

广州地区 PBDEs 长距离迁移潜力和总持久性模拟

吴有方¹,方利江¹,丁中原¹,柳敏¹,马子龙¹,张干²,高宏^{1*} (1.兰州大学资源与环境学院,甘肃兰州 730000; 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,广东广州 510640)

摘要: 运用 TaPL3.0 模型对 7 种 PBDEs 同系物在广州地区的长距离迁移潜力(LRTP)和总持久性(Pov)进行了模拟研究,并通过灵敏度分析得到了模型的关键参数. 研究结果显示,PBDEs 排放至大气中,特征迁移距离(CTD)为 296~811km,均值为 557km;Pov 为 19~279d,均值为 184d;PBDEs 平均约有 73.8%分布在土壤中,16.9%分布在沉积物中,9.3%分布在其他三相中.PBDEs 排放到水体时,CTD 为 3090~4291km,均值为 3731km;Pov 范围为 228~854d,均值为 731d;平均约 92.1%分布在沉积物中,6.8%分布在水相中,1.1%在大气、土壤和植被相中.BDE47 迁移潜力最大,BDE209 易残留于源区形成点源性污染.PBDEs 各同系物主要分布在沉积物和土壤中.随着溴代程度升高,CTD 逐渐降低,Pov 逐渐升高,与国外研究趋势一致.

关键词: 广州地区; PBDEs; 长距离迁移潜力; 总持久性; TaPL3.0 模型

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)03-0426-07

Simulation of long-range transport potential and overall persistence of PBDEs in Guangzhou. WU You-fang¹, FANG Li-jiang¹, DING Zhong-yuan¹, LIU Min¹, MA Zi-long¹, ZHANG Gan², GAO Hong^{1*} (1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *China Environmental Science*, 2012,32(3): 426-432

Abstract: The long-range transport potential(LRTP)and overall persistence(Pov)of 7 PBDEs through air and water in Guangzhou were estimated using the TaPL3.0 model. In addition, the key parameters of the model were identified by sensitivity analysis method. The study results suggested that the CTD(air) ranged from 296 km to 811km, and the mean value was 557 km. Pov(air) was between 19 and 279d, and the mean value was 184d. There were near 73.8% of PBDEs distributed in soil, 16.9% in sediment, and 1.3% in water, respectively. While the CTD(water) was from 3090km to 4291km, and the mean value was 3731km, Pov (water) was from 228d to 854d, and the mean value was 731d. There were near 92.1% of PBDEs distributed in sediment, 6.8% in water, respectively 1.1% in other environmental media including air, soil and plants. Futhermore, this case study also showed that the BDE47 congener exhibited the strongest transport potential and transported to remote regions, moreover, BDE209 tended to stay in the study area. The 7 congeners of PBDEs distributed mainly in sediment and soil. This paper also indicated that the CTD values tended to be lower with the increase of Br numbers, on the contrary, Pov values tended to be higher. In addition, the research conclusions well agreed with the study results of similar foreign research.

Key words: Guangzhou area; PBDEs; long-range transport potential; overall persistence; TaPL3.0 model

多溴联苯醚(PBDEs) 共有 209 种同类物,因其具有优异的阻燃性能,被广泛用在纺织品、电路板、油漆、家具、电器电子产品中.该类化合物具有环境持久性、长距离迁移性、生物可积累性等特点,是一类具有生态风险的新型持久性有机污染物(POPs)^[1].室温下,PBDEs 蒸气压低、亲脂性强,因其为添加型阻燃剂,缺乏化学键束缚作用,添加于产品中后很容易以挥发、渗出等方

式逸散到大气或水体中,通过“蚱蜢跳效应”进行长距离迁移^[2].目前在偏远北极地区也发现了多溴联苯醚的踪迹^[3],可见其可远离源区污染全球.同时其化学性质稳定,可随生物链进行生物富集

收稿日期: 2011-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971267/D010903);教育部“春晖计划”国际合作科研项目(Z2008-1-62025)

* 责任作者, 副教授, honggao@lzu.edu.cn

和放大,从而导致生态及健康风险.PBDEs 造成的全球环境污染越来越受到科学家和环境保护组织的广泛关注.常见 PBDEs 同系物有四溴联苯醚(tetra-BDEs)、五溴联苯醚(penta-BDEs)、六溴联苯醚(hexa-BDEs)、八溴联苯醚(octa-BDEs)和十溴联苯醚(deca-BDEs)等,分别含有 4、5、6、8、10 个溴原子^[4].加强 PBDEs 同系物区域环境行为差异的探索研究具有十分重要的意义.

