

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020050804

刘莹莹, 潘超, 李全威, 等. 开封市夏秋季交通干道颗粒物中多环芳烃特征分析及健康风险评估[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2789-2795.

LIU Yingying, PAN Chao, LI Quanwei, et al. Characteristics and health risk assessment of PAHs in particulate matter of mainroads in Kaifeng in summer and autumn[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (9): 2789-2795.

开封市夏秋季交通干道颗粒物中多环芳烃特征 分析及健康风险评估*

刘莹莹¹ 潘超¹ 李全威¹ 徐香¹ 苏艳霞^{1,2}**

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封, 475004; 2. 河南省大气污染综合防治与生态安全重点实验室, 开封, 475004)

摘要 为了解开封市夏、秋季交通干道大气颗粒物中多环芳烃浓度情况, 判断对人体的危害程度, 于2019年7月至9月采集开封市金明大道和郑开大道交界处的大气颗粒物样品, 使用GC-MS定量分析不同样品中的16种多环芳烃的质量浓度, 采用环境健康风险评价方法, 开展开封市夏秋季交通干道颗粒物中PAHs的健康风险评价研究. 结果表明, 开封市夏秋季TSP、PM₁₀、PM_{2.5}浓度整体上低于《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准限值, 二次PM贡献率大; TSP、PM₁₀、PM_{2.5}中∑PAHs质量浓度范围分别为7.64—19.42、5.171—9.40、2.52—4.79 ng·m⁻³, 单体平均浓度范围分别为0.466—1.488、0.177—0.934、0.087—0.493 ng·m⁻³, PAHs主要分布于可吸入颗粒物中; 以BaP为基准, 计算等效毒性因子以及通过呼吸暴露途径对成人和儿童造成的超额终生致癌风险, 分别为1.62×10⁻⁷和7.75×10⁻⁸, 对人体健康风险不明显.

关键词 多环芳烃, 交通干道, GC-MS, 风险评估, 开封.

Characteristics and health risk assessment of PAHs in particulate matter of mainroads in Kaifeng in summer and autumn

LIU Yingying¹ PAN Chao¹ LI Quanwei¹ XU Xiang¹ SU Yanxia^{1,2}**

(1. The College of Environment and Planning Henan University, Kaifeng, 475004, China; 2. Key Laboratory of Air Pollution Prevention and Ecological Safety of Henan Province, Kaifeng, 475004, China)

Abstract In order to understand the concentration and determine the degree of harm to humans of polycyclic aromatic hydrocarbons in the particles of the main roads in summer and autumn in Kaifeng City, the particulate matter samples were collected at the junction of Jinming Avenue and Zhengkai Avenue in Kaifeng City from July to September 2019. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to determine 16 kinds of PAHs in different samples. And then, the method of environment health risk assessment proposed by Nisbet was adopted to assess the health risks of PAHs in particulate matter of mainroads in Kaifeng in summer and autumn. The results showed that: The concentration of TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} were generally lower than the limit values for the class 2 according to the National Ambient Air Quality Standard (GB 3095—2012), and the secondary PM contribution rate was large; the total concentration of PAHs in TSP, PM₁₀, and PM_{2.5}

2020年5月8日收稿(Received: May 8, 2020).

* 河南省大学生创新创业训练计划项目(201910475096)资助.

Supported by the Provincial University Student Innovation and Entrepreneurship Training Programs (201910475096).

** 通讯联系人 Corresponding author, Tel:15993390529, E-mail: syx@henu.edu.cn

were 7.64—19.42, 5.171—9.40 and 2.52—4.79 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, and the mean monomer concentration were 0.466—1.488, 0.177—0.934 and 0.087—0.493 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively; PAHs were mainly distributed in inhalable particles. Based on BaP, calculating the toxic equivalent factor and the incremental lifetime cancer risks to adults and children through respiratory exposure routes, which were 1.62×10^{-7} and 7.75×10^{-8} , respectively, which were not obvious risk to human health.

