

北京东南郊大气 TSP 中多环芳烃浓度特征与影响因素

张树才, 张巍, 王开颜, 胡连伍, 沈亚婷, 王学军*

(北京大学环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 对 2005-03 ~ 2006-01 北京市东南郊 3 个采样点大气总悬浮颗粒物(TSP)样品进行分析, 总结了研究区内 TSP 以及 TSP 中 16 种 PAHs 的浓度特征和季节变化规律. 研究区内 16 种 PAHs 浓度总和的范围在 $0.29 \sim 1\,184.48 \text{ ng/m}^3$ 之间, 均值为 239.44 ng/m^3 ; 分别用气象参数(温度、风速、气压、相对湿度)和大气 API 指数(二氧化硫、二氧化氮、 PM_{10})与 PAHs 浓度进行了偏相关分析, 结果表明温度和 SO_2 的 API 指数与 PAHs 浓度相关显著, 应用逐步回归方法得到 PAHs 对气象参数和大气 API 指数的回归方程, 分别为 $\sum 16\text{PAHs} = 572.56 - 23.18t$ 和 $\sum 16\text{PAHs} = 5.99 \text{ SO}_2$, 可以利用温度和 SO_2 的 API 指数对 PAHs 浓度进行估算.

关键词: 总悬浮颗粒物; 多环芳烃; 北京; 偏相关分析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0460-06

Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in TSP in the Southeastern Suburb of Beijing, China

ZHANG Shu-cai, ZHANG Wei, WANG Kai-yan, HU Lian-wu, SHEN Ya-ting, WANG Xue-jun

(MOE Laboratory of Earth Surface Processes, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: TSP samples were collected at three sampling sites in the southeastern suburb of Beijing from March, 2005 to January, 2006. The samples were analyzed for TSP and sixteen PAHs. The concentrations and seasonal changes of TSP and sixteen PAHs were illustrated. Concentrations of $\sum 16\text{PAHs}$ range from $0.29 \sim 1\,184.48 \text{ ng/m}^3$, and the average value is 239.44 ng/m^3 . Partial correlation analysis was applied to investigate the influence of meteorological parameters (temperature, wind speed, air pressure and relative humidity) and air pollution indexes (SO_2 , NO_2 and PM_{10}) on PAHs concentrations. Finally, quantitative estimation equations between PAHs and meteorological parameters and air pollution indexes were put forward by applying stepwise linear regression method, and the equations are $\sum 16\text{PAHs} = 572.56 - 23.18t$ and $\sum 16\text{PAHs} = 5.99 \text{ SO}_2$, respectively. Concentration of PAHs could be estimated using temperature or API of SO_2 .

Key words: TSP; PAHs; Beijing; partial correlation analysis

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类具有致癌和致畸活性的持久性有毒物质^[1], 近年来的研究表明多环芳烃可能具有内分泌干扰作用^[2]. PAHs 分布广泛, 在各种介质中都有检出, 主要来自工业污染源(炼钢、炼油、炼焦)、交通污染源(柴油车、汽油车的尾气排放)和民用污染源(烹调、吸烟、民用燃油、燃煤、燃柴)^[3]. 秸秆燃烧、家庭燃煤以及炼焦工业被认为是中国大气中 PAHs 的主要来源^[4].

由于 PAHs 进入大气之后, 可以随着颗粒物在大气中进行长距离迁移^[5], 因此大气颗粒物中 PAHs 的行为受到了国内外学者的广泛关注, 在美国的坦帕湾^[6]、日本的静冈^[7]、中国的粤港澳^[8]等地区都开展了对大气中 PAHs 浓度的监测工作. 在对北京市大气颗粒物的研究中, 国内学者在大气颗粒物来

源^[9]、PAHs 的粒径分布^[10]、交通源 PAHs 特征^[11]以及交警暴露监测^[12]等方面取得了一定的进展. 大气悬浮颗粒物中的 PAHs 可通过呼吸进入人体上呼吸道、支气管以及肺泡等部位, 给人体健康带来很大威胁^[10, 13]. 因此, 开展大气总悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)中 PAHs 的研究具有很重要的意义.

