调查研究
Investigation

兰州市某工业区大气 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃污染特征及健康风险评估

李盛[1]，王金玉[2]，李普[3]，许军[1]，樊春燕[4]

1. 兰州市第一人民医院公共卫生科，甘肃 兰州 730050
2. 兰州大学基础医学院，甘肃 兰州 730000
3. 白银市第二人民医院，甘肃 白银 730900
4. 甘肃中医药大学公共卫生学院，甘肃 兰州 730000

摘要：

[背景] 多环芳烃（PAHs）是重要的环境污染物，部分还具有致癌性，生活在工业区的居民可能承受着比其他地区更高的致癌健康风险。

[目的] 分析兰州市某工业区大气细颗粒物（$PM_{2.5}$）中 PAHs 污染特征及健康风险。

[方法] 于 2017 年采集某工业区大气 $PM_{2.5}$ 样品 84 份，其中采暖季 35 份，非采暖季 49 份。检测样品中 16 种优先控制 PAHs 单体水平，包括萘、苊、苊烯、芴、蒽、菲、苯并 [*a*] 蒽、屈、荧蒽、芘、苯并 [*a*] 芘、苯并 [*b*] 荧蒽、苯并 [*k*] 荧蒽、二苯并 [*a*，*h*] 蒽、苯并 [*g*，*h*，*i*] 苝、茚并 [1，2，3-*cd*] 芘。采用美国环保署推荐的当量法评估大气 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 对人群的健康风险和预期寿命损失，可接受的终身致癌风险水平在 1×10^{-6}~1×10^{-4} 范围。

[结果] 该工业区大气 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 全年总质量浓度（简称浓度）为（43.51±26.09）ng·m^{-3}，采暖季总浓度 [（60.64±30.88）ng·m^{-3}] 高于非采暖季 [（31.27±11.59）ng·m^{-3}]（Z=-7.252，P<0.001）。全年、非采暖季 PAHs 均以 2~3 环为主，分别占 47.96%、65.08%；采暖季 PAHs 以 4 环为主，占 38.41%。PAHs 总终身致癌风险值（V_{ILCR}）为 1.24×10^{-5}，其中采暖季（2.06×10^{-5}）高于非采暖季（6.50×10^{-6}），成人（1.46×10^{-5}）高于儿童（1.02×10^{-5}）（分别 Z=-7.223、-2.573，均 P<0.05）。PAHs 的居民预期寿命损失为 90.59 min。

[结论] 兰州市某工业区采暖季大气 PAHs 终身致癌风险高于非采暖季，成人高于儿童，但都处于可接受水平。

关键词：多环芳烃；细颗粒物；健康风险评价；污染特征

Pollution characterization and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in an industrial area of Lanzhou

LI Sheng[1], WANG Jinyu[2], LI Pu[3], XU Jun[1], FAN Chunyan[4]
(1.Department of Public Health, Lanzhou First People's Hospital, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2.School of Basic Medicine, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3.Baiyin Second People's Hospital, Baiyin, Gansu 730900, China; 4.School of Public Health, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract:

[Background] Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are important environmental pollutants, some of which are carcinogenic and could increase the carcinogenic health risks among residents living in relevant industrial areas than in other areas.

[Objective] The purpose of this study is to analyze the pollution characteristics and potential health risks of PAHs in atmospheric fine particulate matters($PM_{2.5}$) of an industrial area in Lanzhou City.

[Methods] Eighty-four atmospheric $PM_{2.5}$ samples were collected from an industrial area in 2017, including 35 samples in heating season and 49 samples in non-heating season. Sixteen PAHs listed as priority pollutants were detected, including naphthalene, acenaphthene, acenaphthylene, fluorene, anthracene, phenanthrene, benzo[*a*]anthracene, chrysene, fluoranthene, pyrene, benzo[*a*]pyrene, benzo[*b*]fluoranthene, benzo[*k*]fluoranthene, dibenzo[*a*, *h*]anthracene, benzo[*g*, *h*, *i*]perylene, and indene[1, 2, 3-*cd*]pyrene. The equivalent method recommended by US Environmental Protection Agency was used to evaluate the health risk and life expectancy loss

