

西安城区秋季大气中多溴联苯醚的污染特征及来源分析

蒋君丽¹, 张承中^{1*}, 马万里², 杨萌³, 周变红¹, 刘立忠¹, 李一凡^{2,3}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710056; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室国际持久性有毒物质联合研究中心, 哈尔滨 150090; 3. 大连海事大学国际持久性有毒物质联合研究中心, 大连 116026)

摘要: 为了评估西安大气中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染程度, 2008 年 8 ~ 10 月, 利用大流量主动采样器采集了西安城区气态和颗粒态大气样品. 分别利用 GC-MS 和 GC/ECD 对低溴 PBDEs 和 BDE-209 进行分析, 12 种 PBDEs 的总浓度 (气相 + 颗粒相) 范围为 37.43 ~ 620.30 pg/m^3 , 平均值为 216.28 pg/m^3 , 其中三溴至七溴联苯醚 ($\sum_{11}$ PBDEs) 和 BDE-209 的浓度范围分别为 16.32 ~ 86.49 pg/m^3 和 16.34 ~ 576.01 pg/m^3 . 三溴和四溴联苯醚主要存在于气相中, 五溴至七溴联苯醚在颗粒相中含量高于气相含量, 而十溴联苯醚 BDE-209 则只在颗粒相中检出, 随着溴原子个数的增加, PBDE 单体在颗粒相的含量比重呈现增大趋势. 西安城区秋季大气中 PBDEs 的气固相分配系数和过冷饱和蒸气压有显著相关性, PBDEs 的气粒分配接近于平衡. 对 PBDEs 单体作相关性分析, 结果发现除过 BDE-85, 其它 PBDEs 单体之间均具有较好的相关性, 因子分析表明西安大气中 PBDEs 主要来源于 Penta-BDE 和 Deca-BDE 污染.

关键词: 多溴联苯醚; 西安; 气粒分配; 相关性; 因子分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2226-05

Pollution Characterization and Source Apportionment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Autumn Air of Xi'an

JIANG Jun-li¹, ZHANG Cheng-zhong¹, MA Wan-li², YANY Meng³, ZHOU Bian-hong¹, LIU Li-zhong¹, LI Yi-fan^{2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. International Joint Research Centre for Persistent Toxic Substances (IJRC-PTS), State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. IJRC-PTS, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Air samples in gas and particle phases were collected using a high volume active sampler from August to October in 2008 at Xi'an for evaluating the pollution level of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs). Lower brominated PBDEs and BDE-209 were analyzed via GC-MS and GC/ECD, respectively. The total concentrations (gas plus particle phases) of 12 PBDEs were ranged from 37.43 to 620.30 pg/m^3 , with an average of 216.28 pg/m^3 , while tri- to hexa-brominated congeners ($\sum_{11}$ PBDEs) ranged from 16.32 to 86.49 pg/m^3 , BDE-209 ranged from 16.34 to 576.01 pg/m^3 . Tri- to tetra-brominated congeners existed mainly in gas phase, tetra- to hexa-brominated congeners were predominated in particle phase, and BDE-209 was detected only in particle phase. The proportion of PBDEs in particle phase increased with bromine number. Gas-particle partition coefficient of PBDEs was well correlated with sub-cooled liquid vapor pressure, and the partitioning of PBDEs between gas and particle phases were close to equilibrium. Correlation analysis indicated that all the PBDEs have good coefficients except BDE-85. Source analysis indicated that PBDEs in the atmosphere of Xi'an were mainly from the Penta-BDE and Deca-BDE contamination.

Key words: polybrominated diphenyl ethers (PBDEs); Xi'an; gas-particle partitioning; correlations; factor analysis

多溴联苯醚 (PBDEs) 是一类添加型溴代阻燃剂, 在塑料制品、纺织品、电路板以及建筑材料等领域都有广泛的应用. 2000 年, 我国溴代阻燃剂的生产量为 10 000 t, 并且每年以 8% 的速度增长^[1]. PBDEs 具有持久性、生物累积性、长距离迁移能力以及对生物和人体等的潜在毒性, 在很多环境介质甚至是人体组织中都能检测到它们的存在. PBDEs 是一种半挥发性有机污染物, 能够以气态和颗粒态的形式存在于大气中.

