

西安城区大气中多氯联苯的气粒分配研究

韩德明¹, 叶磊¹, 张承中^{1*}, 李文龙², 马万里², 李一凡² (1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 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, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了解西安城区大气中多氯联苯(PCBs)的气粒分配规律, 于 2012 年春季对西安城区大气中气态和颗粒态样品进行每周一次的主动采样. 结果表明, 西安城区大气中 PCBs 的总浓度(气态和颗粒态)为 62.05~454.18 pg/m³, 主要以气态为主. 由 Clausius-Clapeyron 方程得到的斜率较陡(-5193.24), 表明春季大气中的 PCBs 主要受西安城区附近地面挥发释放的影响. PCBs 的气粒分配系数(K_p)与过冷饱和蒸汽压(P_L^0)高度相关, 由 $\log K_p$ 和 $\log P_L^0$ 线性回归得到的斜率 m_i (-0.46~-0.37) 均高于平衡状态理论值 -1, 说明西安城区大气中的 PCBs 气粒分配尚未达到平衡状态. 采用 Junge-Pankow 吸附模型和 Harner-Bidleman 吸收模型对 PCBs 颗粒态百分比(ϕ)及 K_p 进行了模拟, 结果显示两种模型均较好地预测了 PCBs 的气粒分配行为, 但与实验测得的值相比, 两种模型均高估了 ϕ 值及 K_p 值.

关键词: 多氯联苯(PCBs); 气粒分配; 大气; 西安市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2014)10-2466-06

Gas-particle partitioning of polychlorinated biphenyls in air of Xi'an City. HAN De-ming¹, YE Lei¹, ZHANG Cheng-zhong^{1*}, LI Wen-long², MA Wan-li², LI Yi-fan² (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). *China Environmental Science*, 2014, 34(10): 2466~2471

Abstract: In order to study the gas-particle partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air of Xi'an City, China, both gas and particle phases samples were collected using an active air sampler on a weekly base during spring in 2012. The results showed that the total concentration (gas plus particle phases) of PCBs ranged from 62.05 to 454.18 pg/m³, with much higher concentration in gas phase than that in particle phase. The steep slope (-5193.24) obtained from Clausius-Clapeyron equation indicated that PCBs concentration in Xi'an City was mainly influenced by the evaporation from adjacent land surface. Gas-particle partitioning coefficients (K_p) of PCBs were well correlated with the sub-cooled vapor pressure (P_L^0) however, the slopes (-0.46~-0.37) obtained from linear regression between $\log K_p$ and $\log P_L^0$ were shallower than the theoretical value of -1 at equilibrium condition. The results indicated that partitioning of PCBs between the gas and particle phases in the air in Xi'an City was under non-equilibrium condition. The particle bound fraction (ϕ) and K_p value were estimated using the Junge-Pankow adsorption model and Harner-Bidleman absorption model, the result showed that gas-particle partitioning of PCBs was well simulated by both models, however, both models tended to overestimate the values of ϕ and K_p compared with those obtained from field measurement.

Key words: polychlorinated biphenyls(PCBs); gas-particle partitioning; air; Xi'an City

多氯联苯(PCBs)曾被大量用于生产变压器油、电容器绝缘油、油漆添加剂等工业产品. PCBs 在环境介质中难以降解, 科学研究表明 PCBs 会对生物及人类的生殖、免疫、神经系统造成干扰破坏, 并在体内累积而对生物及人类健康构成威胁. PCBs 已于 20 世纪 70 年代末期在全球范围内停止生产和使用, 是首批被列入《斯德哥尔摩公

约》的持久性有机污染物之一.

PCBs 是半挥发性有机污染物, 在大气中以气态和颗粒态的形式存在, 其气粒分配行为不仅会影响其在大气中的长距离输送作用, 还会影响

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101493)

* 责任作者, 教授, zhangchengzhong4711@sina.com

其干湿沉降、光降解以及在大气中的停留时间^[1],并最终影响人体暴露及健康风险.基于过冷饱和蒸汽压(P^0_L)的 Junge-Pankow 模型和基于辛醇-空气分配系数(K_{OA})的 Harner-Bidleman 模型,分别对 PCBs 吸附在颗粒物表面和吸收到颗粒物有机质内部进行模拟,均已被成功用于描述大气中 PCBs 的气粒分配行为^[2-3].