Keywords PAHs, traffic arterial road, GC-MS, risk assessment, Kaifeng.

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons 简称 PAHs)是大气中广泛存在的有机污染物,以稠环方式相连,具有“致癌、致畸、致突变”特性^[1-3],对人体健康危害极大.大气中多环芳烃主要来自石油挥发、石油燃烧、化石燃料、垃圾燃烧等人类活动及一些自然过程^[4-5],并以气相和颗粒相的形式存在.颗粒相可吸附在固体颗粒物表面,颗粒的粒径越小,呈现的比表面积越大,吸附 PAHs 的能力越强^[6-8].

近年来,许多国内外学者对颗粒物中多环芳烃进行了特征分析、来源解析以及风险评估.陈瑞等^[9]利用高效液相色谱法对兰州市社区大气细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃(PAHs)进行质量浓度及其组成特征分析,运用毒性当量浓度及终身超额致癌风险(ILCR)进行毒性评价.严宙宁等^[10]对深圳市南山区和龙岗区进行大气采样,使用高效液相色谱仪定量分析样品 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 含量;张艺璇等^[11]采集长春市秋季大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,使用气相色谱质谱仪(GC-MS)分析了样品中 17 种多环芳烃的浓度和组成特征,运用主成分分析法和比值法确定 PAHs 的污染来源;Kim 等^[12]在 Environment International (EI)发表了 PAHs 对人体健康的影响.

开封市地处中原地区,地势较低,不利于污染物的扩散.每逢夏、秋季大量游客前来参观,庞大的交通流量给当地天气质量状况带来重要影响.自 2017 年,全国各省雾霾现象日益严重,河南省的天气状况同样不容乐观.根据调查,2018 年,开封市空气质量达标天数仅占全年 54.12%,超标天数比例高达 45.88%.2019 年,一年中空气污染严重时 $\text{PM}_{2.5}$ 含量最大值达 $278\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 的含量高达 $286\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.大气中颗粒物含量维持在高水平,增大了多环芳烃对人体危害的可能性,因此对于可吸入颗粒物 PM_{10} 和细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 的研究一直是近年来的热点话题.

开封市金明大道与郑开大道交界处,每天有交警执勤指挥,长期暴露于环境中,且采样点周围有金明广场等娱乐场所,经常有老人孩子前往健身娱乐.因此,本文选取交界处作为研究对象,采集第三季度(7—9月)的大气样品,使用 GC-MS 对 TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等 3 种颗粒物中的多环芳烃的浓度和组成特征进行分析,并通过计算苯并芘等效致癌浓度和终身致癌超额危险度进行健康风险评估.

1 材料和方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

本研究在开封市金明大道与郑开大道交界处设置采样点,依据《环境空气 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的测量重量法》(HJ618-2011)使用中流量大气采样器采集大气颗粒物.采集时间自 7 月至 9 月,每周采样 1 次,每月共计采样 3 次,设置平行样,每日采样周期均为当日 8:00 至 18:00. TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 有效样各 18 个,采样体积标准状况下约为 $65\ \text{m}^3$.采样同时记录采样时间、气压、实时温度、平均温度、相对湿度等气象参数.雨后 48 h 内不采样.

1.2 预处理和分析

1.2.1 样品提取与浓缩

采用快速溶剂萃取法提取颗粒物中有机物.将滤膜和环膜剪碎,同硅藻土交叉放入萃取池中,萃取溶剂为正己烷和丙酮(体积比为 3:1)的混合溶液,经过润洗、预热、注液、静态萃取、冲洗、气体吹扫,最终提取有机物多环芳烃.氮吹浓缩法进行浓缩定容.提取液转移至浓缩瓶中,并用正己烷润洗收集瓶,使用多功能氮吹仪于 $45\ ^\circ\text{C}$ 下进行氮吹浓缩,将提取液浓缩至 5.0 mL 以下时,再加入正己烷,继续浓缩,使溶剂完全转化为正己烷,浓缩至 1.0 mL 以下.制备的样品在 $4\ ^\circ\text{C}$ 下冷藏保存,等待上机.