本研究初步探讨了北京东南郊大气 TSP 中 PAHs 浓度的季节变化规律, 分析了 TSP 中 PAHs 浓度与各种气象参数及大气污染指数之间的关系, 建立了相应的回归方程, 以期对大气 TSP 中 PAHs 浓

收稿日期: 2006-04-21; 修订日期: 2006-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40525003, 40371105)

作者简介: 张树才(1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区域环境科学, E-mail: treetalent@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xjwang@urban.pku.edu.cn

度水平的估测提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

使用 2030B 型中流量智能 TSP 采样器(青岛崂山应用技术研究所)于 2005-03-15~2006-01-13 进行 10 次采样(03-15, 04-15, 05-01, 06-02, 07-29, 09-10, 10-19, 11-19, 12-17, 01-13), 颗粒物被捕集在玻璃纤维滤膜($\phi=80\text{ mm}$, 450°C 焙烧 4 h 后恒重)上, 采样时间为 24 h, 流量为 100 L/min. 分别将 3~4 月、5~7 月、9~10 月、11~来年 1 月的样品作为春、夏、秋、冬 4 个季节的代表样品来处理。

本研究共设 3 个采样点, 分别位于北京市通州区环保局、张辛庄村委会和北寺村委会院内, 采样高度 1.5 m. 采样点位置及周围情况如表 1 所示。

表 1 采样点位置及周围状况

Table 1 Sampling sites and the surroundings		
采样点	位置	采样点下垫面及周围情况
环保局	116.66°E 39.89°N	沥青地表; 东面为商业用房, 南面有 1 条车流量较小的马路和 1 所小学, 西面是幼儿园, 北面是居民区
张辛庄	116.73°E 39.86°N	地表是草坪和石灰的混合地面; 东面为张辛庄小学、村民住宅区和农田, 南面是农田, 西面是 1 个水泥厂和 103 国道, 北面是一片大工业区, 包括东方化工厂等企业
北寺村	116.74°E 39.97°N	地表是裸露土地; 村民委员会四周都是村民住宅

同时记录采样期间的空气质量状况(API 指数)以辅助分析, 并从通州区气象局获得与采样期间同步的气压、温度、相对湿度、风速等参数。

1.2 样品前处理及分析方法

采样后的滤膜在干燥器中恒重后称重. 将采集了颗粒物的滤膜用预先用正己烷提取净化的滤纸包好, 用体积比为 1:1 的正己烷和环己烷混合溶剂提取(90°C , 8 h); 提取液经旋转蒸发浓缩至约 2 mL, 再用正己烷将浓缩液转移至硅胶层析柱中; 先后用 25 mL 正己烷和 50 mL 正己烷和二氯甲烷混合溶剂(3:2)淋洗硅胶柱, 得到的洗脱液经旋蒸后转移至样品瓶中。

利用 GC-MS(Agilent GC 6890/5973N MSD)测定 1979 年美国环保局公布的优先监测污染物中的 16 种多环芳烃, 即萘(NAP)、二氢苊(ACE)、苊(ACY)、芴(FLO)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLA)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)、蒾(CHR)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚(1,

2,3-cd)并芘(IcdP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)以及苯并(ghi)芘(BghiP)。

在样品前处理前加入氘代多环芳烃: 萘- D_8 、二氢苊- D_{10} 、菲- D_{10} 、蒾- D_{12} 和 芘- D_{12} 作为回收率指示物^[14]; 对样品进行加标回收实验, 16 种多环芳烃的回收率在 63.24%~109.48% 之间; 样品上机前加入内标物质 2-氟联苯和氘代三联苯, 用内标法定量分析样品中 PAHs 浓度。

2 结果与讨论

2.1 TSP 浓度特征

对采样期间 3 个采样点的 TSP 浓度进行基本统计分析, 北京市东南郊大气中 TSP 浓度水平时间和空间变化幅度较大, 最小值(0.030 mg/m^3) 出现在 06-02 环保局采样点, 最大值(0.731 mg/m^3) 出现在 05-01 北寺村采样点。

对 3 个采样点大气中全年 TSP 浓度进行总体均值成对数据 t 检验, 结果表明 TSP 浓度均值北寺村 > 环保局, 而张辛庄与北寺村和环保局样点的差别不大. 推测这与 3 个采样点下垫面性质有关. 下垫面为裸土的北寺村在全年大部分时间内 TSP 浓度最高; 张辛庄下垫面为草坪, 表现出一定的季节性差异, 即夏季浓度低(6 月除外), 其余季节浓度较高; 环保局的下垫面为沥青地面, 全年各月 TSP 浓度相对较低。

