

# 宜昌市 PM<sub>2.5</sub> 的污染特征及其风险评价

杨财平, 马蓓蓓, 余青, 万正杨

宜昌市疾病预防控制中心, 湖北 宜昌 443005

**摘要:** **目的** 了解宜昌市空气中细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)的污染特征及其对人体健康的影响。 **方法** 利用中流量采样器采集空气中 PM<sub>2.5</sub>, 重量法测定 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度, 气相色谱-质谱联用仪分析 16 种优先控制的多环芳烃(PAHs), 电感耦合等离子体质谱测定 12 种元素<sup>[1-2]</sup>。 **结果** 西陵区和伍家岗区的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度范围分别为 12.4~219 μg/m<sup>3</sup> 和 10.4~218 μg/m<sup>3</sup>, 平均值分别为 74.0 μg/m<sup>3</sup> 和 77.2 μg/m<sup>3</sup>; PM<sub>2.5</sub> 中 ΣPAHs 的浓度范围分别为 0~74.8 ng/m<sup>3</sup> 和 0~79.8 ng/m<sup>3</sup>, 平均值分别为 20.2 ng/m<sup>3</sup> 和 19.1 ng/m<sup>3</sup>, ΣPAHs 的总当量毒性为分别为 2.75 ng/m<sup>3</sup> 和 2.64 ng/m<sup>3</sup>, 两个监测点 PAHs 的终生致癌风险分别为 7.74×10<sup>-5</sup> 和 7.44×10<sup>-5</sup>, 略高于美国环保总局(USEPA)规定的可忽略阈值(10<sup>-6</sup>)。西陵区和伍家岗区的铅浓度范围分别为 8.8~112.0 ng/m<sup>3</sup> 和 4.4~120.0 ng/m<sup>3</sup>, 非致癌风险分别为 0.219 和 0.207; 镉浓度范围分别为 0.2~4.8 ng/m<sup>3</sup> 和 0.1~5.4 ng/m<sup>3</sup>, 非致癌风险分别为 1.03×10<sup>-2</sup> 和 8.55×10<sup>-3</sup>, 致癌风险分别为 4.26×10<sup>-8</sup> 和 3.55×10<sup>-8</sup>; 低于 EPA 规定可忽略阈值(非致癌风险<1, 致癌风险<10<sup>-6</sup>)。 **结论** 空气中的 PM<sub>2.5</sub> 对人体存在一定的健康风险, 因此需从源头对污染物的排放进行控制, 以减少其对居民的潜在危害。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 多环芳烃; 重金属; 风险评价; 终生致癌风险

**中图分类号:** R122.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3110(2017)10-1209-04 DOI:10.3969/j.issn.1006-3110.2017.10.015

## Characteristics of PM<sub>2.5</sub> pollution and its risk assessment in Yichang City

YANG Cai-ping, MA Bei-bei, YU Qing, WAN Zheng-yang

Yichang Municipal Center for Disease Control and Prevention, Yichang, Hubei 443005, China

**Abstract:** **Objective** To investigate the characteristics of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) air pollution and their effects on people's health in Yichang City. **Methods** Atmospheric PM<sub>2.5</sub> samples were collected in Xiling District and Wujiagang District using a sampler of medium-flow capacity. The weighing method was employed to analyze the mass concentration of PM<sub>2.5</sub>. 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) bound to PM<sub>2.5</sub> were analyzed by gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS), and 12 kinds of heavy metals were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). **Results** Atmospheric PM<sub>2.5</sub> concentration in Xiling District and Wujiagang District ranged from 12.4 μg/m<sup>3</sup> to 219 μg/m<sup>3</sup> and from 10.4 μg/m<sup>3</sup> to 218 μg/m<sup>3</sup> respectively, with the average concentration of 74.0 μg/m<sup>3</sup> and 77.2 μg/m<sup>3</sup> respectively. The total concentration of PAHs in the PM<sub>2.5</sub> samples was in the ranges of 0~74.8 ng/m<sup>3</sup> and 0~79.8 ng/m<sup>3</sup> respectively, with the average concentration of 20.2 ng/m<sup>3</sup> and 19.1 ng/m<sup>3</sup> respectively. The total values of total toxicity equivalent concentration were 2.75 ng/m<sup>3</sup> and 2.64 ng/m<sup>3</sup> respectively, and the values of incremental lifetime cancer risk (ILCR) in the two monitoring districts were 7.74×10<sup>-5</sup> and 7.44×10<sup>-5</sup> respectively, which were all slightly higher than the negligible threshold (ILCR=10<sup>-6</sup>) provided by United States Environmental Protection Agency (USEPA). The concentration of lead in the two monitoring districts was 8.8~112.0 ng/m<sup>3</sup> and 4.4~120.0 ng/m<sup>3</sup> respectively, and its non-carcinogenic risk was 0.219 and 0.207 respectively. The concentration of cadmium was 0.2~4.8 ng/m<sup>3</sup> and 0.1~5.4 ng/m<sup>3</sup> respectively, with the non-carcinogenic risk of 1.03×10<sup>-2</sup> and 8.55×10<sup>-3</sup> respectively and the incremental lifetime cancer risk of 4.26×10<sup>-8</sup> and 3.55×10<sup>-8</sup> respectively. These values were all lower than the negligible thresholds provided by USEPA (non-carcinogenic risk<1, ILCR<10<sup>-6</sup>). **Conclusions** PM<sub>2.5</sub> air pollution in Xiling District and Wujiagang District in Yichang City has certain health risk for human body; and hence, it is necessary to control the pollutant discharge so as to reduce the potential health risk.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); heavy metal; risk assessment; incremental lifetime cancer risk