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.20412

基金项目
兰州市人才创新创业项目（2019-RC-70）；甘肃省科技计划项目（20YF8FA075）

作者简介
李盛（1976—），男，学士，主任医师；
E-mail：1178708407@qq.com

通信作者
王金玉，E-mail：wangjiny@lzu.edu.cn

伦理审批 不需要
利益冲突 无申报
收稿日期 2020-09-01
录用日期 2020-12-15

文章编号 2095-9982(2021)02-0137-05
中图分类号 R122
文献标志码 A

▸引用
李盛，王金玉，李普，等. 兰州市某工业区大气 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃污染特征及健康风险评估 [J]. 环境与职业医学，2021，38（2）：137-141.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20412

Funding
This study was funded.

Correspondence to
WANG Jinyu, E-mail: wangjiny@lzu.edu.cn

Ethics approval Not required
Competing interests None declared
Received 2020-09-01
Accepted 2020-12-15

▸To cite
LI Sheng, WANG Jinyu, LI Pu, et al. Pollution characterization and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in an industrial area of Lanzhou[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(2): 137-141.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20412

from PAHs in atmospheric $PM_{2.5}$. The acceptable lifetime carcinogenic risk level was in the range of 1×10^{-6}-1×10^{-4}.

[Results] The annual total concentration of PAHs in atmospheric $PM_{2.5}$ in the selected industrial area was (43.51±26.09) ng·m^{-3}. The total concentration in heating season [(60.64±30.88) ng·m^{-3}] was significantly higher than that in non-heating season [(31.27±11.59) ng·m^{-3}] (Z=−7.252, P<0.001). In the whole year and the non-heating season, the PAHs were dominated by 2-ring and 3-ring components, accounting for 47.96% and 65.08%, respectively, while in the heating season, the PAHs were dominated by 4-ring components, accounting for 38.41%. The incremental lifetime carcinogenic risk value (V_{ILCR}) from PAHs in the whole year was 1.24×10^{-5}. The V_{ILCR} in the heating season (2.06×10^{-5}) was higher than that in the non-heating season (6.50×10^{-6}), and that in adults (1.46×10^{-5}) was higher than that in children (1.02×10^{-5}) (Z=−7.223, −2.573, P<0.05). The life expectancy loss of PAHs was 90.59 min.

[Conclusion] The lifetime carcinogenic risk of atmospheric PAHs in Lanzhou industrial zone in the heating season is higher than that in the non-heating season, and that in adults is higher than that in children, but they are within the preset acceptable range.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons; fine particulate matter; health risk assessment; pollution characteristics

多环芳烃（polycyclic aromatic hydrocarbons，PAHs）是一类重要的环境化学毒物，对女性具有生殖毒性，母亲孕期暴露于PAHs将影响胎儿的体格发育和神经行为发育水平[1-2]；PAHs暴露可影响儿童的发育和免疫功能[3]；人体甲状腺激素水平和精液质量改变与体内羟基PAHs的浓度相关[4-5]，部分PAHs还有致癌风险[6-7]。对空气中PAHs的排放量估算发现，工业来源具有较高的贡献率[8]。有研究发现，我国某石化区人群的大气PAHs终身致癌风险高于宁波市某城区，也高于美国环保署推荐的可接受风险[9-10]，说明生活在石化区的居民可能承受着比其他地区更高的致癌健康风险。

