

北京市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中多氯联苯的污染水平与分布

孙俊玲¹, 刘大锰¹, 张庆华², 杨 雪¹

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心 环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 2008年1月同时采集了北京市市区/交通干道(中国地质大学(北京)东门及测试楼顶)、工业区(首钢集团焦化厂、高井热电厂)和背景点(十三陵)大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 样品。依据US EPA 1668A方法, 采用同位素稀释、高分辨率气相色谱/高分辨率质谱(HRGC/MS)联用技术, 对比分析了 $PM_{2.5}$ 中19种多氯联苯(PCBs)的质量浓度、分布特征及来源。结果表明, 5个采样点 $PM_{2.5}$ 的质量浓度范围为 $101.85 \sim 145.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 日均值为 $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 比美国1997年制定的日均标准($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$)高83%, 属严重污染。 $PM_{2.5}$ 中 Σ PCBs 的质量浓度和毒性当量(TEQ)分别为 $7.2 \sim 16.2 \text{ pg}/\text{m}^3$ (平均值 $10.9 \text{ pg}/\text{m}^3$)、 $8.29 \sim 17.81 \text{ fgWHO-TEQ}/\text{m}^3$ (平均值 $13.58 \text{ fgWHO-TEQ}/\text{m}^3$), 与其他国家和地区比较, 北京市大气PCBs的污染处于较低水平。PCBs最高浓度出现在工业区, 其次是市区, 背景点最低, 化石燃料的不完全燃烧是北京市PCBs的主要来源。研究成果将为北京市大气环境中持久性有机污染物(POPs)的污染防治提供科学依据。

关键词: $PM_{2.5}$; 多氯联苯(PCBs); 同位素稀释; 毒性当量(TEQ); 北京市

中图分类号: X132.1; X513

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2009)02-0378-07

Pollution Level and Spatial Distribution of Polychlorinated Biphenyls from Atmospheric Matter $PM_{2.5}$ in Beijing

SUN Jun-ling¹, LIU Da-meng¹, ZHANG Qing-hua², YANG Xue¹

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In January 2008, $PM_{2.5}$ was sampled concurrently at five contrasting sites: two urban sites (the east gate of China University of Geosciences(CUGB) and the roof of a testing building within CUGB), two industrial sites (coking plant of Capital Steel Plant and a thermoelectric plant), and a background site (Ming Tombs) in Beijing, China. The concentration and spatial distribution of 19 polychlorinated biphenyls (PCBs) congeners were analyzed with isotope dilution and high resolution gas chromatography/high resolution mass spectrometry (HRGC/HRMS) based on US EPA 1668A method. $PM_{2.5}$ concentrations were in the range of $101.85 \sim 145.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with mean value of $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which was 83% higher than the US daily average standard($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), suggesting the atmospheric $PM_{2.5}$ pollution is very serious in Beijing city. Σ 19PCBs and Σ TEQ concentrations varied from $7.2 \sim 16.2 \text{ pg}/\text{m}^3$ and $8.29 \sim 17.81 \text{ fgWHO-TEQ}/\text{m}^3$, respectively, with an average concentration of $10.9 \text{ pg}/\text{m}^3$ and $13.58 \text{ fgWHO-TEQ}/\text{m}^3$. PCBs levels were lower in Beijing compared to other metropolises in the world. The highest PCBs concentration was observed in industrial sites followed by urban sites and background site, incomplete combustion of fossil fuel were main sources of PCBs in Beijing. The aim of this work was to better understand the overall PCBs levels, to identify the source of PCBs in Beijing city, and to provide the scientific foundation for preventing the atmospheric persistent organic pollutants (POPs) pollution.

Key words: $PM_{2.5}$; polychlorinated biphenyls(PCBs); isotope dilution; toxic equivalent(TEQ); Beijing city

收稿日期: 2008-09-23; 改回日期: 2009-03-10; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40475049, 20777079, 20607025); 北京市自然科学基金项目(8032012)。

作者简介: 孙俊玲, 女, 工程师, 博士研究生, 1972年出生, 能源地质工程专业, 主要从事大气环境中持久性有机污染物的研究。Email: jlsun990406@sina.com。

