

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.03.2015101002

赵阳, 林晓辉, 胡恭任, 等. 南昌市秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征、风险评价及来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(3): 500-507

ZHAO Yang, LIN Xiaohui, HU Gongren, et al. Pollution characteristics, risk assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in $\text{PM}_{2.5}$ collected in autumn in Nanchang City[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(3): 500-507

南昌市秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征、 风险评价及来源分析*

赵 阳^{1,2} 林晓辉¹ 胡恭任^{1**} 于瑞莲¹

(1. 华侨大学化工学院, 厦门, 361021; 2. 南昌市环保局, 南昌, 330038)

摘 要 用气相色谱-质谱法(GC-MS)定量分析了 2013 年 9 月南昌市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 16 种优控多环芳烃(PAHs)含量. 结果表明, PAHs 总浓度平均值为 $17.95 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 变化范围为 $3.55\text{—}39.97 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 不同环数多环芳烃占总浓度比例由大到小依次为: 5 环(50.45%) > 4 环(19.32%) > 6 环(17.99%) > 2 环(6.34%) > 3 环(5.90%), 表现出明显的机动车尾气排放特征. 通过计算 PAHs 的苯并[a]芘(BaP)毒性当量浓度($9.458\text{—}14.454 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 表明南昌市 PAHs 对人体健康存在潜在危害. 特征化合物比值法和主成分分析法结果表明, 燃煤、机动车尾气、农业燃烧及少量的石油挥发是南昌市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 的主要污染源.

关键词 南昌市, $\text{PM}_{2.5}$, 多环芳烃, 污染特征, 风险评价, 来源分析.

Pollution characteristics, risk assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in $\text{PM}_{2.5}$ collected in autumn in Nanchang City

ZHAO Yang^{1,2} LIN Xiaohui¹ HU Gongren^{1**} YU Ruilian¹

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China;

2. Environmental Protection Agency of Nanchang City, Nanchang, 330038, China)

Abstract: Sixteen polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in $\text{PM}_{2.5}$ samples collected from Nanchang City in September 2013 were collected by gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS). The average concentration of total PAHs was $17.95 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, with a range of $3.55\text{—}39.97 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. The percentages of different ring PAHs to the total PAHs concentration followed the descending order: 5-ring (50.45%) > 4-ring (19.32%) > 6-ring (17.99%) > 2-ring (6.34%) > 3-ring (5.90%), which showed significant characteristics of vehicle exhaust emission. The risk of PAHs was calculated by Benzo[a]pyrene (BaP) equivalent ($9.458\text{—}14.454 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), indicating PAHs had potential hazardous effects on human health in Nanchang city. Diagnostics ratios and principal component analysis (PCA) indicated that coal combustion, vehicle exhaust, agricultural burning and small amount of petroleum volatilization were the major sources of PAHs in $\text{PM}_{2.5}$ in Nanchang City.

Keywords: Nanchang City, $\text{PM}_{2.5}$, polycyclic aromatic hydrocarbon, pollution characteristics, risk assessment, source analysis.

2015 年 10 月 10 日收稿(Received: October 10, 2015).

* 国家自然科学基金(21377042, 21477042)和福建省自然科学基金(2014J01159)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21377042, 21477042) and Natural Science Foundation of Fujian province (2014J01159).

* ** 通讯联系人, Tel: 13808544503, E-mail: grhu@hqu.edu.cn.

Corresponding author, Tel: 13808544503, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

目前,全国的雾霾事件使大气颗粒物 PM_{2.5}成为人们关注的焦点.PM_{2.5}具有粒径小、比表面积大的特征,易负载有毒有害物质,如细菌、病毒、重金属及有机化合物等,其中多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons,简称 PAHs)可几乎全部吸附在 PM_{2.5}上,具有致癌、致畸、致突变的特性,对人体健康和生态环境造成严重危害^[1].PAHs 主要来源于机动车尾气、工业排放(如炼钢、炼焦、炼油等生产)、居民生活(烹调、燃烧)、垃圾焚烧等人类活动及一些自然过程^[2-3].美国环保局(USEPA)已将 16 种对人体危害较大的多环芳烃列入优控污染物名录,并对其进行重点监控和管理.虽然我国已经开始改革能源结构,但随着机动车数量的增长,多环芳烃仍是大气污染治理的痛点.

