

宁波市某城区大气PM_{2.5}中PAHs源解析及健康风险评估

冷朋波, 王爱红, 王群利, 陶敬阳, 金永高, 陆蓓蓓

宁波市疾病预防控制中心环境与职业卫生所, 浙江 宁波 315010

摘要:

[目的] 调查宁波市某城区大气PM_{2.5}中多环芳烃(PAHs)污染水平, 判断其来源, 评估其对人群的潜在健康风险。

[方法] 于2016年每月10—17日(9月采样时间为8—15日), 在宁波市江北区儿童医院4层楼顶平台采集颗粒物样本, 采用高效液相色谱法测定不同季节大气PM_{2.5}中16种PAHs水平。采用特定PAHs比值来判断PM_{2.5}中PAHs来源。采用美国环境保护署超级基金风险评估指南推荐的吸入模型对PAHs进行人群健康风险评估。

[结果] PM_{2.5}年均质量浓度为54 μg/m³, 超过标准限值(35 μg/m³)。PM_{2.5}中16种PAHs每日总质量浓度介于1.60~31.26 ng/m³, 平均6.11 ng/m³。PM_{2.5}中BaP年均质量浓度为0.50 ng/m³, 未超过我国环境空气质量标准(1 ng/m³), 但其日均质量浓度超标率为2.1%。16种PAHs总质量浓度季节分布呈冬季高、夏季低。从特定比值判断, 该采样点大气PM_{2.5}中PAHs主要来源于汽油燃烧。人群吸入PM_{2.5}中PAHs无致癌风险($Risk=0.54\times10^{-6}$), 而有非致癌风险($HQ=1.06$)。

[结论] 该采样点存在大气PM_{2.5}污染, 人群通过吸入途径暴露于PM_{2.5}中PAHs无致癌风险, 但有非致癌风险。

关键词: 大气污染; PM_{2.5}; 多环芳烃; 源解析; 健康风险评估

Source apportionment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in an urban area of Ningbo LENG Peng-bo, WANG Ai-hong, WANG Qun-li, TAO Jing-yang, JIN Yong-gao, LU Bei-bei (Institute of Environmental and Occupational Health, Ningbo Municipal Center for Disease Control and Prevention, Ningbo, Zhejiang 315010, China)

Abstract:

[Objective] To investigate the pollution levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM_{2.5} in an urban area of Ningbo, identify their sources, and evaluate their potential health risks.

[Methods] Particulate matter samples were collected from the four-storey roof platform of Ningbo Jiangbei Children's Hospital from 10th to 17th of every month except September (from 8th to 15th) in 2016. High performance liquid chromatography was used to determine the levels of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in collected atmospheric PM_{2.5} samples. PAHs ratios were used to identify sources of PAHs. The inhalation model recommended by Risk Assessment Guideline for Superfund of the US Environmental Protection Agency was used to assess the health risks of PAHs.

[Results] The average annual concentration of PM_{2.5} was 54 μg/m³, exceeding the national limit (35 μg/m³). The total concentrations of 16 PAHs in PM_{2.5} were between 1.60 and 31.26 ng/m³, and the average value was 6.11 ng/m³. The average annual concentration of BaP in PM_{2.5} was 0.50 ng/m³, which did not exceed the ambient air quality standard of China (1 ng/m³), but the unqualified rate of daily average concentration was 2.1%. The total concentrations of 16 PAHs were high in winter and low in summer. According to the predetermined diagnostic ratios, the PAHs in PM_{2.5} at the selected sampling site were mainly derived from gasoline combustion. There was no carcinogenic risk ($Risk=0.54\times10^{-6}$) but was non-carcinogenic risk ($HQ=1.06$) if populations were exposed to the sampled PAHs in PM_{2.5}.

[Conclusion] PM_{2.5} pollution is identified at the sampling site. Exposure to PAHs in PM_{2.5} by inhaling in the selected area poses no human carcinogenic risk but has human non-carcinogenic risk.