3 个采样点大气中 TSP 浓度的年变化如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 全年大气中 TSP 浓度在 06-02 和 07-29 之间存在 1 个低谷, 在 04-15 左右达到了峰值; 这是因为夏季降水比较丰沛, 对大气中颗粒物冲刷作用较强; 而春季沙尘天气频发, 对大气中颗粒物的贡献较大. 冬季 11-15~03-15 为传统的采暖期, 燃煤所产生的烟尘也是大气中 TSP 污染的 1 个重要来源^[15], 但 3 个采样点冬季各月 TSP 浓度均低于春

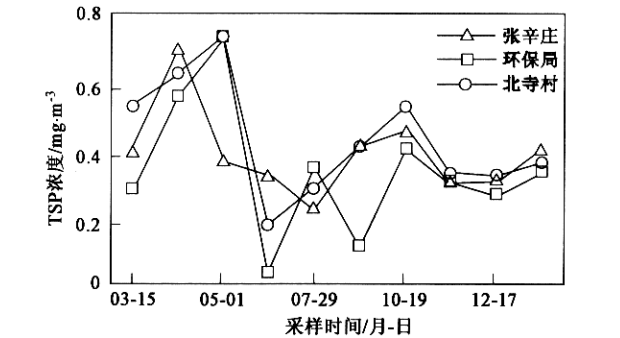


图 1 TSP 浓度的年变化

Fig.1 Temporal changes of TSP concentration

季,也从 1 个侧面反映了北京春季沙尘源对 TSP 的贡献要大于冬季燃烧源,此结果与杨复沫等人 2002 年对北京 PM₁₀与 TSP 关系的研究结论一致^[16].以张辛庄采样点为例,冬季(11 月~次年 1 月)的平均浓度比夏季(5~8 月)高 10.34%.比年均浓度低 18.28%;而春季(3~4 月)的平均浓度比夏季高 84.10%,比年均浓度高 36.34%,Zhang 等人在西安地区也观测到 TSP 浓度类似的特征^[17].从大气中 TSP 的浓度水平来看,除夏季外,全年大部分采样时期内,3 个采样点大气中的 TSP 浓度均高于我国环境空气质量标准(GB3095-1996)中的二级标准(日均值<0.3 mg/m³),其中北寺村采样点最大超标 2.44 倍(05-01),最小超标 1.07 倍(12-17),仅 6~7 月达到二级标准.

2.2 TSP 中 PAHs 浓度特征

16 种 PAHs 组分在各个 TSP 样品中均有检出,总 PAHs 浓度的最大值1 184.48 ng/m³出现在 2006-01-13 北寺村采样点,最小值 0.29 ng/m³出现在 06-02 环保局采样点,全年均值为 239.44 ng/m³.

对 3 个采样点 16 种 PAHs 的平均浓度以及总平均浓度进行正态分布检验,发现数据符合对数正态分布,将对数变换后的数据进行相关分析,得到各变量之间的相关系数以及相伴概率,可以发现除 NAP 外的 15 种 PAHs 组分之间存在着显著的相关性.全年大气 TSP 中各组分 PAHs 浓度具有显著的相关关

系,例如, BaP 与 16 种 PAHs 总浓度的相关系数为 0.983,相伴概率小于 0.001,因此可以用某一种组分的浓度变化来估算整个研究区域内的 TSP 中 16 种 PAHs 的总浓度.由于 BaP 为常规监测项目,选取 BaP 作为自变量,与 16 种 PAHs 的总浓度进行一元线性回归(图 2),得到的曲线拟合效果良好($R^2 = 0.8213$),相应直线方程为: $y = 16.95x - 5.66$,其中 y 为 16 种 PAHs 的总浓度, x 为 BaP 浓度,二者单位均为 ng/m³,可以用 BaP 的浓度值估算 16 种 PAHs 的总浓度.