国外对 PBDEs 的研究较早, 有关 PBDEs 在环境中的分布、来源及迁移已成为热点问题^[2]. 我国近年来陆续开展了环境中 PBDEs 污染状况的研究, 主要集中在珠江三角洲和电子垃圾拆解地等地

收稿日期: 2010-09-26; 修订日期: 2011-01-27

基金项目: 陕西自然科学基金项目 (2007D20); 陕西省教育厅专项科研基金项目 (06JK268)

作者简介: 蒋君丽 (1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染物控制, E-mail: jiangjl1010@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangchengzhong4711@sina.com

区^[3,4]. 我国西部地区的研究较少, 西安作为我国西北地区最大的高新技术产业基地, 仅有一篇关于西安水体沉积物中 PBDEs 的污染研究^[5], 大气作为 PBDEs 传输迁移的一个很重要的介质, 至今还鲜有此方面的报道. 本研究采集了 2008 年 8 ~ 10 月西安大气中颗粒态和气态样品, 对西安市大气中 PBDEs 的污染现状、气粒分配特征以及污染来源展开了分析, 以期对相关污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样

采样点位于西安建筑科技大学环境与市政工程学院楼顶, 距地面 28 m, 周围没有明显污染源和高大障碍物. 采用改进型的 KB-1000 大流量采样器(经专用电子孔口校准器校准), 利用玻璃纤维滤膜采集总悬浮颗粒物(TSP)样品, 2 个串联的聚氨酯泡沫(PUF)采集气态样品, 采样流速 0.800 m³/min, 采样体积为 1 151 m³. 采样时间从 2008-08-05 ~ 2008-10-30, 每周采集 1 次, 每个样品采集时间为 24 h, 共 12 次, 获得了 12 对气态和颗粒态的大气样品.

1.2 样品的预处理

大气样品的处理过程在哈尔滨工业大学国际持久性有毒物质联合研究中心(IJRC-PTS)实验室进行. 加入代标物 PCB-155 作为回收率指示物, 滤膜和 PUF 分别用二氯甲烷和丙酮、正己烷混合液(1:1, 体积比)萃取 24 h, 萃取液经过溶剂置换后, 经旋转蒸发仪浓缩, 再用活化后的硅胶层析柱分离净化, 将洗脱液再次旋转蒸发浓缩, 氮气吹脱定容到 1 mL, 用于分析.

1.3 样品的分析

三至七溴 PBDEs(BDE-17, -28, -47, -66, -85, -99, -100, -153, -154, -138, -183)混合标样的测定使用 GC-MS(Thermo PolarisQ)负化学源(ECNI)选择离子(SIM)模式, 检测离子为 79 和 81. 离子源和传输线温度分别为 200℃ 和 280℃, 色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). 升温程序为: 初始温度 110℃ 保持 1 min, 以 20℃/min 升到 250℃ 保持 5 min, 以 25℃/min 升到 300℃ 保持 8 min. 甲烷为反应气, 高纯氮气为载气(纯度 99.999%), 载气流量 1 mL/min.

BDE-209 使用 Varian CP-3800 气相色谱电子捕获检测器(GC/ECD)进行测定, 色谱柱为 HP-5 MS 毛细管柱(7 m × 0.25 mm × 0.25 μm). 升温程序为: 初始温度 100℃ 保持 2 min, 以 6℃/min 升到

210℃ 保持 5 min, 以 7℃/min 升到 300℃ 保持 10 min. 进样口和检测器温度分别为 250℃ 和 310℃. 高纯氮气(99.999%)为载气, 柱流量 2.0 mL/min.

1.4 质量控制和质量保证

整个实验过程中, 共进行了 3 个场地空白和 2 个实验室空白, 结果表明在空白样品中未检测到 PBDEs 的污染. 为了考察采样过程中污染物的穿透情况, 共进行 3 次穿透实验, 结果表明, 本实验中通过串联 2 个 5 cm PUF 在采集大气中的 PBDEs 不会发生穿透现象. 本实验过程中 PBDEs 的定量采用内标法定量, 内标物质为 PCB-204, 代标物 PCB-155 的回收率在 75% ~ 101% 之间. 12 种 PBDEs 仪器检测限(IDL)为 0.048 ~ 0.724 pg/m³.