1.2.2 PAHs 的测定

气相色谱质谱仪测定 PAHs 含量: 利用气相色谱-质谱联用仪, 配备石英毛细管色谱柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 进样口温度为 250 °C, 分流比 60:1, 升温程序为在 70 °C 条件下保持 2 min 再以 10 °C·min⁻¹ 的速度升温至 320 °C 保持 5.5 min, 离子源温度为 230 °C, 离子化能量为 70 eV, 传输线温度为 280 °C, 进样量为 2 μL, 对净化后的样品进行定量分析。

实验仪器及实验分析方法如表 1 所示。

表 1 实验仪器及分析方法

Table 1 Experimental instruments and analysis methods

实验项目 Experimental projects	仪器名称 Instrument name	仪器规格及型号 Instrument specifications and models
滤膜前处理	环膜	石英纤维(直径Φ75 mm)
	滤膜	石英纤维(直径Φ90 mm)
	分析天平	
颗粒物采集	马弗炉	
	智能中流量采样器总悬浮微粒采样器 组合式多功能切割器	TH-150A型
颗粒物质量浓度的测定	分析天平	
多环芳烃浓度的测定	气相色谱-质谱联用仪	5975C/890N 型(美国安捷伦)
	全自动固相萃取仪	Preval SPE 304 型(北京普立泰科)
	多功能氮吹仪	HN200

1.3 质量保证和质量控制

实验在称量过程进行质量控制、称量前后对天平进行校准, 每次称量使用同一台天平, 多次称量, 结果的误差不大于 15 μg。实验过程中利用空白实验、平行实验进行质量控制, 外标法定量, 同时使用无目标物的基质进行回收实验。多环芳烃标准品购置于美国 AccuStandard Inc, 16 种多环芳烃标准曲线 R^2 维持在 0.999 以上, 加标回收率在 68%—87.0% 之间, 方法检出限在 0.01—0.20 ng·m⁻³ 之间, 平行样的相对误差均在 12% 以内。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 大气颗粒物浓度变化

通常开封市夏秋季相对春冬季, 空气质量好, 能见度高, 雾霾天气出现较少。交通要道附近空气中不同粒径颗粒物浓度如图 1 所示。

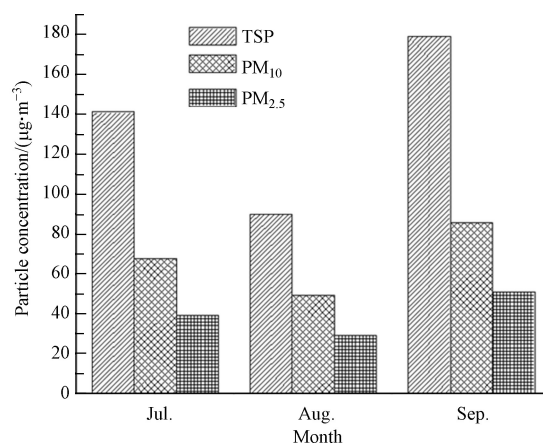


图 1 2019 年 7—9 月份采样点大气颗粒物浓度对比图

Fig.1 Comparison of atmospheric particulate concentration at sampling points from July to September 2019

由图 1 可知, 8 月份天气质量状况最佳, TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 三类颗粒物均符合《环境空气质量标准》(GB3095-2012)一级标准, 7 月次之, 三类颗粒物均符合二级标准; 9 月最差, TSP 含量接近 180 μg·m⁻³. 查阅真气网, 开封市 2019 年 7、8、9 月份空气质量达标率在 60% 左右, 轻度污染约占 38.9%, 中度污染约占 1.1%; 首要污染物均为 O₃, 这是夏季高温、高湿、高紫外线气象条件的结果.