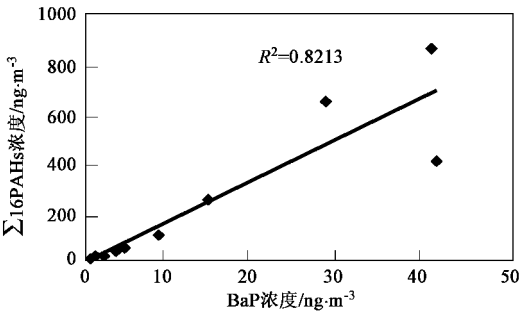


图 2 BaP 与 $\sum$ 16PAHs 的拟合结果

Fig. 2 Linear regression of BaP and $\sum$ 16PAHs

2.3 TSP 中 PAHs 浓度的时间和空间变化

分析 3 个采样点 TSP 中 16 种 PAHs 组分浓度的季节变化,各采样点各季节 PAHs 浓度水平如表 2 所示.

表 2 采样点 TSP 中 16 种 PAHs 浓度的季节变化/ng·m⁻³

Table 2 Seasonal average concentrations of 16 PAHs at the sampling sites /ng·m⁻³

多环芳烃	环保局				张辛庄				北寺村			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
NAP	0.29	0.18	0.88	0.48	0.46	0.25	0.54	0.53	0.37	0.29	0.46	0.51
ACE	0.14	0.03	0.12	0.93	0.23	0.03	0.10	2.16	0.87	0.07	0.08	2.01
ACY	0.02	0.01	0.05	0.08	0.03	0.01	0.04	0.15	0.11	0.02	0.03	0.18
FLO	0.17	0.04	0.28	0.91	0.25	0.05	0.26	2.02	0.83	0.04	0.19	2.87
PHE	2.74	0.44	2.12	12.56	4.21	0.48	1.75	29.37	15.20	0.44	1.31	63.09
ANT	1.02	0.16	0.50	5.37	0.59	0.15	0.44	11.05	4.62	0.28	0.72	24.05
FLA	8.96	1.88	6.72	50.15	14.85	1.95	6.69	117.07	74.88	2.17	4.94	199.85
PYR	8.09	1.98	7.11	51.70	14.38	2.18	7.36	119.71	71.55	2.74	5.23	202.10
BaA	3.59	0.69	2.32	19.56	9.24	0.78	4.89	53.34	81.31	1.32	3.44	85.69
CHR	5.68	1.44	4.33	24.90	12.82	1.56	5.64	41.68	64.26	2.13	4.27	58.20
BbF	4.88	2.18	16.49	47.60	13.80	6.88	13.70	118.48	52.30	2.02	8.98	81.04
BkF	5.55	2.25	1.93	11.65	13.22	2.29	6.46	23.63	62.27	6.11	5.19	49.31
BaP	3.66	2.00	2.71	8.61	8.65	2.17	6.49	28.00	55.90	2.25	5.45	46.34
IcdP	2.82	2.32	5.77	6.97	8.02	3.41	13.15	27.03	22.22	3.23	10.09	58.56
DAHA	0.32	0.10	0.22	0.45	0.69	0.11	0.46	1.24	3.74	1.54	0.38	3.06
BghiP	2.41	1.60	3.17	6.01	5.77	2.33	6.11	17.20	16.99	1.69	4.74	29.12
$\sum$ 16PAHs	50.31	17.31	54.74	247.95	107.20	24.64	74.08	592.66	527.42	26.33	55.49	905.98

由表 2 可见,3 个采样点 1 a 内 TSP 中 16 种 PAHs 浓度水平(NAP 除外)大多表现为冬季最高,夏季最低.以张辛庄采样点为例,冬季 16 种 PAHs 总浓度是夏季的 24.05 倍.从空间分布上,对 3 个采样点全年数据的总体均值出 t 检验表明,总 PAHs 浓度水平为北寺村 > 张辛庄 > 环保局.北寺村采样点 TSP 中 16 种 PAHs 总浓度冬季值分别是环保局和张辛庄的 3.65 倍和 1.53 倍,春季值分别是 10.48 倍和 4.92 倍,夏季值分别是 1.52 倍和 1.07 倍,而秋季值分别是 1.01 倍和 0.75 倍(略低于张辛庄).

