 2009 年对该地区河流进行了河流沉积物样品采样(图 1). 样点选择在河道开阔且水流平缓的河段,用已洗净的不锈钢制抓斗式采样器采集沉积物样品(采样深度 0 ~10 cm),装入预处理过的1 000 mL具塞棕色玻璃广口瓶中,封装后 -20℃保存,待分析.

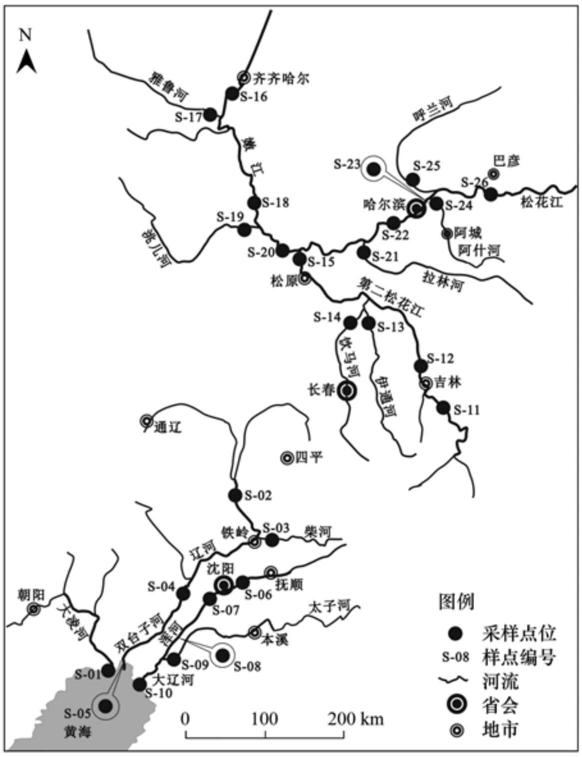

图1 东北主要河流沉积物采样位置示意

Fig. 1 Sampling sites of sediments in the Northeast China River Basin

1.2 材料

仪器设备:Agilent 6890N 气相色谱-5975 质谱联用仪(GC-NCI-MS,美国 Agilent),旋转蒸发仪 R-215(瑞士 BUCHI); 玻璃仪器是玻璃柱(带聚四氟乙烯旋塞)为 30 cm ×1 cm ID.

试剂:实验所用丙酮、二氯甲烷、正己烷为分析纯(上海国药集团),采用全玻璃蒸馏系统二次蒸馏,经色谱检验无干扰峰,异辛烷为色谱纯. 硅胶(100 ~200 目)和氧化铝(100 ~200 目)经丙酮、二氯甲烷及正己烷依次抽提24 h,在通风橱中晾干,在130℃下活化至少 16 h; 硅胶经酸化处理(每 100 g 硅胶加入44 g 浓硫酸),氧化铝加入6% 的超纯水去活化,充分振荡至无结块,在干燥器中平衡 24 h 后备用; 无水硫酸钠(分析纯),于 450℃ 在马弗炉中灼烧6 h,冷却后存放在干燥器中备用. PBDEs 标样:41 种 PBDE 同类物标准品包括二溴 BDEs(BDE7,8,10,11,12,13,15)、三溴 BDEs(BDE17,25,28,30,32,33,35,37)、四溴 BDEs (BDE47,49,66,71,75,77)、五溴 BDEs(BDE-85,99,100,116,118,119,126)、六溴 BDEs (BDE138,153,154,155,166)、七溴 BDEs(BDE181,183,190)、八溴 BDE (BDE203)、九溴 BDEs (BDE206,207,208) 和十溴 BDE(BDE209)(美国 Accustandard 公司),回收率内标 BDE50 和$^{13}C_{12}$-BDE209(美国 CIL 公司),进样内标 PCB209(美国 Accustandard 公司).