珠江三角洲地区是我国乃至世界电子电器制造业基地之一,关于珠江三角洲地区大气、水体、生物、土壤和沉积物等介质中 PBDEs 污染状况^[5-10]的研究表明:该地区 PBDEs 污染来源主要为五溴、八溴和十溴工业品的使用,污染程度较为严重,尤以 BDE209 高于世界其他地区.广州市是珠江三角洲地区的工业及经济中心,地处南亚热带,北回归线穿越北部,属典型的海洋季风气候,夏季盛行东或东南季风,冬季盛行东或东北季风,大气传输对于 PBDEs 从陆地向水生系统,从高浓度向低浓度迁移有重要的作用,因此研究该地区 PBDEs 的污染源汇和迁移变化规律具有重要意义.

Wania^[11]采用 4 种基于长距离迁移潜力(LRTP)评价模型对不同溴代程度 PBDEs 进行了 LRTP 评价.模型输出结果对引导实际状况下 PBDEs 区域环境过程的研究具有一定的理论及现实意义.目前,在国内尚未见关于 PBDEs 的 LRTP 及其总持久性(Pov)模拟研究的公开报道.

本文拟运用 TaPL3.0 对 PBDEs 在广州地区大气及水体进行 LRTP 和 Pov 模拟研究,以期更深入研究该地区 PBDEs 区域环境行为及对偏远地区造成相应污染的可能性提供科学依据.

1 研究方法

1.1 模型简介

TaPL3.0 是基于三级稳态多介质逸度模型,由加拿大 TRENT 大学开发,专用于估算化学物质的 LRTP 及 Pov.模型假设污染源连续稳定地以 1000kg/h 的排放强度向大气或水体中排放污染物,不考虑大气、水体的平流输入或输出及沉积物的掩埋.研究区域环境相主要由大气、水体、土壤、沉积物和植被 5 个主相组成,各个主相又包括相应的子相.模型 TaPL3.0 在计算时已根据温度对参数进行了校对.模型输出主要有 LRT、Pov 值及 PBDEs 在各相中的百分含量,其中 LRT 可用特征迁移距离(CTD)来表征.

1.2 模型参数的确立

对于在各个环境相中均有分配的第 1 类化学物质^[12],TaPL3.0 模型共需输入 18 项污染物的物理化学参数和 46 项环境参数.物理化学参数主要摘自于国外相关数据手册及文献^[11,13-14],环境参数则摘自中国气象局网站^[15]、广州市志(1998 年版)^[16]、广州统计年鉴 2010^[17]及其他参考文献^[18-19].主要参数取值见表 1 和表 2.

表 1 PBDEs 的主要物理化学参数

Table 1 The main Physical and chemical parameters for PBDEs

参数	BDE28	BDE47	BDE100	BDE99	BDE153	BDE183	BDE209
摩尔质量(g/mol)	406.9 ^[13]	485.8 ^[13]	564.7 ^[13]	564.7 ^[13]	643.6 ^[13]	722.5 ^[13]	959.2 ^[13]
水溶解度(g/m ³)	0.334 ^[13]	0.0947 ^[13]	0.0541 ^[13]	0.0385 ^[13]	0.0167 ^[13]	1.5×10 ⁻⁶ ^[13]	4.17×10 ⁻⁹ ^[13]
饱和蒸汽压(Pa)	1.57×10 ⁻³ ^[13]	2.15×10 ⁻⁴ ^[13]	3.68×10 ⁻⁵ ^[13]	3.63×10 ⁻⁵ ^[13]	8.87×10 ⁻⁶ ^[13]	4.68×10 ⁻⁷ ^[13]	2.95×10 ⁻⁹ ^[13]
辛醇-水分配系数的对数	5.80 ^[13]	6.39 ^[13]	6.53 ^[13]	6.76 ^[13]	7.08 ^[13]	7.14 ^[13]	9.97 ^[13]
熔点(°C)	64.25 ^[13]	84 ^[13]	110 ^[13]	92.5 ^[13]	161.5 ^[13]	172 ^[13]	302.5 ^[13]
辛醇-水分配的焓变(kJ/mol)	-20 ^[14]	-20 ^[14]	-20 ^a	-20 ^[14]	-20 ^[14]	-20 ^a	-20 ^[14]
气-水分配的焓变(kJ/mol)	59.2 ^[14]	58.4 ^[14]	55 ^a	70.8 ^[14]	62.1 ^[14]	55 ^a	63.2 ^[14]
大气中的半衰期(h)	128 ^[11]	256 ^[11]	357 ^[11]	467 ^[11]	1110 ^[11]	1340 ^[11]	7620 ^[11]
水中的半衰期(h)	1440 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]
土壤中的半衰期(h)	1440 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]	3600 ^[11]
沉积物中的半衰期(h)	5760 ^[11]	14400 ^[11]	1400 ^[11]	14400 ^[11]	14400 ^[11]	14400 ^[11]	14400 ^[11]
植被中的半衰期(h)	64 ^b	128 ^b	178.5 ^b	233.5 ^b	555 ^b	770 ^b	3810 ^b

