

合肥市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃污染水平及来源解析

李四生¹, 单晓梅², 常君瑞³, 葛成相¹, 李昌安¹

1. 合肥市疾病预防控制中心, 安徽 合肥 230061; 2. 安徽省疾病预防控制中心, 安徽 合肥 230601;
3. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100021

摘要: **目的** 分析合肥市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 污染水平及来源解析, 为治理合肥市大气污染提供科学参考。 **方法** 采集 2018 年 2 月—2019 年 1 月合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs, 利用超声萃取-高效液相色谱-荧光检测器-PDA 测定, 采用特征比值、主成分分析和正定矩阵因子分解模型 3 种方法对大气 PM_{2.5} 中 PAHs 来源解析。 **结果** 合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs $\Sigma 16\text{PAHs}$ 年平均浓度 $(9.25 \pm 6.72) \text{ ng/m}^3$, 其中 7 种致癌性 ΣcPAHs 年平均浓度在 $(4.67 \pm 3.88) \text{ ng/m}^3$ 。3 种来源分析方法结果基本一致, 滨湖新区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 主要来源是汽油和柴油燃烧源、炼焦源、燃煤源、生物质燃烧源, 贡献率分别占 43.07%、15.21%、11.24% 和 10.93%; 瑶海区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 主要来源是汽油和柴油燃烧、燃煤源、炼焦源、生物质燃烧源, 贡献率分别为 45.93%、16.49%、11.73% 和 10.08%, 合肥市市区 (瑶海区) 和郊区 (滨湖新区) 两监测点 PAHs 主要来源存在一定的差异。 **结论** 合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 含量总体水平较低, 多环芳烃来源以交通石油和柴油燃烧源为主。

关键词: PM_{2.5}; 多环芳烃; 污染水平; 来源解析; 高效液相色谱法

中图分类号: R122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-3110(2020)09-1052-05 **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-3110.2020.09.008

Pollution level and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM_{2.5} in Hefei city

LI Si-sheng¹, SHAN Xiao-mei², CHANG Jun-rui³, GE Cheng-xiang¹, LI Chang-an¹

1. Hefei Municipal Center for Disease Control and Prevention, Hefei, Anhui 230061, China;

2. Anhui Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hefei, Anhui 230601, China;

3. National Institute of Environmental Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100021, China

Abstract: **Objective** To analyze the pollution level and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric PM_{2.5} in Hefei city, and to provide a scientific basis for control and management of atmospheric PAHs pollution in Hefei city. **Methods** High performance liquid chromatography-fluorescence detector-PDA was used to detect the concentration of atmospheric PAHs in PM_{2.5} samples collected in Hefei city from February 2018 to January 2019. Three kinds of analytical methods, including characteristic ratio, principal component analysis (PCA) and positive definite matrix factorization (PMF) model, were employed to perform source apportionment of PAHs. **Results** The annual average concentration of $\Sigma 16\text{PAHs}$ in atmospheric PM_{2.5} in Hefei city was $(9.25 \pm 6.72) \text{ ng/m}^3$, and the annual average concentration of 7 kinds of carcinogenic ΣcPAHs was $(4.67 \pm 3.88) \text{ ng/m}^3$. The results of the source apportionment by characteristic ratio method, PCA and PMF model were basically similar. Gasoline and diesel combustion, coke combustion, coal combustion and biomass combustion were the main sources of PAHs in atmospheric PM_{2.5} in Binhu new district, with the contribution rates being 43.07%, 15.21%, 11.24% and 10.93%, respectively. Gasoline and diesel combustion, coal combustion, coke combustion and biomass combustion were the main sources of PAHs in atmospheric PM_{2.5} in Yaohai district, with the contribution rates being 45.93%, 16.49%, 11.73% and 10.08%, respectively. There existed some differences in the main sources of PAHs between urban area (Yaohai district) and suburban area (Binhu new district) in Hefei city. **Conclusions** The total pollution level of PAHs in atmospheric PM_{2.5} in Hefei city is relatively low, and the main sources of PAHs are traffic petroleum and diesel combustion.