西固区是兰州市的重要工业区。2010年于云江等[11]发现西固区空气可吸入颗粒物（inhalable particles，PM_{10}）中PAHs对居民有一定的健康危害。细颗粒物（fine particulate matter，$PM_{2.5}$）更容易进入人体，对人体的危害也更大。因此，本研究于2017年对西固区大气$PM_{2.5}$中PAHs污染水平进行调查，并采用美国环保署推荐模型对PAHs经呼吸暴露途径的健康风险进行评估和分层分析。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据西固区历史气象资料筛选出西固区大气$PM_{2.5}$年均质量浓度（简称浓度）最高的监测站。于2017年在该监测站覆盖的西固城街道玉门街南社区某小学家属楼6层楼顶平台进行大气$PM_{2.5}$采样。采样点按《环境空气质量监测规范（试行）》中要求设置，采用TH-150C型智能中流量$PM_{2.5}$采样器（中国武汉天虹仪表有限公司）和玻璃纤维滤膜采样。采样过程按照HJ 194—2017《环境空气质量手工监测技术规范》中颗粒物的采样要求执行。于每月的10~16日进行采样，每次采样以100 L·min^{-1}连续抽取空气24 h，使得大气中的检测物质附着于已称量的玻璃纤维滤膜上。采集的样品迅速送至实验室后冷冻保存于−18℃冰箱内。共采集84个样品。

1.2 样品测定

采用2695高效液相色谱仪（美国Waters公司，配荧光检测器）测定优先控制的16种PAHs单体，包括：萘、苊、苊烯、芴、蒽、菲、苯并［a］蒽、屈、荧蒽、芘、苯并［a］芘、苯并［b］荧蒽、苯并［k］荧蒽、二苯并［a，h］蒽、苯并［g，h，i］苝、茚并［1，2，3-cd］芘。整个分析过程采用样品平行试验、空白试验等进行监控。其中，每隔20张玻璃纤维滤膜取1张进行空白试验，平行样品按照采样量的10%（体积分数）采集。分析方法的检出限在0.01~0.1 ng·m^{-3}之间，空白加标回收率在78.0%~96.0%之间，平行样的相对标准偏差在6.5%~16.1%之间。

1.3 大气$PM_{2.5}$中PAHs的健康风险评价

1.3.1 致癌健康风险评价 大气$PM_{2.5}$中PAHs的健康风险评价采用美国环保署推荐的当量法[7]，即根据每一种PAHs单体的浓度及其相应的以苯并［a］芘为参照的致癌等效因子，计算以苯并［a］芘为参照的致癌等效浓度来进行其致癌风险评价。计算公式：$C_{TEQ}=\Sigma C_i\times V_{TEFi}$，$C_{ADD}=C_{TEQ}\times V_{IR}\times V_{ET}\times V_{EF}\times V_{ED}/(V_{BW}\times V_{AT})$，$V_{ILCR}=V_{SF}\times C_{ADD}$，其中，$C_{TEQ}$：16种PAHs的总致癌等效浓度（ng·m^{-3}）；C_i：第i种环境空气PAH单体浓度（ng·m^{-3}），i=1~16；V_{TEFi}：第i种PAH单体的苯并［a］芘致癌等效因子；C_{ADD}：日均暴露量；V_{IR}：呼吸速率，m^3·d^{-1}；V_{ET}：暴露时间，h·d^{-1}；V_{ET}：暴露频率，d·年$^{-1}$；V_{ED}：暴露持续时间，年；V_{BW}：体重，kg；V_{AT}：平均接触时间，d；V_{ILCR}：人群终身致癌风险，无量纲；V_{SF}：化合物呼吸暴露的致癌强度因子，kg·d^{-1}·mg^{-1}。PAHs的苯并［a］芘致癌等效因子见表1[9]，暴露评价模型参数

见表2[12]。

根据美国环保署和美国职业安全与健康署的建议，一般人可接受的终身致癌风险水平在1×10^{-6}~1×10^{-4}范围内。

表1 PAHs的苯并[*a*]芘致癌等效因子

Table 1 Benzo[*a*]pyrene carcinogenic equivalent factor of PAHs

PAHs	毒性等效因子	PAHs	毒性等效因子
萘	1×10^{-3}	苯并[*a*]蒽	1×10^{-1}
苊烯	1×10^{-3}	屈	1×10^{-2}
苊	1×10^{-3}	苯并[*b*]荧蒽	1×10^{-1}
荧蒽	1×10^{-3}	苯并[*k*]荧蒽	1×10^{-1}
菲	1×10^{-3}	苯并[*a*]芘	1
蒽	1×10^{-2}	茚并[1，2，3-*cd*]芘	1×10^{-1}
芴	1×10^{-3}	二苯并[*a*，*h*]蒽	5
芘	1×10^{-3}	苯并[*g*，*h*，*i*]苝	1×10^{-2}