2 结果与讨论

2.1 大气中 PBDEs 的浓度

西安城区秋季大气中, 12 种 PBDEs 均能检出, 其中 BDE-17, -28, -47, -66, -100, -99, -154, -153, -209 的检出率为 100% (每次采集的样品中, 在气相和颗粒相至少一相中检出). 12 种 PBDEs 的总浓度(气相 + 颗粒相)范围为 37.43 ~ 620.30 pg/m³ (平均值为 216.28 pg/m³), 其中三溴至七溴联苯醚($\sum_{11}$ PBDEs)的浓度为 16.32 ~ 86.49 pg/m³ (38.02 pg/m³), BDE-209 的浓度为 16.34 ~ 576.01 pg/m³ (178.26 pg/m³). 11 种 PBDEs 同系物中含量较高的单体是 BDE-99 和 BDE-47, 这和很多研究结果相似^[6,7,9,10], 它们的浓度分别为 9.90 pg/m³ 和 6.62 pg/m³, BDE-85 和 BDE-138 的浓度较小, 分别为 0.44 pg/m³ 和 0.56 pg/m³. 表 1 列出了世界部分地区大气中 PBDEs 的浓度, 西安大气中低溴 PBDEs ($\sum_{11}$ PBDEs) 含量比广州城区 (88.8 pg/m³) PBDEs 浓度略低^[6], 与日本和印度的主要城市大气中 PBDEs 含量相当^[7,8]. 本研究采样点位于以电子产品开发为主的西安市南郊, 阻燃剂的使用不可避免, 可能会造成环境中 PBDEs 的污染. 台州作为典型的电子垃圾拆解地, 大气中低溴 PBDEs 浓度高达 216.0 pg/m³^[9], 说明电子垃圾的回收利用容易造成大气中 PBDEs 污染. 北美的 Great Lakes (郊区) 也检测到了 PBDEs 的存在^[10], 可见大气远距离传输使得 PBDEs 的污染足迹遍及世界各地. 对比这几个地区大气中 BDE-209 的浓度, 发现西安、广州、台州的 BDE-209 含量相当, 比 Kyoto 和 Great Lakes 要高很多, 这与我国正在使用十溴联苯醚 (Deca-

表 1 世界部分地区大气中 PBDEs 的浓度
Table 1 Atmospheric PBDEs concentrations in part areas of the world

采样点	类型	采样时间 (年)	低溴 PBDEs 单体组成	低溴 $\sum$ PBDEs 浓度/ $\text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$	低溴 PBDEs 浓度较高单体	BDE-209 浓度 / $\text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$	文献
西安	城市	2008	BDE-17, -28, -47, -66, -85, -99, -100, -153, -154, -138, -183	16.32 ~ 86.49 (38.02 $\pm$ 21.03)	BDE-47, -99	16.34 ~ 576.01 (178.26 $\pm$ 181.09)	本研究
广州	城市	2004	BDE-28, -47, -66, -85, -99, -100, -138, -153, -154, -183	64.0 ~ 110.0 (88.8)	BDE-47, -99	99.9 ~ 443.7 (263.8)	[6]
日本, Kyoto	城市	2000 ~ 2001	BDE-28, -49, -47, -66, -77, -100, -99, -154, -153, -183	4.5 ~ 65	BDE-47, -99, -183	ND ~ 48	[7]
印度沿海地区	城市	2006	BDE-28, -47, -66, -85, -99, -100, -153, -154, -183	2 ~ 181 (34 $\pm$ 59)	BDE-47, -85	—	[8]
台州	电子垃圾拆解地	2006	BDE-17, -28, -71, -47, -66, -100, -99, -85, -154, -153, -138, -183	135.1 ~ 362.0 (216.0 $\pm$ 115.0)	BDE-47, -99, -183	137.7 ~ 304.0 (290.4 $\pm$ 85.3)	[9]
Great Lakes	郊区	2002 ~ 2004	BDE-17, -28, -47, -49, -66, -71, -85, -99, -100, -138, -153, -154, -183, -190	0.78 ~ 75 (7.0 $\pm$ 13)	BDE-47, -99	0.14 ~ 6.4 (1.8 $\pm$ 1.5)	[10]