1.3 样品处理

将 -20℃冰柜中保存的样品干燥、研磨和过80 目标准计量筛后,放入棕色玻璃瓶,再置于干燥器中保存; 称取 10 g 沉积物样品,与 10 g 无水硫酸钠研磨均匀后转移至抽提筒中,加入回收率指示物 BDE50 及$^{13}C_{12}$-BDE209,用体积比为 1∶1 的丙酮-正己烷混合溶剂样品进行索氏抽提 48 h, 抽提前在平底烧瓶中放入经稀硝酸处理过的铜片以脱除样品中的硫. 将抽取液旋转蒸发浓缩至 1 mL,然后采用硅胶/氧化铝复合柱纯化,再用90 mL 的正己烷和二氯甲烷(体积比为 3∶1)混合液淋洗,旋转蒸发浓缩至 1 mL 左右,再 N_2 吹浓缩至近干后,加入 100 μL 浓度为 80 ng·g^{-1}的 PCB209 异辛烷溶液,密闭保存用于下一步仪器分析.

1.4 样品分析

色谱条件:进样口温度为 280℃,载气为高纯氦气,柱流速 1.5 mL·min^{-1},不分流进样. 一 ~ 七溴 BDEs 用 DB-5ms 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm,J&W Scientific)分析. 程序升温条件:初始温度100℃,保持 2 min; 以 20℃·min^{-1}升至 200℃保持10 min,以 2℃·min^{-1}升至 250℃,保持 5 min; 再以 5℃·min^{-1} 升至 290℃, 保持 15 min, 最后以 20℃·min^{-1}的速率升到 300℃,保持 15 min. 八 ~ 十溴 BDEs 使用 DB-5HT 色谱柱(15 m × 0.25 mm × 0.10 μm, J&W Scientific) 分析. 升温程序:90℃保

持 1 min,然后以 10℃·min^{-1}的速率升至 220℃,保持 3 min,再以 20℃·min^{-1}的速率升至 300℃,保持 10 min.

质谱条件:负化学电离源(NCI);接口温度 280℃,离子源温度 250℃,四极杆温度 150℃,反应气为甲烷;数据采集采用选择离子模式(SIM).一~九溴 BDEs 特征离子 m/z 为 79 和 81;BDE209 特征离子 m/z 为 79、81、486.7 和 488.7;$^{13}C_{12}$-BDE209 特征离子 m/z 为 415.6 和 494.6.

定性与定量分析:定性分析方法采用与标样保留时间对照与 MS 确证的方法进行定性分析;定量分析采样 5 点校准曲线法.

1.5　质量控制

QA/QC 控制方法包括采样现场空白、方法空白、加标空白、基质加标平行和样品平行样,所有的空白和样品等都进行相同的处理过程,包括萃取、净化、分析等.以 BDE50 和$^{13}C_{12}$-BDE209 作为回收率内标,PCB209 作为进样内标.目标化合物的基质加标回收率为 72.5% ~115.7% (n =5).每 12 个样品增加一个实验室空白和一个平行样品.平行样品的相对标准偏差 <15%.以 3 倍信噪比作为方法的检测限(LODs),二~九溴二苯醚的方法检测限为 0.001 ~0.05 ng·g^{-1},BDE209 为 0.18 ng·g^{-1}.样品中回收率内标 BDE50 和$^{13}C^{12}$-BDE209 的回收率 80% ~115%,所有分析结果均以干重表示.