3 个采样点 1 a 内 TSP 中 PAHs 的时间和空间变化与采样点周围 PAHs 源排放状况、大气扩散条件以及雨水冲刷作用等密切相关.现场污染源调查表明,环保局采样点周围居民冬季取暖为集中供暖,居民家中的燃料为市政供气,因此环保局采样点 PAHs 源主要为道路交通源;张辛庄位于张家湾工业区,当地冬季供暖虽以集中供暖方式为主,但仍存在着一定数量的村民自行燃煤取暖.根据成玉等研究结果,商业区对空气中 PAHs 的贡献大于道路交通的贡献^[18],而商业区中 PAHs 的来源主要是取暖和烹饪等活动,本研究结果显示冬季张辛庄采样点 16 种 PAHs 的浓度均高于环保局(NAP 除外),也说明冬季张辛庄村民燃煤取暖产生的 PAHs 贡献远大于环保局附近道路交通源的贡献;对于北寺村而言,村民全部自家燃煤取暖,冬季大气 TSP 中 16 种 PAHs 浓度与张辛庄相比均较高(NAP、ACE、BbF 除外),特别是春季,在城镇地区已经结束集中供暖(03-15)以后,北寺村气温仍然较低,村民仍有取暖需要,造成春季北寺村 TSP 中 PAHs 浓度水平显著高于其它 2 个采样点.

从 16 种 PAHs 的比例来看,在整个采样期内,3 个采样点各季节大气 TSP 中 16 种 PAHs 组分的比例在时间和空间上均有显著变化.将 3 个采样点各季节各环数 PAH 浓度取平均值,可以分析研究区域内 TSP 中 PAHs 组分的环数变化(图 3).从图 3 可以看出,TSP 中 PAHs 组分在各个季节中占优势的部分均为高环组分,4~6 环组分浓度总和均占 16 种 PAHs 浓度总和的 90% 以上;春冬 2 季占优势地位的为 4 环组分,可达到总浓度的 50% 左右;夏季占优势地位的为 5~6 环组分,达总浓度的 65.17%;冬季 3~4 环的比重较高,占总浓度的 67.60%,此结果与谭吉华等对广州 PM₁₀ 中 PAHs 的研究结论一致,PAHs 的季节变化是受排放源、气象条件、PAHs 的沉降及消除机制和 PAHs 本身化学机制的共同作用引

起的^[19].

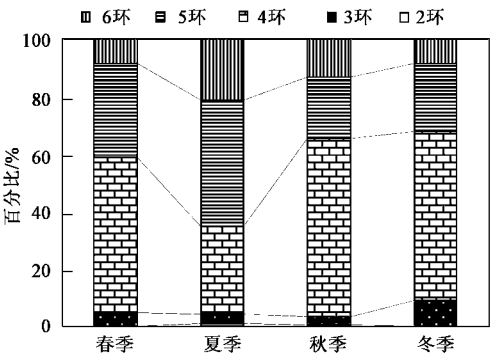


图 3 3 个采样点不同环数 PAHs 的季节变化
Fig.3 Seasonal changes of PAHs compounds

2.4 PAHs 浓度与相关参数关系

用采样当天的实时气象数据(气压,温度,相对湿度,风速)和空气污染 API 指数(PM₁₀, SO₂, NO₂)与 16 种 PAHs 总浓度进行回归分析.正态分布检验结果表明,其他参数样本均服从正态分布,而 PAHs 总浓度服从对数正态分布.将对数变换后的 PAHs 总浓度分别与气象参数和 API 指数进行偏相关分析.结果表明(表 3、表 4),PAHs 总浓度与温度显著负相关(0.05 显著性水平下),与 SO₂ 的 API 指数成显著正相关(0.01 显著性水平下).温度与 PAHs 总浓度的负相关关系体现了随着温度降低,取暖燃烧源对 PAHs 总浓度的贡献;SO₂ 的 API 指数与 PAHs 总浓度正相关,可以推测 TSP 中的 PAHs 主要来自于含硫煤的燃烧.Manolis 等对城市大气颗粒物中的 PAHs 行为的研究也表明 16 种 PAHs 浓度与温度显著负相关,与二氧化硫显著正相关^[20].温度和 SO₂ 的 API 指数与 PAHs 总浓度之间的变化趋势如图 4、图 5 所示.