Key words: PM_{2.5}; polycyclic aromatic hydrocarbon; pollution level; source apportionment; high performance liquid chromatography

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是自然界中发现种类最多的一类致癌物, 多数都具有致畸性、致癌性和致突变性^[1]。萘、苊烯、苊、苊、菲、蒽、荧蒽、芘、 BaA 、苯并[α]蒽、苯并[β]蒽、苯并[κ]蒽、苯并[α]芘、二苯并[α, h]蒽、苯并[g, h, i]芘、茚并[1, 2, 3-cd]芘 16 种 PAHs 被美国环保署 (environmental protection agency, EPA) 列为优先控制的污染物^[2], 此外 BaA 、苯并[α]蒽、苯并[β]蒽、苯并[κ]蒽、苯并[α]芘、二苯并[α, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘 7 种为致癌性 PAHs。

PAHs 的来源主要为自然源和人为源, 自然源包括火山爆发、灌木丛燃烧等, 以及各种植物、微生物合成^[3]; 人为源主要为石油、煤燃烧和炼焦等^[4-5]。PAHs 排放种类与环境因素有关, 在高温和通风条件下产生高环 PAHs, 而在低温度和密闭下产生低环 PAHs, 每种排放源产生的 PAHs 种类、污染水平存在差异^[6]。

目前, 多环芳烃检测方法主要为高效液相色谱法^[7-8]和气相色谱质谱联用方法^[9], 本文以优先控制的 16 种 PAHs 为监测对象, 利用玻璃纤维滤膜采样, 采用超声萃取-液相色谱-PDA-荧光检测器方法进行检测, 评估合肥市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 污染水平, 并利用不同模型方法解析 PAHs 来源, 为制定有效的污染控制措施提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 仪器 高效液相色谱仪 (LC2030C, 日本岛津公司), 附带 PDA 和 RF-20A 检测器; PAHs 专用柱 (4.60 mm \times 250 mm, 5.0 μm , 上海安谱实验科技股份有限公司); 改装冷凝数控超声仪 (Elma 公司); 大流量 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器 (TH-150F 型, 武汉市天虹仪表有限责任公司); 玻璃纤维滤膜 (Pall 型, Art. No. 61664)。

1.1.2 试剂 16 种 PAHs 混合标准: 浓度均为 200 mg/L, 含萘、苊烯、苊、苊、菲、蒽、荧蒽、芘、 BaA 、苯并[α]蒽、苯并[β]蒽、苯并[κ]蒽、苯并[α]芘、二苯并[α, h]蒽、苯并[g, h, i]芘、茚并[1, 2, 3-cd]芘 (上海安谱实验科技股份有限公司); 甲醇、乙腈 (色谱纯, TEDIA 公司); 去离子水电阻率 18.2 M Ω .cm (25 $^{\circ}\text{C}$)。

1.2 方法

1.2.1 样品采集

1.2.1.1 采样点 根据中国疾病预防控制中心制定的《空气污染对人群健康影响监测与防护工作手册》要求, 设置市区 (瑶海区) 和郊区 (滨湖新区) 两个采样点, 监测高度为 10~15 m。

1.2.1.2 监测时间及频次 采集时间从 2018 年 2 月—2019 年 1 月, 每月 10—16 日连续在两监测点进行采样, 每天采样时间大于 20 h; 在空气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重时, 12 h 更换一次滤膜, 1 d 采集两张滤膜。全年每个采样点各采集 84 份样品。

1.2.1.3 样品采集和前处理 以 100 L/min 大流量 TH-150F 型空气采样器和玻璃纤维滤膜采集环境空气样品 24 h (采样头配备可采集总悬浮颗粒物的切割机)。样品采集完成后, 玻璃纤维滤膜于 4 $^{\circ}\text{C}$ 密闭、避光保存, 7 日内完成 PAHs 提取。整张玻璃纤维滤膜, 向内对折, 剪碎后放入 10 ml 圆底比色管中, 加入乙腈 4.0 ml, 超声提取 60 min 后, 以孔径 0.45 μm 的针式尼龙过滤器过滤到进样小瓶中, 按照仪器优化条件测定。