2　结果与讨论

2.1　沉积物中 PBDEs 的含量

在东北地区主要河流沉积中,共检测出 40 种 PBDEs 同类物.在 40 种同类物中,辽河流域检测到 25 种,松花江流域检测到 24 种,其中第二松花江流域检测到 23 种;嫩江检测到 8 种;从嫩江和第二松花江交汇后到巴彦县以西的松花江干流及相应的支流(拉林河、呼兰河、阿什河)检测到 16 种同类物.就单个采样点来看,各采样点的检测率较低,最低的是辽河铁岭上游(S-02)、双台子河上游(S-04)、嫩江齐齐哈尔下游(S-16)、松花江哈尔滨上游(S-22)均为 10%,最高的是浑河下游(S-08)仅为 40%,检测率相对较高的是浑河下游(S-08)和阿什河出口处(S-24),而在 $\sum$PBDEs 的含量相对较高的第二松花江的吉林市上游(S-11 含量为 15.84 ng·g^{-1})和下游(S-12 含量为 17.67 ng·g^{-1}),其检测率也仅为 20% 和 30%(图 2).BDE-209 在各研究点位均未检出,主要由于:①研究区各采样点 $\sum$PBDEs 含量普遍较低,而且 BDE-209 的检出限(0.18 ng·g^{-1})远比其它化合物检出限(0.001 ~0.05 ng·g^{-1})高,所以 BDE-209 未被检出;②BDE209 可通过化学降解、光降解、微生物降解、生物降解等途径脱溴为低溴 BDEs 同族体[6].

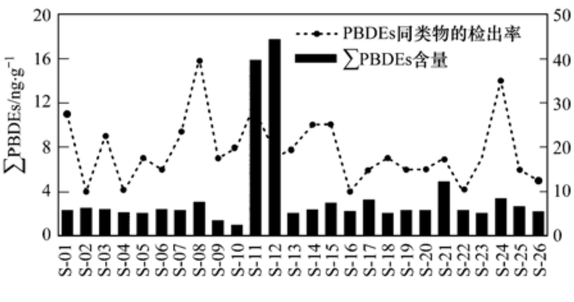

图 2　东北主要河流沉积物中 PBDEs 各同类物的检测率及总 PBDEs 的含量

Fig. 2　Detection rate and concentration of PBDEs congeners from sediments in Northeast China River Basin

东北地区主要河流沉积物中被检出的 40 种 PBDE 同类物的总含量($\sum_{40}$PBDEs)为 0.91 ~17.67 ng·g^{-1},中位含量值为 2.24 ng·g^{-1}.除第二松花江吉林市上游(S-11)、第二松花江吉林市下游(S-12)、松花江支流拉林河(S-21)之外,其它河流沉积物中 $\sum$PBDEs 含量皆小于 4.00 ng·g^{-1}.就局部流域而言,辽河流域(该流域范围点位编号是 S-01 ~S-10)$\sum$PBDEs 含量为 0.91 ~2.98 ng·g^{-1},松花江流域(该流域范围点位编号是 S-11 ~S-26)$\sum$PBDEs 含量为 1.94 ~17.67 ng·g^{-1}.在松花江流域中,第二松花江流域(S-11、S-12、S-13、S-14、S-15)$\sum$PBDEs 含量为 1.94 ~17.67 ng·g^{-1},嫩江流域(S-16、S-17、S-18、S-19、S-20)$\sum$PBDEs 含量为 1.99 ~3.15 ng·g^{-1},巴彦县以西松花江干流及相应支流(拉林河、呼兰河、阿什河)$\sum$PBDEs 含量为 2.00 ~4.82 ng·g^{-1}.另外,$\sum$PBDEs 含量最高的河段是第二松花江吉林市上游及吉林市下游,所检出的同类物主要以四溴 BDEs 中 BDE-47 化合物和九溴 BDEs 中 BDE-207 化合物分布为主,其质量分数分别占 PBDEs 总量的 86.5% 和 76.6%.在其它持久性有机污染物的研究中,第二松花江吉林市上游、下游的多环芳烃相含量相对整个松花江流域也处于较高水平[7].这表明,第二

松花江 $\sum$PBDEs 含量与东北地区其它河流的含量存在明显的差异. 极高值与极低值的含量差近 20 倍. 除第二松花江之外,其它河流流域沉积物中 $\sum$PBDEs 含量仅在 0.91 ~4.82 $ng\cdot g^{-1}$之间. 纵观研究区 PBDEs 的分布特征,除了第二松花江吉林市上游和下游外相对较高外,其它地区含量差异并不明显.