注:a值为模型默认值,b值为大气中半衰期的0.5倍

表 2 研究区域主要环境参数

Table 2 The main environmental parameters of study area

参数	单位	取值	参数	单位	取值
环境温度	°C	22 ^[15]	植被的密度	kg/m ³	1000 ^[19]
大气面积	m ²	7.4344×10 ⁹ ^[16]	水相中固体的有机碳含量	g/g	0.2 ^a
大气高度	m	2000 ^[18]	土壤中固体的有机碳含量	g/g	0.02 ^[19]
水体面积	m ²	4.2372×10 ⁸ ^[16]	沉积物中固体的有机碳含量	g/g	0.04 ^[19]
水体深度	m	10 ^[19]	鱼类的脂肪含量	g/g	0.05 ^a
土壤深度	m	0.2 ^[17]	植被的脂肪含量	g/g	0.01 ^a
沉积物厚度	m	0.03 ^[19]	生物质量	kg/m ²	1.0 ^a
风速	km/h	7.2 ^[17]	叶面面积指数	m ² /m ²	3.0 ^a
水流流速	km/h	3.6 ^a	气侧气/水质量迁移系数	m/h	3 ^a
植被占土壤总面积的比例	无量纲	0.27 ^[18]	水侧气/水质量迁移系数	m/h	0.03 ^a
气相中固体的体积分数	无量纲	2×10 ⁻¹¹ ^[19]	降水速率	m/h	1.77×10 ⁻⁴ ^[17]
水相中固体的体积分数	无量纲	5×10 ⁻⁶ ^[19]	气溶胶干沉降速率	m/h	10.8 ^[19]
水相中鱼类的体积分数	无量纲	1×10 ⁻⁶ ^[19]	土壤中气相扩散质量迁移系数	m/h	0.02 ^a
土壤中气子相的体积分数	无量纲	0.2 ^[19]	土壤中水相扩散质量迁移系数	m/h	1.0×10 ^{-5a}
土壤中水子相的体积分数	无量纲	0.2 ^[19]	土壤/大气边界层质量迁移系数	m/h	1 ^a
土壤中固子相的体积分数	无量纲	0.6 ^[19]	沉积物中水相扩散质量迁移系数	m/h	0.01 ^a
沉积物中水子相的体积分数	无量纲	0.7 ^[19]	沉积物沉降速率	m/h	4.6×10 ⁻⁸ ^[19]
沉积物中固子相的体积分数	无量纲	0.3 ^[19]	沉积物再悬浮速率	m/h	1.1×10 ⁻⁸ ^[19]
气相中固体的密度	kg/m ³	1500 ^[19]	土壤水流失速率	m/h	3.9×10 ⁻⁵ ^[19]
水相中固体的密度	kg/m ³	1500 ^[19]	土壤固体流失速率	m/h	2.3×10 ⁻⁸ ^[19]
水相中鱼类的密度	kg/m ³	1000 ^[19]	叶面/大气边界层质量迁移系数	m/h	9 ^a
土壤中固体的密度	kg/m ³	2400 ^[19]	清洗速率	无量纲	2.00×10 ⁵ ^[19]
沉积物中固体的密度	kg/m ³	1500 ^[19]	植被所截雨水比例	无量纲	0.1 ^a

注:a为模型默认值

1.3 灵敏度分析

以 BDE209 为例,对于模型中所需输入的 64 个参数,除摩尔质量、数据测定温度可作为常数外,对剩余 62 个参数进行了灵敏度分析.为更好的体现各参数对模型结果的影响,本文以灵敏度系数 $C_s^{[19]} > 0.15$ 为筛选标准,对模型的关键参数进行识别.