大气污染是影响人类健康的危害因素之一, 对居

民的身体健康造成严重威胁<sup>[3-6]</sup>。近年来, 随着城市化进程的加快、机动车数量的增加, 再加上特有的地形和特殊的气象条件, 宜昌市的空气污染较为严重, 引起了社会各界的广泛关注。

**作者简介:** 杨财平 (1982-), 女, 湖南新邵人, 本科学历, 主管技师, 主要从事公共卫生监测工作。

本研究以大气中 PM<sub>2.5</sub> 为研究对象,系统检测了其质量浓度和污染成分,旨在了解该地区大气污染的主要特征以及对居民存在的健康风险,为保护当地居民健康和环境治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

1.1.1 采样点和采样时间 2015 年 7 月-2016 年 6 月,在西陵区和伍家岗区监测点,每月 10-16 日和 AQI 大于 200 时采集大气中 PM<sub>2.5</sub>,每天采集一份玻璃纤维滤膜和一份石英纤维滤膜,采样时间为 20 h。7 d 为一个周期内采集 1 份玻璃纤维滤膜和 1 份石英纤维滤膜空白样和平行样。

1.1.2 仪器设备 青岛崂应 2030 中流量 PM<sub>2.5</sub> 采样器,采样流量为 100 L/min;滤膜为 90 mm 的玻璃纤维滤膜(美国 Pall)和石英纤维滤膜(瑞典 munktell);梅特勒-托利多 AB-135S 十万分之一天平。

1.2 样品分析

1.2.1 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度 通过具有一定切割特性的采样器,以 100 ml/min 流速采集 20 h 空气,使空气中 PM<sub>2.5</sub> 被截留在已知质量的玻璃纤维滤膜上,根据采样前后滤膜的重量差和采样体积,计算出 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度。

1.2.2 多环芳烃 颗粒物中的 PAHs 经滤膜采集,样品经前处理(提取、浓缩、净化)后用气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A-5975C)分离检测,根据保留时间、特征离子定性,内标法定量。

1.2.3 金属和类金属 颗粒物中的金属元素经滤膜采集,样品经超声提取后用电感耦合等离子体-质谱(Agilent 7900)检测,内标法定量。

1.3 风险评估方法 采用美国环保局(USEPA)提出的人体健康风险评价模型进行评价。多环芳烃采用总毒性当量进行评价,重金属针对目前关注较多,风险评估方法较为成熟的铅镉进行评价。

1.4 统计方法 采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析, $P<0.05$  为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度变化显著,西陵区监测点平均浓度为 74.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值为 219  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最小值为 12.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;伍家岗区监测点平均浓度为 77.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值为 218  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最小值为 10.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。PM<sub>2.5</sub> 日均浓度均值达到《环境空气质量标准》(GB3095-2012)<sup>[7]</sup> 规定的二级标准值(限值 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )的西陵区有 39 d,占 43.3%(39/90),伍家岗区有 34 d,占 37.8%(34/90)。经配对  $t$  检验,西陵区与

伍家岗区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度差异无统计学意义( $\chi^2 = 0.737, P = 0.465$ )。见表 1。