与国内外其它地区报道值的比较表明,虽然第二松花江吉林市上游和下游,其沉积物中 PBDEs 含量比研究区其它河流(段)处高出几倍甚至 20 倍,但也远不及美国、英国、德国、西班牙等国家的部分河流的含量高. 如美国旧金山湾沉积物中 PBDEs 的含量是辽河流域的 71 倍、是嫩江流域 67 倍、是松江流域的 12 倍,也远低于中国的珠江、莱州湾、香港地区的最高值,如中国的莱州湾沉积物中 PBDEs 的含量是辽河流域的 604 倍、是嫩江流域 571 倍、是松江流域的 102 倍(表 1). 由此可见,东北地区主要河流沉积物中 PBDEs 的含量和国内外相比处于较低水平.

表 1 不同地区沉积物中 PBDEs 含量比较(干重)

Table 1 Comparison of PBDEs concentrations in sediments from different areas (dry weight)

地点	N[1)]	含量/$ng\cdot g^{-1}$	文献	地点	N	含量/$ng\cdot g^{-1}$	文献
Lake DV09, Canada	—[2)]	0.17[4)]	[8]	Pearl River Estuary, China	—	0.11 ~13.03	[25]
Taku sewage Estuary, China	13	0.1 ~0.5	[9]	Guiyu pollution River, China	14	51.3 ~16.1	[26]
Yangtze River Delta, China	40	ND[3)] ~0.55	[10]	Scheldt Estuary, Netherlands	—	0.6 ~17.6	[27]
Ny-Ålesund Lakes, Norway	14	0.06 ~0.60	[11]	Netherland	5	0.6 ~17.6	[28]
Lake Ellison, Norway	10	0.73	[12]	松花江流域,中国	24	1.94 ~17.67	本研究
Beijing, China	10	1.3 ~1.8	[13]	Rive and Offshore, Portugal	—	0.5 ~18.0	[29]
Lake Huron, USA	17	1.02 ~1.87	[14]	River and coastal sediments, Portugal	40	0.5 ~21.0	[29]
Haihe River Basin, China	—	0.06 ~2.10	[15]	Pearl River Estuary, China	—	0.33 ~21.83	[30]
Industrial Port, Korea	20	2.03 ~2.25	[16]	Denmark	—	0.06 ~25.20	[30]
Bohai, China	10	2.45	[17]	Sundarban mangrove wetland, India	12	0.08 ~29.03	[31]
Lake Michigan, USA	7	2.60	[18]	Ocean, Korea	—	1.1 ~33.8	[32]
Lake Ontario, Canada	20	2.80	[19]	Cinca River, Spain	8	0.3 ~34.1	[33]
辽河流域,中国	25	0.91 ~2.98	本研究	Hadley Lake, USA	—	5.2 ~37.6	[20]
Lake Superior, USA	9	0.49 ~3.14	[20]	Pearl River Estuary, China	10	9.88 ~39.0	[34]
嫩江流域,中国	8	1.99 ~3.15	本研究	Niagara River, USA	9	0.72 ~48	[35]
South China Sea Northern part, China	—	0.04 ~4.48	[21]	Pearl, China	—	0.78 ~49.28	[21]
Qingdao inshore, China	21	0.12 ~5.51	[22]	Viskan Rive, Sweden	—	8 ~50	[36]
Busan Bay, Korea	20	0.38 ~5.86	[14]	Hong Kong Offshore, China	14	1.7 ~52.1	[37]
Jinhae Bay, Korea	20	0.03 ~6.02	[14]	East Pearl River Estuary, China	9	0.04 ~94.7	[38]
Great Lakes, USA	9	0.5 ~6.33	[23]	San Francisco Bay, USA	22	ND ~212	[39]
Ocean, Korea	—	0.05 ~6.37	[24]	Tees Estuary, Britain	—	1.3 ~1 271	[40]
Lake DV09, Canada	—	0.12 ~6.87	[16]	Laizhou Bay, China	11	1.3 ~1 800	[41]
Westem Scheldt, Netherlands	—	0.30 ~12.58	[25]	Coastal marine sediments, Kuwait	7	80 ~3 800	[42]