PM_{2.5} 和 PM₁₀ 主要来自工业生产、机动车尾气等, SO₂、NO₂、CH 化合物等气态污染物参与光化学反应也可产生 PM_{2.5}^[13-14], 沙尘、建筑扬尘、交通扬尘等各类扬尘源可产生 PM₁₀^[15]. 利用细颗粒物在 PM₁₀ 中的占比, 可判断二次 PM 的贡献率. $\rho_{PM_{2.5}}/\rho_{PM_{10}}$ 越大, 二次 PM 的贡献率越大, 相反, 扬尘源的贡献率越大^[16]. 开封市夏秋季 $\rho_{PM_{2.5}}/\rho_{PM_{10}}$ 比值分别为 58.3354%、59.7166%、59.736%, 说明该交通干道处 8、9 月份的空气中二次 PM 贡献率较大.

2.2 颗粒物中多环芳烃浓度及环数分析

2.2.1 浓度变化情况

开封市夏秋季交通要道大气颗粒物样品中多环芳烃的 16 种单体浓度均有检出, 分布范围如图 2 所示. Ant、BaP 质量浓度较低, Acl、Phe、Chr、Bbf、Bkf、DBahA 质量浓度较高. TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 中 Σ PAHs 质量浓度范围分别为 7.64—19.42、5.171—9.40、2.520—4.787 ng·m⁻³, 单体平均浓度范围分别为 0.466—1.488、0.177—0.934、0.087—0.493 ng·m⁻³, 多环芳烃主要分布在可吸入颗粒物中. 与同季节其他城市颗粒物 PM_{2.5} 中 PAHs 质量浓度相比, 开封市 PM_{2.5} 中的 PAHs 明显低于南昌市^[17] (17.95 ng·m⁻³, 2013 年)、伊宁市^[18] (17.95 ng·m⁻³, 2016 年)、长春市^[11] (15.69 ng·m⁻³, 2017 年).

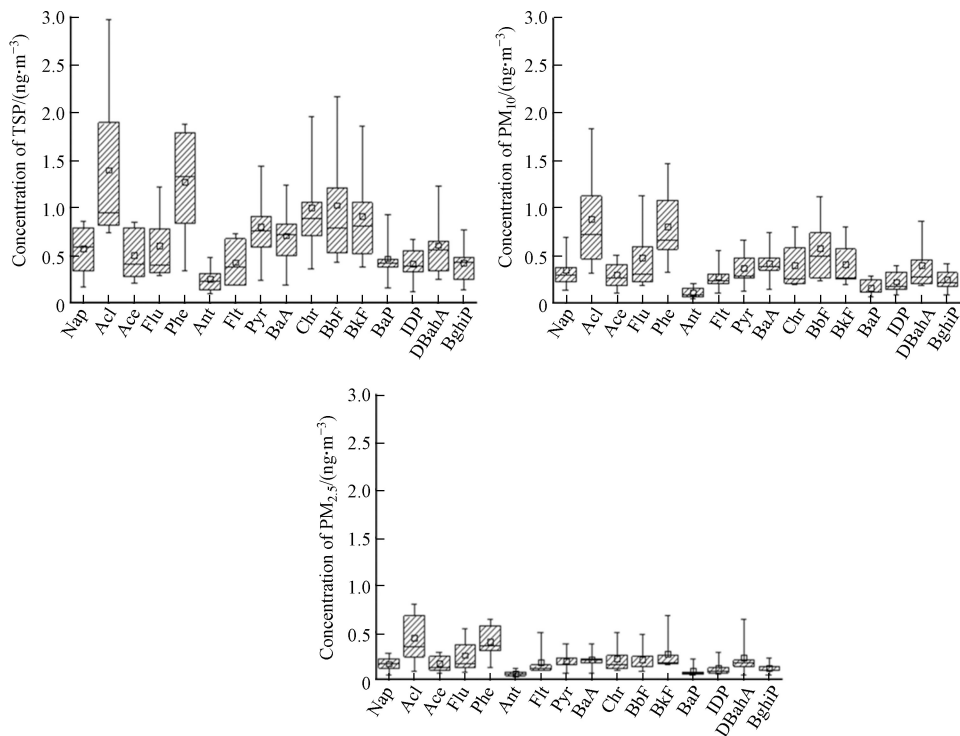


图 2 Σ PAHs 在 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中的质量浓度
Fig. 2 The concentration of Σ PAHs in TSP, PM₁₀ and PM_{2.5}

