ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

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37卷 第1期
2016年1月15日

目 次

第 37 卷第 1 期
2016 年 1 月

环　境　科　学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

Vol. 37, No. 1
Jan., 2016

中国 8 个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平

林海涛[1,2],李琦路[3],张干[4],李军[4*]

(1. 云南大学人文学院,昆明　650090; 2. 云南中医学院药学院,昆明　650500; 3. 河南师范大学环境学院,黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室,河南省环境污染控制重点实验室,新乡　453007; 4. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室,广州　510640)

摘要: 利用大流量采样器采集了我国东西部地区 8 个城市的大气气相和颗粒相样品,分析了样品中 8 种多溴联苯醚. 结果表明,气相中以 BDE-28(三溴组分)浓度最高[(6.25 ± 4.95) $pg\cdot m^{-3}$],不同于以往研究中 BDE-99 和-47 为气相中优势同系物单体; 颗粒相中则以 BDE-209 浓度最高[(25.4 ± 124) $pg\cdot m^{-3}$]. 北京和广州这两个大型城市的大气 PBDEs 浓度较高,尤其是广州的颗粒相 BDE-209 浓度,比其他城市的浓度高两个数量级. 与早期的观测结果相比,我国城市大气 PBDEs 浓度呈普遍的下降趋势. 同时,对比发现气相浓度下降较慢,颗粒相浓度下降较快,结合相关性分析结果,这一现象可能与工业五溴和八溴联苯醚的停产禁用高溴组分的光降解及城市大气颗粒物浓度的降低有关. 城市婴幼儿的吸入暴露量约为成人的 2 ~ 3 倍,反映出城市大气 PBDEs 对城镇居民尤其是婴幼儿的潜在健康危害仍不容忽略.

关键词: 多溴联苯醚; 城市大气; 浓度组成; 时空分布; 呼吸暴露

中图分类号: X51　**文献标识码**: A　**文章编号**: 0250-3301(2016)01-0010-06　**DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.01.002

Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China: Pollution Characteristics and Human Exposure

LIN Hai-tao[1,2], LI Qi-lu[3], ZHANG Gan[4], LI Jun[4*]

(1. College of Humanities, Yunnan University, Kunming 650090, China; 2. School of Pharmacy, Yunnan University of TCM, Kunming 650500, China; 3. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environmental and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 4. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The gas and particle samples of eight cities were collected by high flow active air sampler in the Eastern and Western China and eight congeners of polybrominated diphenyl ethers were analyzed. The results showed that the concentration of BDE-28 (tri-BDE) in the gas-phase (three bromide components) was the highest, which was different from previous studies where BDE-99 and-47 were the predominant homologues in the gas-phase while the concentration of BDE-209 [(25.4 ± 124) $pg\cdot m^{-3}$] in particle-phase was the highest. The atmospheric concentrations of PBDEs in Beijing and Guangzhou were relatively higher, especially the BDE- 209 concentration in particle phases of Guangzhou was two orders higher than those of other cities. However, the atmospheric concentrations of PBDEs declined significantly when compared with the data from previous studies. Meanwhile, the results indicated that the gas-phase concentrations decreased slowly and the particle-phase concentrations decreased rapidly. Combined with the results of correlation analysis, this phenomenon might be ascribed to the ceased commercial production of penta-and octa-BDE, the light degradation of high bromide components and reduced concentrations of atmospheric particles in urban area. Inhalation exposure for infants was about 2-3 times higher than that of adults. This reflected that the potential health risk of atmospheric PBDEs in city for residents, especially infants and young children, should not be ignored.

Key words: PBDEs; urban atmosphere; concentration and composition; temporal and spatial distribution; inhalation exposure

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 的工业混合品主要有工业五溴联苯醚 (penta-BDEs)、工业八溴联苯醚 (octa-BDEs) 和工业十溴联苯醚 (deca-BDEs) 这 3 种,因其具有良好的阻燃性和热稳定性,被广泛添加于电子、纺织、家具等与人类生活密切相关的产品中[1]. 已有大量研究证实, PBDEs 能随大气和水进行长距离传输[2],具有较强的环境持久性、生物富集性和生物毒性,易对生态环境和人体健康造成危害[3]. 因此近十多年来受到广泛关注,工业五溴和八溴产品已

收稿日期: 2015-06-16; **修订日期**: 2015-09-01
基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201209018)
作者简介: 林海涛(1973 ~), 男, 博士, 主要研究方向为污染物分析, E-mail: drhtlinkm@126.com
* 通讯联系人, E-mail: junli@gig.ac.cn

被包括我国在内的多数国家禁用,并于 2009 年的列入 POPs 名单,但工业十溴产品仍在大量生产和使用,特别是我国目前尚无禁止或限制其生产和使用的相关规定[4].