我国在 1965~1974 年期间曾大量生产三氯代 PCBs 产品(约占 90%)和五氯代 PCBs 产品(约占 10%),西安是当时的 PCBs 原料的主要生产地和 PCBs 产品的使用地之一.本课题组前期的研究表明^[4],西安大气中仍能够检测到 PCBs 的残留,但是关于该地区大气中 PCBs 的气粒分配规律的研究未见报道.本研究于 2012 年春季对西安城区进行了颗粒态和气态大气样品的同步采集,对西安地区大气中 PCBs 的气粒分配进行了研究,并用 Junge-Pankow 吸附模型和 Harner-Bidleman 吸收模型对气粒分配行为进行了进一步探讨.

1 实验部分

1.1 样品采集

采样点设置在西安建筑科技大学环境与市政工程学院楼顶,距地面约 28m,周围无明显的污染排放源及障碍物.利用 KB-1000 型大流量主动采样器进行大气样品采集,采样流速为 $0.8\text{ m}^3/\text{min}$,颗粒态和气态样品分别通过玻璃纤维滤膜和 2 个串联的聚氨酯泡沫进行采集.采样前,玻璃纤维滤膜和聚氨酯泡沫分别经过烘烤、索氏提取去除有机物的干扰.大气样品采集时间为 2012 年的 2 月初至 4 月末,每周进行一次连续 24h 的采集,共得到 13 对大气样品(气态和颗粒态).

1.2 样品处理和分析

大气样品的处理和分析过程均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.加入代标指示物(PCB155)后,气态和颗粒态样品分别用丙酮、正己烷混合液($V:V,1:1$)和二氯甲烷进行索氏提取 24h.提取液加入 10 mL 异辛烷后,经过旋转蒸发、浓缩至 2 mL.浓缩后的提取液过湿法活性硅胶柱净化(加入 7g 已经在 130°C 烘烤 16h 进行活化的

硅胶,再加入 2 g 已在马弗炉中 600°C 烘烤 7h 的无水硫酸钠).用正己烷和二氯甲烷($V:V,1:1$)淋洗,淋洗液再次经过旋转蒸发和高纯氮气吹脱浓缩到 0.9 mL,加入内标 PCB30、PCB204,定容到 1.0mL,振荡混匀待分析.

PCBs 的测定采用 Agilent 气相色谱质谱联用仪(6890-5975N)进行,色谱柱为 Agilent 的 DB-5MS 柱($60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\mu\text{m}$),高纯氮的载气流速为 $0.8\text{ mL}/\text{min}$.进样量为 $2.0\mu\text{L}$,采用不分流进样模式,进样口温度为 250°C ,检测器温度为 300°C .气相色谱升温程序为: 90°C (保持 1min),以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升到 160°C ,然后以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 升到 275°C (保持 8min).运行方式采用选择离子扫描模式(SIM),利用标准样品中目标物的保留时间和实际样品中目标物的保留时间比较进行验证.

1.3 质量保证与质量控制

为保证所获得的数据的真实性与可靠性,大气样品分析前对所有样品添加代标回收率指示物 PCB155.结果表明,PCB155 的在 GFF 中的回收率为 $109.97\%\pm 26.61\%$,在 PUF 中的回收率为 $115.69\%\pm 21.16\%$,其回收率均满足痕量分析的要求.实验室空白中目标物的浓度均低于检出限,表明实验过程未受到目标物的污染.本文采用 PCB30 和 PCB204 作为内标物做内标法定量分析,以降低基质的干扰.仪器检测限(IDL)定为三倍信噪比($S/N\geq 3$),检测限范围为 $0.04\sim 0.26\text{ ng}$.

2 结果与讨论

2.1 污染水平

对 84 种 PCBs 的同系物进行了定性,结果表明共有 63 种同系物(包括共溢出同系物)的浓度高于检出限. $\sum_{63}\text{PCBs}$ 总浓度范围为 $62.05\sim 454.18\text{ pg}/\text{m}^3$,平均浓度为 $(281.57\pm 134.11)\text{ pg}/\text{m}^3$,气态和颗粒态的浓度分别为 $56.42\sim 447.49\text{ pg}/\text{m}^3$ 和 $2.18\sim 15.02\text{ pg}/\text{m}^3$,颗粒态 PCBs 占总浓度的平均比例为 2.17%(图 1).西安大气中 PCBs 的同族体的组成见图 2,PCBs 同族体中以 4 氯和 3 氯代 PCBs 为主,占总含量的 65.55%~88.69%.2 氯、5 氯平均分别占 14.20%和 5.75%,而 6 氯代 PCBs 及以上仅占 1.26%,这些与国内及亚洲其他城市

大气中 PCBs 的组成基本一致^[5,10].与国内外其他城市大气相比,西安城区大气中 PCBs 的浓度水平与大连、土耳其布尔萨的浓度水平相近,明显低于台州、广州、芝加哥等城市大气中 PCBs 的污染水平,总体比较,西安大气中 PCBs 的浓度在国内外处于中等偏低的水平(表 1).

