

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20150825002

郭志明, 刘頔, 申铠君, 等. 太原市 PM_{2.5} 中溴代阻燃剂的污染特征及人体暴露水平[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 325-329

Guo Z M, Liu D, Shen K J, et al. Brominated flame retardants in PM_{2.5} in the urban of Taiyuan: Characteristics of pollution and human exposure [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 325-329 (in Chinese)

太原市 PM_{2.5} 中溴代阻燃剂的污染特征及人体暴露水平

郭志明¹, 刘頔², 申铠君², 李军^{2,*}, 张干²

1. 中国辐射防护研究院, 太原 030006

2. 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

收稿日期: 2015-08-25 录用日期: 2015-09-22

摘要: 2013年10月至2014年7月在太原城区,分4个月采集大气细颗粒物,每个月选取4个样品,分析了颗粒物上8种多溴联苯醚(PBDEs)和6种新型溴代阻燃剂(NBFRs)的浓度与组成。结果表明,大气PM_{2.5}样品中PBDEs和NBFRs总浓度算术平均值分别为(10.9 ± 10.3) pg·m⁻³和(22.3 ± 24.7) pg·m⁻³,其中BDE-209、HBB和DBDPE是溴代阻燃剂中的主要污染物。季节变化来看,秋季样品中总PBDEs和总NBFRs的浓度要高于其他季节,夏季最低;化合物组成上,秋季样品中BDE-209含量较低,而NBFRs中HBB含量较高。相关分析显示,溴代阻燃剂的变化与颗粒物浓度和有机质的相关性不大,与大气温度与无显著性相关,而主要与气团来源有关。城市儿童的吸入暴露量约为成人的2~3倍,反映出PM_{2.5}中溴代阻燃剂对城镇居民尤其是儿童的潜在健康危害仍不容忽视。

关键词: 大气细颗粒物; 多溴联苯醚; 新型溴代阻燃剂; 呼吸暴露; 太原

文章编号: 1673-5897(2016)2-325-05 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Brominated Flame Retardants in PM_{2.5} in the Urban of Taiyuan: Characteristics of Pollution and Human Exposure

Guo Zhiming¹, Liu Di², Shen Kaijun², Li Jun^{2,*}, Zhang Gan²

1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China

2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China.

Received 25 August 2015 accepted 22 September 2015

Abstract: This study was designed to characterize the atmospheric particulate matter (PM_{2.5}) for different brominated flame retardants (BFRs) at an urban site in Taiyuan, China from October, 2013 to July, 2014. A total number of sixteen (16) samples were selected to analyze polybrominated diphenyl ether (PBDE) and novel brominated flame retardant (NBFR). Average concentration levels of \sum_8 PBDEs and \sum_6 NBFRs were (10.9 ± 10.3) and (22.3 ± 24.7) pg·m⁻³, respectively. Among all brominated flame retardant, BDE-209, HBB and DBDPE were the predominant congeners. Seasonal variations were characterized by the higher BFR levels in autumn than those in other seasons while low contribution of BDE-209 to \sum PBDEs and high contribution of HBB to \sum NBFRs has been observed in autumn.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 B(XDB05040503)

作者简介: 郭志明(1969-)男,副研究员,学士,研究方向为环境影响评价, E-mail: GZM603@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: junli@gig.ac.cn

Findings of the correlation analysis indicated that the concentrations of BFRs was not significantly influenced by particle mass, organic matter and ambient temperature, but affected by the wind direction and speed. Inhalation exposure for children was about 2~3 times higher than that of adults. It is reflected that potential health risks of particulate BFRs for residents especially children should not be ignored in Taiyuan.