2.2.2 环数分析

图 3 为 PAHs 在颗粒物上的环数分布, 自下而上分别是 2 环 (Nap)、3 环 (Acl、Ace、Flu、Phe、Ant)、4 环 (Flt、Pyr、BaA、Chr)、5 环 (BbF、BkF、BaP)、6 环 (IDP、DBahA、BghiP). 其中 2、3 环是低环数, 5、6 环是高环数. 通过分析 TSP₁₀₀₋₁₀、PM_{10-2.5}、PM_{2.5} 颗粒物中的 PAHs 环数分布情况发现, 低环数 > 高环数, 以 3、4 环为主; 采集的样品 PM_{2.5} 中不同环数 PAHs 所占比例为 3 环 (41.6%) > 4 环 (23.7%) > 5 环 (16.1%) > 6 环 (13.4%) > 2 环 (5.2%).

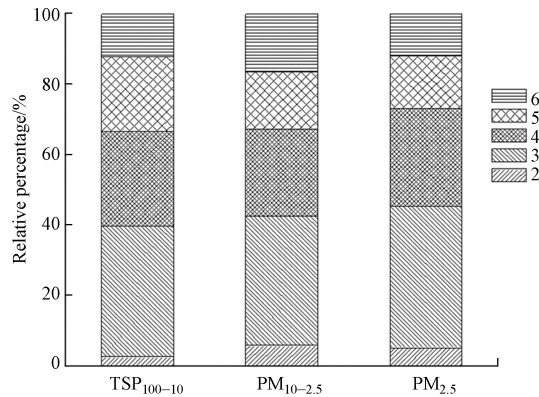


图3 PAHs在颗粒物上的环数分布

Fig.3 The distribution of the number of PAHs on particles

2.2.3 来源解析

依据特征比值法对开封市交通干道细颗粒物 $PM_{2.5}$ 中的 PAHs 进行源解析. 表 2 是项目所设采样点处和文献已报道的 PAHs 来源解析特征比值^[19-20]. 由表 2 得到, 研究对象 ρ_{BaP}/ρ_{BghiP} 比值结果为 0.64, 处于柴油燃烧源范围内, ρ_{Phe}/ρ_{Ant} 、 $\rho_{BaA}/\rho_{BaA+Chr}$ 、 $\rho_{IDP}/\rho_{IDP+BghiP}$, 比值结果分别为 6.47、0.505、0.482, 处于汽油燃烧排放源范围内, 利用 $\rho_{Flu}/\rho_{Flu+Pyr}$ 进行比值, 结果处于燃煤源界定范围内. 由此证明开封市主干道 PAHs 源于汽油、柴油燃烧、燃煤过程, 且汽油的燃烧起主要贡献, 此结果与杨旭曙等^[21]探究的南京中山北路交通干道处大气颗粒物中 PAHs 的来源一致.