2.2 气态浓度与温度的关系

PCBs 能通过土气交换、水气交换、植物表面的挥发等方式进入大气中,大气中的 PCBs 气态浓度与温度的关系可以表示为 Clausius-Clapeyron 方程:

$$\ln P = \frac{\Delta H_{SA}}{R} \cdot \frac{1}{T} + \text{const} \tag{1}$$

式中: P 为 PCBs 的气态浓度分压,atm; ΔH_{SA} 为表面-空气交换焓值,J/mol; R 为理想气体常数,8.314J/mol·K; T 为温度,K;const 为常数.将气态 PCBs

浓度通过理想气体法则转换成分压 P 与平均温度的倒数进行线性回归分析,得到斜率和截距值.

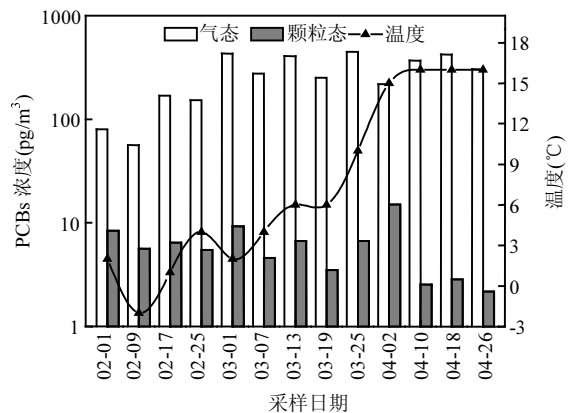


图 1 西安市大气中 PCBs 的气态与颗粒态浓度
Fig.1 Concentration of PCBs in gas and particle phases in air in Xi'an City

表 1 国内外大气中 PCBs 的浓度比较(pg/m³)
Table 1 Comparison of concentrations of PCBs in air in the world (pg/m³)

城市	采样点性质	采样时间	检出种类	平均浓度*
新加坡肯特岗 ^[5]	城市	2006,11~12	23	6.3(p); 25.4(g)
德国 Melpitz ^[6]	农村	2001,4	54	5.5(p); 105.0(g)
南非夸祖鲁-纳塔尔 ^[7]	工业区	2004,8~2005,9	82	7.7(p); 120.3(g)
韩国首尔 ^[8]	城市	1999,7~2000,1	38	130.41(p+g)
土耳其 Bursa ^[9]	工业区	2004.3~2005.7	37	69.2(p); 434(g)
美国芝加哥 ^[3]	城市	2006,11~2007,8	50	90(p); 1820(g)
中国大连 ^[10]	城市	2007,8~2008.7	13	200.87(p); 93.34(g)
中国广州 ^[11]	工业区	2004,6	64	935(p+g)
中国台州 ^[3]	工业区	2006,7; 2007,1	38	12407(p+g)
中国西安(本研究)	城市	2012,2~4	63	6.10(p); 268.22(g)

注: * :p指颗粒态,g指气态

Wania 等^[12]认为,气态浓度分压受温度影响显著(较陡的斜率)意味着大气浓度主要受采样点附近环境表面挥发的影响,而受温度影响程度低(平缓的斜率)则表示大气浓度主要来源于大气的长距离输送作用.本研究得到的斜率值为-5193.24($R^2=0.39,P=0.02$)相对国外其他城市(平均为-4789±3384)较陡^[6,9],表明西安城区春季大气中的 PCBs 浓度主要受附近地面挥发释放的影响,而长距离输送作用的贡献则相对较小.

2.3 气粒分配

气粒分配是影响 PCBs 在大气中输送、沉降、降解等行为的重要因素^[13],受 TSP、温度、颗粒

大小及颗粒中有机成分等因子影响,一般用气粒分配系数 K_p 表示:

$$K_p = \frac{F/TSP}{A} \tag{2}$$

式中: F 、 A 分别指 PCBs 的颗粒态、气态浓度,pg/m³;TSP 总悬浮颗粒物,μg/m³.