大气是 PBDEs 扩散传输和健康暴露的重要途径,而赋存于大气中的 PBDEs 受光照、温度等因素作用,发生连续逐步的光解脱溴反应,由高溴代联苯醚产生毒性更强的低溴代联苯醚[5,6]. 城市区域因人口密集、工业发达、需求旺盛,大气中的 PBDEs 不仅会直接影响居民的人体健康,而且会随大气迁移到周边地区沉降并蓄积,产生更深远的影响和危害[7].

关于城市大气 PBDEs 污染水平、组成特征的研究国内外已开展了许多[8,9],我国主要集中于具有典型污染源的电子垃圾拆解地（贵屿、台州等）[10,11] 和经济发达地区（珠三角、长三角等）[12,13]. 然而在我国高速城镇化和工业转型期的背景下,对不同类型城市大气 PBDEs 的污染特征和时空分布的研究还较少[14,15]. 本研究选取我国东西部地区的 8 个城市,分析其大气 PBDEs 的浓度组成,以期为了解目前中国城市大气 PBDEs 的污染现状、时空分布和健康暴露提供数据支持.

1　材料与方法

1.1　样品采集

于 2014 年 6 ~ 10 月,分别在北京、青岛、南昌、厦门、广州、昆明、绵阳和太谷利用大流量采样器（Tisch Environmental, Inc.）采集气相和颗粒相样品. 样点设置于各城市教育生活区（大学校园和研究所）的建筑物楼顶,四周无遮挡,每个样点分夏、秋季共采集 7 个样品,每个样品采集大气的体积约为1 000 m^3,样点具体信息见表 1.

表 1　大气采样点基本信息

Table 1　Basic information of atmospheric sampling sites

城市	样点	经纬度		时间	
		经度	纬度	夏季	秋季
北京	北京大学	39°59′26″	116°18′13″		
青岛	中国海大	36°03′44″	120°20′13″		
南昌	江西师大	28°40′35″	115°55′28″	6 月 14 ~ 18 日	
厦门	厦门大学	24°26′19″	118°05′48″	7 月 14 ~ 18 日	9 月 14 ~ 18 日
广州	广州地化所	23°08′56″	113°21′30″	8 月 4 ~ 8 日	10 月 4 ~ 8 日
昆明	云南大学	25°03′17″	102°42′44″	8 月 14 ~ 18 日	10 月 14 ~ 18 日
绵阳	外国语学校	31°28′46″	104°40′44″		
太谷	县环保局	37°25′59″	112°33′29″		

大气颗粒相样品用玻璃纤维膜有效孔径 0.7 μm（Whatman, USA）,使用前于马弗炉中 450℃ 煅烧 8 h. 气相样品由串接于下方的聚氨酯泡沫（PUF,直径 6.5 cm,高 7.5 cm,密度 0.030 $g \cdot cm^{-3}$）采集,PUF 在采样前分别用干净的甲醇和丙酮索式抽提 24 h,再用二氯甲烷索式抽提 48 h,真空干燥后密封待用. 样品采集后,滤膜和 PUF 用干净铝箔包裹并置于 −20℃ 下保存至分析.

1.2　样品处理与分析

采样后的玻璃纤维膜和 PUF 加入一定量的回收率指示物 $^{13}C_2$-PCB138 和 ^{12}C-PCB209,用二氯甲烷索氏抽提 48 h,抽提液经旋转蒸发器浓缩并转换至 1 mL 正己烷溶液,然后通过层析柱（玻璃柱内径为 8 mm,依次充填 3 g 的 3% 去活化氧化铝、5 g 的 3% 去活化硅胶、6 g 的 50% 硫酸硅胶和 1 g 的无水硫酸钠）净化,用 50 mL 正己烷/二氯甲烷（体积比 1∶1）混合液淋洗,过滤液通过氮吹浓缩至约 25 μL,加入 20 ng BDE-77 作为定量内标.