Keywords: PM_{2.5}; PBDEs; NBRFs; inhalation exposure; Taiyuan

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),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]。

随着传统PBDEs的禁用,新型的溴代阻燃剂迅猛发展,并得到了广泛的应用,如添加在塑料、泡沫和纺织物中^[5]。据资料统计,1,2-双(三溴苯氧基)乙烷(BTBPE)在2001年,全球消费量达到16 000 t;2001年欧洲进口十溴二苯乙烷(DBDPE)约1 000~5 000t。2009年,挪威污染控制局(现挪威气候与污染署)发表了一份报告,报告指出新型溴代阻燃剂(NBRFs)的产量和使用量仍然难以确定,并呼吁提供更多的生产量方面的信息。随着电子工业的发展,中国逐渐成为溴代阻燃剂生产和消费大国,其中NBRFs中使用量最大的为DBDPE,在2006年国内生产量达到了12 000 t,BTBPE在中国也有生产和使用,但具体数据不祥^[6]。

关于城市大气中溴代阻燃剂的污染水平和组成特征的研究,国内外已开展了许多^[7],在我国主要集中于典型污染点源,如电子垃圾拆解地(贵屿、台州等)^[6,8,9]和经济发达地区(珠三角、长三角等)^[10]。大气细颗粒物对人体健康产生重要的危害,而颗粒物上的毒害污染物会加剧细颗粒物对人体健康的影响。华北地区是我国甚至全球PM_{2.5}污染最为严重的地区之一,近年来该地区主要城市灰霾频发。本文在太原市市区进行为期1年的采样观测,探讨该地区大气PM_{2.5}中溴代阻燃剂的浓度水平、季节变

化及人体呼吸暴露水平。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 采样点

采样点位于太原市小店区学府街的中国辐射防护研究院主楼楼顶,楼高为9层,距离学府街主干道直线距离约50米,周边为商业区和居民区。

1.2 样品采集

采用撞击式空气动力学切割大流量采样仪和微孔石英纤维滤膜来捕集大气中的PM_{2.5}。采样器为上海新拓实验仪器科技公司制造,采样流量为300 L·min⁻¹。石英滤膜为PALL公司产品,孔径为0.7 μm,石英滤膜在采样前通过450 °C预烧8 h去除可能的有机物。为了避免有机组分挥发,分析前样品用铝箔纸密封于-20 °C冷藏。采样前后对滤膜恒重,使用电子微量天平称重3次。采样频率为24 h/次,采样分4个阶段,分别为秋末冬初2013年10月16日到11月16日,冬季取暖期2013年12月21日到2014年1月21日,春季2014年3月21日到4月21日和夏季2014年6月23日到7月23日,每季选取4个样品做溴代阻燃剂分析。

1.3 样品处理与分析

采样后的石英滤膜加入一定量的回收率指示物¹³C-PCB138和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)混和液淋洗,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8种多溴联苯醚: BDE-28、-47、-99、-100、-153、-154、-183和-209 (AccuStandards, New Haven, CT)和6种新型溴代阻燃剂: 1,2-双(三溴苯氧基)乙烷(1,2-bis(2,4,6-tribromophenoxy)ethane, TBE); 五溴乙苯(pentabromoethylbenzene, PBEB); 十溴二苯乙烷(1,2-bis(pentabromodiphenyl)ethane, DBDPE); 四溴邻苯二甲酸酯(bis(2-ethylhexyl)-3,4,5,6-tetrabromo-

phthalate, TBPH); 2-乙基己基-四溴苯甲酸(2-ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabromobenzoate, TBB)和全溴代苯(hexabromobenzene, HBB)。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 $^{\circ}\text{C}$ 下保留 5 min,然后以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升至 295 $^{\circ}\text{C}$ 并保留 12 min,进样口和检测器温度分别为 250 $^{\circ}\text{C}$ 和 310 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 质量控制和质量保证

在采样和处理过程中,设置了野外和实验室空白,以检验整个实验的污染情况。结果表明,实验室空白和野外空白中均无目标物检出。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。¹³C-PCB138 和 PCB209 的回收率分别为 82.3% \pm 16.6% 和 89.5% \pm 11.8%,PBDEs 和 NBFRs 浓度未经回收率校正。

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 浓度组成

太原市大气 PM_{2.5} 中 8 种 PBDEs 的总浓度范围为 1.62 ~ 36.5 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,算术平均值为(10.9 \pm 10.3) $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (表 1),其中 BDE-209 的浓度为(3.15 \pm 3.7) $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,三溴至七溴 PBDEs(Σ_7 PBDEs)的浓度为(7.72 \pm 9.37) $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从同系物单体的上看,大气细颗粒相中以 BDE-209 浓度最高,依次分别为 BDE-99、BDE-100、BDE-183、BDE-28、BDE-47、BDE-153 和 BDE-154,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]。