1.4 模型不确定性分析

以 BDE209 为例,运用蒙特卡罗方法对模型进行不确定性分析.为减少计算工作量,本文选用对模型输出结果产生显著影响的关键参数进行随机取值,重复运行 10000 次,模型计算结果给出了模型的不确定性信息.

2 结果与讨论

2.1 模型结果

模型模拟结果显示,当 PBDEs 排放到大气中,

其 CTD 范围为 296~811km,均值为 557km,其中 BDE209 最低,BDE47 最高;Pov 范围为 19~279d,均值为 184d,其中 BDE28 最低,BDE209 最高.研究中五溴六溴同系物的 CTD 和 Pov 与各自均值接近.

污染物排放到水体中的 CTD 范围为 3090~4291km,均值为 3731km,BDE183 最低,BDE47 最高;Pov 范围为 228~854d,均值为 731d,BDE28 最低,BDE209 最高,五溴六溴同系物的 CTD 和 Pov 略高于均值.CTD 与 Pov 基本呈负相关,且随溴原子数增多,CTD 逐渐降低,Pov 逐渐升高(图 1).

PBDEs 同系物在各主相中的分布见图 2.当 PBDEs 排放到大气中,各同系物在土壤中含最高,48.2%~83.6%,平均 73.8%,其中 BDE183 含量最高,BDE28 最低;沉积物中含量其次,14.8%~19.2%,平均 16.9%,BDE47 最高,BDE183 最低.PBDEs 在大气、水和植被 3 相中的分布均较

少.当 PBDEs 排放至水中,主要分布在沉积物和水中相中,沉积物中含量为 84.1%~95.1%,平均 92.1%,BDE209 最高,BDE28 最低;在水相中含量为 4.84%~15.3%,平均 6.8%,BDE28 最高,BDE183 最低.PBDEs 在大气、土壤和植被 3 相中分布也均较少.

容易富集在研究区域,同时 Pov 较高,残留时间较长,易形成区域性污染.陈来国^[5]研究中,BDE209 含量较其他同系物含量高是一个有力证明.邹梦瑶等^[9]研究显示土壤中有有机质及其疏水性有机化合物的吸附解析作用很大程度上影响着 PBDEs 在环境中的迁移转化.因此有机质将有利于 PBDEs 的吸附,这也是 PBDEs 在土壤和沉积物中分布含量高,残留时间长的一个重要原因.高溴代同系物亲脂性强,因此含量分布相对较高,该结论与文献^[10]报道基本吻合.

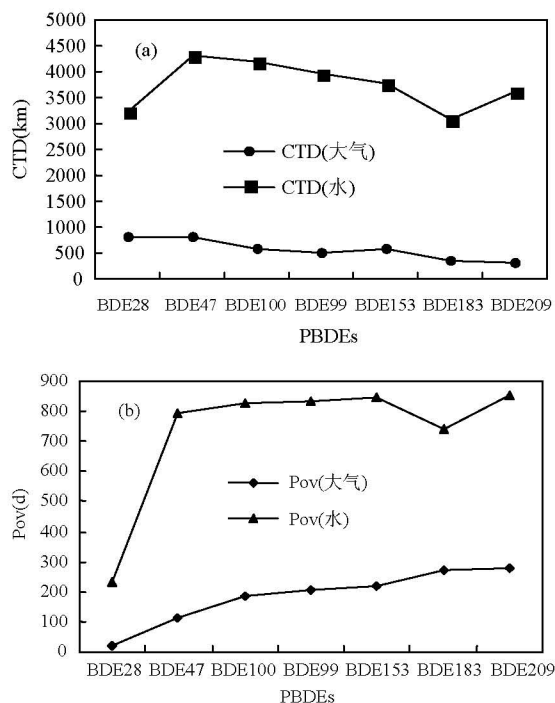


图1 PBDEs 的 CTD 和 Pov 值

Fig.1 The values of CTD and Pov through air and water

2.2 讨论与分析

2.2.1 理化性质对 CTD、Pov 及相间分布差异影响分析

模型输出结果显示,当污染物排放到大气或水体中,基本呈现出当溴代程度升高,CTD 逐渐降低,Pov 升高,在沉积物和土壤中含量分布亦升高的趋势(图 1,图 2).