PCBs 同系物在气态与颗粒态的分配:

$$\log K_p = m_r \log P_L^0 + b_r \tag{3}$$

$$\log P_L^0 = m_L/T + b_L \tag{4}$$

式中: P_L^0 指过冷饱和蒸汽压,Pa;系数 m_r 和 b_r 通过 $\log K_p$ 和 $\log P_L^0$ 线性回归分析得到; m_L 、 b_L 参考 Falconer 等^[14]提供的值; T 指采样时的平均温度,K.

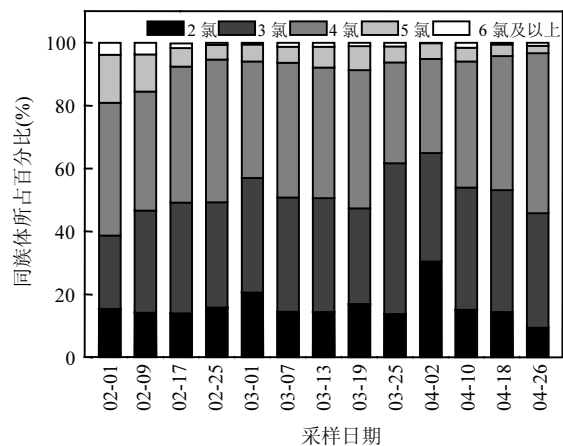


图 2 PCBs 的同族体组成
Fig.2 Composition of PCBs homologues

一般认为 PCBs 在大气中气粒分配趋于平衡主要存在 2 种机制^[15-16]:一种是吸附机制,PCBs 被颗粒物表面活性吸附位所吸附,吸附作用力为范德华力、化学键等;另一种是吸收机制,即 PCBs 被吸收到颗粒物有机相内部像液态一样的有机膜中,吸收作用力与 PCBs 在颗粒物中的溶解度以及颗粒物粒径有关.不论哪种机制占主导地位,当气粒分配达到平衡状态时^[16],斜率 m_r 的值均应当接近-1,但也有学者指出, m_r 值不等于-1 并不等同于气粒分配没有达到平衡,并指出浓度的变化、采样期间温度的波动等是致使 m_r 值偏离-1 的原因.西安春季各月样品中 PCBs 的 $\log K_P$ 和 $\log P^o_L$ 均显著相关($R^2=0.23\sim0.47, P<0.05$),如图 3 所示.二月、三月、四月的斜率 m_r 分别为-0.39、-0.46、-0.37,整个春季的 m_r 为-0.39,均比达到平衡时的理论值-1 大,与其他城市的研究结果比较见表 2.He 等^[5]、Kim 等^[17]分别通过对新加坡肯特岗和韩国京畿道的大气中 PCBs 的气粒分配进行研究指出,采样期间温度高比温度低时的 m_r 值更接近-1,本研究中也发现类似规律,但温度与斜率值相关性没有统计意义.相对较高的 m_r 可能说明,西安城区春季大气中 PCBs 的气粒分配尚未达到平衡状态.引起上述现象的可能原因是西安城区周边(如西郊工业区)的二次污染源(被 PCBs 污染的土壤、水体、植物表面等)中的 PCBs 通过土壤-空气交换、水-空气交换及挥发等方式进入空气中;而据报道^[18]西安市大气中 TSP 中有 36.3%~42.2%

来自土壤尘,51%~60%来自“较干净”的烟煤、建筑、冶金等尘;被污染的气态 PCBs 缓慢吸附在“较干净”的颗粒物表面或被污染的颗粒物不断与“较干净”的大气进行缓慢的解吸附.

表 2 国内外大气中 $\log K_P$ 和 $\log P^o_L$ 线性回归方程的斜率、截距的比较

Table 2 Comparison of slopes and intercepts for the regression of $\log K_P$ VS $\log P^o_L$ plots in the world				
城市	性质	m_r	b_r	R^2
土耳其 Bursa ^[9]	城市	-0.36	-3.87	0.42
德国 Melpitz ^[6]	农村	-0.40	-3.60	0.32
美国芝加哥 ^[2]	城市	-0.51	-4.28	0.57
新加坡肯特岗 ^[5]	城市	-0.58	-4.72	0.72
日本横浜 ^[17]	城市	-0.74	-5.42	0.72
中国台州 ^[3]	工业区	-1.44	-3.87	0.42
中国西安(本研究)	城市	-0.39	-5.22	0.27

运用 Junge-Pankow 吸附模型和 Harner-Bidleman 吸收模型分别对大气中的 PCBs 气粒分配进行进一步的探讨,将模型预测的颗粒态百分比(φ)和气粒分配系数 K_P 与实测值进行对比.