6 种 NBFRs 的总浓度范围为 3.41 ~ 94.9 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,算术平均值为(22.3 \pm 24.7) $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ (表 1)。化合物组成上,HBB 浓度值最高,浓度范围为 0.69 ~ 51.9 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,算术平均值为(9.04 \pm 14.3) $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其次为 DBDPE 浓度范围为 0.58 ~ 23.0 $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,算术平均值为(7.64 \pm 6.26) $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$,其他化合物含量都较低。HBB 和 DBDPE 都属于添加型阻燃剂,主要应用于纺织物、纸张、电子设备、木材和塑料商品的阻燃 [11],而 PBDEs 商业品的热降解也会产生 HBB; 与 PBDEs 相比,HBB 和 DBDPE 比所有的 PBDEs 单体化合物都高,进一步说明 NBFRs 已经逐渐取代 PBDEs,成为中国市场上添加在各种易燃产品中的主要阻燃剂。

与全国范围的早期研究相比 [12-13],太原大气颗

粒物中 PBDEs 和 NBFRs 的含量都较低,特别是 PBDEs 与大气背景站的浓度相当,该结果一方面是由工业五溴和八溴联苯醚的停产和禁用造成的 [4],另一方面可能是因为大气中的高溴组分在紫外光或者太阳光照射下,容易被光降解 [7]。

对 PBDEs 和 NBFRs 各单体浓度进行相关性分析。结果显示,除了总 PBDEs 浓度与总 NBFRs 的浓度显著性相关($r^2 = 0.52$, $P < 0.01$),其他单个化合物之间无显著性相关或者相关度较小($r^2 < 0.2$),这也从一定程度上反映了此类阻燃剂在使用上无关联性,浓度的变化可能与污染物空间传输有关。

2.2 季节变化

大气中颗粒物态 PBDEs 和 NBFRs 浓度的季节变化如图 1 所示,总的来说,溴代阻燃剂总浓度在秋季达到最高值,在夏季达到最低值,总体趋势是秋

表 1 太原市大气细颗粒物中溴联苯醚(PBDEs)和新型溴代阻燃剂(NBFRs)的浓度($\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Table 1 Concentration of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and novel brominated flame retardant (NBFRs) in PM_{2.5} in Taiyuan ($\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$)

	算术平均值	范围	中值
	Average	Range	Mean
BDE28	1.22 \pm 1.43	0.04 ~ 5.54	0.76
BDE47	0.84 \pm 1.07	0.05 ~ 4.3	0.46
BDE100	1.46 \pm 4.37	0.04 ~ 17.8	0.17
BDE99	2.34 \pm 3.97	0.18 ~ 15.5	0.77
BDE154	0.22 \pm 0.31	0.04 ~ 1.24	0.10
BDE153	0.38 \pm 0.34	0.04 ~ 1.21	0.26
BDE183	1.26 \pm 1.31	0.18 ~ 4.60	0.72
BDE209	3.15 \pm 3.07	0.91 ~ 12.7	2.07
Σ PBDEs	10.9 \pm 10.3	1.62 ~ 36.5	6.79
PBEB	0.19 \pm 0.40	0.00 ~ 1.65	0.06
HBB	9.04 \pm 14.3	0.69 ~ 51.9	3.16
TBB	2.02 \pm 6.68	0.05 ~ 27.0	0.27
TBE	0.66 \pm 0.59	0.09 ~ 2.25	0.39
TBPH	2.78 \pm 10.7	0.00 ~ 42.7	0.05
DBDPE	7.64 \pm 6.26	0.58 ~ 23.0	6.65
Σ NBFRs	22.3 \pm 24.7	3.41 ~ 94.9	14.4

注: BDE、PBEB、HBB、TBB、TBE、TBPH、DBDPE 为溴代联苯醚、五溴二苯、全溴代苯、2-乙基己基-四溴苯甲酸、1,2-双(三溴苯氧基)乙烷、四溴邻苯二甲酸酯、十溴二苯乙烷。

Note: BDE, PBEB, HBB, TBB, TBE, TBPH, DBDPE stand for brominated diphenyl ethers, pentabromoethylbenzene, hexabromobenzene, 2-ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabromobenzoate, 1,2-bis(2,4,6-tribromophenoxy)ethane, bis(2-ethylhexyl)-3,4,5,6-tetrabromo-phthalate, 1,2-bis(pentabromodiphenyl)ethane.