PBDEs 是一类疏水亲脂性物质,溴代程度越高,水溶解性越弱,越容易吸附在颗粒物或有机质中.BDE28 和 BDE47 作为低溴代同系物,较其他同系物饱和蒸气压更高,即挥发性更强,同时水溶解度大,辛醇水分配系数对数 $\log K_{ow}$ (表 1)低,有利于其通过环境介质进行长距离迁移.高溴代 BDE183 和 BDE209 的 CTD 较低,迁移潜力较弱,

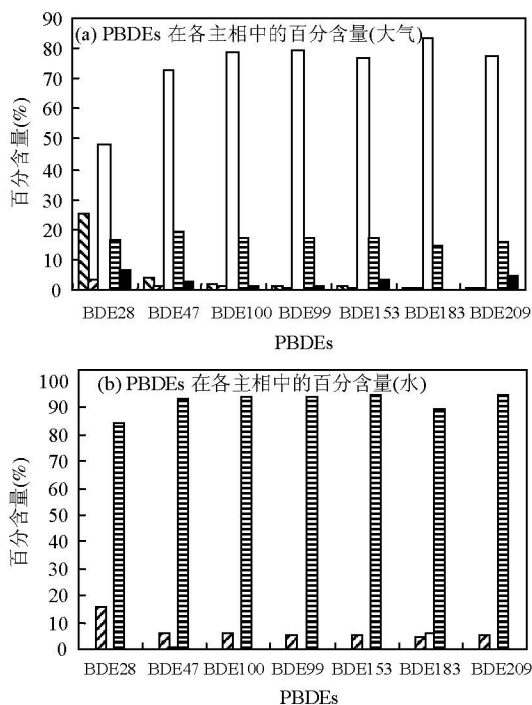


图2 PBDEs 在各主相中的百分含量

Fig.2 The percentages of PBDEs in the main phases

■ 大气 ▨ 水体 □ 土壤 ■ 沉积物 ■ 植被

2.2.2 气候差异对 CTD、Pov 及相间分布差异影响分析

广州地区气候属典型的海洋季风气候类型,大气传输对于 PBDEs 从陆地向水生系统,从高浓度向低浓度迁移有重要的作用.广州夏季盛行东或东南季风,有利于 PBDEs 向内陆地区迁移,而冬季盛行东或东北季风,PBDEs 将借助风力飘向海洋或进行跨境长距离迁移.此外,广州地区年平均气温较高,为 22℃,夏季高

温天气会加剧低溴代同系物释放至大气中,较强的日照条件也将加速高溴代的 PBDEs 发生光降解,产生低溴代的同系物,因此低溴代同系物在大气中的含量相对较高,而高溴代同系物相反.然而总体上各同系物在沉积物和土壤中的含量远比在大气中的含量高,可能由于广州地区雨量充沛,夏季雨水冲刷和稀释作用强,使大气中的 PBDEs 含量降低,在土壤和沉积物中富集量增加.然而冬季为降雨干季,雨水冲刷作用小,空气中含量会相应升高,但大气中含量总体较土壤和沉积物中低,表明 PBDEs 在进行长距离迁移时,CTD 和 Pov 受气候影响不显著,可能主要受其理化性质如较高的辛醇-水分配系数等因素影响.

根据对模拟结果的分析,BDE28 和 BDE47 在污染源区残留时间相对较短,容易从研究区域迁移至偏远地区;BDE183 和 BDE209 富集残留在污染源区的可能性较大,残留时间较长;高溴代 PBDEs 更易富集在沉积物中.该模拟预测结果将为研究者提供参考和指引作用.