近年来,国内已有较多城市进行了对 PM_{2.5}中 PAHs 的分布特征及来源解析的研究.Liu 等^[4]利用高效液相色谱法(HPLC)分析北京 PM_{2.5}中多环芳烃来源,得出燃煤及机动车排放为其主要污染源.赵雪艳等^[5]结合比值法、主成分分析法及化学质量平衡受体模型法对 PM_{2.5}进行来源解析,结果表明,重庆主城区 PM_{2.5}载带的 PAHs 主要来自机动车尾气尘和燃煤尘的贡献.目前对南昌市大气 PM_{2.5}中多环芳烃来源解析的研究均采用因子分析法及多元线性回归法结合的方式^[6-8],本文测定了南昌市 PM_{2.5}及潜在污染源中的多环芳烃,对 PM_{2.5}中多环芳烃的进行健康风险评价,并通过特征化合物比值法及主成分分析法确定 PAHs 的主要来源.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 PM_{2.5}样品及潜在污染源样品采集

本研究在南昌市设置了 6 个采样点,采样位置如图 1 所示.各采样点代号分别为:武术学校(Wushu School, WS)、林科所(Forestry Research Institute, FRI)、建工学校(Construction Engineering School, CES)、省外办(Provincial Foreign Affairs Office, PFAO)、京东镇政府(Jingdong TownGovernment, JDTG)、石化(Petrochemical, PC),所属功能区分别为:郊区、旅游区、教育区、商住混合区、住宅区、交通区.采样时间从 2013 年 9 月 13 日至 25 日(19、20、21 日雨天不采样),连续性采样 20 h,采样时间为 9:00 至次日 7:00 (其中 19:00—21:00 停机休息 2 h).采样期间同步记录风速、风向、温度、相对湿度和气压等气象参数.采样仪器为 TH-150A II 智能中流量颗粒物采样器(武汉天虹智能仪表厂),流速为 100±1 L·min⁻¹.选用 90 mm 石英纤维滤膜(Pallflex, 美国),采样前将滤膜放在烘箱 400—500 ℃(稳定后)烘 2 h.采样前后将采样膜置入温度(30±2 ℃)、相对湿度(40%±5%)的天平室中平衡 48 h 以上,连续 2 次称量结果的误差不大于 15 μg,分析前将滤膜在小于 4 ℃下密封保存备用.

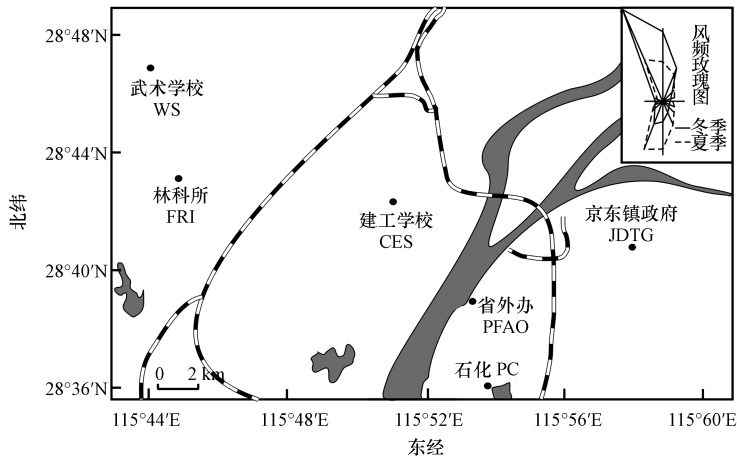


图 1 南昌市 PM_{2.5}采样点位

Fig.1 Sampling sites of PM_{2.5} in Nanchang City

依据南昌市污染源调查数据,选择有代表性的建筑水泥尘、道路扬尘、建设施工尘、冶金冶炼尘、火电燃烧尘及土壤风沙尘进行采集,采样时间与 PM_{2.5}样品时间基本一致(2015 年 9 月 11 日至 30 日),共

采集 6 类源 64 份样品.收集的样品过 150 目筛后直接进行冷冻,使用再悬浮采样器选用石英纤维滤膜对样品进行采集,前处理及保存方式与 PM_{2.5} 样品一致.