分析目标物质分别为：BDE-28、-47、-99、-100、-153、-154、-183 和-209（AccuStandards, New Haven, CT）,采用气相色谱/质谱联用仪（Agilent-5975 GC-MS）检测,离子源为负化学源,电离模式为电子捕获负化学电离（ECNI）. 不分流进样 1 μL,色谱柱为 DB5-HT（柱长 15 m,内径 0.25 mm,液膜厚度 0.1 μm）,升温程序：110℃ 下保留 5 min,然后以 5 $℃ \cdot min^{-1}$ 的速率升至 295℃ 并保留 12 min,进样口和检测器温度分别为 250℃ 和 310℃.

1.3　质量控制和质量保证

在采样前进行了穿透实验,而在采样和处理过程中设置了野外和实验室空白,用以检验整个实验的污染情况. 结果表明,实验室空白、野外空白中样品和穿透实验中下层 PUF 均无目标物检出. 仪器检测限（IDL）定义为 3 倍信噪比（S∶N = 3）,当色谱峰 S/N ≥3,认为该化合物可检出. 方法检测限（MDL）定义为 3 倍的 IDL. 7 种 PBDE 单体（BDE-28, 47, 99, 100, 153, 154 和-183）的仪器检出限和方法检出限

分别为0.030 ~0.047 pg 和0.089 ~0.140 pg·m^{-3},而 BDE-209 仪器检出限和方法检出限分别为 0.059 pg 和0.178 pg·m^{-3}. $^{13}C_{12}$-PCB138 和^{12}C-PCB209 的回收率分别为 80.7% ±26.1% 和 86.4% ±13.9% ,PBDEs 浓度未经回收率校正.

2 结果与讨论

2.1 浓度组成

中国 8 个城市大气中 8 种 PBDEs 的气相和颗粒相浓度范围分别为 1.70 ~62.8 pg·m^{-3}和 0.80 ~910 pg·m^{-3}(表 2),其中 BDE-209 的浓度分别为(0.28 ±0.25) pg·m^{-3}和 (31.1 ±126) pg·m^{-3},三溴至七溴 PBDEs ($\sum_7$PBDEs) 的气相和颗粒相浓度分别为(8.90 ±6.87) pg·m^{-3}和 (5.62 ±7.31) pg·m^{-3}. 北京的气相 BDE-28 浓度最高,而广州的颗粒相 BDE-209 浓度最高 (比其他城市高两个数量级).

表 2 8 个城市大气中 PBDEs 的浓度/pg·m^{-3}

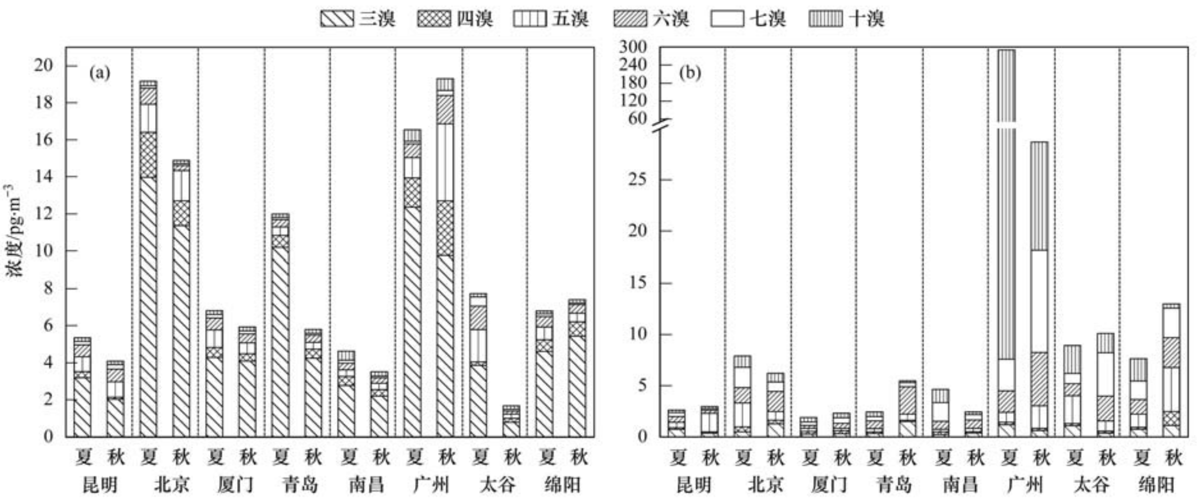
Table 2 Gas and particular concentrations of PBDE congeners in the atmosphere of eight cities/pg·m^{-3}