0 引言

多氯联苯(PCBs)是大气中广泛存在的一类重要的持久性有机污染物(POPs), 具有持久性、毒性、生物蓄积性和远距离迁移性, 对人体健康和生态系统具有严重威胁性^[1], 近年来逐渐引起了国际社会的广泛关注。PCBs是半挥发性有机污染物(SVOCs), 可以从受污染的水、土壤、沉积物、含PCBs的材料以及其焚烧而挥发到大气中。PCBs共有209种单体, 其中12种共平面PCBs因为具有与二噁英(PCDD/Fs)相似的毒性, 被称为类二噁英多氯联苯(DL-PCBs), 世界卫生组织(WHO)建议将它们和PCDDs/Fs一起测定并计算总毒性当量。以往的研究成果表明, 大气传输是环境污染物特别是POPs的主要迁移途径^[2-4]。

作为空气中的重要介质, $PM_{2.5}$ 对PCBs在环境中的迁移扩散起着重要作用。 $PM_{2.5}$ 可长期停留在大气中, 并可不受阻挡地直接进入肺部, 不易被排出; 大部分有机污染物都易在细颗粒物($PM_{2.5}$)上富集^[5], 造成了严重的细颗粒物污染, 其中亲脂性强、抗氧化性、难降解、致癌性强、生物富集率高的持久性有机污染物(POPs), 如PCBs和PCDD/Fs等, 对人体健康产生的危害最大。PCBs对人体的危害表现为使人类精子数量减少, 女性不孕, 造成脑损伤, 抑制脑细胞合成, 发育迟缓, 降低智商, 干扰内分泌, 使儿童的行为怪异, 另外, PCBs还会引起皮肤病氯痤疮。

北京作为中国的首都, 由于工业化和城市化迅速发展, 越来越多的有机污染物被排放到大气中, 大气颗粒物和PCBs污染不可避免。研究 $PM_{2.5}$ 以及其中PCBs的含量、分布特征和来源对环境保护意义重大。然而, 国内外对PCBs的研究多集中在水体^[6]、土壤^[7]和沉积物^[8], 对大气颗粒物尤其是 $PM_{2.5}$ 的研究很少, 大多集中在多环芳烃(PAHs)^[9-10]等方面的研究, 对其中PCBs的研究到目前为止国内仅见一例^[11], 而且限制在一个采样点, PCBs也只是作为混合物进行研究, 各单体的污染特征没有被揭示。在分析方法上以往研究主要采用GC/MS或GC/ECD^[11-12], 由于受分析方法的限制, PCBs的测定数据多以其总量表示。因此, 研究结果具有局限性。本文在北京市石景山工业区、十三陵和海淀区较广泛的范围内选择5个采样点, 于2008年1月利用HRGC/HRMC对北京市大气中的 $PM_{2.5}$ 以及其中的19种

PCBs污染水平、分布特征及来源进行了研究, 充分地揭示了PCBs的实际污染状况, 力求为科学评价环境污染、制定环境政策和 $PM_{2.5}$ 国家质量标准提供科学依据。

1 样品分析与质量监控

1.1 采样点

在北京市共设置了3个功能区5个采样点: 市区/交通干道(A中国地质大学(北京)(下文简称地质大学)东门及B测试楼顶), 工业区(C首钢集团焦化厂、D高井热电厂)和背景点(E十三陵)。所选工业区位于北京市西边的石景山工业区, 是以煤为燃料并形成的以钢铁制造、发电、炼焦等重型工业为产业链的老工业区, 其中首钢是全国最大的钢铁企业, 其周边环境污染非常严重。所选市区位于海淀区成府路口南, 紧邻北四环, 车流量大, 人口密集, 人为污染物排放量大。而背景点位于昌平区一个小村庄, 群山环绕, 植被密集, 人口密度小, 车流量小, 污染源少, 大气环境相对较好。选择这3个功能区作为采样点能够充分揭示北京市大气环境现状。

1.2 样品采集和样品处理

笔者于2008年1月6-13日利用中流量大气颗粒物采样器(TSP/ PM_{10} / $PM_{2.5}$ -2型, 北京地质仪器厂迪克公司)在3个功能区5个采样点用玻璃纤维滤膜(GFF, 直径9cm)同时连续8d采集 $PM_{2.5}$ 样品(约900m³), 采样间隔24h。采样前GFFs在马弗炉里经450℃的温度灼烧12h并密封在铝箔中, 以除去其中的有机物影响, 采样前后在恒温恒湿的天平室内平衡24h, 然后用电子天平(精度为 1×10^{-5})准确称量以获得 $PM_{2.5}$ 的含量。采样后称量完的GFFs上添加含27种¹³C标记的PCBs混合净化内标, 以1:1的正己烷/二氯甲烷为溶剂用加速溶剂抽提仪(ASE)萃取, 萃取液经旋转蒸发仪旋蒸浓缩, 再依次经过复合硅胶柱、碱性氧化铝柱和弗罗里土柱净化分离。净化溶液经旋转蒸发浓缩、氮吹浓缩后, 在样品溶液中加入¹³C标记的PCBs进样内标¹³C-PCB-9、52、101、138和194, 涡轮混匀用HRGC/HRMS进行测定。测定前在样品溶液中加壬烷作稳定剂。本文分析了19种PCBs, 包括12种DL-PCB(77、81、105、114、118、123、126、156、157、167、169和189), 6种指示性PCB(Indicator PCB 28、52、101、138、153、180)和PCB-209。所有溶剂都