1.2 样品预处理与分析

将滤膜剪成细长条置于具塞离心管中,加入 10 mL 重蒸后的二氯甲烷,用超声波清洗器(KQ-300VDE)超声提取 10 min;在 3000 r·min⁻¹下离心 10 min,取上清液于 50 mL 圆底烧瓶中;离心管中再加入 10 mL 二氯甲烷,超声提取 10 min 后再离心 10 min,合并上清液.用旋转蒸发器(Labtech EV341)浓缩(40 ℃,低于常压 0.02—0.03 MPa)至近干后,移入 K-D 浓缩管中,再用氮吹仪(N-EVAP-111 型,Organomation Associates Int)吹至 0.2 mL.将浓缩液滴加在硅胶柱中,依次用 40 mL 正己烷,100 mL 二氯甲烷+正己烷(3:7)混合液洗脱,分别得到正构烷烃和多环芳烃洗脱液,洗脱液用旋转蒸发器浓缩(45 ℃,低于常压 0.07—0.08 MPa)至近干,移入 K-D 浓缩管中,氮气吹至近干,加二氯甲烷定容至 1 mL.

利用气相色谱-质谱仪 GC-MS(QP2010 plus,岛津),配备 Rtx-5ms 毛细色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),测定 2 环的萘(NaP)、3 环的蒽(AnP)、芴(Flu)、芘(Ace)、菲(Phe)和蒽(Ant)、4 环的荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、蒽(Chr)和苯并[a]蒽(BaA)、5 环的苯并[b]蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)和二苯并[a,h]蒽(DahA)、6 环的苯并[g,h,i]芘(BghiP)和茚并[1,2,3-cd]芘(InP)等 16 种 USEPA 优先控制的多环芳烃的质量浓度.进样口温度 280 ℃,不分流进样,升温程序为 50 ℃保持 3 min,以 10 ℃·min⁻¹升温到 200 ℃,再以 5 ℃·min⁻¹升温到 280 ℃保持 8 min.离子源温度 250 ℃,Scan 方式进行定性扫描(m/z 45—400),SIM 方式进行定量扫描.

1.3 质量控制和质量保证

实验分析过程采用插入 10%样品空白和 20%的平行样品,平行样结果控制在±30%内.并采用标准样品为 16 种多环芳烃混合标样(Accustandard,美国),加标回收率控制在 68%—110%之间.同时用外标法进行定量分析,用十氟联苯作为反应前处理提取效果的替代物,样品中加入十氟联苯,通过回收率评价样品前处理对分析结果的影响,回收率控制在 50%—120%之间.文中数据经过空白校正和回收率校正.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 PM_{2.5}中 PAHs 的污染特征

本研究共检测 16 种优控 PAHs 的质量浓度,但 Acy、Flu、Ace 和 Ant 低于检出限未被检出(表 1),多环芳烃总浓度(ΣPAHs)变化范围 3.55—39.97 ng·m⁻³,平均值 17.95 ng·m⁻³,高于彭希琰等^[8]研究的南昌市夏季 PM_{2.5}中 PAHs 的浓度,而低于冬季 PAHs 浓度^[8],与 He 等^[9]研究的 ΣPAHs 浓度季节趋势呈现冬季>春季>秋季>夏季一致,这可能是排放源变化及气象条件改变所造成,夏季降雨多、温度高、辐射强易促进 PAHs 的分解导致夏季 ΣPAHs 浓度最低.各采样点 ΣPAHs 的平均值呈现出:石化(23.88 ng·m⁻³)>省外办(20.50 ng·m⁻³)>建工学校(18.44 ng·m⁻³)>京东镇政府(15.89 ng·m⁻³)>林科所(14.72 ng·m⁻³)>武术学校(14.27 ng·m⁻³),石化代表的交通区的多环芳烃含量最高,林科所和武术学校周围无工业污染源,但监测点可能会受到公路交通源 PAHs 污染的影响.其中 BaP 在南昌市秋季各采样点的平均浓度均超过我国《环境空气质量标准》(GB3095—2012)^[10]中规定的 2.5 ng·m⁻³及世界卫生组织(WHO)限值 1 ng·m⁻³^[11].