Keywords: air pollution; PM_{2.5}; PAHs; source apportionment; risk assessment

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2019.18164

基金项目

宁波市科学计划项目(2017A610272, 2017A610269); 宁波市医学科技计划项目(2016A02)

作者简介

冷朋波(1979—), 男, 本科, 高级工程师;
E-mail: 83408179@qq.com

通信作者

陆蓓蓓, E-mail: 493944183@qq.com

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2018-02-22

录用日期 2018-07-26

文章编号 2095-9982(2019)01-0073-06

中图分类号 R122

文献标志码 A

►引用

冷朋波, 王爱红, 王群利, 等. 宁波市某城区大气PM_{2.5}中PAHs源解析及健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2019, 36(1): 73-78.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2019.18164

Funding

This study was funded.

Correspondence to

LU Bei-bei, E-mail: 493944183@qq.com

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2018-02-22

Accepted 2018-07-26

►To cite

LENG Peng-bo, WANG Ai-hong, WANG Qun-li, et al. Source apportionment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in an urban area of Ningbo[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2019, 36(1): 73-78.

►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2019.18164

经济的快速发展与城市化的不断推进导致了严重的颗粒物污染问题,中国大部分地区大气PM_{2.5}浓度都远高于我国规定的环境空气质量标准^[1]。PM_{2.5}不仅影响大气的能见度,还会影响人类健康,尤其是PM_{2.5}中多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)因其毒性大和对人体健康的损害严重,引起研究人员极大的关注^[2]。流行病学研究发现,人类肺癌与PAHs吸入暴露高度相关^[3-5]。美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)将16种对人体危害较大的PAHs列入优先控制污染物名单进行重点监督和管理^[6]。中国PAHs排放量占全球总PAHs排放量的20%^[7],因此,评估大气PM_{2.5}中PAHs的来源、污染特征和健康风险对于我国大气环境管理及健康预警具有重要意义。

宁波是长三角重要的港口工业城市,随着健康城市建设的推进,当地陆续开展了PM_{2.5}源解析及大气污染物与疾病关系等方面的研究^[8-10],但对PM_{2.5}中PAHs等化学污染物质的污染特征及健康风险的研究极少。本研究拟通过分析宁波市某城区大气PM_{2.5}中PAHs的污染特征、来源及人群健康风险,以期为宁波大气环境问题治理提供科学依据,并为居民健康风险提出预警。

1 材料与方法

1.1 样品采集

PM_{2.5}样品由宁波市疾病预防控制中心参照HJ 656—2013《环境空气颗粒物(PM_{2.5})手工监测方法(重量法)技术规范》^[11]进行采集。采样点位于宁波市江北区儿童医院4层楼顶平台,采样高度为地面上方约14 m,采样点周围无固定污染源及障碍物,采样点东侧130 m、西侧180 m处均为双向3车道交通主干道,南侧40 m为单向2车道交通次干道。采用MVS6中流量颗粒物采样器(Sven Leckel GmbH, 德国)进行采样,采样流量为2.3 m³/h,并使用4046型流量计(TSI, 美国)进行流量校准。采样滤膜为φ47 mm石英纤维滤膜(MUNKTELL FILER AB, 瑞典)。采样时间为2016年每月10—17日(9月采样时间为8—15日),每天08:00—次日07:00,连续采样23 h。

1.2 PM_{2.5}质量浓度及PAHs成分测定

PM_{2.5}中PAHs成分委托杭州谱可检测技术有限公司统一检测。PM_{2.5}质量浓度测定参照HJ 618—2011《环境空气PM₁₀和PM_{2.5}的测定 重量法》^[12],滤膜和样品使用XS205型十万分之一电子天平(METTLER

TOLEDO, 瑞士)称量。PM_{2.5}中16种PAHs成分测定参照国家环保总局的《空气和废气监测分析方法》(第四版增补版)^[13]、HJ 647—2013《环境空气和废气气相和颗粒物中多环芳烃的测定 高效液相色谱法》^[14],使用1260型高效液相色谱仪(Agilent Technologies, 美国)按紫外检测器推荐波长对16种PAHs进行检测。