表 3 16 种 PAHs 总浓度与气象参数的偏相关分析

Table 3 Partial correlation analysis for $\sum$ 16PAHs and meteorological parameters				
指标	气压	温度	相对湿度	风速
相关系数	-0.188	-0.784	-0.014	-0.112
相伴概率	0.686	0.037	0.976	0.812

表 4 16 种 PAHs 总浓度与 API 指数的偏相关分析

Table 4 Partial correlation analysis for $\sum$ 16PAHs and API index			
指标	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
相关系数	-0.478	0.952	0.173
相伴概率	0.231	0.000	0.682

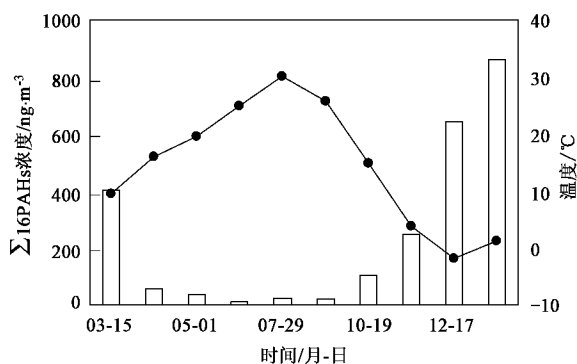
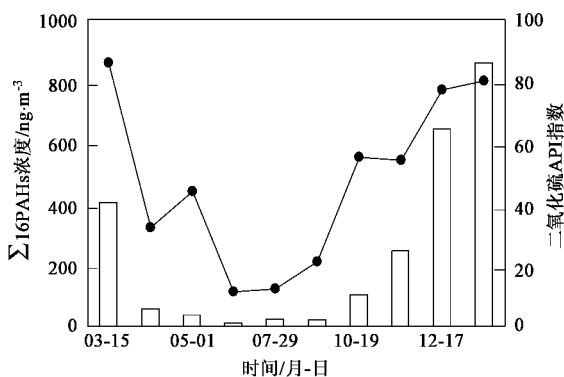


图4 16种PAHs浓度与温度的变化趋势

Fig.4 Temporal changes of $\sum 16\text{PAHs}$ and temperature图5 16种PAHs浓度与SO₂的API指数的变化趋势Fig.5 Temporal changes of $\sum 16\text{PAHs}$ and SO₂ API index

将PAHs总浓度与气象参数和API指数进行多元回归分析,建立气象参数和API指数对总PAHs的回归模型.由于气象参数和API指数之间有很强的共线性,故将PAHs总浓度分别对气象参数和API指数进行逐步回归.逐步回归结果表明,气象参数中,只有温度能通过参数显著性检验(显著性水平0.01),表明温度对PAHs总浓度有显著影响,可以作为解释变量出现在回归方程中,而其它3个参数(气压、相对湿度、风速)对PAHs总浓度的影响不显著,被排除在方程之外.PAHs总浓度与气象参数的回归方程为: $y = 572.56 - 23.18x$, 其中 y 表示16种PAHs的总浓度,单位为 ng/m^3 ; x 表示气温,单位为 $^{\circ}\text{C}$.该方程截距项和斜率项显著性检验的相伴概率分别为0.000和0.002.方程总体显著性检验的 F 值为20.509,相伴概率为0.002.

API指数中,只有SO₂能通过参数显著性检验(显著性水平0.01),表明SO₂对PAHs总浓度有显著影响,可以作为解释变量出现在回归方程中,而

NO₂和PM₁₀的API指数对PAHs总浓度的影响不显著,被排除在方程之外.同时,由于常数项的显著性检验相伴概率为0.134 > 0.01,表示常数项与0没有显著性差异,所以常数项不应出现在方程中.PAHs总浓度与API指数的无截距回归方程为: $y = 5.99x$, 其中 y 表示16种PAHs的总浓度,单位为 ng/m^3 ; x 表示SO₂为空气污染的API指数.斜率项显著性检验的相伴概率为0.000;方程总体显著性检验的 F 值为28.345,相伴概率为0.000.

通过上述2个方程,可以对北京东南郊大气TSP中的16种PAHs的总浓度进行估算.由于温度以及SO₂的API指数很好获得,这为大致估计TSP中的优控多环芳烃浓度提供了便捷的途径.

3 结论

(1)北京市东南郊大气中TSP浓度春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季;该研究区内的TSP主要来自地面扬尘,其次是煤燃烧.