2.3 灵敏度分析

通过灵敏度分析(表3,图3),对 CTD 和 Pov 产

生显著影响的有 14 个关键参数.当 PBDEs 排放至大气,影响 CTD 和 Pov 的关键参数有 9 个.其中理化参数 3 个, logKow 影响最显著;环境参数 6 个,大气高度和风速是最主要影响因素.当 PBDEs 排放至水体,产生显著影响的关键参数共 7 个.其中理化参数 2 个, PBDEs 在水中半衰期影响较大;环境参数 5 个,水体流速影响最为显著.影响 PBDEs 排放到大气和水体 Pov 的关键参数各只有 3 个,温度是两种排放方式下影响 Pov 的公共关键参数.通过灵敏度分析得知,风速和温度是广州地区 PBDEs 长距离迁移的主要环境贡献因子.

表 3 灵敏度分析中参数的代码

Table 3 Codes of parameters for sensitivity analysis

代码	意义	代码	意义
A1	辛醇-水分配系数对数	A9	清洗速率
A2	土壤中的半衰期	W1	水中的半衰期
A3	沉积物中的半衰期	W2	沉积物中的半衰期
A4	温度	W3	温度
A5	大气高度	W4	水体深度
A6	风速	W5	水体流速
A7	气溶胶干沉降速率	W6	沉积物沉降速率
A8	降水速率	W7	水相中固体体积分数

注:A-气相;W-水相

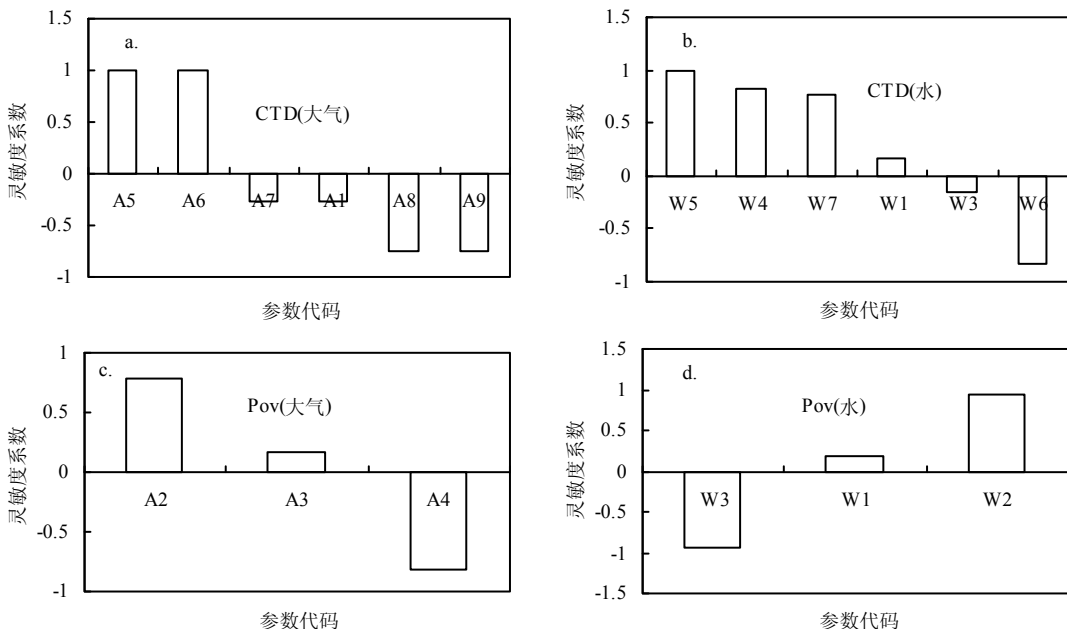


图 3 通过大气和水体的 CTD 和 Pov 的关键参数的灵敏度

Fig.3 The sensitivity of key parameters of CTD and Pov through air and water

2.4 不确定性分析

将已产生的关键参数随机序列输入 TaPL3 (Version 3.0), 重复运算 10000 次得到模型的输出结果分布情况(图 4), 相关统计指标见表 4. 结果表明, 模型输出结果均符合正态分布. 通过水体的 CTD 和 Pov 比大气的输出结果离散程度高, 不确定性相对较大, 可能与关键参数的灵敏度和不同参数间灵敏度的相对平衡有关. 不确定性分析结

果与王宣同等^[15]研究结论基本一致.