为农残级。

1.3 质量控制和质量保证

实验过程中同时分析了实验空白和野外空白,结果表明,实验空白和野外空白的主要干扰物是PCBs-28,但是通常都小于大气样品中相应浓度的5%。¹³C标记的PCBs的平均回收率为78%,符合US EPA 1668A的要求。

2 PM_{2.5}的质量浓度和分布特征

图1给出了5个采样点大气中PM_{2.5}的质量浓度日均分布。PM_{2.5}的日均值范围为101.85~145.57 μg/m³,平均日均值为119 μg/m³。与美国1997年颁布的日均值标准65 μg/m³相比,5个采样点全部超标,超标范围为57%~124%,平均超标83%,可见北京市PM_{2.5}的污染非常严重。

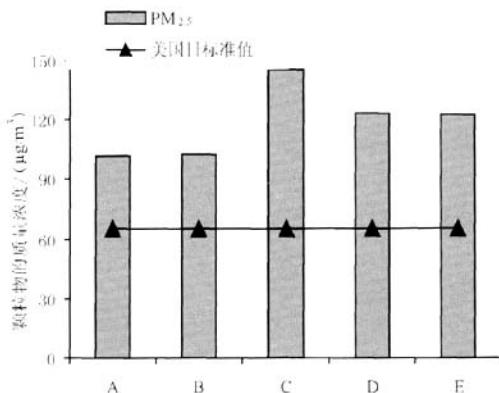


图1 5个采样点PM_{2.5}质量浓度日均分布

Fig. 1 Concentration distributions of PM_{2.5} at five sampling sites in Beijing
A. 中国地质大学东门; B. 中国地质大学测试楼顶; C. 首钢集团焦化厂; D. 高井热电厂; E. 十三陵; 下文同

PM_{2.5}质量浓度空间分布表现为工业区>背景点>交通要道,充分体现了局地排放源贡献的特征。燃煤是PM_{2.5}的重要来源^[13]。所选工业区企业密集,燃煤量大,燃煤污染非常严重。至于背景点PM_{2.5}质量浓度高于市区,是因为采样期间正值采暖期,背景点严重依赖燃煤取暖,且取暖分散、燃烧不充分,对PM_{2.5}的贡献非常大,而且燃煤引起的烟尘污染比汽车尾气所引起的污染更为严重^[14]。Liu等^[9]对非采暖期北京市PM_{2.5}的研究结果显示市区PM_{2.5}的质量浓度大于背景点,进一步证明燃煤对PM_{2.5}的贡献远远大于汽车尾气。

比较不同地区大气中PM_{2.5}质量浓度(图2)发

现,本研究中5个采样点的PM_{2.5}质量浓度的平均值(119 μg/m³)比1999—2000年冬季北京车公庄的检测结果(176 μg/m³)^[15]下降了32.4%,也低于广州(1996年140 μg/m³)^[5],表明北京在治理大气污染方面成效显著。但是PM_{2.5}的污染明显高于英国伦敦(21 μg/m³)^[16]和德国慕尼黑2003年冬季最高值(37.1 μg/m³)^[17],说明北京市大气PM_{2.5}的污染仍然非常严重,应引起高度重视。