1.2.2 数据处理方法

1.2.2.1 来源解析 目前, 对大气中 PAHs 来源定性和定量解析方法主要有特征比值法、轮廓图法、主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和正定矩阵因子分解模型 (positive matrix factorization, PMF) 等^[10], 本文采取特征比值法、PCA 和 PMF 法进行解析, 将每个样品所检测到的 16 种 PAHs 浓度代入相应的模型进行来源解析。

1.2.2.2 特征比值法 特征比值法是一种最简单的 PAHs 污染源诊断方法, 根据同分异构体对热稳定性差异来指示 PAHs 不同排放源的特征, 石油源以 2~3 环 PAHs 为主, 化石燃料高温不完全燃烧产生的 PAHs 以 ≥ 4 环为主。主要的特征比值对有 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 、 $\text{IN}/(\text{IN} + \text{BP})$ 等^[11]。

1.2.2.3 PCA PCA 将一组相关变量通过线性转换为另一组不相关的新变量, 并在转变过程减少变量的个数后, 再进行变量间结构相关性分析, 依据新变量方差贡献率的大小形成主成分, 并提取出载荷大前几个主成分, 用来作为推断出各个因子所指示的 PAHs 污染源^[12]。

1.2.2.4 PMF PMF 是由 US EPA 开发的一个多变量因素分析源解析软件, 它利用测得的源配置文件信息和排放或排放清单, 进行解释、识别对样品有贡献的源类型, 具有不需要测量源成分谱优点。

1.3 统计学分析 利用统计分析软件为 SPSS 17.0,

当样品中某种 PAHs 未检出时,按该种 PAHs 1/2 检出限计算。数据符合正态分布资料用($\bar{x}\pm s$)描述,多组数据之间显著性差异采用 ANOVA-LSD 分析方法,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 的浓度水平 每月 10—16 日 7 d 采集的样本检测分析,以两个采样点同 1 d 测定的浓度平均值作为合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 的当天浓度,结果见表 1。由表 1 分析发现,合肥市大

气 PM_{2.5} 中 PAHs $\Sigma 16$ PAHs 年平均浓度 (9.25 ± 6.72) ng/m³,其中四季大气 PM_{2.5} 中 PAHs 浓度:春季 (2—4 月) 为 (8.79 ± 4.54) ng/m³、夏季 (5—7 月) 为 (4.35 ± 3.48) ng/m³、秋季 (8—10 月) 为 (9.81 ± 6.01) ng/m³、冬季 (11, 12, 1 月) 为 (14.04 ± 8.03) ng/m³; 7 种致癌性 Σc PAHs 年平均浓度在 (4.67 ± 3.88) ng/m³,其中四季大气 PM_{2.5} 中致癌 PAHs 浓度:春季为 (4.76 ± 2.53) ng/m³、夏季为 (2.39 ± 2.46) ng/m³、秋季为 (5.59 ± 3.12) ng/m³、冬季为 (5.96 ± 5.52) ng/m³。

表 1 合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 浓度 (ng/m³)