表 4 CTD 和 Pov 输出结果的不确定性

Table 4 The uncertainty of CTD and Pov

统计参数	均值	最大值	最小值	标准差
CTD(大气)(km)	296	312	279	4.54
CTD(水)(km)	3700	3909	3504	54.23
Pov(大气)(d)	279	290	268	2.68
Pov(水)(d)	854	893	816	9.64

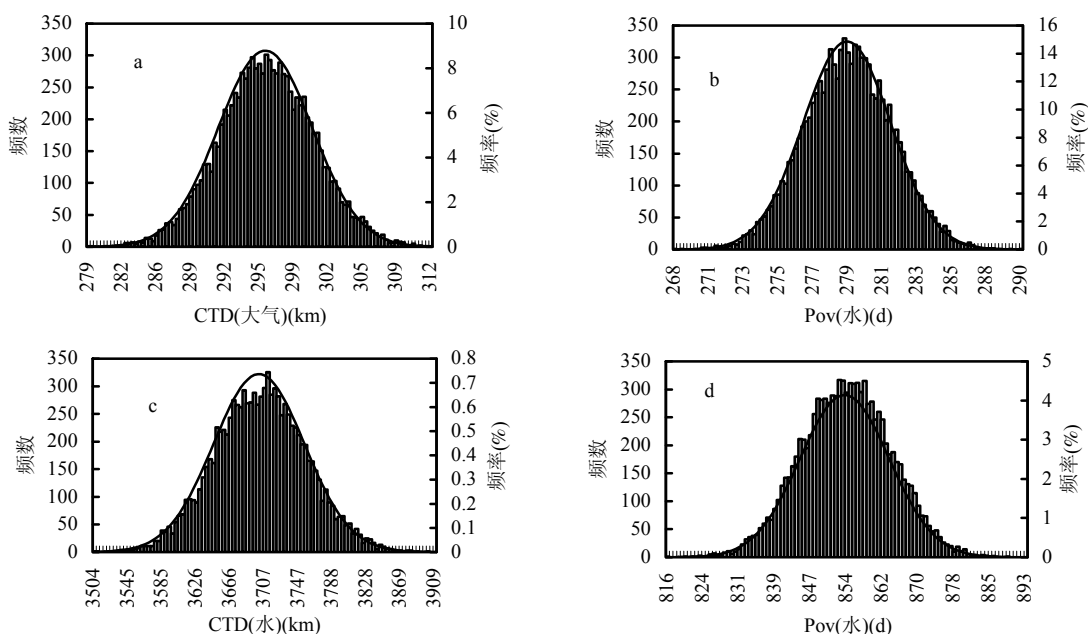


图 4 通过大气和水体的 CTD 和 Pov 正态分布

Fig.4 Normal distribution of CTD and Pov through air and water

2.5 与国外同类研究比较

Wania 等^[11]运用 4 种模型对不同溴代程度 PBDEs 的 LRTP 进行了评估, 对比同一模型 TaPL3 输出结果, PBDEs 的 CTD 为 480~1873km, 与本研究同一化合物的 CTD 相比, 该模型结果略高一些, 但随着溴代程度升高, CTD 逐渐降低. 灵敏度分析结果显示, 风速、大气高度、颗粒物沉降速率和饱和蒸汽压等参数是影响 PBDEs 的 CTD 的关键参数, 本研究中的关键参数为风速和大气高度. Wania 等^[11]的文章中未给出 Pov 值, 故无法与本研究进行比对.

分析结果差异主要原因为: ①本文所使用的

TaPL3(Version 3.0)模型考虑了环境温度对化学物质消解和迁移的影响, 同时在环境构成中包括了植被相, 模型更具可靠性. ②本文参考的物理化学参数与 Wania 等^[11]研究中不同, 主要选自 Mackay, 2006 年版数据手册^[13]. ③Wania 等^[11]研究采用的环境参数是基于 EQC 标准环境, 并非实际环境条件下的参数值, 本文参考的是广州地区实际环境参数, 更具实际参考意义.

3 结论

3.1 研究的 PBDEs 同系物的 CTD(大气)范围为 296~811km, 均值 557km. CTD(水)范围为 3090~

4291km,均值为 3731km.BDE47 迁移距离最远,BDE209 最近,易残留形成点源污染.CTD 与 Pov 基本呈负相关关系,即随溴原子数增多,CTD 逐渐降低,Pov 值逐渐升高.