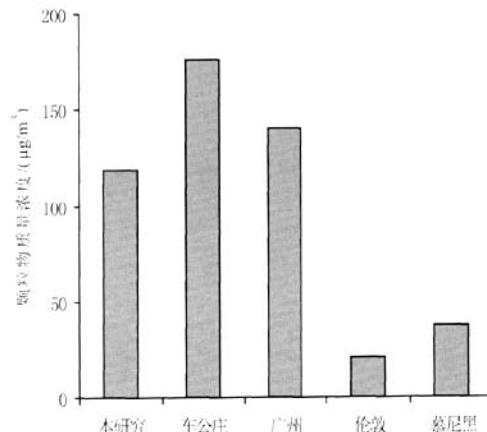


图2 不同地区PM_{2.5}质量浓度对比

Fig. 2 Comparison of PM_{2.5} concentration among different areas

3 PCBs的污染水平及分布特征

图3给出了5个采样点PM_{2.5}中PCBs的质量浓度和毒性当量的分布规律: Σ PCBs的质量浓度范围为7.2~16.2 pg/m³,平均值10.9 pg/m³;PCBs的毒性当量根据世界卫生组织毒性当量因子

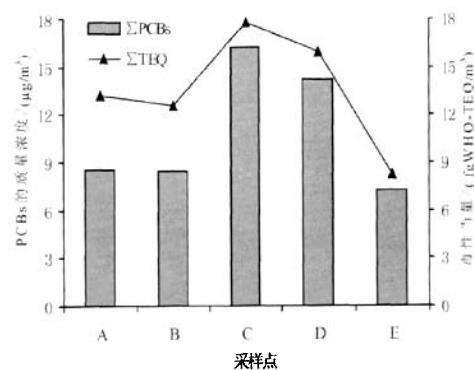


图3 5个采样点的ΣPCBs质量浓度和毒性当量分布

Fig. 3 Distribution of concentrations of TEQ and PCBs of five sampling sites in Beijing

(WHO-TEF)计算^[18], $PM_{2.5}$ 中 PCBs 的毒性当量范围为 $8.29 \sim 17.81 \text{ fgWHO-TEQ}/\text{m}^3$, 平均值 $13.58 \text{ fgWHO-TEQ}/\text{m}^3$, 和其他地区大气中 PCBs 质量浓度相比, 美国芝加哥 $\Sigma 50\text{PCBs}$ 为 $90 \text{ pg}/\text{m}^3$ ^[19], 法国巴黎 $\Sigma 21\text{PCBs}$ 为 $0.01 \sim 0.27 \text{ ng}/\text{m}^3$ ^[20], 中国广东鼎湖山自然保护区 $\Sigma 68\text{PCBs}$ 为 $53.23 \text{ pg}/\text{m}^3$ ^[21], 韩国 $\Sigma 24\text{PCBs}$ 为 $6.56 \text{ pg}/\text{m}^3$ ^[22], 中国台州 $\Sigma 12\text{PCBs}$ 为 $0.050 \sim 0.859 \text{ pgTEQ}/\text{m}^3$ ^[23], 北京市大气中的 PCBs 污染处于较低水平。

与 $PM_{2.5}$ 质量浓度空间分布不同, 各采样点的 ΣPCBs 质量浓度总体呈现为工业区 > 市区(交通干道) > 背景点。其中首钢焦化厂最高, 是背景点的 2.24 倍, 热电厂是背景点的 1.97 倍, 而地质大学东门只是背景点的 1.12 倍。各采样点 PCBs 的浓度差异充分体现了局地污染源的差异。固体燃料的燃烧会产生大量 PCBs 且以低氯代同族体为主^[24], 液体燃料的燃烧和钢铁生产等热工业过程也是 PCBs 的重要释放源^[25]。所选工业区企业密集、燃煤量大, 其中首钢是全国最大的钢铁企业, 燃煤污染非常严重。市区交通干道虽然没有燃煤污染, 但是机动车流量大, 汽车尾气污染严重, 同时还有燃油和燃气取暖, 对 PCBs 的贡献非常大。背景点远离交通干道, 汽车尾气污染较轻, 燃煤量也远低于工业区, 所以 PCBs 污染相对较轻。市区两个采样点 PCBs 的质量浓度比较接近, 因为这两个点之间距离较近, 空气循环比较快, 使得两地 PCBs 质量浓度混合较充分。PCBs 质量浓度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度空间分布存在差异, 两者之间虽然线性相关, 但是相关性并不显著 ($R^2 = 0.6003$, $P > 0.10$, 图 4), 说明两者的污染源不尽

相同; 另外, 工业区 PCBs 质量浓度远高于背景点, 而市区和背景点差别不大, 结合上面所介绍的各采样点的特点, 也可以进一步说明 $PM_{2.5}$ 主要来自燃煤, 而 PCB 却是燃煤、燃油和燃气以及热工业过程共同作用所致。