Junge-Pankow 模型中, φ 、 K_P 分别表示为:

$$\varphi = \frac{C_p}{C_g + C_p} = \frac{c\theta}{P^o_L + c\theta} \tag{5}$$

$$\log K_P = \log \frac{c\theta}{TSP} - \log P^o_L \tag{6}$$

式中: $C_p(\text{pg}/\mu\text{g})$ 和 $C_g(\text{pg}/\text{m}^3)$ 分别是大气中颗粒态和气态浓度; θ 是总悬浮颗粒物的有效表面积, m^2/m^3 ; c 为基于化学性质及表面冷凝热的常数.在模型预测中^[5], $c=0.172\text{Pa}\cdot\text{m}$,城市、农村和干净背景的 θ 分别取 1.1×10^{-3} , 1.5×10^{-4} , $4.2\times10^{-5}\text{m}^2/\text{m}^3$.

Harner-Bidleman 吸收模型的表达式如下:

$$\varphi = \frac{C_p}{C_g + C_p} = \frac{K_P \times TSP}{1 + K_P \times TSP} \tag{8}$$

$$\log K_P = \log K_{OA} + \log f_{OM} - 11.91 \tag{9}$$

$$K_{OA} = \frac{K_{OW}RT}{H} \tag{10}$$

式中: f_{OM} 指颗粒物中有机质百分含量,其取值与当地环境因素及颗粒物特征有关,对 K_P 值的预测中 f_{OM} 取 20%; K_{OA} 为辛醇-空气分配系数; K_{OW} ^[20] 为辛醇-水分配系数; R 为理想气体常数, 8.314

$J/\text{mol}\cdot\text{K}$; T 为环境温度, K ; H 为亨利常数.

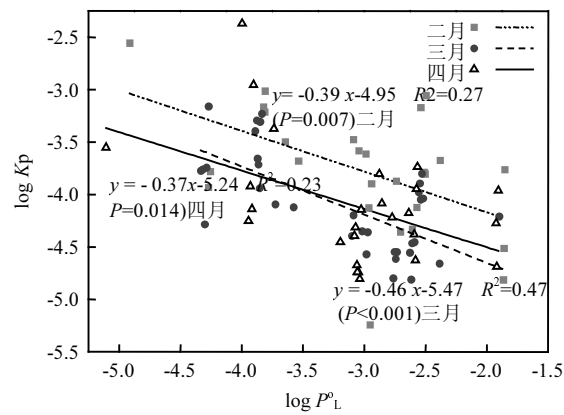


图 3 $\log K_p$ 和 $\log P^o_L$ 线性回归
Fig.3 Regression plots of $\log K_p$ VS $\log P^o_L$

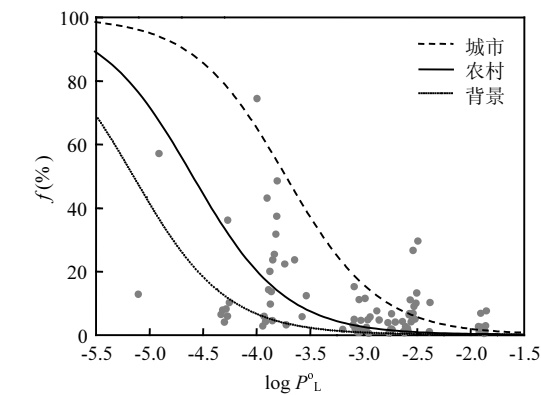


图 4 ϕ 的实测值与 Junge-Pankow 模型预测值比较
Fig.4 Comparison of ϕ between the measured result and the prediction from Junge-Pankow model