样本	春		夏		秋		冬	
	$\Sigma 16$ PAHs	Σc PAHs	$\Sigma 16$ PAHs	Σc PAHs	$\Sigma 16$ PAHs	Σc PAHs	$\Sigma 16$ PAHs	Σc PAHs
1	17.14	7.60	2.50	1.11	17.24	8.03	5.72	1.34
2	14.64	6.79	2.33	1.03	3.62	2.07	4.32	1.13
3	16.36	9.07	2.32	1.08	12.99	8.26	10.18	1.54
4	15.12	7.67	2.27	0.99	3.31	2.11	8.35	0.27
5	11.52	7.01	2.30	0.99	3.27	1.97	4.62	1.31
6	15.85	7.04	2.29	0.81	4.6	2.86	6.45	1.27
7	11.01	9.21	2.27	1.03	4.59	2.75	12.07	1.79
8	8.56	6.52	2.22	0.97	10.68	6.78	7.83	1.74
9	7.06	5.44	2.27	0.91	27.47	14.68	25.96	4.69
10	5.80	2.89	2.62	0.94	15.85	8.12	9.70	1.98
11	7.09	1.81	2.44	1.09	8.22	4.68	7.80	3.96
12	3.25	2.31	2.22	0.98	4.34	2.51	9.45	1.60
13	3.51	2.42	2.24	0.81	10.28	5.53	5.09	2.50
14	4.79	1.85	2.41	0.91	7.46	4.21	25.09	11.15
15	5.57	3.72	6.64	3.59	11.54	7.15	21.29	9.60
16	4.88	2.36	8.22	4.98	5.93	3.78	19.48	7.73
17	3.94	2.18	7.70	4.99	6.16	3.89	27.36	11.34
18	5.76	2.72	6.16	3.91	9.94	5.95	27.53	16.42
19	8.53	2.65	8.36	5.50	7.71	4.54	21.33	14.27
20	9.87	6.17	5.29	2.65	11.55	7.05	15.25	13.28
21	4.28	2.45	16.39	10.85	19.26	10.4	20.01	16.34
均值	8.79±4.54	4.76±2.53	4.35±3.48	2.39±2.46	9.81±6.01	5.59±3.12	14.04±8.03	5.96±5.52

利用采用 ANOVA-LSD 统计分析发现:合肥市大气 PM_{2.5} 中 $\Sigma 16$ PAHs 浓度表现为春季>夏季 ($I-J=4.43219, P<0.05$)、春季与秋季 PAHs 含量无统计学差异 ($I-J=-1.02257, P>0.05$)、春季<冬季 ($I-J=-5.25400, P<0.05$)、夏季<秋季 ($I-J=-5.45476, P<0.05$)、夏季<冬季 ($I-J=-9.68619, P<0.05$)、秋季<冬季 ($I-J=-4.23143, P<0.05$)、大气 PM_{2.5} 中 7 种 Σc PAHs 浓度表现为春季>夏季 ($I-J=2.36952, P<0.05$)但是春季与秋季 ($I-J=-0.83048, P>0.05$)及冬季 ($I-J=-1.20810, P>0.05$)均无统计学差异;夏季<秋季 ($I-J=-3.20000, P<0.05$)、夏季<冬季 ($I-J=$

$-3.57762, P<0.05$) ;秋季与冬季 ($I-J=-0.37762, P>0.05$)无统计学差异。

2.2 合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 来源解析

2.2.1 特征比值法 根据 InP/(InP+BP)与 BaA/(BaA+Chr)、Flu/(Flu+Pyr)与 Ant/(Ant+Phe)两组特征比值对合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 来源解析。

从图 1、图 3 可以看出,瑶海区和滨湖新区大气 PM_{2.5} 全部样品 Ant/(Ant+Phe)>0.1,并且大多数样品 Flu/(Flu+Pyr)>0.4;从图 2、图 4 可以看出,滨湖新区大气 PM_{2.5} 大部分样品 BaA/(BaA+Chr)>0.2, 0.2<IN/(IN+BP)<0.5,部分样品 IN/(IN+BP)>0.5,因此四组