相态	单体	北京		青岛		南昌		厦门		昆明		广州		绵阳		太谷	
		均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
气相	BDE28	13.6	2.68	7.98	5.99	2.50	1.26	4.21	1.83	2.71	1.79	11.2	3.71	1.56	1.56	4.93	2.71
	BDE47	2.24	1.08	0.58	0.37	0.42	0.18	0.48	0.21	0.23	0.22	2.19	1.67	0.21	0.06	0.59	0.52
	BDE100	0.54	0.32	0.12	0.02	0.12	0.03	0.22	0.09	0.19	0.11	1.32	2.78	0.16	0.10	0.15	0.04
	BDE99	1.00	0.35	0.29	0.16	0.22	0.07	0.57	0.32	0.63	0.54	1.14	0.93	0.44	0.66	0.46	0.34
	BDE154	0.42	0.13	0.17	0.09	0.16	0.07	0.33	0.19	0.40	0.34	0.74	0.81	0.29	0.41	0.21	0.18
	BDE153	0.34	0.19	0.22	0.12	0.17	0.07	0.24	0.11	0.26	0.18	0.35	0.18	0.16	0.14	0.29	0.23
	BDE183	0.13	0.03	0.12	0.05	0.13	0.09	0.18	0.11	0.20	0.16	0.19	0.17	0.19	0.20	0.13	0.09
	$\sum_7$PBDEs	18.2	2.93	9.50	6.64	3.73	1.58	6.23	2.43	4.62	3.03	17.2	7.51	3.02	3.04	6.51	3.36
	BDE209	0.24	0.10	0.19	0.05	0.35	0.29	0.21	0.06	0.19	0.02	0.63	0.41	0.19	0.02	0.16	0.06
	$\sum_8$PBDEs	36.7	5.87	19.2	13.3	7.81	3.21	12.7	4.90	4.81	3.02	34.9	15.1	6.22	6.09	13.2	6.69
颗粒相	BDE28	0.65	0.38	0.69	1.01	0.33	0.21	0.31	0.24	0.61	1.13	0.95	0.61	0.55	0.49	0.95	0.85
	BDE47	0.45	0.26	0.19	0.11	0.20	0.12	0.27	0.24	0.14	0.01	0.22	0.10	0.20	0.08	0.70	1.37
	BDE100	0.74	0.69	0.13	0.07	0.13	0.03	0.13	0.03	0.16	0.08	0.83	1.31	0.57	0.65	0.67	0.93
	BDE99	1.36	1.50	0.25	0.29	0.16	0.10	0.15	0.13	0.85	1.66	0.69	0.50	0.87	0.96	1.97	2.17
	BDE154	0.55	0.39	0.18	0.13	0.19	0.20	0.12	0.03	0.24	0.25	1.37	1.99	1.13	1.81	1.01	1.34
	BDE153	1.02	0.53	1.14	1.78	0.60	0.58	0.25	0.14	0.24	0.17	2.09	1.78	0.96	0.88	1.03	1.08
	BDE183	1.79	2.11	0.40	0.42	1.09	1.74	0.43	0.24	0.30	0.29	6.13	7.33	3.44	5.84	2.13	2.62
	$\sum_7$PBDEs	13.4	4.61	2.97	3.39	2.70	2.49	1.66	0.76	2.53	0.10	12.3	12.5	7.72	9.74	8.46	7.69
	BDE209	2.33	0.77	0.39	0.47	0.70	1.26	0.43	0.35	0.22	0.10	163	295	2.07	2.41	1.18	2.47
	$\sum_8$PBDEs	15.7	5.30	3.36	3.43	3.39	3.65	2.09	1.07	2.75	2.80	175	295	9.79	12.1	9.65	7.33