BDE)有关,随着五溴联苯醚和八溴联苯醚产品的禁止生产和使用,十溴联苯醚作为主要产品,已成为环境中 PBDEs 的主要污染物^[11]。

2.2 PBDEs 在气相和颗粒相中的分配

半挥发性有机物(SOCs)在大气中以气相或吸附于颗粒物上的形式存在,它们在气相和颗粒相中的分配会影响它们在大气中的迁移和沉降等行为。西安大气中 PBDEs 在气相和颗粒相中的分配如图 1 所示,三溴和四溴联苯醚主要存在于气相中,五溴至七溴联苯醚都是颗粒相含量高于气相含量,而十溴联苯醚 BDE-209 则只在颗粒相中检出,随着溴原子个数的增加,PBDE 单体在颗粒相含量的比重有增大趋势。气相和颗粒相中浓度最高的单体分别是 BDE-47 和 BDE-209。 $\sum_{11}$ PBDEs 在采样期间的气相浓度和颗粒相浓度分别为 6.88 ~ 32.51 pg/m^3 (15.50 $\text{pg}/\text{m}^3 \pm 7.43 \text{ pg}/\text{m}^3$) 和 2.68 ~ 53.98 pg/m^3 (22.52 $\text{pg}/\text{m}^3 \pm 15.89 \text{ pg}/\text{m}^3$),颗粒相所占质量分数为 59.2%,可以看出 PBDEs 主要存在于颗粒相中。这与西安地区大气中多环芳烃(PAHs)与有机氯农药(OCPs)的气粒相对浓度不同,西安地区气相 PAHs 占总浓度的 71%,远高于颗粒相浓度^[12],OCPs 也主要存在于气相中^[13],这与不同有机物的理化性质有关,PAHs 和 OCPs 的蒸气压较高,相对于 PBDEs 更容易从颗粒相挥发到气相中,而 PBDEs 更容易吸附于颗粒物上。

SOC 在气相-颗粒相间的分配通常表示为分配系数 K_p :

$$K_p = (F/TSP)/A \tag{1}$$

式中, F 和 A 分别为 SOC 在颗粒相和气相中的浓度

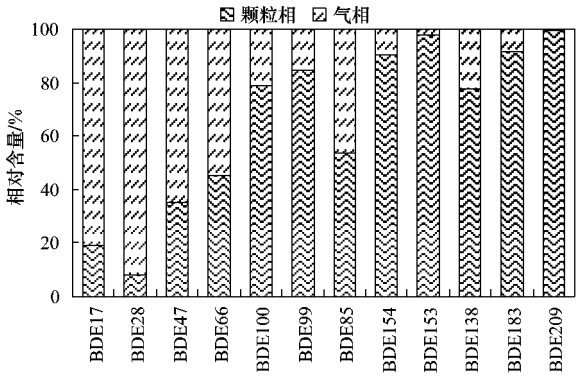


图 1 PBDEs 在气相和颗粒相中的相对含量
Fig. 1 Relative gaseous and particulate concentrations of PBDEs

(pg/m^3),TSP 为总悬浮颗粒物浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$).研究表明,2 种不同的机制决定 SOC 在气-粒相间的分配,即气溶胶表面的吸附和气溶胶有机物的吸收,不管是在哪种机制的作用下,气粒分配系数 K_p 和过冷饱和蒸气压 P_L° 之间都有对数线性关系:

$$\log K_p = m \log P_L^\circ + b \tag{2}$$

12 种 PBDEs 的 P_L° 值是根据 Tittlemier^[14]测得的值在本研究采样温度下进行校正获得的.对所有样品中气相和颗粒相含量都在检测限以上的 PBDEs 作 $\log K_p$ - $\log P_L^\circ$ 线性回归,结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,同一物质的过冷饱和和蒸气压在整个采样过程中的 $\log P_L^\circ$ 很接近,主要是由于在采样期间温度变化不大.气粒分配系数 K_p 和过冷饱和蒸气压 P_L° 具有很好的对数相关性($R^2 = 0.561$),其斜率 m 为 -1.02,接近于在气粒分配平衡状态时 m 的理论值(-1),可见西安城区秋季大气中 PBDEs 的气粒分配基本平衡。

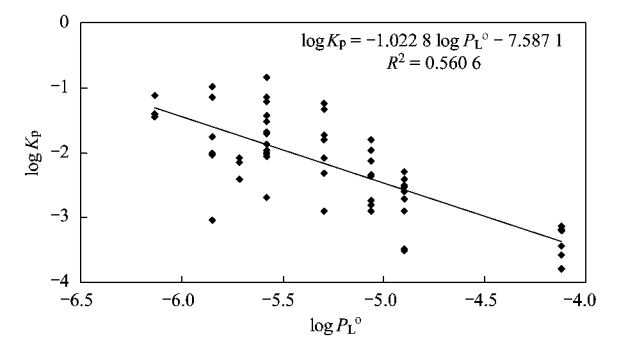


图2 PBDEs 的 log PL°-log Kp 相关性

Fig. 2 Plots of log Kp versus log PL° for PBDEs

2.3 来源分析

PBDEs 有 3 种工业品, 它们是五溴联苯醚 (Penta-BDE)、八溴联苯醚 (Octa-BDE) 和十溴联苯醚 (Deca-BDE), 它们作为阻燃剂添加于电子产品等多种产品中, 通过泄露或释放对环境造成污染. 不同工业品的组成具有很大差异, Penta-BDE 含 24% ~