表2 暴露评价模型参数

Table 2 Exposure assessment model parameters

人群	呼吸速率/($m^3\cdot d^{-1}$)	暴露时间/($h\cdot d^{-1}$)	暴露频率/($d\cdot 年^{-1}$)	暴露持续时间/年	体重/kg	平均接触时间/d	化合物呼吸暴露的致癌强度因子/($kg\cdot d^{-1}\cdot mg^{-1}$)
成人	15.7	2.5	365	30	60.6	70×365	7.3
儿童	8.7	2.5	365	10	16.0	70×365	7.3

1.3.2 预期寿命损失 计算公式：$V_{LL}=62.16\times(V_{ILCR}/10^{-5})$[13]，其中，$V_{LL}$：预期寿命损失，min；$V_{ILCR}$：人群终身致癌风险，无量纲。

1.4 统计学分析

利用Excel 2007进行数据整理并建立健康风险评价计算模型。使用SPSS 18.0软件包进行统计学分析。两组间的比较分析采用Mann-Whitney秩和检验。检验水准：$\alpha=0.05$。当样品的检测浓度低于检出限（limit of detection，LOD）时，采用LOD/2值代表样品浓度。

2 结果

2.1 大气$PM_{2.5}$中PAHs的污染情况

2.1.1 PAHs的检测结果 由表3可见，2017年西固区大气$PM_{2.5}$中PAHs总浓度为（43.51±26.09）$ng\cdot m^{-3}$；其中，采暖季总浓度[（60.64±30.88）$ng\cdot m^{-3}$]高于非采暖季[（31.27±11.59）$ng\cdot m^{-3}$]（$P<0.001$）。84份样品均未检出苊烯，其他检出的15种单体中年平均浓度、采暖季和非采暖季平均浓度均以蒽最高，分别为（11.47±6.10）、（12.27±7.25）和（10.90±5.13）$ng\cdot m^{-3}$；采暖季和非采暖季蒽平均浓度间差异无统计学意义。

2.1.2 PAHs的组成 由表4可见，全年、非采暖季PAHs均主要以2~3环为主，分别占47.96%、65.08%；采暖季以4环PAHs占比最高（38.41%）。

表3 2017年兰州市西固区大气$PM_{2.5}$中PAHs检测结果

Table 3 Detection results of PAHs in atmospheric $PM_{2.5}$ in Xigu District, Lanzhou City in 2017

单位（Unit）：$ng\cdot m^{-3}$

PAHs	全年（*n*=84）		采暖季（*n*=35）		非采暖季（*n*=49）		*Z*	*P*
	均数	标准差	均数	标准差	均数	标准差		
萘	5.26	3.17	5.10	3.23	5.37	3.15	−0.869	0.385
苊	2.71	1.42	2.68	1.87	2.74	1.02	−0.946	0.344
苊	0.69	0.43	0.70	0.55	0.69	0.31	−0.161	0.872
菲	0.72	0.38	0.81	0.49	0.65	0.27	−1.963	0.050
蒽	11.47	6.10	12.27	7.25	10.90	5.13	−0.689	0.491
荧蒽	4.56	4.07	7.59	4.72	2.39	1.15	−9.402	**<0.001**
芘	4.05	4.05	7.16	4.66	1.84	0.93	−9.839	**<0.001**
屈	2.75	2.89	4.94	3.35	1.19	0.69	−9.363	**<0.001**
苯并[*a*]蒽	1.87	2.28	3.60	2.69	0.64	0.35	−9.987	**<0.001**
苯并[*b*]荧蒽	3.43	3.46	6.15	3.82	1.49	1.03	−9.524	**<0.001**
苯并[*k*]荧蒽	1.05	0.89	1.72	1.00	0.57	0.30	−8.984	**<0.001**
苯并[*a*]芘	1.63	1.58	2.85	1.80	0.77	0.45	−9.364	**<0.001**
二苯并[*a*，*h*]蒽	0.92	1.09	1.51	1.40	0.50	0.50	−5.706	**<0.001**
茚并[1，2，3-*cd*]芘	0.94	0.92	1.45	1.05	0.58	0.60	−7.182	**<0.001**
苯并[*g*，*h*，*i*]苝	1.44	1.20	2.11	1.27	0.97	0.88	−7.594	**<0.001**
合计	43.51	26.09	60.64	30.88	31.27	11.59	−7.252	**<0.001**