将 Junge-Pankow 模型中和 Harner-Bidleman 模型中预测的 ϕ 值和实测值进行比较, 结果如图 4、图 5 所示. 在 Junge-Pankow 模型中, 发现 ϕ 的实测值比采用城市的 θ 预测的值要低, 绝大部分介于采用城市和农村预测线之间, 这与 Kim 等^[17]对韩国京畿道的研究结果类似, 这可能与参数 θ 的假设值有关. 当 ϕ 较低时 ($\phi < 20\%$) 时, ϕ 的实测值更接近于农村预测线. 而对于 Harner-Bidleman 吸收模型, 大部分 PCBs 同系物的 ϕ 实测值比颗粒中 10% 有机质预测线低. 当 ϕ 较低时 ($\phi < 10\%$) 时, ϕ 的实测值散布在模型预测线两侧. 由于 f_{OM} 的取值因采样点环境而异, 本次以经验

值替代西安大气颗粒物的 f_{OM} 的真实值可能是致使 Harner-Bidleman 模型高估西安大气中 ϕ 值的主要原因.

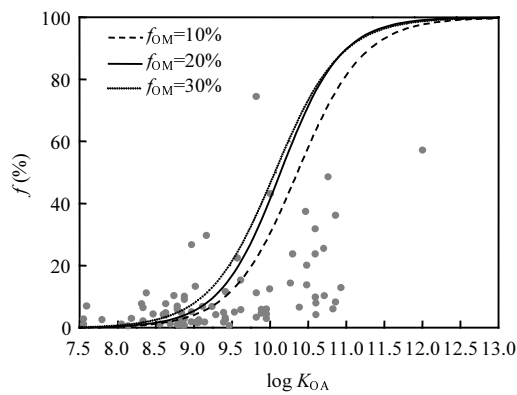


图 5 ϕ 的实测值与 Harner-Bidleman 模型预测值比较
Fig.5 Comparison of ϕ between the measured result and the prediction from Harner-Bidleman model

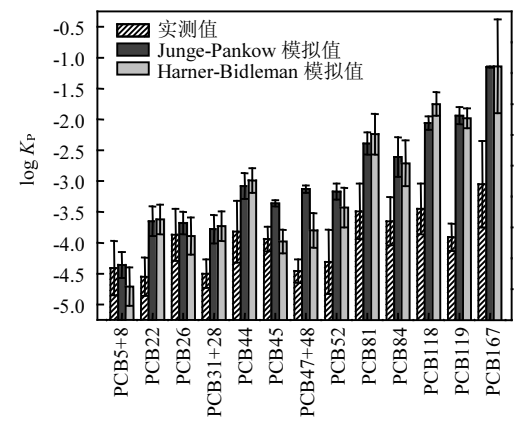


图 6 K_p 的实测值与模型预测值比较
Fig.6 Comparison of K_p between the measured result and the predictions from models

将气态和颗粒态中的浓度均大于检出限的 PCBs 的 K_p 的模型预测值与实测值进行比较, 结果见图 6. 可以发现, Junge-Pankow 模型和 Harner-Bidleman 模型的预测均高估了其 K_p 值. 在 Junge-Pankow 模型中, 低氯代 PCBs 部分模型预测的 K_p 值比实测值高 0.05~1.14 个 log 单位, 而五氯代以上 PCBs 则高 1.04~1.97 个 log 单位, 这与 Manolis 等^[6]对德国某工业区预测的 K_p 值在低氯代态 PCBs 部分比实测值低而在高氯代部分比实测值高的结果

有所不同,可能是因为西安春季大气中 PCBs 的气粒分配未达到平衡状态.在 Harner-Bidleman 模型预测中,部分低氯代 PCBs(如 PCB5+8、PCB26 和 PCB45)的 K_p 预测值比实测值低,其余均比实测值高.将 2 种模型对 K_p 的预测值进行比较,发现在二氯及四氯代 PCBs 部分,吸收模型比吸附模型预测值小,更接近于实测值,而三氯及五氯代 PCBs 部分二者预测的结果接近.

3 结论

3.1 西安城区大气中 PCBs 总浓度(气态和颗粒态)为 $62.05\sim 454.18\text{pg}/\text{m}^3$,气态和颗粒态的浓度分别为 $56.42\sim 447.49\text{pg}/\text{m}^3$ 和 $2.18\sim 15.02\text{pg}/\text{m}^3$,在国内外处于中等偏低的污染水平.PCBs 同族体中以四氯和三氯代 PCBs 为主.

3.2 西安城区的 Clausius-Clapeyron 方程斜率相对较高,表明西安城区春季大气中的 PCBs 浓度主要受近地面挥发释放的影响,而长距离输送作用的贡献则相对较小.