特征比值表明,瑶海区 and 滨湖新区大气 PM_{2.5} PAHs 来源主要为石油、煤和生物质燃烧产生。

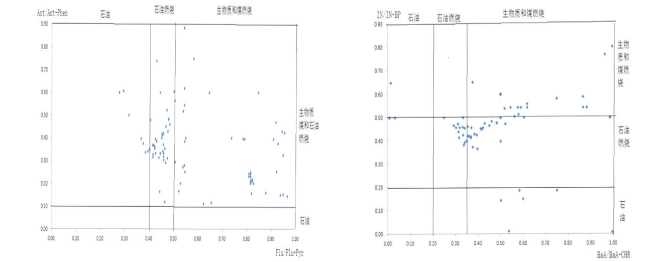


图 1 瑶海区 Ant/(Ant+Phe)-Flu/(Flu+Pyr)特征比值

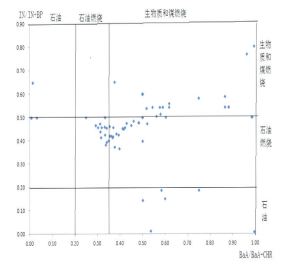


图 2 瑶海区 BaA/(BaA+Chr)-IN/(IN+BP)特征比值

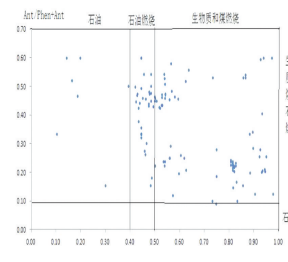


图 3 滨湖新区 Ant/(Ant+Phe)-Flu/(Flu+Pyr)特征比值

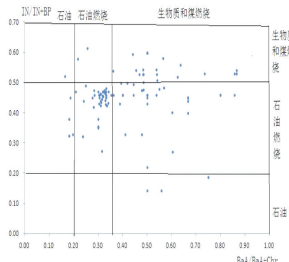


图 4 滨湖新区 BaA/(BaA+Chr)-IN/(IN+BP)特征比值

2.2.2 PCA 利用 SPSS 17.0 统计软件降维-因子分析方法对滨湖新区和瑶海区全年各 84 份样品 16 种 PAHs 进行数据降维,最大方差旋转法和主成分提取法进行分析,得到 16 种 PAHs 旋转后主成分载荷矩阵见表 2。从表 2 可知,瑶海区和滨湖新区 4 个主成分分别解释了 80.418%和 84.225%的 PAHs 原始变量的变差。

滨湖新区 PC1 的方差贡献率为 43.070%,主要包括的 BbF、IN、BP、DA 为柴油或汽油燃烧汽车尾气排放指示物,表明主要来源柴油或汽油燃烧源。PC2 的方差贡献率为 15.211%,主要包括 FI、Ace 和 BkF,表明主要来自炼焦和石化燃烧。PC3 的方差贡献率为 11.204%,主要包括 Py 和 BkF,表明主要来自煤炭燃烧。PC4 的方差贡献率为 10.933%,其中 Acy 为主要载荷,表明主要来自生物质燃烧。

瑶海区 PC1 的方差贡献率为 45.928%,主要包括的 BbF、IN、BP、DA 为柴油或汽油为燃烧汽车尾气排放指示物,PC1 表明主要来源柴油或汽油燃烧。PC2 方差贡献率为 16.486%,主要包括 FI、Ace 和 BkF,表明主要来自煤炭燃烧来源。PC3 方差贡献率为 11.734%,主要包括 Py 和 Ant,表明主要来自炼焦来源。PC4 方差贡献率为 10.077%,其中 Acy 为主要载荷,表明主要来自生物质燃烧来源。

表 2 合肥市大气中 PM_{2.5} 样品 16 种 PAHs 旋转后主成分载荷矩阵

PAHs	滨湖新区				瑶海区			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
Nap	0.291	0.38	-0.346	0.325	0.487	-0.591	0.281	0.290
Acy	-0.152	-0.075	-0.032	0.775	-0.208	0.046	0.544	0.837
FI	0.268	0.799	0.367	0.132	0.500	-0.586	0.284	-0.072
Ace	0.386	0.774	-0.071	0.136	0.229	-0.339	-0.055	0.770
Phe	0.411	-0.501	0.498	0.260	0.039	0.711	0.468	0.128
Ant	-0.317	-0.359	-0.095	0.639	-0.220	0.315	0.703	-0.040