38% 的四溴 BDEs、50% ~ 60% 的五溴 BDEs 和 4% ~ 8% 的六溴 BDEs, Octa-BDE 含 10% ~ 12% 的六溴 BDEs、44% 的七溴 BDEs、31% ~ 35% 的八溴 BDEs、10% ~ 11% 的九溴 BDEs 和 < 1% 的十溴 BDEs, Deca-BDE 含 97% ~ 98% 的十溴 BDEs 和 < 3% 的九溴 BDEs^[15]. 西安大气中, 不同溴代联苯醚相对含量的高低顺序依次为: 十溴 BDE (82. 4%, BDE-209), 五溴 BDEs (5. 1%, BDE-100, -99, -85), 三溴 BDEs (4. 3%, BDE-17, -28), 四溴 BDEs (3. 6%, BDE-47, -66), 六溴 BDEs (3. 4%, BDE-154, -153, -138), 七溴 BDEs (1. 2%, BDE-183).

对 12 种 PBDE 单体作了 Pearson 相关性分析, 结果如表 2 所示. 从中可以看出 BDE-99、BDE-154 和 BDE-153 三者间相关性最好, 相关系数均达到 0. 960 以上 ($p < 0. 0001$), BDE-17 和以上 3 种同系物也具有较好的相关性, 说明这几组物质之间的来源相似. BDE-85 和其它所有同系物的相关性均很差.

表 2 PBDE 单体间的相关性

Table 2 Pearson coefficients for PBDE congeners												
	BDE-17	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-100	BDE-99	BDE-85	BDE-154	BDE-153	BDE-138	BDE-183	BDE-209
BDE-17	1	0. 753	0. 792	0. 425	0. 808	0. 920	-0. 315	0. 912	0. 894	0. 618	0. 677	0. 284
BDE-28		1	0. 928	0. 849	0. 815	0. 663	-0. 437	0. 768	0. 765	0. 595	0. 750	0. 455
BDE-47			1	0. 863	0. 863	0. 763	-0. 450	0. 827	0. 840	0. 748	0. 864	0. 578
BDE-66				1	0. 713	0. 416	-0. 360	0. 549	0. 564	0. 585	0. 753	0. 619
BDE-100					1	0. 762	-0. 278	0. 813	0. 816	0. 525	0. 837	0. 506
BDE-99						1	-0. 267	0. 963	0. 977	0. 684	0. 778	0. 508
BDE-85							1	-0. 223	-0. 245	-0. 603	-0. 267	0. 080
BDE-154								1	0. 978	0. 697	0. 809	0. 560
BDE-153									1	0. 699	0. 850	0. 622
BDE-138										1	0. 659	0. 390
BDE-183											1	0. 749
BDE-209												1

采取方差最大旋转对 12 种 PBDEs 进行因子分析, 根据提取因子特征值 > 1 的原则, 提取了 3 个主因子, 总方差解释率达到 90% (3 个因子的解释率分别为 43%、30% 和 17%), 说明用这 3 个因子解释 PBDEs 来源是可行的. 因子载荷分析结果如表 3 所示. BDE-17, -99, -154, -153 在第一个因子 (PC1) 上有较高的载荷, 这几种物质是工业品 Penta-BDE 的主要组分, 因此 PC1 可以解释为 Penta-BDE 来源; BDE-66, -183, -209 在第二个因子 (PC2) 上有较高的载荷, 可以认为是 Deca-BDE 来源. 而因子 3 (PC3) 除过对 BDE-85 具有明显很高的负载荷, 对其它同系物都不具有明显高载荷, 表 2 中的单体相关性分析也发现 BDE-85 与其他同系物具