(2)北京市东南郊大气TSP中PAHs浓度总和的范围在0.29 ~ 1 184.48 ng/m^3 之间,均值为239.44 ng/m^3 ;BaP浓度与PAHs总浓度间的回归方程为 $\sum 16\text{PAHs} = 16.95\text{BaP} - 5.66$,可以用BaP的浓度值估算16种PAHs的总浓度.

(3)北京市东南郊大气TSP中PAHs浓度存在季节变化,夏季最低,冬季最高;且各组分比例也存在季节变化.

(4)3个采样点PAHs均值的时间序列数据分别与气象参数和API指数的偏相关分析表明,总PAHs与温度和SO₂API指数的相关性最显著,得到的回归方程分别为: $\sum 16\text{PAHs} = 572.555 - 23.181t$ 和 $\sum 16\text{PAHs} = 5.99 \text{SO}_2$.

致谢:感谢北京大学环境学院刘煜、蒙冰君和刘燕花老师在实验操作方面的指导和协助;感谢通州区环境监测站的张志永站长以及北寺村、张辛庄村委会的领导对本研究采样工作的大力支持.

参考文献:

- [1] 王静,朱利中,沈学优.某焦化厂空气中PAHs的污染现状及健康风险评价[J].环境科学,2003,24(1):135~138.
- [2] Joseph S. Review of the estrogenic and antiestrogenic activity of polycyclic aromatic hydrocarbons: Relationship to carcinogenicity[J]. Chemosphere, 1997, 34(4): 835~848.
- [3] 朱利中,王静,杜焯,等.汽车尾气中多环芳烃(PAHs)成分谱图研究[J].环境科学,2003,24(3):26~29.

[4] Xu S S, Liu W X, Tao S. Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in China [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**: 702 ~ 708.

[5] Panther B C, Hooper M A, Tapper N J. A comparison of air particulate matter and associated polycyclic aromatic hydrocarbons in some tropical and temperate urban environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**: 4087 ~ 4099.

[6] Poor N, Trembley R, Kay H, *et al.* Atmospheric concentrations and dry deposition rates of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for Tampa Bay, Florida, USA [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**: 6005 ~ 6015.

[7] Ohura T, Amagai T, Sugiyama T, *et al.* Characteristics of particle matter and associated polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air in two cities in Shizuoka, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**: 2045 ~ 2054.

[8] 盛国英,傅家谟,成玉,等. 粤港澳地区大气中有机污染物初步研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(4): 6 ~ 11.

[9] 朱先磊,张远航,曾立民,等. 北京市大气细颗粒物 PM_{2.5} 的来源研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(5): 1 ~ 5.

[10] 周家斌,王铁冠,黄云碧,等. 北京地区大气可吸入颗粒物中多环芳烃分布特征[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(5): 10 ~ 14.

[11] 王玮,岳欣,陈建华,等. 北京市交通路口大气颗粒物污染特征研究(Ⅲ)——大气颗粒物中多环芳烃污染特征[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 43 ~ 47.

[12] 张雯婷,窦晗,刘娅因,等. 北京海淀区夏季交警对多环芳烃的暴露[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 224 ~ 227.

[13] 王平利,戴春雷,张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(1): 83 ~ 87.

[14] 段菁春,毕新慧,谭吉华,等. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(1): 6 ~ 10.

[15] 司瑶冰,宫春宁,郑有飞. 呼和浩特市大气污染与天气气候的关系[J]. 气象科技, 2005, **33**(2): 173 ~ 177.

[16] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等. 北京 PM_{2.5} 浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP 的关系[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(6): 506 ~ 510.

[17] Zhang X Y, Cao J J, Li L M. Characterization of Atmospheric Aerosol over Xi'An in the South Margin of the Loess Plateau, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**: 4189 ~ 4199.

[18] 成玉,盛国英,刘德汉,等. 广州市大气颗粒物显微组分分布及其与优控多环芳烃浓度的关系[J]. 环境科学, 1998, **19**(6): 10 ~ 13.

[19] 谭吉华,毕新慧,段菁春,等. 广州市大气可吸入颗粒物 (PM₁₀) 中多环芳烃的季节变化[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(7): 855 ~ 862.

[20] Manolis T, Euripides G S. Occurrence of gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: study of sources and ambient temperature effect on the gas/particle concentration and distribution [J]. Environmental Pollution, 2005, **133**: 147 ~ 156.