前面已经指出燃料的燃烧会产生大量 PCBs 且以低氯代同族体为主。按照氯取代数不同进行分析, 发现在所有采样点的 $PM_{2.5}$ 中 PCBs 同族体以 3 ~ 6 氯取代的低氯代为主(五氯代最高, 其次是三氯代), 与其他对大气颗粒物的研究结果类似^[26], 进一步说明北京市大气颗粒物中的 PCBs 主要来自燃料燃烧过程。但是 Yeo 等^[27] 的研究结果却认为 PCBs 在大气颗粒物中以高氯代为主, 这可能是因为地区间的释放源和气象条件不同。因为 PCBs 质量浓度不仅受排放源的影响, 在很大程度上也受气候条件的控制。通过对同一地点不同温度下大气颗粒物中 PCBs 质量浓度进行对比, 发现随着温度的升高低氯代 PCBs 质量浓度逐渐降低, 而高氯代 PCBs 质量浓度随气温变化相对稳定; 因为蒸汽压较高的低氯代 PCBs 在温度较高的条件下容易挥发而从颗粒相进入气相, 而高氯代 PCBs 的蒸汽压较低, 不容易随气温升高而汽化。

通过对 12 种 DL-PCBs 毒性当量 ΣTEQ 分析可以看出 5 个采样点 ΣTEQ 与 ΣPCBs 的变化趋势相同(图 5), 首钢焦化厂 ΣTEQ 最高, 是背景点的 2.1 倍; 其次是热电厂, 是背景点的 1.9 倍; 地质大学东门是背景点的 1.6 倍。这说明除了燃烧以外, 工业区钢铁厂钢铁冶炼熔炉、含 PCBs 的电厂变压器油以及市区交通干道机动车润滑油都是 PCBs 的潜在释放源^[28]。由图 5 可知所有采样点 PCBs 各单体 TEQ 的变化相似, PCB-126 对 ΣTEQ 的贡献最大, 平均贡献率高达 97%, PCB-118 对 ΣTEQ 的贡献居第 2 位, 但远低于 PCB-126 的贡献, 所以北京市大气颗粒物中 PCB-126 的生物毒性不容忽视。

图 6 和图 7 分别是 5 个采样点大气 $PM_{2.5}$ 中 PCBs 各单体的质量浓度及其相对分布图。通过对样品中 PCBs 各单体质量浓度的相对分布分析, 发现 5 个采样点各单体质量浓度的相对分布相似(图 7), 说明 PCBs 受局地污染源和大气传播共同影响。但是各采样点 PCBs 各单体质量浓度存在差异, 说明局地源是影响 PCBs 的主要因素。由图 6 可以看出 PCBs 中 PCB-28 的质量浓度最高, 与刘文杰等^[29] 对北京大气的研究结果一致。较高的