不同采样点多环芳烃环数分布特征如图 2 所示,平均值从高到低依次为 5 环(50.45%)>4 环(19.32%)>6 环(17.99%)>2 环(6.34%)>3 环(5.90%),与京津冀地区 PM_{2.5}中不同环数 PAHs 分布结果较为类似^[12];4 环、5 环和 6 环的 PAHs 比例之和为 87.76%,与太原市采暖期 PM_{2.5}中 PAHs 4 环、5 环和 6 环的比例之和(89%)相近^[13].南昌市区间 PAHs 环数变化差异较小,总体而言,2 环和 3 环所占比例较小,因分子量低,且其易挥发,主要以气体形式存在;燃煤排放是 Phe、Flu、Pyr、BaA 和 Chr 等 3 环和 4 环的主要来源^[14];PAHs 以 5 环为主,5、6 环所占比例达 68.44%,其中 BaP、BbF、BghiP 和 InP 主要来自机动车尾气^[15-16],表明南昌市 PM_{2.5}中 PAHs 主要污染源为机动车尾气.

表 1 南昌市 6 个采样点 PM_{2.5} 中 PAHs 质量浓度 (ng·m⁻³)

Table 1 Mass concentrations of PAHs in PM_{2.5} at six sampling sites of Nanchang City (ng·m⁻³)

	WS	FRI	CES	PFAO	JDTG	PC
Nap	1.01±0.04	1.30±0.14	3.47±0.24	3.35±0.33	1.73±0.46	3.56±0.43
Acy	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Flu	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ace	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Phe	0.99±0.22	0.89±0.22	1.09±0.45	1.25±0.28	1.27±0.34	1.48±0.67
Ant	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fla	0.99±0.21	0.88±0.22	1.09±0.44	1.25±0.28	1.26±0.32	1.49±0.68
Pyr	0.84±0.18	0.84±0.23	1.32±0.15	1.04±0.28	1.05±0.29	1.33±0.62
Chr	0.87±0.20	0.92±0.20	1.33±0.15	1.06±0.28	1.04±0.29	1.31±0.64
BaA	0.88±0.21	0.77±0.22	1.34±0.14	1.08±0.27	1.08±0.31	1.37±0.65
BbF	2.42±0.84	2.36±0.80	2.83±1.22	3.33±0.83	2.67±1.23	3.82±1.51
BkF	1.33±0.31	1.64±0.63	1.75±0.78	1.53±0.39	1.35±0.58	1.83±0.72
BaP	2.67±0.82	2.50±0.86	3.02±1.34	3.30±0.90	2.57±1.01	3.81±1.52
DahA	1.23±0.35	1.32±0.40	1.70±0.59	1.56±0.35	1.40±0.58	1.94±0.74
BghiP	1.50±0.31	1.65±0.86	2.17±0.94	1.57±0.58	1.40±0.63	2.22±0.91
IcdP	1.25±0.43	1.22±0.41	1.38±0.67	1.62±0.46	1.30±0.59	1.90±0.69
Σ 16-PAHs	14.3±6.28	14.7±7.10	18.4±10.8	20.5±7.67	15.9±9.58	23.9±12.3

注:ND,未检出.ND, not detected.