PM_{2.5}颗粒物中16种PAHs物质特性及方法检出限见表1。

表1 16种PAHs物质特性及方法检出限

中文名	英文缩写	致癌性*	检出限 (ng/m ³)
萘	Nap	2B	0.2
苊烯	Any	—	0.2
苊	Flu	3	0.2
苈	AcI	3	0.2
菲	Phe	3	0.2
蒽	Ant	3	0.2
荧蒽	Fluo	3	0.2
芘	Pyr	3	0.2
屈	Chr	2B	0.2
苯并(a)蒽	BaA	2B	0.2
苯并(b)荧蒽	BbF	2B	0.2
苯并(k)荧蒽	BkF	2B	0.2
苯并(a)芘	BaP	1	0.2
二苯并(a,h)蒽	DahA	2A	0.2
苯并(g,h,i)芘	BghiP	3	0.2
茚并(1,2,3-c,d)芘	IcdP	2B	0.2

[注]*: 参考国际癌症研究中心(IARC)化学物致癌作用分类。IARC对已进行致癌研究的化学物分为1、2A、2B、3、4共五类,1类是“确认人类致癌物”;2A类是“很可能人类致癌物”;2B类是“可能人类致癌物”;3类物质的数据不足,不能对其致癌性进行分类;4类则是根据目前资料判断为“对人很可能是非致癌物”。

1.3 毒理学参数

目前,美国EPA仅研究了BaP的吸入单元风险(inhalation unit risk, IUR)和吸入参考浓度(reference concentration, RfC)^[15],见表2。

表2 吸入BaP的毒性参数值

健康效应	毒性参考值
综合发育毒性	RfC=2×10 ⁻⁶ mg/m ³
喉咽,气管,食管,前胃,鼻腔等鳞状细胞癌	IUR=6×10 ⁻⁴ (μg/m ³) ⁻¹

1.4 PAHs源解析

PM_{2.5}中PAHs来源采用母体PAHs异构体对的比值来判断,特定PAHs比值主要包括:BaP/BghiP、

Phe/Ant、Ant/ (Ant+Phe)、Pyr/ BaP、Fluo/Pyr、Fluo/ (Pyr+Fluo)、BaP/ (BaP+Chr)、BaA/ (BaA+Chr)、IcdP/ (IcdP+BghiP)、BaA/BaP。燃煤、汽油燃烧、柴油燃烧、生物物质燃烧、石油污染、木柴燃烧等污染分别具有不同的特定 PAHs 来源特征比值^[16-18]。

1.5 健康风险评价模型及参数取值^[19-20]

$$TEQ_s = \sum TEQ_i = \sum \rho_i \times TEF_i$$

$$EC = (CA \times EF \times ED \times ET) / AT$$

式中： TEQ_s ，总等效质量浓度 (ng/m^3)； TEQ_i ，某种组分等效质量浓度 (ng/m^3)； ρ_i ，大气中某种组分的质量浓度 (ng/m^3)； TEF_i ，某种组分的等效因子； EC ，暴露的质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； CA ，污染物质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，以多种 PAHs 的 TEQ_s 表示，以 BaP 作为参照的毒性等效因子 (toxic equivalency factor, TEF) 计算，Nap、Any、Flu、Acl、Phe、Fluo、Pyr 的 TEF 值为 0.001，Ant、Chr、BghiP 的 TEF 值为 0.01，BaA、BbF、BkF、IcdP 的 TEF 值为 0.1，DahA 的 TEF 值为 5，BaP 的 TEF 值为 1^[21]； EF ，暴露频率，取值为 365 d/年； ED ，暴露持续时间，以美国 EPA 统计的人群在某地居住的时间上限 30 年计； ET ，暴露时间，取值为 24 h/d； AT ，平均时间，致癌效应评估时按惯例以美国 EPA 推荐的人的一生寿命 70 年计，非致癌效应评估时取值同 ED 按 30 年计。

1.5.1 致癌风险 $Risk = EC \times IUR$ 。式中： $Risk$ ，致癌风险； EC ，暴露的质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； IUR ，吸入单元风险 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁻¹。 $Risk > 1 \times 10^{-6}$ 时表明具有致癌风险，反之则致癌风险较低。