续表 2

PAHs	滨湖新区				瑶海区			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
Flu	0.651	-0.534	0.186	-0.046	0.457	0.718	-0.148	0.056
Py	-0.039	0.162	0.635	0.338	0.123	0.079	0.672	0.390
Chr	0.656	-0.437	-0.099	0.095	0.620	0.500	0.055	0.059
BaA	0.578	0.277	-0.541	0.296	0.693	-0.373	0.130	-0.198
BbF	0.641	-0.048	0.149	-0.269	0.819	0.125	-0.128	-0.022
BkF	0.462	0.462	0.620	0.025	0.722	-0.166	0.133	-0.300
BaP	0.833	-0.019	0.037	-0.101	0.688	0.310	-0.162	-0.159
DA	0.726	0.340	-0.261	0.010	0.385	-0.105	-0.172	0.501
BP	0.834	-0.304	-0.225	-0.016	0.704	0.374	-0.214	0.313
IN	0.405	-0.551	0.088	0.157	0.663	-0.148	0.276	-0.499
特征值	7.491	3.074	1.793	1.269	7.468	2.638	1.877	1.612
方差贡献值(%)	43.070	15.211	11.204	10.933	45.928	16.486	11.734	10.077
累积贡献值(%)	43.070	58.281	69.485	80.418	45.928	62.414	74.148	84.225

2.2.3 PMF 将合肥市两采样点检测数据和相对应的不确定度代入 US EPAPMF5.0 软件中计算,其中不确定度依据样品测定的浓度大小选择计算方法,当样品检测浓度不大于检出限时,不确定度以检出限的5/6计算,当样品浓度大于检出限时,以 20%样品测定浓度计算^[13]。

滨湖新区因子 1 包括了以柴油或汽油燃烧汽车尾气指示物 BbF、IN、BP、DA,主要来源柴油或汽油燃烧源;因子 2 主要包括 FI、Ace 和 BkF,表明来自炼焦和石化燃烧来源;因子 3 主要包括 Py 和 BkF,表明来自煤炭燃烧来源;因子 4 主要包括 Acy,表明来自生物质燃烧来源。因此,滨湖新区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 的来源中汽油和柴油燃烧源、炼焦源、燃煤源、生物质燃烧源。

瑶海区因子 1 主要以柴油或汽油燃烧产生的汽车尾气指示物 BbF、IN、BP、DA,表明来于柴油或汽油燃烧有关。因子 2 主要包括的 Phe 和 FI 为燃煤特征物,来源是燃煤。因子 3 以 Ant、Py 载荷较高,来源是炼焦

产生。因子 4 中 Acy、Ace 的载荷较高,来源是生物质燃烧。瑶海区大气 PM_{2.5} 中的 PAHs 来源中柴油汽油和燃烧、燃煤源、炼焦源、生物质燃烧源。

3 讨论

本研究通过分析 2018 年 2 月—2019 年 1 月合肥市市区和郊区两监测点大气中 PM_{2.5} PAHs 的污染状况,发现合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs Σ 16PAHs 年平均浓度(9.25±6.72) ng/m³,7 种致癌性 Σ cPAHs 年平均浓度在(4.67±3.88) ng/m³。利用采用 ANOVA-LSD 统计分析发现:合肥市大气 PM_{2.5} 中 Σ 16PAHs 浓度表现为春季>夏季、春季<冬季,夏季<秋季、夏季<冬季,秋季<冬季;大气 PM_{2.5} 中 7 种 Σ cPAHs 浓度表现为春季>夏季,但是春季与秋季及冬季均无统计学差异,夏季<秋季、夏季<冬季,秋季与冬季无统计学差异,这一现象可能与冬季合肥总体气温低,气流稳定不利于扩散等气象条件引起。合肥市大气中 PM_{2.5} PAHs 浓度与国内其他城市相比,合肥市大气中 Σ 16PAHs 低于石家庄(25.11 ~ 34.99) ng/m³[14]、保定(29.33 ~ 229.75) ng/m³[14]、沈阳(71.5 ng/m³) [15]、武汉(24.27±9.15) ng/m³[16]、重庆(19.02 ~ 29.92) ng/m³[17],与宁波(1.28 ~ 55.22) ng/m³[18]、镇江(12.21±11.09) ng/m³[19] 比较接近,因此合肥市大气 PAHs 污染水平处在较低水平。