季、冬季、春季到夏季 颗粒物态 PBDE 和 NBRFs 的浓度逐渐降低,除了春季的一天例外(2014 年 4 月 13 日),可能与大气气团来源有关(将在下一部分讨论)。在化合物组成上,秋季样品中,溴代阻燃剂的组成与其他季节样品中化合物组成明显不同, PBDEs 中 BDE-209 相对含量较低,主要以低溴化合物为主, NBRFs 中, HBB 相对含量较高,而其他季节中,则以 DBDPE 为主。浓度和组成上显著的季节

差异反映了该类污染物季节性使用差异的特征,同时,由于不同季节风向的不同,也反映了不同污染源区该类污染物的组成特征。

2.3 影响因素

溴代阻燃剂为疏水性有机污染物,易吸附在颗粒物的有机相中,因此大气中颗粒物含量的多少,以及颗粒物中有机质含量的高低会影响该类污染物的大气颗粒物中的含量。对溴代阻燃剂与 PM_{2.5} 质量浓度、有机碳和元素碳做相关分析,结果显示,颗粒物中的有机碳和元素碳与所有的化合物无显著性相关,而颗粒物的质量浓度与 BDE-99、BDE-183、BDE-209 和总 PBDEs,以及 TBB 和总 NBRFs 呈现显著正相关,但相关系数都较小($r^2 < 0.19$),显示了颗粒物本身特征不是影响溴代阻燃剂含量高低的决定性因素。此外,环境参数也是影响大气中有机污染物的重要因素。温度较高时,各种产品中的阻燃剂易挥发进入环境中,而温度较低时,大气中的有机污染物易倾向于在颗粒物上附件,增大颗粒物中污染物的浓度。对温度与各化合物之间作相关分析显示,温度与各化合物之间无显著性相关,也即温度对此类污染物浓度的影响不大。风速和风向是影响大气中污染物浓度的最重要的环境因子,如气团来源于污染源区,配合较低的风速,则可以观察到高浓度、具有污染源区指纹特征的污染物组合;而风速较大,则利于污染物的扩散与稀释,大气中污染物含量较低。对不同样品的气团来源做后推 96 h 的气流轨迹分析,结果如图 2 所示,在采集秋季的 3 个样品时(2013 年 10 月 22 日,10 月 29 日和 11 月 5 日),风速较小,且气团来源于太原市周边,这些样品中溴代阻燃剂含量高,且以低 BDE-209 和高 HBB 为特征,反映了太原周边地区溴代阻燃剂的使用状况。对于春季 2014 年 4 月 13 日的样品,气流轨迹图显示采集该样品时,气团来源于山东莱州湾,该地区是我国主要的溴代阻燃剂生产基地,可能是在太原观测到大气中高浓度值、不同化合物组合的溴代阻燃剂的主要原因。在采集其余样品时,风速较大,气团来源范围较广,化合物组成特征则反映了溴代阻燃剂的区域使用状况。