1.5.2 非致癌风险 $HQ = EC / (RfC \times 10^3)$ 。式中： HQ ，危害商数； EC ，暴露的质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； RfC ，吸入参考浓度 (mg/m^3)。 $HQ > 1$ 时表明具有非致癌风险，反之则非致癌风险较低。

1.6 统计学分析

$PM_{2.5}$ 和 PAHs 质量浓度按不同季节进行描述性分析，季节分为春季 (3—5 月)、夏季 (6—8 月)、秋季 (9—11 月) 和冬季 (1—2 月、12 月)，质量浓度低至未检出的物质均采用其检测方法最低检出质量浓度的 1/2 进行统计，以均值、中位数进行描述。数据描述性分析和统计学检验均采用 SPSS 17.0 统计软件完成，绘图采用 Excel 2007 完成。

1.7 质量控制

采样器使用前进行流量校准；采样滤膜使用前经 400℃ 高温加热 5 h 去除有机物；采样前后滤膜称重进行质量平衡控制，同一滤膜在恒温恒湿箱内相同

条件下平衡和称重两次，两次重量之差小于 0.04 mg 为满足恒重要求，以两次称量值的算术平均值作为样品质量。采集样品于 4℃ 密闭、避光保存运输；样品于 -18℃ 保存，30 d 内完成成分提取检测，避免 PAHs 降解。每次采样均做全程序空白和运输空白用于检查采样、运输和分析过程是否受到污染。每批次样品做实验空白，分析试剂做试剂空白。样品采用 5℃ 冷却水回流进行索氏提取，40℃ 水浴进行旋转蒸发浓缩，样品预处理和分析过程加入十氟联苯作为替代物对 PAHs 挥发进行校正，检测方法用美国国家标准与技术研究院标准参考物质 1648 a (城市可吸入颗粒物) 进行确认，回收率控制在 65.6%~115%。

2 结果

2.1 $PM_{2.5}$ 及 PAHs 质量浓度特征

在 95 d 的有效天数中， $PM_{2.5}$ 质量浓度有 19 d 超过我国环境空气质量标准限值中的二级标准 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，超标率为 20.0%； $PM_{2.5}$ 年均质量浓度 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 是标准限值 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 1.54 倍。 $PM_{2.5}$ 中 16 种 PAHs 每日总质量浓度介于 $1.60 \sim 31.26 \text{ ng}/\text{m}^3$ ，平均 $6.11 \text{ ng}/\text{m}^3$ 。BaP 日质量浓度介于未检出 (ND) ~ $3.49 \text{ ng}/\text{m}^3$ ，有 2 d 超过我国环境空气质量标准 ($2.5 \text{ ng}/\text{m}^3$)，占全年有效检测天数的 2.1%。见表 3、图 1 和图 2。

表 3 2016 年大气 $PM_{2.5}$ 及其 PAHs 质量浓度分布 ($n=95$)

成分	$\bar{x} \pm s$	Min	M	Max	限值
$PM_{2.5}$ (mg/m^3)	0.054 ± 0.032	0.013	0.046	0.162	0.035
Nap (ng/m^3)	0.10 ± 0.00	0.10	0.10	0.10	
Any (ng/m^3)	0.10 ± 0.00	0.10	0.10	0.10	
Flu (ng/m^3)	0.10 ± 0.00	0.10	0.10	0.10	
Acl (ng/m^3)	0.10 ± 0.00	0.10	0.10	0.10	
Phe (ng/m^3)	0.21 ± 0.29	0.10	0.10	1.29	
Ant (ng/m^3)	0.10 ± 0.00	0.10	0.10	0.10	
Fluo (ng/m^3)	0.30 ± 0.42	0.10	0.10	1.98	
Pyr (ng/m^3)	0.38 ± 0.52	0.10	0.10	2.45	
Chr (ng/m^3)	0.52 ± 0.76	0.10	0.21	4.76	
BaA (ng/m^3)	0.30 ± 0.47	0.10	0.10	3.26	
BbF (ng/m^3)	1.47 ± 1.92	0.10	0.72	8.81	
BkF (ng/m^3)	0.34 ± 0.34	0.10	0.22	2.00	
BaP (ng/m^3)	0.50 ± 0.58	0.10	0.30	3.49	1.000
DahA (ng/m^3)	0.26 ± 0.40	0.10	0.10	2.47	
BghiP (ng/m^3)	0.41 ± 0.55	0.10	0.10	2.82	
IcdP (ng/m^3)	0.91 ± 0.82	0.10	0.61	4.34	
$\sum_{16} \text{PAHs}$ (ng/m^3)	6.11 ± 5.35	1.60	3.89	31.26	