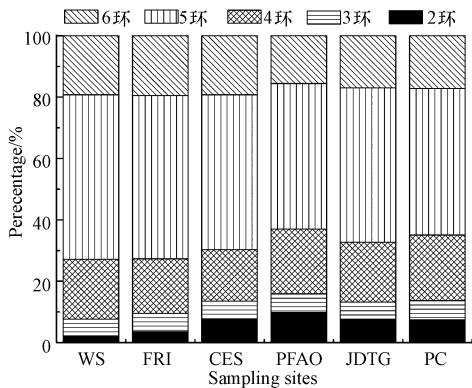


图 2 南昌市不同采样点 PM_{2.5} 中多环芳烃环数分布特征

Fig.2 The distribution of PAHs in PM_{2.5} at different sites in Nanchang City

2.2 PM_{2.5} 中 PAHs 的健康风险评价

PAHs 中 BaP 最早被发现具有强致癌性和致畸性,严重危害人体健康,因此世界卫生组织 (WHO) 选其为 PAHs 总致癌性的标志物^[17].本研究中 BaP 质量浓度与总 PAHs 质量浓度的相关系数达 0.9886, 因此可选 BaP 反映南昌市 PM_{2.5} 中 PAHs 的健康风险. 各 PAHs 单体的 BaP 毒性当量 (Benzo[a] pyrene Equivalent, BEQ) 可通过各 PAHs 的毒性当量因子 (Toxic equivalence factors, TEFs)^[18] 与各 PAHs 质量浓度的乘积计算, 结果见表 2. 从表 2 中可以看出各采样点的总毒性当量变化不大, 范围 9.458—14.454 ng·m⁻³, 平均 11.345 ng·m⁻³. 本研究中 12% 的 PM_{2.5} 样品中 PAHs 的 BEQ 超过 WHO 限值 1 ng·m⁻³, 约有 10% 的样品 BEQ 超过我国环境空气质量标准限值 2.5 ng·m⁻³, 表明南昌市 PM_{2.5} 中 PAHs 对人体健康存在潜在危害. 与国内外城市相比, 南昌市秋季 PM_{2.5} 中 PAHs 的 BEQ 高于合肥市秋季 (3.914 ng·m⁻³)^[19] 和昆明城区 (2.94—6.28 ng·m⁻³)^[20], 远低于太原市 (日间 75.5 ng·m⁻³, 夜间 100.0 ng·m⁻³)^[21], 低于伊朗德黑兰市 PM_{2.5} 中室外 PAHs 的 BEQ (27.50 ng·m⁻³)^[22], 但高于意大利托斯卡纳市 (0.57 ng·m⁻³)^[23].

2.3 PM_{2.5} 中 PAHs 的来源分析

2.3.1 特征化合物比值法

燃烧种类和条件的不同, 会导致 PAHs 在组成和所占比例方面有所差异, 因此可根据不同的 PAHs

特征比值定性识别不同排放来源^[24].研究中常用的特征比值包括 $\rho(\text{BaP})/\rho(\text{BghiP})$ 、 $\rho(\text{Phe})/\rho(\text{Ant})$ 、 $\rho(\text{Ant})/\rho(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\rho(\text{Fla})/\rho(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 、 $\rho(\text{BaA})/\rho(\text{BaA} + \text{Chr})$ 、 $\rho(\text{InP})/\rho(\text{InP} + \text{BghiP})$ 、 $\rho(\text{BaP})/\rho(\text{BaP} + \text{Chr})$ 等,本研究的各种特征比值如表 3 所示.

表 2 南昌市不同采样点 PM_{2.5} 中 PAHs 的毒性当量 (ng·m⁻³)

	Table 2 BEQ of PAHs in PM _{2.5} of different sites in Nanchang City (ng·m ⁻³)						
	TEFs	WS	FRI	CES	PFAO	JD TG	PC
NaP	0.001	0.0010	0.0013	0.0035	0.0033	0.0017	0.0036
Acy	0.001	—	—	—	—	—	—
Flu	0.001	—	—	—	—	—	—
Ace	0.001	—	—	—	—	—	—
Phe	0.001	0.0010	0.0009	0.0011	0.0012	0.0013	0.0015
Ant	0.01	—	—	—	—	—	—
Fla	0.001	0.0010	0.0009	0.0011	0.0012	0.0013	0.0015
Pyr	0.001	0.0008	0.0008	0.0013	0.0010	0.0010	0.0013
Chr	0.01	0.009	0.009	0.013	0.011	0.010	0.013
BaA	0.1	0.088	0.077	0.134	0.108	0.108	0.137
BbF	0.1	0.242	0.236	0.283	0.333	0.267	0.382
BkF	0.1	0.133	0.164	0.175	0.153	0.135	0.183
BaP	1	2.671	2.500	3.021	3.301	2.571	3.815
DahA	5	6.173	6.173	6.173	6.173	6.173	6.173
BghiP	0.01	0.015	0.017	0.022	0.016	0.014	0.022
InP	0.1	0.125	0.122	0.138	0.162	0.130	0.190
Σ 16-PAHs		9.458	9.716	12.307	11.898	10.239	14.454