表4 2017年兰州市西固区大气$PM_{2.5}$中PAHs单体的构成

Table 4 Composition of PAHs monomers in atmospheric $PM_{2.5}$ in Xigu District, Lanzhou City in 2017

单位（Unit）：%

PAHs	全年（*n*=84）	采暖季（*n*=35）	非采暖季（*n*=49）
2~3环	47.96	35.55	65.08
4环	30.41	38.41	19.38
5~6环	21.63	26.04	15.54
合计	100.00	100.00	100.00

2.2 大气$PM_{2.5}$中PAHs的健康风险评价

由表5可见，2017年西固区大气$PM_{2.5}$中PAHs的C_{TEQ}、C_{ADD}、V_{ILCR}分别为7.19 $ng\cdot m^{-3}$、1.70 $ng\cdot m^{-3}$和1.24×10^{-5}；其中采暖季V_{ILCR}高于非采暖季，成人V_{ILCR}高于儿童，差异均有统计学意义（$Z=-7.223$、-2.573，均$P<0.05$）。居民V_{LL}为90.59 min。

表5 2017年兰州市西固区$PM_{2.5}$中PAHs健康风险评价结果

Table 5 Health risk assessment results of PAHs in $PM_{2.5}$ in Xigu District, Lanzhou City in 2017

指标	全年	季节		人群	
		采暖季	非采暖季	成人	儿童
C_{TEQ}/($ng\cdot m^{-3}$)	7.19	11.98	3.77	7.19	7.19
C_{ADD}/($ng\cdot m^{-3}$)	1.70	2.83	0.89	2.00	1.40
V_{ILCR}	1.24×10^{-5}	$2.06\times10^{-5*}$	6.50×10^{-6}	$1.46\times10^{-5*}$	1.02×10^{-5}

[注]*：与非采暖季、儿童相比，$P<0.05$。

3 讨论

本次调查结果显示，工业区 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 总浓度均数为 43.51 ng·m^{-3}，高于宁波市（6.11 ng·m^{-3}）、贵阳市（13.86 ng·m^{-3}）等非工业地区，也高于上海市（13.64 ng·m^{-3}）、厦门市（11.21 ng·m^{-3}）工业区周边的调查结果[10, 14-16]，说明兰州市西固区 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 污染处于较高水平。结果还显示，西固区 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 浓度存在明显的季节变化，与文献报道一致[17-18]，提示冬季采暖燃料的燃烧对空气中的 PAHs 浓度有一定的贡献。PAHs 单体浓度检测结果显示，全年、非采暖季平均浓度均以蒽为最高，萘次之，低环的 PAHs 污染严重，非采暖季 2~3 环 PAHs 高达 65% 以上，与夏凌[9]的研究结果一致。究其原因，可能因石化行业带来的特征污染物是环境空气中多环芳烃最主要的组分。而在采暖季，荧蒽等 4 环 PAHs 构成比上升至首位。荧蒽主要来源于煤和石油的燃烧，进一步说明冬季采暖的燃料燃烧对空气中的 PAHs 组成有一定影响。