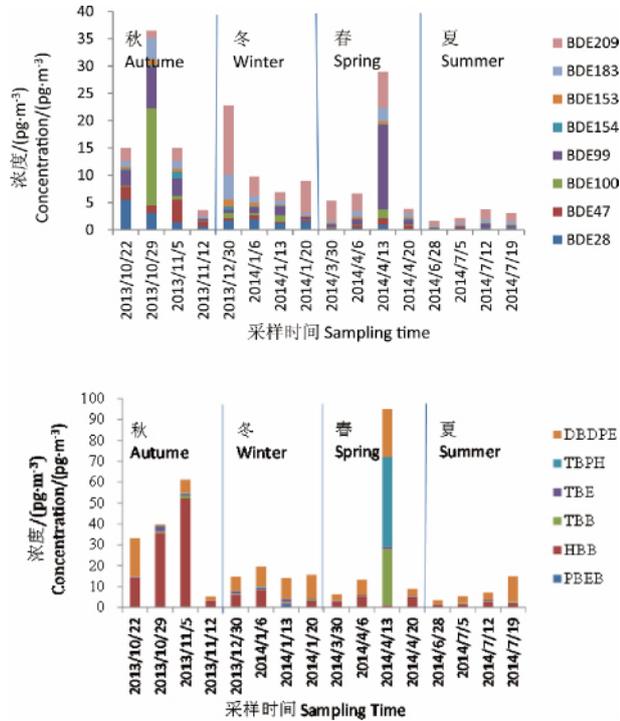


图 1 太原市大气细颗粒物 PBDEs(上)和 NBRFs(下)的季节变化与组成

Fig. 1 Seasonal variation and composition of PBDEs (upper) and NBRFs (lower) in fine particle in Taiyuan



图 2 后推 96 h 气流轨迹图

Fig. 2 Result of 96 hour back-trajectories of air masses in Taiyuan

2.4 人体暴露水平

为了初步评价太原市大气 PM_{2.5} 中的溴代阻燃剂对人体健康所产生的暴露风险,利用美国 EPA 发布的呼吸吸入暴露模型计算了大气 PM_{2.5} 中溴代阻燃剂的日暴露量。

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

其中 E_i 为吸入暴露量($\text{pg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); C_a 为大气中目标污染物浓度($\text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$); V_R 为呼吸速率($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), 数据来自于美国国家环境保护局的《暴露参数手册》^[14]; 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^[15]。结果显示, 太原儿童/成人通过吸入 PM_{2.5} 的 PBDEs 和 NBRs 的日均暴露量分别为 5.94/2.66 $\text{pg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 12.1/5.4 $\text{pg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 相对较低, 但儿童的暴露量是成人的 2~3 倍, 具有潜在的健康危害。

综上可知:

(1)太原市大气细颗粒物中 8 种 PBDEs 和 6 种 NBRs 总浓度算术平均值分别为 $(10.9 \pm 10.3) \text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(22.3 \pm 24.7) \text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中 BDE-209、HBB 和 DBDPE 是溴代阻燃剂中的主要污染物。

(2)PM_{2.5} 中溴代阻燃剂在秋季最高, 夏季最低, 且秋季样品中溴代阻燃剂的组分与其他季节显著不同, 秋季样品中 BDE-209 较低, HBB 较高, 这种差异主要受到气团来源的影响。

(3)通过颗粒物的呼吸暴露计算显示, 太原市区颗粒物中溴代阻燃剂通过呼吸吸入对儿童有潜在的健康危害, 不容忽视。

参考文献(References):

- [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
Liu H X, Zhang Q H, Jiang G B, et al. Polybrominated diphenyl ethers and its related environmental problems [J]. *Progress In Chemistry*, 2005, 17(3): 554-562 (in Chinese)
- [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] Hoh E, Hites A R. Brominated flame retardants in the atmosphere of the east-central united states [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(20): 7794-7802
- [6] Zheng X, Xu F, Chen K, et al. Flame retardants and organochlorines in indoor dust from several e-waste recycling sites in South China: Composition variations and implications for human exposure [J]. *Environment International*, 2015, 78: 1-7
- [7] 王维黎, 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
Wang W J, Zhou J L, Pei S W, et al. Research progress on status of environmental pollutions of polybrominated diphenyl ethers [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(7): 1084-1093 (in Chinese)
- [8] 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
- [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] 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
- [11] Covaci A, Harrad S, Abdallah M A E, et al. Novel brominated flame retardants: A review of their analysis, environmental fate and behaviour [J]. *Environment International*, 2011, 37(2): 532-556
- [12] 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
- [13] 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): 120-1237
Wu H, Jin J, Wang Y, et al. Comparative study of the level and distribution of polybrominated diphenyl ethers and new brominated flame retardants in the atmosphere of typical urban [J]. *Environmental Science*, 2014, 35 (4): 1230-1237 (in Chinese)
- [14] EPA U.S. Exposure Factors Handbook: 2011 Edition [M]. Washington DC: National Center for Environmental Assessment, 2011
- [15] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(10): 1165-1170
Wang Z S, Duan X L, Liu P, et al. Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22 (10): 1165-1170 (in Chinese)