3.3 由 $\log K_p$ 和 $\log P^0_L$ 线性回归得到的斜率大于-1,表明西安城区大气中的 PCBs 气粒分配未达到平衡状态.运用 Junge-Pankow 吸附模型和 Harner-Bidleman 吸收模型对颗粒态所占百分比 ϕ 和气粒分配系数 K_p 进行预测,与实测值进行比较发现,两种模型均高估了 ϕ 值和 K_p 值.

参考文献:

- [1] Lohmann R, Harner T, Thomas G O, et al. A Comparative study of the gas-particle partitioning of PCDD/Fs, PCBs, and PAHs [J]. Environmental Science and Technology, 2000,34:4943-4951.
- [2] Hu D F, Lehmler H J, Martinez A, et al. Atmospheric PCB congeners across Chicago [J]. Atmos. Environ., 2010,44:1550-1557.
- [3] Han W L, Feng J L, Gu Z P Z, et al. Polychlorinated biphenyls in the atmosphere of Taizhou, a major e-waste dismantling area in China [J]. J. Environ. Sci., 2010,22(4):589-597.
- [4] 韩德明,张承中,马万里,等.西安城区大气中多氯联苯季节变化及来源解析 [J]. 环境科学学报, 2014,34(7):1818-1824.
- [5] He J, Balasubramanian R. A study of gas/particle partitioning of SVOCs in the tropical atmosphere of Southeast Asia [J]. Atmospheric Environment, 2009,43:4375-4383.
- [6] Manolis M, Euripides G S. Atmospheric concentration characteristics and gas-particle partitioning of PCBs in a rural area of eastern Germany [J]. Environ. Poll., 2007,147:211-221.
- [7] Batterman S, Chernyak S, Gouden Y, et al. 2009. PCBs in air, soil and milk in industrialized and urban areas of KwaZulu-Natal, South Africa [J]. Environmental Pollution, 2009,157:654-663.
- [8] Yeo H G, Choi M, Chun M, et al. Concentration characteristics of atmospheric PCBs for urban and rural area, Korea [J]. Science of the Total Environment, 2004,324:261-270.
- [9] Cindoruk S S, Tasdemir Y. Characterization of gas/particle concentrations and partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) measured in an urban site of Turkey [J]. Environ. Poll., 2007,148:325-333.
- [10] 李 燕.大连市大气中多氯联苯的时空分布与组分特征研究 [D]. 大连:大连海事大学, 2009.
- [11] 陈来国,麦碧娴,许振成,等.广州市夏季大气中多氯联苯和多溴联苯醚的含量及组成对比[J].环境科学学报, 2008,28(1):474-477.
- [12] Wania F, Haugen J E, Lei Y D, et al. Temperature dependence of atmospheric concentrations of semi-volatile organic compounds [J]. Environmental Science and Technology, 1998,32:1013-1021.
- [13] 马万里,李一凡,孙德智,等.哈尔滨市大气中多环芳烃的初步研究 [J]. 中国环境科学, 2010,30(2):145-149.
- [14] Falconer R L, Bidleman, T F. Vapor pressures and predicted particle/gas distributions of PCB congeners as functions of temperature and ortho-chlorine substitution [J]. Atmospheric Environment, 1994,28 (3):547-554.
- [15] Pankow J F. Absorption model of gas/particle partitioning of organic compounds in the atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 1994,28:185-188.
- [16] Pankow J F. Interdependence of the slopes and intercepts from log-log correlations of measured gas-particle partitioning and vapor pressure: 1, theory and analysis of available data [J]. Atmospheric Environment, 1994,29:107-116.
- [17] Kim K S, Masunaga S. Behavior and source characteristic of PCBs in urban ambient air of Yokohama, Japan [J]. Environmental Pollution, 2005,138:290-298.
- [18] Kim D G, Choi K I, Lee D H, et al. Gas-particle partitioning and behavior of dioxin-like PCBs in the urban atmosphere of Gyeonggi-do, South Korea [J]. Atmos. Res., 2011,101: 386-395.
- [19] 谢 骅,黄世鸿,李如祥.我国若干地区总悬浮颗粒物和沉积尘来源解析 [J]. 气象科学, 1999,19(1):26-32.
- [20] Cindoruk S S, Tasdemir Y. Characterization of gas/particle concentrations and partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) measured in an urban site of Turkey [J]. Environmental Pollution, 2007,148:325-333.

作者简介: 韩德明(1989-),男,江西万年人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要从事大污染物控制研究.