考虑到石化企业排放的 PAHs 以挥发性更强的化合物为主，主要存于环境空气中[19]，并通过呼吸途径进入人体。因此，本研究就工业区 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 经呼吸暴露途径的健康风险进行评估。结果显示，工业区 $PM_{2.5}$ 中 16 种 PAHs 单体的总致癌等效浓度为 7.19 ng·m^{-3}，低于我国规定的限值（10 ng·m^{-3}），但高于世界卫生组织规定的 1 ng·m^{-3}；同时，值得注意的是，采暖季的 PAHs 总致癌等效浓度（11.98 ng·m^{-3}）超过了 10 ng·m^{-3}，提示工业区大气环境，尤其是冬季的大气环境存在一定的健康风险。人群终身致癌风险结果显示，工业区大气 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 人群终身致癌风险水平处于可接受水平，表明工业区大气 PAHs 对人群造成的终身致癌风险较低，但仍然超过我国部分地区水平[19-20]，造成的人群预期寿命损失也高于济南、广州等地区[12-13, 21]，尤其是采暖季的致癌健康风险更高。提示，在采暖季，尤其是 $PM_{2.5}$ 浓度较高时，应加强户外活动防护，或者减少户外活动，以降低 PAHs 暴露引起的健康风险。

本研究也存在一定的局限性，主要是没有考虑 PAHs 室内暴露情况，因此，选择的暴露评价模型参数中的暴露时间可能远远低于实际的暴露时间，这可能导致低估人群实际终身致癌健康风险和预期寿命损失。

参考文献

[1] 米辰炀，许仲妍，谢嘉渝，等. 多环芳烃暴露致女性生殖毒性及其分子机制 [J]. 环境与职业医学，2019，36 (1)：43-49.
MI C Y，XU Z Y，XIE J Y，et al. Toxic effects and relevant molecular mechanisms of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure on female reproductive health [J]. J Environ Occup Med，2019，36 (1)：43-49.

[2] 曹晓敏，李金玉，刘成娟，等. 母亲孕期多环芳烃暴露对其子女神经行为发育的影响 [J]. 环境与职业医学，2020，37 (6)：539-545.
CAO X M，LI J Y，LIU C J，et al. Effect of prenatal maternal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons on children's neurobehavioral development [J]. J Environ Occup Med，2020，37 (6)：539-545.

[3] 张婷，周小林，孟倩倩，等. 多环芳烃暴露与儿童生长和免疫功能的关系：基于中国北部某焦化污染区的研究 [J]. 环境与职业医学，2020，37 (6)：586-593.
ZHANG T，ZHOU X L，MENG Q Q，et al. Associations of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure with growth and immune function of children：a study in a coking contaminated area in northern China [J]. J Environ Occup Med，2020，37 (6)：586-593.

[4] XIA Y，ZHU P，HAN Y，et al. Urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in relation to idiopathic male infertility [J]. Hum Reprod，2009，24 (5)：1067-1074.

[5] ZHU P，BIAN Z，XIA Y，et al. Relationship between urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons and thyroid hormone levels in Chinese non-occupational exposure adult males [J]. Chemosphere，2009，77 (7)：883-888.

[6] BOSTRÖM C E，GERDE P，HANBERG A，et al. Cancer risk assessment，indicators，and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air [J]. Environ Health Perspect，2002，110 Suppl 3：451-488.

[7] BOSETTI C，BOFFETTA P，LA VECCHIA C. Occupational exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons，and respiratory and urinary tract cancers：a quantitative review to 2005 [J]. Ann Oncol，2007，18 (3)：431-446.

[8] JARIYASOPIT N，TUNG P，SU K，et al. Polycyclic aromatic compounds in urban air and associated inhalation cancer risks：a case study targeting distinct source sectors [J]. Environ Pollut，2019，252：1882-1891.

[9] 夏凌. 石化区环境空气中多环芳烃的健康风险评估及其对周边居民内暴露的影响 [D]. 广州：暨南大学，2014.

XIA L. Health riskassessment of atmospheric PAHs and its impact on internal exposure in the residents around a petrochemical area [D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.

[10] 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.
LENG PB, WANG AH, WANG QL, et al. Source apportionment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in an urban area of Ningbo [J]. J Environ Occup Med, 2019, 36 (1): 73-78.