表 3 旋转后的因子载荷

Table 3 Rotated component matrix			
名称	主因子		
	PC1	PC2	PC3
BDE-17	0. 926	0. 157	0. 257
BDE-28	0. 522	0. 607	0. 447
BDE-47	0. 591	0. 653	0. 430
BDE-66	0. 173	0. 873	0. 400
BDE-100	0. 671	0. 554	0. 219
BDE-99	0. 945	0. 254	0. 127
BDE-85	-0. 111	-0. 022	-0. 943
BDE-154	0. 899	0. 383	0. 129
BDE-153	0. 883	0. 428	0. 123
BDE-138	0. 525	0. 328	0. 586
BDE-183	0. 595	0. 717	0. 156
BDE-209	0. 291	0. 837	-0. 237

有明显的负相关,说明 BDE-85 可能来自于特殊的污染源,需要进一步深入研究. 以上分析表明,西安大气中 PBDEs 主要来源于 Penta-BDE 和 Deca-BDE 污染.

3 结论

(1)西安城区秋季大气中 12 种 PBDEs 的总浓度范围为 37.43 ~ 620.30 pg/m³,平均值为 216.28 pg/m³,其中三溴至七溴联苯醚 ($\sum_{11}$ PBDEs) 的浓度范围为 16.32 ~ 86.49 pg/m³,BDE-209 的浓度范围为 16.34 ~ 576.01 pg/m³,11 种低溴 PBDEs 同系物中浓度较高的单体是 BDE-99 和 BDE-47.

(2)随着溴原子个数的增加,PBDE 单体在颗粒相含量的比例呈现增大趋势,三溴和四溴联苯醚主要存在于气相中,五溴至七溴联苯醚颗粒相浓度高于气相浓度,而十溴联苯醚 BDE-209 则只在颗粒相中检出. 气粒分配系数 K_p 和过冷饱和蒸气压 P_L° 具有很好的对数相关性 ($R^2 = 0.561$),西安城区秋季大气中 PBDEs 的气粒分配基本平衡.

(3)相关分析结果显示,除过 BDE-85,其它同系物之间均具有良好的相关性,尤其是 BDE-99、BDE-154 和 BDE-153 三者之间 ($R > 0.960$). 因子分析表明西安大气中 PBDEs 主要来源于 Penta-BDE 和 Deca-BDE 污染.

参考文献:

[1] Wang X, Ren N Q, Qi H, *et al.* Levels and distribution of brominated flame retardants in the soil of Harbin in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(11): 1541-1546.

[2] Hoh E, Hites R A. Brominated flame retardants in the atmosphere of the east-central United States[J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(20): 7794-7802.

[3] 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 and Technology, 2005, **39**(10): 3521-3527.

[4] 陈多宏,李丽萍,毕新慧,等. 典型电子垃圾拆解区大气中多溴联苯醚的污染[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2105-

2110.

[5] 张向荣. 西安市不同区域水体沉积物中多溴联苯醚的污染状况与分布规律研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.

[6] Chen L G, Mai B X, Bi X H, *et al.* Concentration levels, compositional profiles and gas-particle partitioning of polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of an urban city in south China [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(4): 1190-1196.

[7] Hayakawa K, Takatsuki H, Watanabe I, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), polybrominated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PBDD/Fs) and monobromo-polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (MoBPXDD/Fs) in the atmosphere and bulk deposition in Kyoto, Japan [J]. Chemosphere, 2004, **57**(5): 343-356.

[8] Zhang G, Chakraborty P, Li J, *et al.* Passive atmospheric sampling of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls, and polybrominated diphenyl ethers in urban, rural, and wetland sites along the coastal length of India [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(22): 8218-8223.

[9] 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.

[10] Su Y S, Hung H, Brice K A, *et al.* Air concentrations of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in 2002-2004 at a rural site in the Great Lakes [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(39): 6230-6237.

[11] 金军,胡吉成,王英,等. 北京市春季大气中的多溴联苯醚[J]. 环境化学, 2010, **28**(5): 711-715.

[12] 李文慧,张承中,马万里,等. 西安采暖季空气中多环芳烃的污染特征和来源解析[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1432-1437.

[13] 刘焱明,张承中,李文慧,等. 西安城区大气有机氯农药的污染特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(3): 266-271.

[14] Tittlemier S A, Halldorson T, Stern G A, *et al.* Vapor pressures, aqueous solubilities, and Henry's law constants of some brominated flame retardants[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, **21**(9): 1804-1810.

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