表 3 PM_{2.5} 样品及潜在污染源 PAHs 的特征比值

Table 3 The characteristic parameters of PM _{2.5} samples and potential sources						
研究出处 Reference		$\rho(\text{BaA})/\rho(\text{BaA} + \text{Chr})$	$\rho(\text{BaP})/\rho(\text{BghiP})$	$\rho(\text{Fla})/\rho(\text{Fla} + \text{Pyr})$	$\rho(\text{InP})/\rho(\text{InP} + \text{BghiP})$	$\rho(\text{BaP})/\rho(\text{BaP} + \text{Chr})$
本研究	PM _{2.5}	0.49—0.57	1.10—3.18	0.51—0.59	0.35—0.60	0.74—0.82
	建筑水泥尘	0.39—0.42	1.53—3.29	0.50—0.52	—	0.77—0.83
	道路扬尘	0.38—0.43	0.72—4.40	0.50—0.54	—	0.35—0.60
	建设施工尘	0.39—0.41	0.91—2.21	0.50—0.53	—	0.37—0.46
	冶金冶炼尘	0.40—0.42	1.09—3.69	0.50—0.51	0.36—0.39	0.35—0.65
	火电燃烧尘	0.40—0.41	1.47—2.67	0.5	0.49	0.52—0.58
	土壤风沙尘	—	—	0.51—0.53	—	0.27—0.84
源排放 ^[15, 25-26]	柴油尾气	0.30	0.46—0.81	0.35—0.45	0.06—0.32	0.73
	汽油尾气	0.40—0.60	0.3—0.4	0.39—0.65	0.21—0.43	0.49
	天然气燃烧	0.24—0.54	—	0.31—0.68	0.15—0.49	—
	燃煤	0.27—0.65	0.9—6.6	0.36—0.78	0.19—0.77	—
	木柴燃烧	0.21	—	0.35—0.67	0.24—0.60	—
	植物燃烧	—	—	0.42—0.56	0.31—0.39	—

本研究 PM_{2.5} 中 $\rho(\text{BaA})/\rho(\text{BaA} + \text{Chr})$ 比值为 0.49—0.57, 均大于 0.35, 表明来自燃烧源^[27], 但其值高于柴油尾气及木柴燃烧的特征值, 因此表明 PAHs 主要来自燃煤和汽油尾气. $\rho(\text{BaP})/\rho(\text{BghiP})$ 比值 1.10—3.18 在燃煤 0.9—6.6 范围内, 且与冶金冶炼尘和火电燃烧尘接近, 说明了燃煤是 PAHs 的重要来源^[28]. $\rho(\text{Fla})/\rho(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 值在汽油尾气、天然气燃烧、燃煤和木柴燃烧值范围内, 表明这些来源影响了 PAHs. $\rho(\text{InP})/\rho(\text{InP} + \text{BghiP})$ 值, 显示出石油源、煤、生物质及机动车尾气的综合贡献. 农业燃烧在长江中下游流域和南方秋季存在较为普遍^[29], 结合南昌农作物种植及能源结构特点, 可判断南昌市秋季 PM_{2.5} 中 PAHs 主要来源于煤和农业燃烧及一定的汽油尾气的排放.

2.3.2 主成分分析法

除特征化合物比值法判断 PAHs 的来源外,主成分分析法(Principle components analysis,PCA)目前也已广泛应用于污染物来源的识别.本研究以采集的 60 个 PM_{2.5} 样品为样本,每个样品 12 种多环芳烃,即 12 个变量.利用 SPSS19.0 软件进行 R 型主成分分析,主因子的入选以相关阵的特征值为标准,因子载荷矩阵的变换采用方差极大(Varimax)旋转法,主因子分析模型提取出 3 个主因子,对原有变量的累积成因率达到 96.99%,可解释 PM_{2.5} 中 PAHs 的主要来源信息,结果见表 4.

表 4 南昌市 PM_{2.5} 中多环芳烃主成分分析结果
Table 4 Principal component analysis results of PAHs in PM_{2.5} of Nanchang City

	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3
BaA	0.812	0.431	0.357
Pyr	0.789	0.468	0.359
Fla	0.774	0.483	0.367
Phe	0.774	0.484	0.365
Chr	0.769	0.474	0.380
BbF	0.752	0.513	0.403
InP	0.735	0.530	0.402
BaP	0.709	0.574	0.386
DahA	0.663	0.629	0.352
BghiP	0.460	0.809	0.289
BkF	0.481	0.779	0.319
NaP	0.416	0.328	0.848
方差贡献率/%	47.78	31.14	18.07

由表 4 可以看出,因子 1 主要与 4、5 环 PAHs 有很强的相关性,BaA、Pyr、Fla、Phe、Chr 是天然气和燃煤的标志组分^[30],其中 Pyr 和 Chr 又是植物、木柴燃烧指示物^[16],因此因子 1 代表化石燃料燃烧源.因子 2 可能与机动车排放有关,因其中 5、6 环 PAHs 荷载值较高,且 BghiP 是汽油发动机尾气排放的指纹物质^[31],BkF 则在柴油车尾气中含有较高浓度^[17].仅 2 环 NaP 在因子 3 上有较高的负载,低环化合物可能是石油的挥发造成.通过主成分分析可知,南昌市秋季 PM_{2.5} 中 PAHs 排放源主要是燃煤源和机动车尾气排放,与北京^[4]、重庆^[5]、昆明^[19]和南京^[32]研究结论一致.