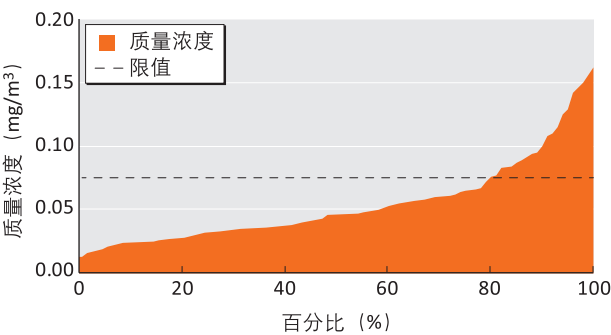


图1 空气中PM_{2.5}日质量浓度百分比分布

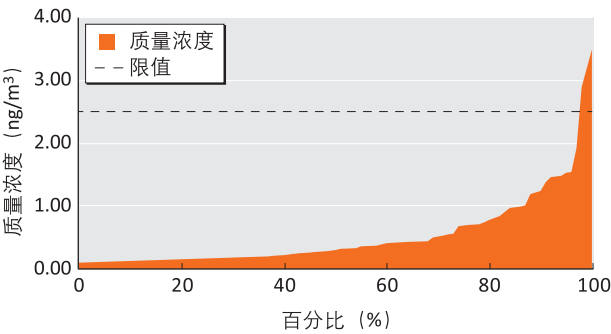


图2 PM_{2.5}中BaP日质量浓度百分比分布

PM_{2.5}质量浓度季节分布呈冬季最高、夏季最低, 差异有统计学意义 ($z=-5.219$, $P=0.000$)。BaP及15种PAHs季节分布与PM_{2.5}具有类似的特征, 差异有统计学意义 (BaP: $z=-6.011$, $P=0.000$; 15种PAHs: $z=-5.506$, $P=0.000$)。

表4 PM_{2.5}及其PAHs质量浓度季节分布

PM _{2.5} 及其PAHs	冬季 (n=24)	春季 (n=24)	夏季 (n=24)	秋季 (n=23)
PM _{2.5} (mg/m ³)	0.078±0.040	0.056±0.030	0.030±0.010	0.050±0.030
Nap (ng/m ³)	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00
Any (ng/m ³)	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00
Flu (ng/m ³)	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00
Acl (ng/m ³)	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00
Phe (ng/m ³)	0.55±0.44	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00
Ant (ng/m ³)	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00
Fluo (ng/m ³)	0.73±0.60	0.26±0.28	0.10±0.00	0.10±0.00
Pyr (ng/m ³)	0.56±0.57	0.75±0.65	0.10±0.00	0.10±0.00
Chr (ng/m ³)	1.36±1.07	0.35±0.32	0.10±0.00	0.26±0.26
BaA (ng/m ³)	0.76±0.75	0.18±0.16	0.10±0.00	0.17±0.14
BbF (ng/m ³)	2.55±2.86	0.54±0.63	0.57±0.43	2.24±0.71
BkF (ng/m ³)	0.68±0.45	0.20±0.14	0.10±0.00	0.38±0.26
BaP (ng/m ³)	1.12±0.79	0.34±0.26	0.11±0.04	0.42±0.35
DahA (ng/m ³)	0.61±0.65	0.23±0.19	0.10±0.00	0.10±0.00
BghiP (ng/m ³)	1.04±0.71	0.40±0.35	0.10±0.00	0.1±0.00
IcdP (ng/m ³)	1.64±1.03	0.67±0.39	0.32±0.19	1.01±0.71
Σ ₁₆ PAHs (ng/m ³)	12.11±6.78	4.52±2.17	2.30±0.56	5.48±3.29