1)"N"表示检测到的目标化合物数目; 2)"—"表示无相关数据; 3)"ND"表示未检出; 4) $\sum$PBDEs 含量按最大值或平均值升序排列

2.2 沉积物中 PBDEs 的生态风险分析

仅仅与国内外不同地区的含量对比,不足以反映研究区多溴二苯醚污染的生态风险,故有必要对多溴二苯醚的污染进行生态风险分析. 毒害污染物的暴露评价一般有 2 种途径:一种是根据使用量推算环境浓度,此浓度一般以预测环境浓度 PEC (predicted environmental concentration)表示; 另一种是定点采样仪器分析测定浓度,此浓度一般以测定环境浓度 MEC (measured environmental concentration)表示[43]. 本研究以样品沉积物样品中 PBDEs 测定的环境浓度 MEC 作为暴露评价途径来分析 PBDEs 的生态风险.

2.2.1 暴露水平分析

常见的多溴二苯醚阻燃剂工业品[44]是五溴二苯醚(PeBDE)、八溴二苯醚(OBDE)和十溴二苯醚(DBDE),均为商业混合物. 据美国环境保护署关于 PBDEs 分类标准假设[44]三溴、四溴 BDE 来源于

PeBDE,五 ~ 九溴 OBDE, BDE209 来源 DBDE,则 PeBDE 暴露水平为三溴、四溴 BDE 的总含量, OBDE 的暴露水平为五 ~ 九溴 BDE 的总含量, DBDE 的暴露水平为 BDE209 含量[45,46],故可得出东北主要河流沉积物中 PeBDE、OBDE、DBDE 的暴露水平 MEC(表 2).

表 2　PBDEs 工业品在东北主要河流沉积物中暴露水平

Table 2　Exposure level industrial products of PBDEs form sediments in Northeast China River Basin

PBDEs 工业品	辽河流域的 MEC/ng·g^{-1}									
	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09	S-10
PeBDE	0.344	0.017	0.095	0.009	0.022	0.032	0.067	0.314	0.027	0.011
OBDE	0.248	0.004	0.093	0.004	0.296	0.031	0.090	0.863	0.023	0.034
PBDEs 工业品	第二松花江流域的 MEC/ng·g^{-1}					嫩江流域的 MEC/ng·g^{-1}				
	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	S-19	S-20
PeBDE	0.315	13.937	0.066	0.151	0.082	0.002	0.052	0.010	0.032	0.024
OBDE	13.953	ND1)	0.070	0.051	0.692	0.011	0.049	0.040	0.077	0.065

PBDEs 工业品	松花江干流及相应支流的 MEC/ng·g^{-1}					
	S-21	S-22	S-23	S-24	S-25	S-26
PeBDE	0.026	0.007	0.017	0.313	0.037	0.019
OBDE	2.279	0.008	0.040	0.823	0.200	0.013

1)“ND”表示未检出

2.2.2　生态风险表征

由上述图 2 研究区的含量分布情况与国内外其它地区比较得知,东北地区主要河流沉积物中 PBDEs 的含量处于较低水平. 而对 PBDEs 生态风险评价首先确定其有风险还是无风险,若含量较低,无生态风险,就此作罢,若有生态风险,则需进一步深入研究. 故暂先采用较为保守的[47]、低水平[48]的生态风险分析方法即商值法[49]来表征研究区生态风险水平. 商值法原理是:当生态风险商值 >1 时,存在生态风险,且数值越大,风险水平越高; 当生态风险商值≤1 时,无生态风险.