表 2 大气颗粒物中各 PAHs 含量的特征比值

Table 2 The characteristic ratio of PAHs content in atmospheric particles

	ρ_{BaP}/ρ_{BghiP}	ρ_{Phe}/ρ_{Ant}	$\rho_{BaA}/\rho_{BaA+Chr}$	$\rho_{Flu}/\rho_{Flu+Pyr}$	$\rho_{IDP}/\rho_{IDP+BghiP}$
采样点 Sampling point	0.64	6.47	0.505	0.445	0.482
燃煤源 Coal source ^[19]	0.9—6.6	3	0.2—0.35	0.4—0.5	>0.5
汽油燃烧 Gasoline burning ^[19-20]	0.3—0.4	3.4-8	>0.35	>0.5	0.2—0.5
柴油燃烧 Diesel combustion ^[20]	0.46—0.81	7.6—8.8	—	—	—

2.3 健康风险评估

$PM_{2.5}$ 是细小颗粒物, 巨大的比表面积可吸附大量有机物, 通过呼吸进入肺泡, 并随人体血液到达全身各处, 对人体健康产生重大影响. 通过计算 Nisbet 等^[22] 确立的以 BaP 为参照物的 16 种优控 PAHs 的 TEF, 用来计算毒性等效浓度 (TEQ), 从而评价 PAHs 对人体健康的影响. TEF 越小, 致癌性越弱, TEF 越接近于 1, 致癌性越强^[23]. 《环境空气质量标准》规定空气 BaP 24 小时平均浓度标准限值为 $2.5 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 16 种多环芳烃的毒性当量因子见表 3.

$$TEQ = \sum C_i \times TEF_i$$

式中, TEQ 为 PAHs 毒性等效浓度, $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$; C_i : 组分浓度, $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$; TEF_i : 毒性当量因子.

呼吸引起的超额终生致癌风险 (ILCR) 计算公式为:

$$ILCR = TEQ \times IR \times EF \times ED \times CSF / (BW \times AT)$$

经计算, 开封市 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 的 TEQ 为 $0.395 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于徐州市^[24] (2016 年, $0.415 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$), 略高于北京市昌平区^[25] (2015 年, $0.354 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$), 参考表 4 人体呼吸暴露参数, 计算通过呼吸暴露途径对成人和儿童造成的超额终生致癌风险, 分别为 1.62×10^{-7} 和 7.75×10^{-8} . 根据美国环境保护署规, $ILCR < 10^{-6}$, 说明对人体健康风险不明显.

表 3 各化合物毒性当量因子记录表

Table 3 The record table of toxicity equivalent factors for each compound

化合物 Compound name	TEF _i	化合物 Compound name	TEF _i
Nap	0.001	BaA	0.1
Acl	0.0001	Chr	0.01
Ace	0.0001	BbF	0.1
Flu	0.0001	BkF	0.1
Phe	0.0001	BaP	1
Ant	0.1	IDP	0.1
Flt	0.001	DBahA	1
Pyr	0.0001	BghiP	0.01

表 4 人体呼吸暴露参数^[26]Table 4 Human respiratory exposure parameters^[26]

人群Group	呼吸速率IR/(m ³ ·d ⁻¹)	暴露天数EF/(d·a ⁻¹)	暴露时长ED/a	体重BW /kg	寿命AT/d	致癌强度系数CSF/(kg·d·mg ⁻¹)
Adult	20	365	30	61	75×365	3.14
Child	7.5	365	10	16	75×365	3.14

3 结论 (Conclusion)

(1) 开封市 7—9 月交通干道交界处颗粒物质量浓度符合《环境空气质量标准》二级标准, 8 月天气质量状况最佳, 9 月最差, 在此研究季节中二次 PM 贡献率较大。

(2) 开封市大气 PM_{2.5} 中∑PAHs 质量浓度平均为(3.49±0.097) ng·m⁻³, 低于全国其他城市和地区, 多环芳烃主要分布在可吸入颗粒物中。

(3) 颗粒物中多环芳烃以 3—4 环低环为主, 且根据多环芳烃特征比值分析, 研究对象主要受石油燃烧源的影响, 可间接反映使用清洁能源的汽车以及控制交通量的必要性。

(4) 开封市 PM_{2.5} 中 PAHs 通过呼吸暴露途径对人体造成的超额终生致癌风险小于美国环境保护署规的 10⁻⁶ 风险阈值, 证明对人体健康风险不明显。