从整体上看 (图 1),气相中的同系物组成以 BDE-28 (三溴组分) 为优势单体,占到 8 个城市大气中 $\sum_7$PBDEs 的 10.5% ~77.3%,其次为 BDE-47 (四溴组分). 这与吴辉等[16]对潍坊 (BDE-28 占到约 76.9%,平均值) 和南宁 (BDE-28 占到约 27.8%,平均值) 的大气 PBDEs 研究结果相类似,均明显不同于以往研究中 BDE-99 和-47 为气相中优势同系物单体[1, 17] (BDE-28 占到约 7.46% ~29.8%). 而颗粒相中则以十溴 (BDE-209) 和六溴组分 (BDE-154 和-153) 七溴 (BDE-183) 为主,分别占总量的 22.8% 和 21.2%,四溴组分 (BDE-47) 最少. 这与很多研究结果相一致,可能是由于我国目前仍大量生产和使用工业十溴联苯醚 (DecaBDE)[3]. 其中,气相中的三溴组分所占比重最高的城市为青岛 (79.2%),最低的为绵阳 (51.5%); 颗粒相中的十溴组分所占比重最高的城市为广州 (46.3%),最低的为太谷 (17.8%).

2.2 时空分布

空间分布上看 (图 1),广州、北京等大型城市的大气 PBDEs 浓度较高,其气相和颗粒相浓度分别为(36.7 ±5.87) pg·m^{-3}和(15.7 ±5.30) pg·m^{-3}、(34.9 ±15.1) pg·m^{-3}和(175 ±295) pg·m^{-3}. 从图 1 中还可以看出,我国以昆明为代表的部分城市,其大气 PBDEs 水平 [气相和颗粒相浓度分别为 (4.81 ±3.02) pg·m^{-3}和 (2.75 ±2.80) pg·m^{-3}] 与偏远背景区域的浓度相当[18]. 从季节变化看,多数城市夏季的大气 PBDEs 浓度高于秋季,尤以气相中的 BDE-28 较为明显,可能是因其挥发性较强,在气温相对高的夏季更易挥发; 而颗粒相则无明显规律.



(a)气相组成,(b)颗粒相组成

图 1　8 个城市大气中气相和颗粒相 PBDEs 的组成

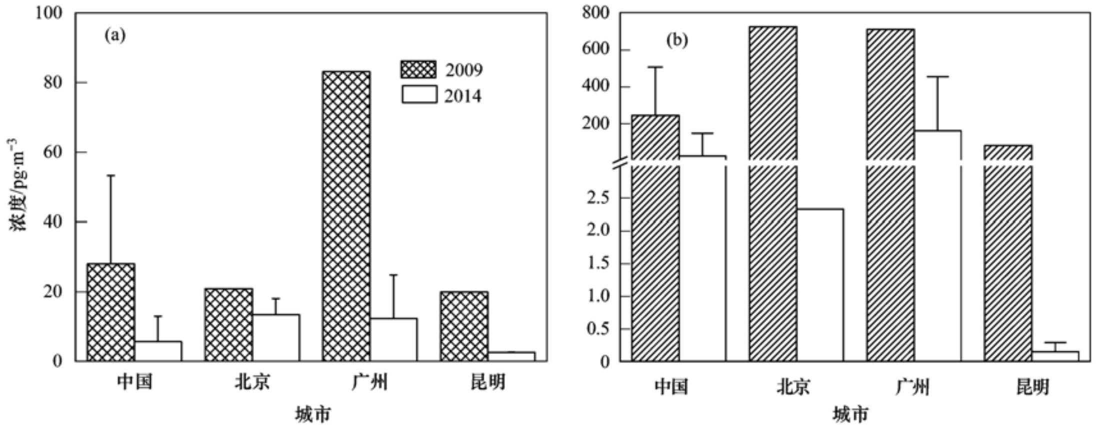
Fig. 1　Composition of PBDEs in gas and particle phase of eight cities

与我国的早期研究[4]相比,无论是东部沿海地区还是中西部地区,我国城市大气中的 PBDEs 浓度均呈现出一定的下降趋势(图 2),这与全国大气被动观测的对比结果(2004 和 2008 年)相一致[17, 19]. 从图 2 中还可以看出,北京的气相 PBDEs 浓度下降比广州缓慢,反观颗粒相中的 BDE-209 浓度变化,北京的下降速度明显快于广州. 考虑到主要同系物单体的质量分数变化(图 1),该结果可能由以下三方面引起的:一是工业五溴和八溴联苯醚的停产和禁用[4];二是大气中的高溴组分在紫外光或者太阳光照射下,被光降解脱溴后生成了低溴代联苯醚[7];三是我国城市大气颗粒物污染整体有所好转.