该方法是采用研究区的暴露水平与来自于 PeBDE、OBDE、DBDE 产品针对淡水或海水沉积相环境中潜居生物(成年红虫)的多物种无显著影响浓度(multi-species no observable effect concentration, MSNOEC)的比值求得生态风险商值[50]. PeBDE、OBDE、DBDE 产品的 MSNOEC 分别为 310、1 340、4 536 ng·g^{-1}[51]. 运用公式:

$$Q = \mathrm{MEC}/\mathrm{MSNOEC} \qquad (1)$$

式中,Q 为生态风险商值,MEC 为暴露水平. 结合研究区暴露水平(表 2)换算可得出,在东北主要河流沉积物中,来自于工业品 PeBDE、OBDE 的 PBDEs,其风险商值均在 0.05 之下,远低于 1(图 3),故不存在生态风险.

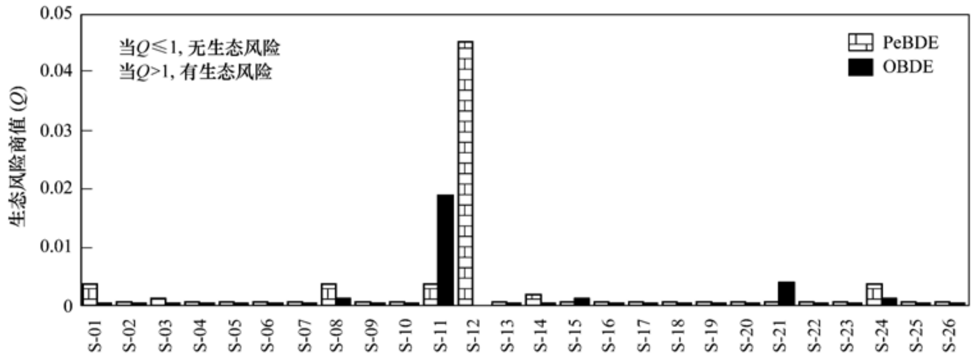

图 3　东北主要河流沉积物中 PBDEs 生态风险评价结果

Fig. 3　Evaluate results of ecological risk of PBDEs from sediments in Northeast China River Basin

3　结论

(1) 在东北主要河流 26 个监测点中,检测到 $\sum_{40}$PBDEs(不包括 BDE209)的含量为 0.91 ~ 17.67 ng·g^{-1},第二松花江吉林市上游及下游中含量相对较高,分别为 15.84 ng·g^{-1}、17.67 ng·g^{-1},其它流域中如辽河流域、嫩江流域、松花江干流及相应支流中含量差异较低,含量介于 0.91 ~ 4.82

ng·g^{-1}之间. 除了第二松花江吉林市上游和下游外,研究区不同采样点含量差异并不明显,PBDEs 分布较为均衡.

(2)与国内外其它研究值相比,研究区域内沉积物中 PBDEs 处于中低水平,但位于吉林市下游采样点受点源污染的影响较为明显,沉积物中 PBDEs 含量高出研究区中位值的 7.8 倍,值得关注.

(3)商值法进行的生态风险分析结果表明,研究区虽然存在 PBDEs 污染,但其生态风险商值极低,就目前而言,沉积物中 PBDEs 不会对该地区造成生态危害.

参考文献:

[1] McDonald T A. A perspective on the potential health risks of PBDEs[J]. Chemosphere, 2002, **46**(5): 745-755.

[2] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. Chemosphere, 2002, **46**(5): 583-624.

[3] 魏爱雪, 王学彤, 徐晓白. 环境中多溴联苯醚类(PBDEs)化合物污染研究[J]. 化学进展, 2006, **18**(9): 1227-1233.

[4] 林忠胜, 马新东, 张庆华, 等. 环渤海沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的研究[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(2): 24-27.

[5] 史鑫源. 松花江黑龙江段水体典型持久性有机污染物污染现状研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 62-67.

[6] Söderstrom G, Sellström U, de Wit C A, *et al*. Photolytic debromination of decabromodiphenyl ether (BDE209)[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(1): 127-132.

[7] 聂海峰, 李括, 彭敏, 等. 松花江底积物中多环芳烃生态风险评价[J]. 中国地质, 2011, **38**(4): 1102-1110.