2.2 PAHs来源

从6个特定比值判断, 2016年检测点所在区域大

气PM_{2.5}中PAHs主要来源于汽油燃烧。

表5 PAHs来源特征比值

内容	比值	PAHs来源特征比值				
		燃煤	汽油燃烧	柴油燃烧	生物物质燃烧	石油污染
BaP/BghiP	2.18±2.76	0.90~6.60	0.30~0.40	0.46	—	—
Pyr/BaP	1.19±2.04	<1.00	1.0~6.0	—	—	—
BaP/(BaP+Chr)	0.52±0.10	0.07~0.24	0.49	0.68	—	—
BaA/(BaA+Chr)	0.41±0.10	—	—	—	>0.50	<0.20
IcdP/(IcdP+BghiP)	0.72±0.16	0.56	0.18	0.35~0.37	—	—
BaA/BaP	0.69±0.29	—	0.93	4.97	—	—

2.3 人群健康风险评估

根据有效天数内16种PAHs总等效平均质量浓度点值评估发现, 该区域居民通过吸入途径暴露于PM_{2.5}中16种PAHs的总致癌风险值 ($Risk$) 为 0.54×10^{-6} , 低于 1×10^{-6} , 提示该区域居民在目前接触水平下无致癌风险, 而总非致癌风险值 (HQ) 为1.06, 大于1, 提示该区域居民在目前接触水平下有非致癌健康风险。

根据16种PAHs每日总等效质量浓度进行评估, 并计算健康风险百分比分布, 发现有11.8%根据日均质量浓度计算的总致癌风险值高于参考值 1×10^{-6} , 存在致癌风险; 29.8%根据日均质量浓度计算的总非致癌风险值高于参考值1, 存在非致癌健康风险。见图3和图4。

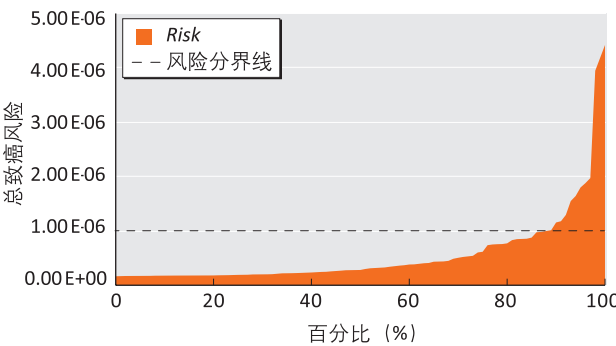


图3 PM_{2.5}中PAHs总致癌风险百分比分布

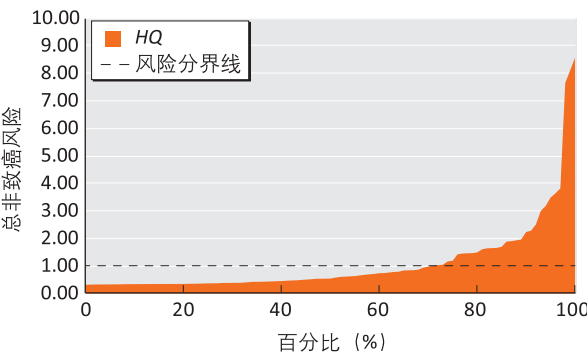


图4 PM_{2.5}中PAHs总非致癌风险百分比分布

3 讨论

本研究通过分析2016年宁波市某城区监测点空气PM_{2.5}和PM_{2.5}中PAHs的污染状况,发现宁波市PM_{2.5}年均质量浓度高于标准限值。PM_{2.5}中16种PAHs总质量浓度季节分布特征为冬季高、夏季低。该监测点大气PM_{2.5}中PAHs主要来源于汽油燃烧。人群吸入PM_{2.5}中PAHs无致癌风险但有非致癌风险。