运用 Origin 9.0 软件对 8 个城市的大气 PBDEs 各单体浓度进行相关性分析. 结果显示,不同城市大气 PBDEs 各单体间的相关性各有不同,尤其是广州,BDE-47 至-183 这 6 种单体间均存在显著的相关性(多数 $P < 0.01$),而 BDE-28 则仅与-209 之间存在较明显的相关性($r = 0.663$, $P < 0.05$). 同时,不同城市的相关性也有一定的共性,即低溴代单体与高溴代单体间多存在一定的相关性($P < 0.05$). 以 BDE-28 为例,在不同的城市大气中分别与高溴代单体(BDE-47, -100, -99, -153, -183 和-209)存在较显著的相关性($P < 0.05$),这也从一定程度上反映了目前我国城市大气 BDE-28 比重较高可能与高溴代联苯醚的光降解有关.

2.3　健康暴露

在大气污染物影响人体健康的众多途径中,呼吸吸入所引起的人体暴露风险是最直接的,本研究根据美国国家环境保护局(EPA)提供的呼吸吸入



(a)气相中三至七溴 BDEs 浓度,(b)颗粒相中 BDE-209 浓度,2009 和 2014 年数据分别来自文献[4]和本研究

图 2　与全国早期大气 PBDEs 研究对比

Fig. 2　Comparison with previous research of atmospheric PBDEs over China

暴露模型[20]计算了 8 个城市的大气（气相和颗粒相）PBDEs 日暴露.

$$E_i = c_a V_R f_r / BW \quad (1)$$

式中,E_i 为吸入暴露量[$pg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$]；c_a 为大气中目标污染物浓度（$pg\cdot m^{-3}$）；V_R 为呼吸速率（$m^3\cdot d^{-1}$）,数据来自于文献[20]；f_r 为空气进入肺部的气体交换比（取 0.75）；BW 为体重（kg）,数据来自中国居民暴露参数的初步研究[21].

结果发现,大型城市的大气 PBDEs 呼吸暴露量较高,北京大气气相中 BDE-28 和广州颗粒相中 BDE-209 的吸入暴露量最高,均值分别为 1.00 $pg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$和 11.8 $pg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$,低于国内早期的城市大气 PBDEs 吸入暴露量[22]. 从人群分类上看,女性的日暴露量略微高于男性；而婴幼儿的日暴露量较高,约是成人日暴露量的 2 ~ 3 倍. 已有研究表明,呼吸吸入只占 PBDEs 人体摄入总量的一部分. 因此,虽然目前我国城市大气 PBDEs 的浓度已经明显降低,但 PBDEs 对城镇居民尤其是婴幼儿的潜在健康危害仍不容忽略,我国应在城市 PBDEs 人体健康暴露方面继续开展研究.

3 结论

（1）8 个城市大气 $\sum_8$PBDEs 的气相和颗粒相浓度范围分别为 1.70 ~ 62.8 $pg\cdot m^{-3}$和 0.80 ~ 910 $pg\cdot m^{-3}$. 组成特征与以往研究不同的是,气相中三溴联苯醚（BDE-28）为主要组分.

（2）我国城市大气 PBDEs 浓度普遍呈下降趋势,然而气相浓度下降较慢,颗粒相浓度下降较快. 结合相关性分析结果,这一现象可能与工业五溴和八溴联苯醚的停产禁用、高溴组分的光降解及城市大气颗粒物浓度的降低有关.

（3）大型城市的大气 PBDEs 吸入暴露量较高,婴幼儿的暴露量则约是成人的 2 ~ 3 倍,因此我国城市大气 PBDEs 对城镇居民尤其是婴幼儿的健康危害仍不容忽略.

参考文献：

[1] Wang Y W, Jiang G B, Lam P K S, *et al*. Polybrominated diphenyl ether in the East Asian environment: A critical review [J]. Environmental International, 2007, **33**(7): 963-973.