[8] Stern G A, Braekevelt E, Helm P A, *et al*. Modern and historical fluxes of halogenated organic contaminants to a lake in the Canadian arctic, as determined from annually laminated sediment cores[J]. Science of the Total Environment, 2005, **342**(1-3): 223-243.

[9] Lü J X, Wang Y W, Zhang Q H, *et al*. Contamination trends of polybrominated diphenyl ethers, organochlorine pesticides and heavy metals in sediments from Dagu drainage river estuary, Tianjin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, **52**(10): 1320-1326.

[10] Chen S J, Gao X J, Mai B X, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of the Yangtze River Delta: levels, distribution and potential hydrodynamic influence[J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 951-957.

[11] Jiao L P, Zheng G J, Minh T B, *et al*. Persistent toxic substances in remote lake and coastal sediments from Svalbard, Norwegian Arctic: Levels, sources and fluxes[J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(4): 1342-1351.

[12] Evenset A, Christensen G N, Carroll J, *et al*. Historical trends in persistent organic pollutants and metals recorded in sediment from Lake Ellasjoen, Bjornoya, Norwegian Arctic[J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(1): 196-205.

[13] 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 & Technology, 2007, **41**(17): 6026-6032.

[14] Song W L, Li A, Ford J C, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 2. Lake Michigan and Huron[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(10): 3474-3479.

[15] 赵高峰, 周怀东, 杜苗, 等. 海河流域 14 条河流表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2069-2073.

[16] Moon H B, Kannan K, Choi M, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in marine sediments from industrialized bays of Korea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, **54**(9): 1402-1412.

[17] Wang Z, Ma X H, Lin Z S, *et al*. Congener specific distributions of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment and mussel (*Mytilus edulis*) of the Bo Sea, China[J]. Chemosphere, 2009, **74**(7): 896-901.

[18] Zhu L Y, Hites R A. Brominated flame retardants in sediment cores from Lakes Michigan and Erie[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(10): 3488-3494.

[19] Qiu X H, Marvin C H, Hites R A. Dechlorane plus and other flame retardants in a sediment core from Lake Ontario[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(17): 6014-6019.

[20] Song W L, Ford J C, Li A, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 1. Lake Superior[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(12): 3286-3293.

[21] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平, 等. 珠江三角洲及南海北部海域表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(9): 1265-1271.

[22] 杨永亮, 潘静, 李悦, 等. 青岛近岸沉积物中持久性有机污染物多氯萘和多溴联苯醚[J]. 科学通报, 2003, **48**(21): 2244-2251.

[23] Song W L, Ford J C, Li A N, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 3. Lakes Ontario and Erie[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(15): 5600-5605.

[24] Moon H B, Chio H, Kim S, *et al*. Contaminations of polybrominated diphenyl ethers in marine sediments from the southeastern coastal areas of Korea[J]. Organohalogen Compd, 2002, **58**: 217-220.

[25] Toms L M, Mortimer M, Symons K, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment by salinity and land-use type from Australia[J]. Environment International, 2008, **34**(1): 58-66.

[26] Zheng G J, Martin M, Richardson B J, *et al*. Concentrations of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Pearl River Delta sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, **49**(5-6): 520-524.

[27] Luo Q, Cai Z W, Wong M H. Polybrominated diphenyl ethers in fish and sediment from river polluted by electronic waste[J]. Science of the Total Environment, 2007, **383** (1-3): 115-127.

[28] De Boer J, Wester P G, Van der Horst A, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in influents, suspended particulate matter, sediments, sewage treatment plant and effluents and biota from the Netherlands[J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(1): 63-74.

[29] Lacorte S, Guillamón M, Martínez E, *et al*. Occurrence and specific congener profile of 40 polybrominated diphenyl ethers in river and coastal sediments from Portugal[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(5): 892-898.

[30] Platz J, Christensen J H. Screening of brominated flame retardants in Danish marine and freshwater sediments[A]. In: Symposium of the Second International Workshop on Bromine Flame Retardants, May 14-16[C]. Stockholm: Stockholm University, 2001. 353-356.