3 结论(Conclusion)

南昌市秋季 PM_{2.5} 中 16 种 PAHs 总浓度变化范围为 3.55—39.97 ng·m⁻³,高于文献报道的夏季浓度含量,低于冬季浓度含量.在环数分布上,以 5—6 环 PAHs(占 68.44%)为主,机动车尾气排放特征明显. BaP 的毒性当量结果显示,有 12% 的样品高于 WHO 限值(1 ng·m⁻³),约有 10% 的样品超过环境空气质量标准(2.5 ng·m⁻³),表明南昌市 PM_{2.5} 中 PAHs 对人体健康存在潜在危害.利用 PAHs 特征化合物比值法分析,发现南昌市 PM_{2.5} 中 PAHs 主要来源于燃煤、机动车尾气排放、农业燃烧及少量的石油挥发.

参考文献(References)

[1] 史纯珍,屈瑶,毛旭. 大气细颗粒物(PM_{2.5}) 中多环芳烃的分析测定与污染特征[J].环境化学,2015,34(8):1417-1423.
SHI C Z, QU Y, MAO X. Analysis and pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM_{2.5} [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(8): 1417-1423 (in Chinese).
[2] 张树才,张巍,王开颜,等. 北京东南郊大气 TSP 中多环芳烃浓度特征与影响因素[J]. 环境科学,2007,28(3):460-465.
ZHANG S C, ZHANG W, WANG K Y, et al. Concentration characteristics and influencing factors of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in TSP in the southeastern suburb of Beijing, China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2007, 28(3): 460-465 (in Chinese).
[3] 沈宏雷,汤莉莉,李红双,等. 南京大气 PM₁₀ 谱分布和细粒子中多环芳烃的研究[J]. 环境科学与技术,2011,34(7):66-72.
SHEN H L, TANG L L, LI H S, et al. Spectral distribution characteristics in PM₁₀ and PAHs in fine particles from different districts in