参考文献 (References)

- [1] YUE H F, YUN Y, GAO R, et al. Winter polycyclic aromatic hydrocarbon-bound particulate matter from peri-urban North China promotes lung cancer cell metastasis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24): 14484-14493.
- [2] PIETERSE B, FELZEL E, WINTER R, et al. PAH-CALUX, an optimized bioassay for AhR-mediated hazard identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) as individual compounds and in complex mixtures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11651-11659.
- [3] YANG P, WANG Y X, CHEN Y J, et al. Urinary polycyclic aromatic hydrocarbon metabolites and human semen quality in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(2): 958-967.
- [4] 高庚申, 迟峰, 毛金群, 等. 贵阳市大气细颗粒物中多环芳烃时空分布特征 [J]. *环境监控与预警*, 2019, 11(4): 43-47.
GAO G S, CHI F, MAO J Q, et al. Pollutant characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric fine particulate matter in Guiyang City [J]. *Environmental Monitoring and Early Warning*, 2019, 11(4): 43-47 (in Chinese).
- [5] BANDOWE B A, MEUSEL H, HUANG R J, et al. PM_{2.5}-bound oxygenated PAHs, nitro-PAHs and parent-PAHs from the atmosphere of a Chinese megacity: seasonal variation, sources and cancer risk assessment [J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 473-474(3): 77-87.
- [6] LAMMEL G, SEHILI A M, BOND T C, et al. Gas/particle partitioning and global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons—a modelling approach [J]. *Chemosphere*, 2009, 76(1): 98-106.
- [7] WANG X, CHOW J C, KOHL S D, et al. Characterization of PM_{2.5} and PM₁₀ fugitive dust source profiles in the Athabasca Oil Sands Region [J]. *Journal of the Air & Waste Manage Association*, 2015, 65(12): 1421-1433.
- [8] WATSON J G, CHOW J C, LOWENTHAL D H, et al. PM_{2.5} source apportionment with organic markers in the Southeastern Aerosol Research and Characterization (SEARCH) study [J]. *Journal of the Air & Waste Manage Association*, 2015, 65(9): 1104-1118.
- [9] 陈瑞, 李拥军, 杨海霞, 等. 2018年兰州社区大气细颗粒物中多环芳烃的污染特征及健康风险评价 [J]. *卫生研究*, 2019,