[31] Binelli A, Sarkar S K, Chatterjee M, *et al*. Concentration of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment cores of Sundarban mangrove wetland, northeastern part of Bay of Bengal (India)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, **54**(8): 1220-1229.

[32] Moon H B, Chio H, Kim S, *et al*. Polybrominated diphenyls in marine sediments and bivalves from the coastal areas of Korea [J]. Organohalogen Compd, 2002, **58**: 221-224.

[33] Eljarrat E, de la Cal A, Raldua D, *et al*. Occurrence and bioavailability of Polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from the Cinca River, a tributary of the Ebro River (Spain)[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(9): 2603-2608.

[34] Xiang C H, Luo X J, Chen S J, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in biota and sediments of the Pearl River. Estuary, South China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, **26** (4): 616-623.

[35] Samara F, Tsai C W, Aga D S. Determination of potential sources of PCBs and PBDEs in sediments of the Niagara River [J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(3): 489-497.

[36] Sellstrm U, Kierkegaard A, de Wit C, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from a Swedish river[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, **17**(6): 1065-1072.

[37] Liu Y, Zheng G J, Yu H X, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediments and mussel tissues from Hong Kong marine waters[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **50**(11): 1173-1184.

[38] Mai B X, Chen S J, Luo X J, *et al*. Distribution of polybrominated diphenyl ethers in sediments of the Pearl river delta and adjacent south China sea[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(10): 3521-3527.

[39] Oros D R, Hoover D, Rodigari F, *et al*. Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in water, surface sediments, and bivalves from the San Francisco estuary[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(1): 33-41.

[40] Allchin C R, Law R J, Morris S. Polybrominated diphenylethers in sediments and biota downstream of potential sources in the UK [J]. Environmental Pollution, 1999, **105**(2): 197-207.

[41] Jin J, Liu W Z, Wang Y, *et al*. Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in plant, shellfish and sediment samples from Laizhou bay in China[J]. Chemosphere, 2008, **71** (6): 1043-1050.

[42] Gevao B, Beg M U, Al-Ghadban A N, *et al*. Spatial distribution of Polybrominated diphenyl ethers in coastal marine sediments receiving industrial and municipal effluents in Kuwait[J]. Chemosphere, 2006, **62**(7): 1078-1086.

[43] 赵建亮, 应光国, 魏东斌, 等. 水体和沉积物中毒害污染物的生态风险评价方法体系研究进展[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 577-588.

[44] 向彩虹. 珠江河口水生生物中多溴联苯醚的初步研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006. 37-67.

[45] 王志增, 赵文晋, 马小凡. 珠江口水环境中多溴联苯醚生态风险分析[J]. 环境保护科学, 2010, **36**(4): 64-68.

[46] 罗贤丽, 刘丽华, 晋艺聪. 多溴联苯醚动物毒性综述[J]. 化学工程与装备, 2010, (1): 131-134.

[47] 王晶. 渤海(预期性)环境风险评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. 32-39.

[48] Brain R A, Sanderson H, Sibley P K, *et al*. Probabilistic ecological hazard assessment: Evaluating pharmaceutical effects on aquatic higher plants as an example[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, **64**(2): 128-135.

[49] 曹洪法, 沈英娃. 生态风险评价研究概述[J]. 环境化学, 1991, **10**(3): 26-29.

[50] 张永春, 林玉锁, 孙勤芳, 等. 有害废物生态风险评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 172-195.

[51] 周玳, 张文华, 王连生. 毒物风险评价外推方法[J]. 环境科学进展, 1995, **3**(2): 42-48.

HUANJING KEXUE Vol. 34 No. 10
Environmental Science (monthly) Oct. 15, 2013

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976年8月创刊）

2013年10月15日　34卷　第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 10　Oct. 15, 2013

主　管	中国科学院
主　办	中国科学院生态环境研究中心
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院
主　编	欧阳自远
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱（海淀区双清路18号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com
订购处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京399信箱）

Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
Domestic		All Local Post Offices in China
Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：90.00元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行