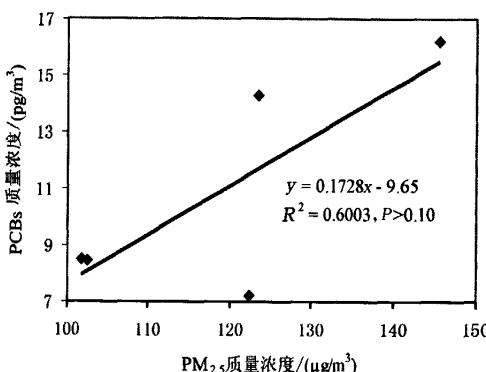
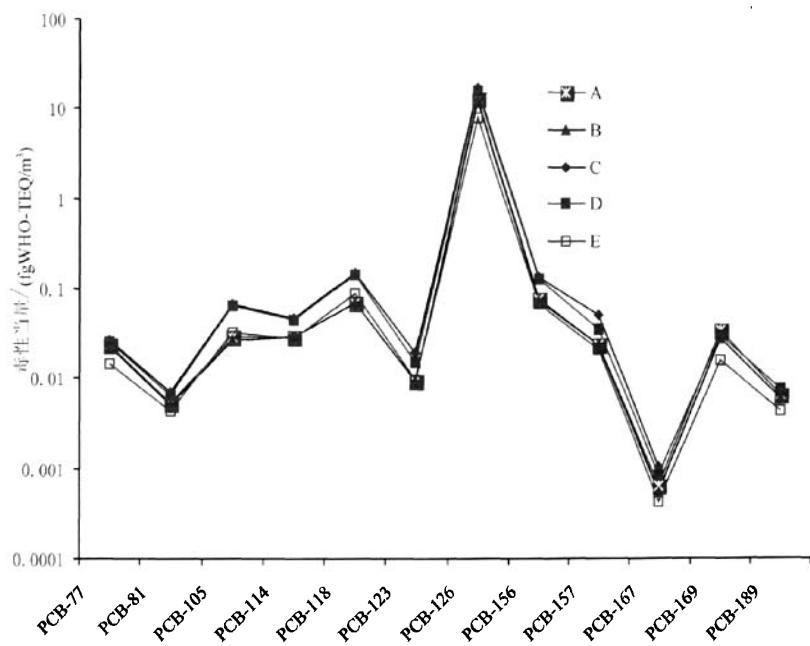
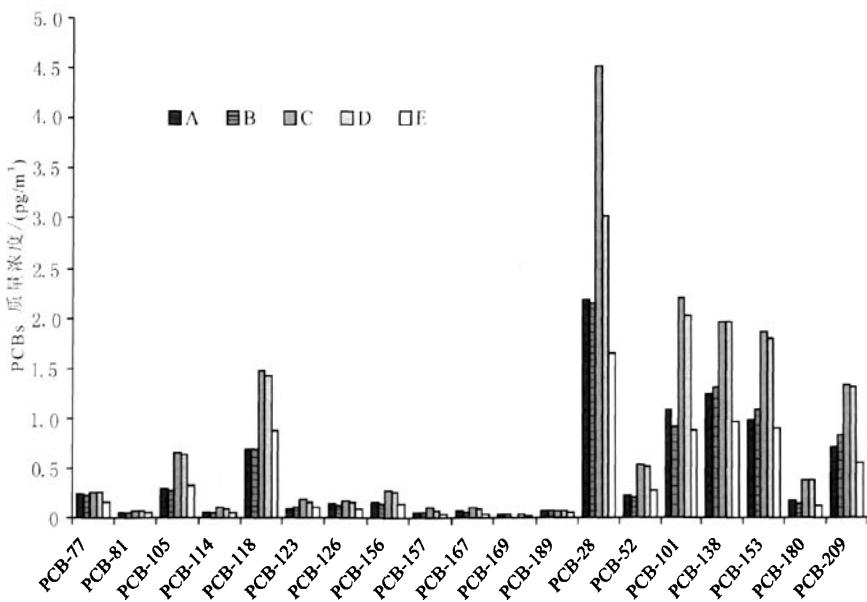


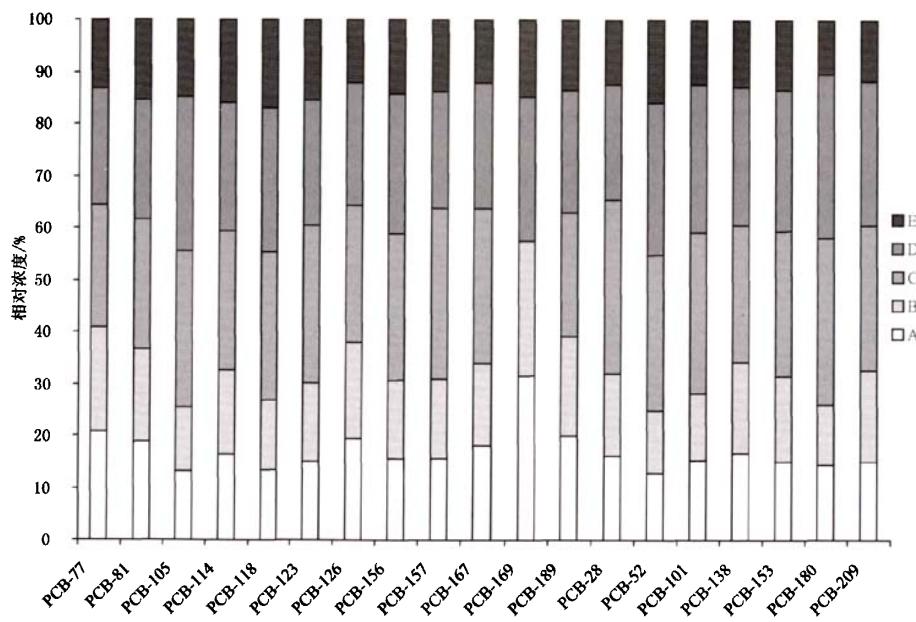
图 4 5 个采样点 $PM_{2.5}$ 与 PCBs 质量浓度相关性

Fig. 4 Correlation between $PM_{2.5}$ and PCBs at five sampling sites in Beijing

图 5 5个采样点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 DL-PCBs 各单体的毒性当量Fig. 5 TEQ of DL-PCBs congeners from $\text{PM}_{2.5}$ at five sampling sites in Beijing图 6 5个采样点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PCBs 各单体的质量浓度Fig. 6 Concentration of PCBs congeners from $\text{PM}_{2.5}$ at five sampling sites in Beijing