本研究中宁波2016年监测点所在城区大气PM_{2.5}冬季质量浓度为(0.078±0.040) mg/m³,与同为港口城市的天津近年冬季城区质量浓度[(0.079±0.056) mg/m³]^[16]相当,但低于青岛近年冬季质量浓度(0.191 mg/m³)^[22];冬季16种PAHs总质量浓度为(12.11±6.78) ng/m³,低于上海近期水平40~100 ng/m³^[23]。

根据宁波市环境状况公报^[24],宁波市近10年市区PM_{2.5}年均质量浓度呈现逐年下降趋势,但2016年仍高于我国环境空气质量二级标准,说明大气PM_{2.5}污染仍然比较严重。宁波市大气PM_{2.5}及PAHs污染总体呈冬高、夏低的季节变化^[25],这可能主要与气象条件变化有关,由于冬季气团主要来自内陆,导致污染物区域传输,而夏季来自洋面或沿海主导气团会对空气污染起稀释作用^[26]。

此外,本研究发现,虽然采用年平均质量浓度评估吸入途径PM_{2.5}中PAHs无致癌风险,但应用每日质量浓度百分比分布评价时有11.8%根据日均质量浓度计算的致癌风险值高于风险参考值,仍存在一定比例的健康风险。这一研究结果是否预示着利用PM_{2.5}中PAHs日均质量浓度分布百分比得出的健康风险分布更能展现风险全貌值得进一步研究。

目前关于吸入途径人群健康风险,仍多采用美国EPA在1989年发布的《超级基金风险评估指南 第1卷 人群健康评估手册(A部分)》中推荐使用的RfD和致癌斜率(slope factor, SF)来分别计算非致癌和致癌风险^[5-6, 16, 27-29],而2009年美国EPA发布的《超级基金风险评估指南 第1卷 人群健康评估手册(F部分 吸入风险评估补充指南)》推荐使用RfC和IUR作为毒理学参数指标来进行吸入途径人群健康风险的计算,考虑毒物毒效应作用的靶器官,并将化学物浓度作为暴露度量标准的原则^[30]。因此,采用EPA《超级基金风险评估指南》(F部分)推荐的模型进行吸入途径的健康风险评估更为科学。PAHs种类繁多,美国EPA及相关研究人员对其RfC和IUR研究有限,为此,本研究采用TEF来估算PAHs的等效质量浓度,从而实现16种

PAHs总健康风险的评估。在TEF出现之前,美国EPA在评估PAHs总健康风险时,均假设所有PAHs与BaP的致癌等毒性效力一样,这明显高估了PAHs的风险^[21]。而TEF是依据PAHs相对于BaP毒性效力大小为基准而开发,它不仅解决了因PAHs缺少IUR和RfC而无法对PAHs进行健康风险评估的不足,而且可更为科学地反映PAHs的毒性。

由于本研究仅设立1个城区监测点且非每日采样,因此监测点PM_{2.5}及其PAHs污染浓度与该点所在城区污染浓度可能存在一定偏差。因本研究中Nap、Any、Flu、Acl、Ant 5种物质全年未检出,故未将Phe/Ant、Ant/(Ant+Phe)、Fluo/Pyr和Fluo/(Pyr+Fluo)的值纳入分析,这个可能导致PM_{2.5}中PAHs源解析结果存在偏倚。在大部分PAHs缺少RfC和IUR毒性参数资料的情况下采用TEF来换算评估其总健康风险,这个过程并没有考虑PAHs对健康影响是否具有联合作用,这对评估结果也有一定影响。

参考文献

- [1] WANG J, GENG N B, XU Y F, et al. PAHs in PM_{2.5} in Zhengzhou: concentration, carcinogenic risk analysis, and source apportionment [J]. Environ Monit Assess, 2014, 186 (11): 7461-7473.
- [2] RAVINDRA K, SOKHI R, VAN GRIEKEN R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation [J]. Atmos Environ, 2008, 42 (13): 2895-2921.
- [3] CHEN S C, LIAO C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources [J]. Sci Total Environ, 2006, 366 (1): 112-123.
- [4] ZHANG Y, TAO S, SHEN H, et al. Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106 (50): 21063-21067.
- [5] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 大连市人群对多环芳烃的暴露及健康风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15 (5): 330-334.
- [6] 王钊, 徐晓宇, 陈任翔. 湘潭市冬季大气PM_{2.5}中多环芳烃的点位分布特征和健康风险评价 [J]. 环境与健康杂志, 2016, 33 (8): 703-706.
- [7] ZHANG Y, TAO S. Global atmospheric emission inventory