[2] de Wit C A, Herzke D, Vorkamp K. Brominated flame retardants in the Arctic environment: trends and new candidates [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(15): 2885-2918.

[3] 刘汉霞, 张庆华, 江桂斌, 等. 多溴联苯醚及其环境问题[J]. 化学进展, 2005, **17**(3): 554-562.

[4] Yang M, Qi H, Jia H L, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in air across China: levels, compositions, and gas-particle partitioning[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(15): 8978-8984.

[5] Zeng X, Simonich S L M, Robrock K R, *et al*. Development and validation of a congener-specific photodegradation model for polybrominated diphenyl ethers [J]. Environmental Toxicology Chemistry, 2008, **27**(12): 2427-2435.

[6] Lagalante A F, Shedden C S, Greenbacker P W. Levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in dust from personal automobiles in conjunction with studies on the photochemical degradation of decabromodiphenyl ether (BDE-209) [J]. Environment International, 2011, **37**(5): 899-906.

[7] 王维㛃, 周俊丽, 裴淑玮, 等. 多溴联苯醚在环境中的污染现状研究进展[J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1084-1093

[8] Harner T, Shoeib M, Diamond M, *et al*. Passive sampler derived air concentrations of PBDEs along an urban-rural transect: Spatial and temporal trends [J]. Chemosphere, 2006, **64**(2): 262-267.

[9] Birgul A, Katsoyiannis A, Gioia R, *et al*. Atmospheric polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the United Kingdom [J]. Environmental Pollution, 2012, **169**: 105-111.

[10] Chen D H, Bi X H, Zhao J P, *et al*. Pollution characterization and diurnal variation of PBDEs in the atmosphere of an E-waste dismantling region [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(3): 1051-1057.

[11] Han W L, Feng J L, Gu Z P, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of Taizhou, a major e-waste dismantling area in China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **83**(6): 783-788.

[12] Li J, Li Q L, Gioia R, *et al*. PBDEs in the atmosphere over the Asian marginal seas, and the Indian and Atlantic oceans[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(37): 6622-6628.

[13] Li J, Liu X, Yu L L, *et al*. Comparing polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in airborne particles in Guangzhou and Hong Kong: sources, seasonal variations and inland outflow [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2009, **11**(6): 1185-1191.

[14] Fu X X, Wang J X, Zhou X Y, *et al*. Tree bark as a passive air sampler to indicate atmospheric polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in southeastern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(12): 7668-7677.

[15] Dong Y, Fu S, Zhang Y F, *et al*. Polybrominated diphenyl ethers in atmosphere from three different typical industrial areas in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2015, **123**: 33-42.

[16] 吴辉, 金军, 王英, 等. 典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1230-1237.

[17] Jaward F M, Zhang G, Nam J J, *et al*. Passive air sampling of polychlorinated biphenyls, organochlorine compounds, and polybrominated diphenyl ethers across Asia[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(22): 8638-8645.

[18] Strandberg B, Dodder N G, Basu I, *et al*. Concentrations and

spatial variations of polybrominated diphenyl ethers and other organohalogen compounds in Great Lakes Air[J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(6): 1078-1083.

[19] Li Q L, Li J, Chaemfa C, *et al.* The impact of polybrominated diphenyl ether prohibition: A case study on the atmospheric levels in China, Japan and South Korea[J]. Atmospheric Research, 2014, **143**: 57-63.

[20] EPA US. Exposure factors handbook: 2011 edition[M]. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment, 2011.

[21] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1164-1170.

[22] 周变红, 张承中, 蒋君丽, 等. 西安市大气中多溴联苯醚的季节变化特征及人体暴露评估[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(9): 1591-1596.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1.1,1.1.1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 1

Jan. 15, 2016

CONTENTS

《环境科学》第 6 届编辑委员会

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊　1976 年 8 月创刊)

2016 年 1 月 15 日　第 37 卷　第 1 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly　Started in 1976)

Vol. 37　No. 1　Jan. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended**	by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored**	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
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	**Co-Sponsored**	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**		OUYANG Zi-yuan
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	**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
出　　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	**Published**	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed**	by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com	**Distributed**	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	**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: 120.00 元　　国外发行代号: M 205

国内外公开发行