PCB-28 质量浓度在其他地区也有监测，如西班牙^[30]和德国^[31]。12 种 DL-PCBs 中 PCB-118 的质量浓度最高，与刘耕耘等^[32]对北京降尘的研究结果一致。 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\sum \text{Indicator PCBs} / \sum \text{PCBs}$ 的平均比值与 Liu 等^[7]对某些土壤的研究结果相当。

Sweetman 等^[33]提出因为 PCBs 在大气中的半衰期为 2~6 a，大气迁移是 PCBs 一个主要来源，以上结果符合 PCBs 从大气通过沉降过程进入土壤的迁移规律和全球蒸馏效应。象征燃烧源的低氯代 PCB-28 的质量浓度在所有采样点都居首位，进一

图7 5个采样点大气PM_{2.5}中PCBs各单体质量浓度相对分布Fig. 7 Relative concentration of PCBs congeners from PM_{2.5} at five sampling sites

步说明燃烧是北京市PCBs的重要来源。

4 结 论

(1) 北京市大气PM_{2.5}污染相当严重。与美国1997年颁布的日均值标准65 μg/m³相比,5个采样点PM_{2.5}全部超标,超标57%~124%。北京市大气PM_{2.5}主要来源是人为源,如化石燃料在工业生产、交通运输以及生活中被广泛应用。

(2) 与其他城市相比,北京市大气PM_{2.5}中PCBs污染处于较低水平。PM_{2.5}中ΣPCBs质量浓度范围为8.4~19.7 pg/m³,平均值为14 pg/m³;毒性当量范围为8.8~19.8 fgWHO-TEQ/m³,平均值为15.14 fgWHO-TEQ/m³。空间分布上表现为工业区>市区>背景点,说明工业区和市区是PCBs的主要污染源区,燃料的不完全燃烧和工业热加工过程可能是北京市PCBs的主要来源。

(3) 北京市大气PM_{2.5}中PCBs以PCB-28的质量浓度为最高,12种DL-PCBs中PCB-118的质量浓度最高,但是毒性当量贡献最大的是PCB-126,北京市大气中PCB-126的生物毒性不容忽视。

(4) PCBs的具体来源及其在大气中的环境行为还需要进一步深入研究。

致谢:论文试验过程中得到中国科学院生态环境中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室

王璞的大力帮助,在此致以衷心感谢。

参 考 文 献:

- [1] Bocio A, Domingo J L. Daily intake of polychlorinated dibenz-p-dioxins/dibenzofurans (PCDD/Fs) in food stuffs consumed in Tarragona, Spain: a review of recent studies (2001–2003) on human PCDD/Fs exposure through the diet [J]. Environmental Research, 2005, 97(1): 1–9.
- [2] Kaupp H, McLachlan M S. Gas/Particle partitioning of PCDD/Fs, PCBs, PCNs and PAHs [J]. Chemosphere, 1999, 38(14): 3411–3421.
- [3] 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.
- [4] Ma J, Cheng J P, Xie H Y, et al. Seasonal and spatial character of PCBs in a chemical industrial zone of Shanghai, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29: 503–511.
- [5] Wei F, Teng E, Wu G, et al. Ambient concentration and elemental composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in four Chinese cities [J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33: 4188–4193.
- [6] 孙振中,戚隽渊,曾智超,等.长江口九段水域环境及生物体内多氯联苯分布 [J].环境科学研究, 2008, 21(3): 92–97.
- [7] Liu H X, Zhou Q F, Wang Y W, et al. E-waste recycling induced polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenz-p-dioxins and dibenz-furans pollution in the ambient environment [J]. Environment International, 2008,