- of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004 [J]. Atmos Environ, 2009, 43 (4): 812-819.
- [8] 钱旭君, 贺天锋, 谷少华, 等. 宁波市大气污染物暴露与肺癌发病及死亡灰色关联定量分析 [J]. 中国卫生统计, 2016, 33 (1): 5-8.
- [9] 叶臻华, 郑培雯, 沈鹏, 等. 宁波市鄞州区大气可吸入颗粒物暴露与冠心病就诊人数的时间序列分析 [J]. 浙江大学学报 (医学版), 2016, 45 (6): 607-613.
- [10] 叶文波. 宁波市大气可吸入颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的源解析研究 [J]. 环境污染与防治, 2011, 33 (9): 66-69.
- [11] 环境空气颗粒物 ($PM_{2.5}$) 手工监测方法 (重量法) 技术规范: HJ 656—2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [12] 环境空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的测定 重量法: HJ 618—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [13] 国家环境保护总局《空气和废气监测分析方法》编委会. 空气和废气监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [14] 环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 高效液相色谱法: HJ 647—2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [15] Integrated Risk Information System, National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency. Toxicological Review of Benzo [a] pyrene Executive Summary (EPA/635/R-17/003Fc) [R]. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2017.
- [16] 赵岩, 冯利红, 李建平, 等. 天津市冬季 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃来源及健康风险评价 [J]. 华南预防医学, 2016, 42 (1): 25-31.
- [17] KONG S, DING X, BAI Z, et al. A seasonal study of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in five typical cities of Liaoning Province, China [J]. J Hazard Mater, 2010, 183 (1/2/3): 70-80.
- [18] GUO H, LEE S C, HO K F, et al. Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong [J]. Atmos Environ, 2003, 37 (38): 5307-5317.
- [19] Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund Volume I human health evaluation manual (Part F, Supplemental guidance for inhalation risk assessment, EPA-540-R-070-002, OSWER 9285.7-82) [R]. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2009.
- [20] Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A, EPA/540/1-89/002) [R]. Washington: Environmental Protection Agency, 1989.
- [21] NISBET ICT, LAGOY P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regul Toxicol Pharmacol, 1992, 16 (3): 290-300.
- [22] 吴虹, 张彩艳, 王静, 等. 青岛环境空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染特征与来源比较 [J]. 环境科学研究, 2013, 26 (6): 583-589.
- [23] XU T, LV Y, CHENG T, et al. Using comprehensive GC×GC to study PAHs and n-alkanes associated with $PM_{2.5}$ in urban atmosphere [J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22 (7): 5253-5262.
- [24] 宁波市环境保护局. 2016年宁波市环境状况公报 [EB/OL]. (2017-06-05) [2017-12-21]. http://www.nbeppb.gov.cn/Info_Show.html?TypeID=show&ClassID=20cf3dee-c1f4-4740-8781-2e1708cc0140&InfoID=a2efde60-4b83-4b4f-a2a7-c394bc7d95f2.
- [25] 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.
- [26] 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 宁波市 $PM_{2.5}$ 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 [J]. 环境科学, 2015, 36 (9): 3128-3134.
- [27] 赵岩, 冯利红, 刘洪亮, 等. 天津市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及健康风险评价 [J]. 中华疾病控制杂志, 2016, 20 (3): 294-298.
- [28] 李敏, 高燕红, 郭凌川, 等. 广州大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染的健康风险评价 [J]. 环境与健康杂志, 2016, 33 (5): 421-424.
- [29] 庄马展. 厦门大气 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评估 [J]. 环境化学, 2016, 35 (8): 1723-1732.
- [30] 丁钢强, 张美辩. 国外职业健康风险评估指南 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2014: 127-128.

(英文编辑: 汪源; 编辑: 陶黎纳; 汪源; 校对: 邱丹萍)