3.2 当 PBDEs 排放到大气中,各同系物主要分布在土壤和沉积物两相中;PBDEs 排放至水体,各同系物主要分布在沉积物和水相中,但沉积物中含量平均为 92.1%,而水相中为 6.8%,沉积物中分布量约为水相的 13 倍.因此沉积物和土壤成为 PBDEs 在研究区域的汇.

3.3 灵敏度分析显示,对 BDE209 的 CTD 和 Pov 值产生影响的关键参数共有 14 个,理化参数 4 个,分别为 $\log K_{ow}$,土壤、沉积物和水中的半衰期.环境参数 10 个,产生影响较显著的是大气高度、风速和水体流速 3 个参数.

3.4 以 BDE209 为例进行不确定性分析,输出结果符合正态分布,CTD 和 Pov 均较集中,总体呈现大气输出结果比水体集中稳定.

参考文献:

- [1] 王学彤,王 飞,贾金盼,等.电子废物拆解区农业土壤中多溴二苯醚的分布与来源 [J]. 中国环境科学, 2010,30(12):1664-1669.
- [2] 唐学玺,柯 可,王 悠.多溴联苯醚在海洋环境中的分布及其对海洋生物的影响研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2010,(1):36-46.
- [3] 向彩虹,罗孝俊,余 梅,等.珠江河口水生生物中多溴联苯醚的分布 [J]. 环境科学, 2006,27(9):1732-1737.
- [4] 周 冰,仇雁翎.多溴联苯醚及其环境行为 [J]. 环境科学与技术, 2008,31(5):57-61.
- [5] 陈来国.广州市大气环境中多溴联苯醚 PBDEs 和多氯联苯 PCBs 的初步研究 [D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2009.
- [6] 黄玉妹,陈来国,文丽君,等.广州市室内尘土中多溴联苯醚的分布特点及来源 [J]. 中国环境科学, 2009,29(11):1147-1152.
- [7] 陈多宏,毕新慧,钟流举,等.典型电子垃圾拆解区大气中多溴联苯醚(PBDEs)的季节变化特征 [J]. 生态环境学报, 2010,19(5): 1068-1072.
- [8] 罗孝俊,余 梅,麦碧娴,等.多溴联苯醚(PBDEs)在珠江口水体中的分布与分配 [J]. 科学通报, 2008,53(2):141-146.
- [9] 邹梦遥,龚 剑,冉 勇.珠江三角洲流域土壤多溴联苯醚 (PBDEs)的分布及环境行为 [J]. 生态环境学报 2009,18(1): 122-127.
- [10] 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.
- [11] Wania Frank, Dugani Chandrasagar B. Assessing the long-range transport potential of polybrominated diphenyl ethers: A comparison of four multimedia models [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2003,22(6):1252-1261.
- [12] Mackay D, Guardo A D, Paterson S, et al. Evaluating the environmental fate of a variety of types of chemicals using the EQC Model [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15:1627-1637.
- [13] Mackay D. Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals [M]. CRC Press/Taylor and Francis, 2006.
- [14] Mark D Rowe. Modeling contaminant behavior in lake superior: a comparison of PCBs, PBDEs, and mercury [D]. Michigan Technological University, 2009.
- [15] 中国气象局.中国气象科学数据共享服务网:中国(1971-2000 年)气候标准值[EB/OL].北京:国家气象信息中,2009[2009-04-05]. <http://cdc.cma.gov.cn/shishi/climate.jsp?stprovid=广东&station=59287>.
- [16] 广州市地方编纂委员会.广州市志(卷二) [M]. 广州:广州出版社, 1998.
- [17] 广州市统计局.广州统计年鉴 2010 [M]. 北京:中国统计出版社, 2010.
- [18] 王宣同,唐孝炎,胡建信.利用 TaPL3 模型计算 p,p'-DDT 在天津地区的长距离传输潜力 [J]. 环境科学学报, 2005,25(4):491-496.
- [19] 唐纳德·麦凯.环境多介质模型-逸度方法 [M]. 北京:化学工业出版社, 2007.

作者简介: 吴有方(1987-),女,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为典型 POPs 区域环境过程.