[11] 于云江，杨林，李良忠，等. 兰州市大气PM_{10}中重金属和多环芳烃的健康风险评价 [J]. 环境科学学报，2013，33 (11)：2919-2927.
YU YJ, YANG L, LI LZ, et al. Health risk assessments of heavy metals and PAHs bound to PM_{10} in Lanzhou city [J]. Acta Sci Circumst, 2013, 33 (11): 2919-2927.

[12] 焦海涛，杨月莲，于志刚，等. 2014年济南市十六里河社区大气$PM_{2.5}$中多环芳烃的污染特征及健康风险评价 [J]. 现代预防医学，2016，43 (20)：3688-3691，3695.
JIAO HT, YANG YL, YU ZG, et al. Pollution characterization and health risk assessment of $PM_{2.5}$ in Shiliulihe community in Jinan 2014 [J]. Mod Prev Med, 2016, 43 (20): 3688-3691, 3695.

[13] 刘薇薇，塔娜，赵星华，等. 内蒙古呼和浩特市大气TSP和PM_{10}中PAHs的健康风险评价 [J]. 生态毒理学报，2015，10 (6)：154-158.
LIU WW, TA N, ZHAO XH, et al. Health risk assessment of PAHs in atmospheric TSP and PM_{10} of Hohhot of inner Mongolia [J]. Asian J Ecotoxicol, 2015, 10 (6): 154-158.

[14] 许明佳，张亚宁，高霞，等. 上海某大型化工区周边大气细颗粒物中多环芳烃的分布特征 [J]. 环境与职业医学，2015，32 (8)：749-752.
XU MJ, ZHANG YN, GAO X, et al. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in fine particulate matters in proximity of a large chemical industrial park in Shanghai [J]. J Environ Occup Med, 2015, 32 (8): 749-752.

[15] ZHAO J, ZHANG F, CHEN J, et al. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons and gas/particle partitioning in a coastal city, Xiamen, Southeast China [J]. J Environ Sci, 2010, 22 (7): 1014-1022.

[16] 周贻兵，李磊，林野，等. 贵阳市两城区大气$PM_{2.5}$中多环芳烃的污染特征 [J]. 环境与职业医学，2016，33 (11)：1097-1100.
ZHOU YB, LI L, LIN Y, et al. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in two urban areas of Guiyang City [J]. J Environ Occup Med, 2016, 33 (11): 1097-1100.

[17] 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.
WANG AH, YAO XP, LENG PB, et al. Distribution characteristics of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric $PM_{2.5}$ in an urban area of Ningbo from 2015 to 2017 [J]. J Environ Occup Med, 2018, 35 (11): 1012-1018.

[18] MO Z, WANG Z, MAO G, et al. Characterization and health risk assessment of $PM_{2.5}$-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in 5 urban cities of Zhejiang Province, China [J]. Sci Rep, 2019, 9 (1): 7296.

[19] 冯利红，李永刚，赵岩，等. 天津市大气细颗粒物中多环芳烃人群健康风险评估 [J]. 实用预防医学，2015，22 (11)：1322-1325.
FENG LH, LI YG, ZHAO Y, et al Assessment on health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne $PM_{2.5}$ in Tianjin [J]. Pract Prev Med, 2015, 22 (11): 1322-1325.

[20] 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.
WANG QQ, MA XY, XU B, et al. Outdoor inhalation exposure risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons among $PM_{2.5}$ in 4 cities of Jiangsu Province [J]. Jiangsu J Prev Med, 2018, 29 (2): 140-144, 207.

[21] 梁秀梅，邹云锋，王钰钰，等. 广州市大气$PM_{2.5}$中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评价 [J]. 环境与健康杂志，2017，34 (3)：220-224.
LIANG XM, ZOU YF, WANG YY, et al. Seasonal variation and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric $PM_{2.5}$ in Guangzhou [J]. J Environ Health, 2017, 34 (3): 220-224.

（**英文编辑**：汪源；**责任编辑**：陈姣）