通过采用特征比值法、PCA 和 PMF 3 种方法联合进行合肥市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 来源解析,发现三种解析方法对源解析分担率存在一定的细微不同,但是三种来源分析结果基本一致,滨湖新区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 主要来源是汽油和柴油燃烧源、炼焦源、燃煤源、生物质燃烧源;瑶海区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 主要来源是汽油和柴油燃烧、燃煤源、炼焦源、生物质燃烧源。郊区和城区主要来源均是汽油和柴油源,汽油和柴油燃烧源主要为汽车尾气产生,和深圳市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 来源相似^[20],但是两监测点第二种来源刚好相反,可能与市区的瑶海区为老旧工业区,人员密集,部分家庭使用燃煤有关,此外街头的燃煤烧烤也不容忽视。而郊区的滨湖区为新区,主要燃料以管道天然气为主。

参考文献

[1] Carmichael LM, Christman RF, Pfaender FK. Desorption and mineralization kinetics of Pheanthrene and chrysene in contaminated soils[J]. Environ Sci Technol, 2012, 31(1): 126-132.

[2] Wilcke W, Amelung W, Krauss M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) patterns in climatically different ecological zones of Brazil[J]. Org Geochem, 2003, 34(10): 1405-1417.

[3] 刘少鹏,李先国,张大海,等.墨水河表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的分布特征、来源解析及生态风险评价[J]. 环境化学, 2018, 37(4): 843-850.

[4] Xu SS, Liu WX, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40: 702-708.

[5] 赵淑莉,戴天有,段小丽,等.北京城市空气中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 16-20.

[6] Mastral AM, Callén MS. A review on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from energy generation[J]. Environ Sci Technol, 2000, 34: 3051-3057.

[7] 常君瑞,李娜,徐春雨,等.超声提取-高效液相色谱法测定 PM_{2.5} 中的多环芳烃[J]. 实用预防医学, 2016, 23(3): 267-270.

[8] 于海燕,徐向阳,刘瀚升.应用高效液相色谱法测定谷物中 15 种多环芳烃[J]. 实用预防医学, 2018, 25(12): 1531-1533.

[9] 杨财平,马蓓蓓,余青,等.宜昌市 PM_{2.5} 的污染特征及其风险评价[J]. 实用预防医学, 2017, 24(10): 1209-1212.

[10] 林海鹏,武晓燕,王琼,等.兰州市工业区 PM₁₀ 中多环芳烃的来源分析及健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(5): 426-430.

[11] 高博,马社霞,赵伟,等.大气多环芳烃源解析研究进展[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2015.

[12] 李洪成,张茂军,马广斌. SPSS 数据分析实验教程[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017: 1-113.

[13] 王成龙,邹欣庆,赵一飞,等.基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3789-3797.

[14] 安玉琴,郝海燕,金红,等.河北省四城市 PM_{2.5} 中多环芳烃污染水平及健康风险评估[J]. 职业与健康, 2018, 34(22): 3129-3133.

[15] 李晶,祝琳琳,王男,等.沈阳市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(1): 24-28.

[16] 李宽,周家斌,袁畅,等.武汉市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃的分布特征及来源[J]. 环境科学研究, 2018, 31(4): 648-656.

[17] 赵雪艳,任丽红,姬亚芹,等.重庆主城区春季大气 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1395-1402.

[18] 王爱红,姚浔平,冷朋波,等.宁波市某城区 2015—2017 年大气 PM_{2.5} 中重金属和多环芳烃分布特征分析[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(11): 1012-1018.

[19] 汪庆庆,马小莹,徐斌,等.江苏四城市 PM_{2.5} 中多环芳烃室外呼吸暴露健康风险评估[J]. 江苏预防医学, 2018, 29(2): 140-144, 207.

[20] 严宙宁,牟敬锋,严燕,等.2017 年深圳市大气 PM_{2.5} 污染状况及其来源解析研究[J]. 实用预防医学, 2019, 26(10): 1172-1176.

收稿日期: 2019-11-05