- 48(6): 957-963.
- CHEN R, LI Y J, YANG H X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in fine particulate matter in Lanzhou community [J]. *Health Research*, 2019, 48(6): 957-963 (in Chinese).
- [10] 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.
- YAN Z N, MOU J F, YAN Y, et al. Pollution status and source apportionment of atmospheric particulates (PM_{2.5}) in Shenzhen city [J]. *Practical Preventive Medicine*, 2019, 26(10): 1172-1176 (in Chinese).
- [11] 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 等. 2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 564-573.
- ZHANG Y X, CAO F, ZHENG H, et al. Source apportionment and health risk assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM_{2.5} in Changchun city, autumn of 2017 [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 564-573 (in Chinese).
- [12] KIM K H, JAHAN S A, KABIR E, et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects [J]. *Environment International*, 2013, 60: 71-80.
- [13] 李健, 安俊岭, 陈勇, 等. 脱硝技术与天然气应用情景下京津冀地区空气质量模拟评估 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(4): 472-482.
- LI J, AN J L, CHEN Y, et al. Simulation of air quality over Beijing, Tianjin, and Hebei province of China with application of catalysts for selective catalytic reduction of NO_x to diesel exhaust and natural gas boilers [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(4): 472-482 (in Chinese).
- [14] 赵顺征, 易红宏, 唐晓龙, 等. 空气细颗粒物污染的来源、危害及控制对策 [J]. *科技导报*, 2014, 32(33): 61-66.
- ZHAO S Z, YI H H, TANG X L, et al. Source and harm of air fine particulate matter pollution and control strategies [J]. *Science and Technology Herald*, 2014, 32(33): 61-66 (in Chinese).
- [15] 江瑶, 汪婷, 沈利洪, 等. 2012年苏州地区PM_{2.5}和PM₁₀的时空变化特征分析 [J]. *热带气象学报*, 2015, 31(1): 128-136.
- JIANG Y, WANG T, SHEN L H, et al. Analysis on tempo-spatial variations of PM_{2.5} and PM₁₀ in Suzhou region in 2012 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(1): 128-136 (in Chinese).
- [16] 王涛, 康淮钰, 刘梓雅, 等. 基于比值和偏相关的大气污染物源识别-以2014年江苏省为例 [J]. *复旦大学学报(自然科学版)*, 2016, 55(4): 538-542.
- WANG T, KANG H Y, LIU Z Y, et al. Source identification of atmospheric pollutants based on specific value and partial correlation-taking Jiangsu province in 2014 as an example [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science Edition)*, 2016, 55(4): 538-542 (in Chinese).
- [17] 赵阳, 林晓辉, 胡恭任, 等. 南昌市秋季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 Y, LIN X H, HU G R, et al. Pollution characteristics, risk assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} collected in autumn in Nanchang City [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(3): 500-507 (in Chinese).
- [18] 胡锋, 王兴磊, 赵晶. 伊宁市夏季PM_{2.5}载带多环芳烃污染特征及来源解析 [J]. *常熟理工学院学报*, 2018, 32(2): 114-118.
- HU F, WANG X L, ZHAO J. An analysis of the pollution characteristics and source identification of the PM_{2.5} carrying PAHs in the city of Yining in Summer [J]. *Journal of Changshu Institute of Technology*, 2018, 32(2): 114-118 (in Chinese).
- [19] GSCHWEND P M, HITES R A. Fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine and lacustrine sediments in the northeastern United States [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(12): 2359-2367.
- [20] ROGGE W F, HILDEMAN L M, MAZUREK M A, et al. Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. *Environmental Science and Technology*; (United States), 1993, 27(4): 636-651.
- [21] 杨旭曙, 王正萍, 宋艳涛. 城市交通干道区颗粒物中多环芳烃的源解析研究 [J]. *环境科学与技术*, 2004, 27(6): 50-51.
- YANG X S, WANG Z P, SONG Y T. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in particulate matter in urban traffic arterial area [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 27(6): 50-51. (in Chinese)
- [22] NISBET I C, LAGOY P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, 16(3): 290-300.
- [23] 王伟. 鞍山市大气中多环芳烃健康影响评价 [J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(6): 192-194.
- WANG W. Health impact assessment of PAHs on atmosphere of Anshan City [J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(6): 192-194 (in Chinese).
- [24] 郁倩, 张娟, 安可, 等. 徐州市大气细颗粒物中多环芳烃人群健康风险评估 [J]. *中国校医*, 2019, 33(12): 884-886, 916.
- YU Q, ZHANG J, AN K, et al. Assessment on health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne PM_{2.5} in Xuzhou City [J]. *Chinese Journal of School Doctor*, 2019, 33(12): 884-886, 916 (in Chinese).
- [25] 王焕新, 张续, 马琳, 等. 北京市昌平区大气颗粒物中多环芳烃暴露及人群健康风险评估 [J]. *环境与健康*, 2016, 33(11): 999-1002.
- WANG H X, ZHANG X, MA L, et al. Health risk assessment of inhabitants exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons and particulate matter in air in Changping district of Beijing [J]. *Journal of Environment and Health*, 2016, 33(11): 999-1002 (in Chinese).
- [26] 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*, 2013, 30(5): 426-430.
- LIN H P, WU X Y, WANG Q, et al. Source analysis and health risk assessment of PAHs in PM₁₀ in industrial area of Lanzhou [J]. *Journal of Environment and Health*, 2013, 30(5): 426-430. (in Chinese)