- Nanjing City[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(7): 66-72(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 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.
- ZHAO X Y, REN L H, JI Y Q, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM₁₀ and PM_{2.5} in spring in Chongqing [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(12): 1395-1402(in Chinese).
- [6] 彭希琰,何宗健,刘小真,等. 南昌市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃的来源解析[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(10): 28-32.
- PENG X L, HE Z J, LIU X Z, et al. Source apportionment of PAHs in fine particulate matter (PM_{2.5}) of Nanchang City [J]. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(10): 28-32(in Chinese).
- [7] 郭琳,何宗健,尹丽. 南昌市夏季 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 58-62.
- GUO L, HE Z J, YIN L. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in summer of Nanchang [J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(11): 58-62(in Chinese).
- [8] 彭希琰,何宗健,刘小真,等. 南昌市大气细粒子 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征及源解析[J]. 南昌大学学报(理科版), 2009, 33(5): 499-504.
- PENG X L, HE Z J, LIU X Z, et al. Characteristic of PAHs pollution and their sources apportionment in fine particulate matter (PM_{2.5}) of Nanchang City[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2009, 33(5): 499-504(in Chinese).
- [9] HE J B, FAN S X, MENG Q Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing, China: Distributions, sources and meteorological influences[J]. Atmospheric Environment, 2014, 89: 207-215.
- [10] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准(GB 3095—2012)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- Ministry of Environmental Protection of the P.R.C.. Ambient Air Quality Standard (GB 3095—2012)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012(in Chinese).
- [11] World Health Organization, Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publication, European Series [S]. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, 2000.
- [12] 王超,张霖琳,刀谱,等. 京津冀地区城市空气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 1-6.
- WANG C, ZHANG L L, DAO X, et al. Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particulates of Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. China Environmental Science, 2015, 35(1): 1-6(in Chinese).
- [13] 张洪,何建昇,赵小珍,等. 太原市城中村采暖期大气中 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征[J]. 环境化学, 2015, 34(3): 602-604.
- ZHANG H, HE J S, ZHAO X Z, et al. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} during the heating season in Taiyuan City, China[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(3): 602-604(in Chinese).
- [14] KONG S, LI X, LI L et al. Variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM_{2.5} during winter haze period around 2014 Chinese Spring Festival at Nanjing: Insights of source changes, air mass direction and firework particle injection[J]. Science of the Total Environment, 2015, 520: 59-72(in Chinese).
- [15] KONG S, DING X, BAI Z, et al. A seasonal study of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in five typical cities of Liaoning Province, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1/3): 70-80.
- [16] 段凤魁,贺克斌,马永亮. 北京 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征及来源研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(7): 1363-1371.
- DUAN F K, HE K B, MA Y L. Concentration and sources of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM_{2.5} in Beijing [J]. Acta Scientiae circumstantiae, 2009, 29(7): 1363-1371(in Chinese).
- [17] 杨飞,杨凌霄,孟川平,等. 济南市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评估[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(3): 389-396.
- YNG F, YANG L X, MENG C P, et al. Seasonal variation and health-risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Jinan [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(3): 389-396(in Chinese).
- [18] Larsen J C, Larsen P B. Chemical carcinogens//Hester R, Harrison R. Air Pollution and health[M]. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry, 1998: 33-56.
- [19] 郑志侠,潘成荣,高坤龙,等. 合肥市大气颗粒物 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中 PAHs 的污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(6): 55-59.
- ZHENG Z X, PAN C R, GAO K L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM₁₀ and PM_{2.5} of Hefei City[J]. Environmental Science Survey, 2014, 33(6): 55-59(in Chinese).
- [20] 毕丽玫,郝吉明,宁平,等. 昆明城区大气 PM_{2.5} 中 PAHs 的污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 659-667.
- GUO L M, HAO J M, NING P, et al. Characteristics and sources apportionment of PM_{2.5}-bound PAHs in Kunming [J]. China Environmental Science, 2015, 35(3): 659-667(in Chinese).
- [21] 郭利利,崔阳,张桂香,等. 太原市采暖期大气 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征[J]. 地球与环境, 2015, 43(2): 198-204.
- GUO L L, CUI Y, ZHANG G X, et al. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} during the heating season in Taiyuan city village, China[J]. Earth and Environment, 2015, 43(2): 198-204(in Chinese).

- [22] HASSANVAND M S, NADDAFI K, FARIDI S, et al. Characterization of PAHs and metals in indoor/outdoor PM₁₀/PM_{2.5}/PM₁ in a retirement home and a school dormitory[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 527-528: 100-110.
- [23] MARTELLINI T, GIANNONI M, LEPRI L, et al. One year intensive PM_{2.5} bound polycyclic aromatic hydrocarbons monitoring in the area of Tuscany, Italy. Concentrations, source understanding and implications[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 252-258.
- [24] NISBET L C T, LAGOY P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1993, 16(3): 290-300.
- [25] CHEN Y J, SHENG G Y, BI X H, et al. Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(6): 1861-1867.
- [26] KHALILI N R, SCHEFF P A, HOLSEN T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(4): 533-542.
- [27] PANKOW J F. An absorption model of gas/particle partitioning of organic compounds in the atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(2): 185-188.
- [28] 杨成阁, 胡菁, 郭军, 等. 贵阳市冬、夏季 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2014, 33(1): 161-162.
YANG C G, HU J, GUO J, et al. Characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in winter and summer in Guiyang[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(1): 161-162 (in Chinese).
- [29] MENG Q Z, FAN S X, HE J B, et al. Particle size distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during a heavy haze episode in Nanjing, China[J]. *Particuology*, 2015, 18: 127-134.
- [30] KONG S, LI X, LI Q, et al. Subway construction activity influence on polycyclic aromatic hydrocarbons in fine particles: Comparison with a background mountainous site[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 161-162: 82-92.
- [31] HARRISON R M, SMITH D, LUHANA L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, UK[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(3): 825-832.
- [32] 孟庆紫, 樊曙先, 何佳宝, 等. 南京北郊冬季大气粗细颗粒物中 PAHs 来源解析[J]. *环境化学*, 2015, 34(3): 417-424.
MENG Q Z, FAN S X, HE J B, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in fine and coarse particulate matter during winter in northern suburbs of Nanjing[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(3): 417-424 (in Chinese).