- [34(1): 67 - 72.]
- [8] Lohmann R, Macfarlane K, Gachwend P M. Importance of black carbon to sorption of native PAHs, PCBs, and PCDDs in Boston and New York harbor sediments [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39: 141 - 148.
- [9] Liu D M, Gao S P, An X H. Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons from atmospheric particulate matter PM_{2.5} in Beijing [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(2): 297 - 305.
- [10] 董雪玲, 刘大锰, 袁杨森, 等. 北京市大气PM₁₀中有机污染物的分布特征 [J]. 现代地质, 2008, 22(2): 325 - 332.
- [11] Xu D D, Dan M, Song Y, et al. Concentration characteristics of extractable organohalogens in PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 4119 - 4128.
- [12] 樊详科, 魏爱弘, 花卫华, 等. 超声萃取-傅里叶净化-气相色谱法测定沉积物中的多氯联苯 [J]. 海洋环境科学, 2008, 27(增刊): 95 - 97.
- [13] 刘大锰, 马永胜, 高少鹏, 等. 北京市区春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素 [J]. 现代地质, 2005, 19(4): 621 - 633.
- [14] 刘大锰, 李运勇, 蒋伯坤, 等. 北京首钢地区大气颗粒物中有机污染物的初步研究 [J]. 地球科学, 2003, 28(3): 327 - 332.
- [15] He K B, Yang F, Ma Y L, et al. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 4959 - 4970.
- [16] Charron A, Harrison R M. Fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{2.5 - 10}) particulate matter on a heavily trafficked London Highway: sources and processes [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39: 7768 - 7776.
- [17] Schäfer K, Harbusch A, Emeis S, et al. Correlation of aerosol mass near the ground with aerosol optical depth during two seasons in Munich [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 4036 - 4046.
- [18] Van den Berg M, Birnbaum L, Bosveld A T C, et al. Toxic equivalent factors (TEFs) for PCBs, PCDDs and PCDFs for humans and wildlife [J]. Environmental Health Perspectives, 1998, 106: 775 - 792.
- [19] Tasdemir Y, Vardar N, Odabasi M, et al. Concentration and gas/particle partitioning of PCBs in Chicago [J]. Environmental Pollution, 2004, 131: 35 - 44.
- [20] Blanchard M, Teil M J, Chevreuil M. The seasonal fate of PCBs in ambient air and atmospheric deposition in Northern France [J]. Atmospheric Chemistry, 2006, 53: 123 - 144.
- [21] 李春雷, 麦碧娟, 郝永梅, 等. 珠江三角洲空气中多氯联苯污染的区域背景研究 [J]. 中国环境科学, 2004, 24 (4): 501 - 504.
- [22] Yeo H G, Choi M, Chun M Y, et al. Gas/particle concentrations of PCBs in the atmosphere of Korea [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 3561 - 3570.
- [23] Li Y M, Jiang G B, Wang Y W, et al. Concentrations, profiles and gas-particle partitioning of PCDD/Fs, PCBs, and PBDEs in the ambient air of an E-waste dismantling area, southeast China [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(4): 521 - 528.
- [24] Lee R G M, Coleman P, Jones J L, et al. Emission factors and importance of PCDD/Fs, PCBs, PCNs and PM₁₀ from the domestic burning of coal and wood in the UK [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39: 1436 - 1447.
- [25] Cetin B, Yatkin S, Bayram A, et al. Ambient concentrations and source apportionment of PCBs and trace elements around an industrial area in Izmir, Turkey [J]. Chemosphere, 2007, 69: 1267 - 1277.
- [26] 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.
- [27] Yeo H G, Choi M, Chun M Y, et al. Concentration characteristics of atmospheric PCBs for urban and rural area, Korea [J]. Science of the Total Environment, 2004, 324: 261 - 270.
- [28] Dvorska A, Lammel G, Klanova J, et al. Kosetice, Czech Republic ten years of air pollution monitoring and four years of evaluating the origin of persistent organic pollutants [J]. Environmental Pollution, 2008, 156(2): 403 - 408.
- [29] 刘文杰, 陈大舟, 刘咸德, 等. 被动采样器在监测大气有机氯污染物中的应用 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 9 - 14.
- [30] Mari M, Schuhmacher M, Feliubadaló J, et al. Air concentrations of PCDD/Fs, PCBs and PCNs using active and passive air samplers [J]. Chemosphere, 2008, 70(9): 1637 - 1643.
- [31] Mandalakis M, Stephanou E G. Atmospheric concentration characteristics and gas/particle partitioning of PCBs in a rural area of eastern Germany [J]. Environmental Pollution, 2007, 147: 211 - 221.
- [32] 刘耕耘, 陈左生, 史烨弘, 等. 北京大气尘降样品中的 PCBs [J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 40 - 44.
- [33] Sweetman A J, Jones K C. Declining PCB concentrations in the UK atmosphere: evidence and possible causes [J]. Environmental Science and Technology, 2000, 34: 863 - 869.