表 1 宜昌市两个监测点 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度的月变化情况

时间	西陵区( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			伍家岗区( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
7 月	76.7	12.4	40.1	99.0	10.4	41.7
8 月	90.9	35.9	59.8	92.4	49.0	67.0
9 月	119.0	36.2	73.6	109.0	30.2	74.7
10 月	119.0	37.9	79.5	119.0	38.9	84.6
11 月	106.0	60.3	78.4	94.1	64.5	80.9
12 月	219.0	58.5	117.0	208.0	58.3	119.0
1 月	203.0	86.9	152.0	218.0	80.5	154.0
2 月	131.0	65.3	92.4	149.0	92.3	117.0
3 月	167.0	90.5	127.0	182.0	79.7	134.0
4 月	122.0	34.1	77.5	143.0	58.1	92.9
5 月	153.0	22.1	86.3	141.0	12.0	80.5
6 月	70.3	38.6	54.1	73.4	42.7	58.0

2.2 多环芳烃

2.2.1 PAHs 的浓度 16 种 PAHs 在 PM<sub>2.5</sub> 中均有检出,其中萘烯、萘的浓度低于定量检测限。西陵区和伍家岗区的质量浓度范围分别为 n. d. ~74.8  $\text{ng}/\text{m}^3$  和 n. d. ~79.8  $\text{ng}/\text{m}^3$ ,平均值分别为 20.2  $\text{ng}/\text{m}^3$  和 19.1  $\text{ng}/\text{m}^3$ ,见表 2。

表 2 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的浓度

检测项目	西陵区			伍家岗区		
	最大值 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	最小值 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	平均值 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	最大值 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	最小值 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	平均值 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )
萘	1.50	n. d.	0.31	1.43	n. d.	0.30
萘烯	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
萘	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
芴	0.36	n. d.	0.02	0.37	n. d.	0.02
菲	5.64	n. d.	0.72	5.49	n. d.	0.58
蒽	0.49	n. d.	0.16	0.42	n. d.	0.14
荧蒽	9.17	n. d.	1.74	8.42	n. d.	1.50
比	5.72	n. d.	1.43	5.97	n. d.	1.26
屈	11.50	n. d.	1.68	11.70	n. d.	1.64
苯并[a]蒽	8.60	n. d.	2.25	8.79	n. d.	2.16
苯并[b]荧蒽	14.80	n. d.	3.35	15.70	n. d.	3.34
苯并[k]荧蒽	3.88	n. d.	1.31	3.92	n. d.	1.18
苯并[a]芘	6.80	n. d.	1.80	9.15	n. d.	1.73
茚并[1,2,3-c,d]芘	6.09	n. d.	2.98	6.32	n. d.	2.86
二苯并[a,h]蒽	1.07	n. d.	0.19	0.76	n. d.	0.18
苯并[g,h,i]芘	4.80	n. d.	2.20	4.91	n. d.	2.20

注:n. d.为低于检出限,统计时以 0 计算。

2.2.2 PAHs 的组成特征 两个监测点的 PAHs 的组成基本相同,即 2 环、3 环的 PAHs 含量较少,主要以 4 环、5 环、6 环的为主,见表 3。

表 3 PAHs 组成比例(%)

监测点	2 环	3 环	4 环	5 环	6 环
西陵区	1.56	4.45	35.25	33.02	25.73
伍家岗区	1.58	3.89	34.36	33.69	26.47

2.2.3 PAHs 的风险评估 总毒性当量是指 PAHs 中所有致癌物质相对于 BaP 的总浓度(ΣBaP),由 16 种 PAHs 的浓度和其对应的毒性当量因子估算,采用的当量因子如下:萘为 0.001,萜烯为 0.001,屈为 0.001,苯并[a]蒽为 0.014,苯并[b]荧蒽为 0.11,苯并[k]荧蒽为 0.037,苯并[a]芘为 1,茚并[1,2,3-c,d]芘为 0.067,二苯并[a,h]蒽为 0.89,苯并[g,h,i]芘为 0.012。西陵区和伍家岗区的总毒性当量浓度分别为 2.75 ng/m<sup>3</sup> 和 2.64 ng/m<sup>3</sup><sup>[8-13]</sup>。

2.2.4 PAHs 终身致癌风险计算 吸附在 PM<sub>2.5</sub> 表面的多环芳烃通过呼吸、皮肤接触途径进入人体,对人体产生一定的致癌效应,这种致癌风险可以通过终生致癌风险(ILCR)模型来估算<sup>[12]</sup>。根据 USEPA 相关规定,当 10<sup>-6</sup><ILCR<10<sup>-4</sup>时,表示具有潜在致癌风险;当>ILCR<sup>-4</sup>时,表示风险很高,需要优先处理。本文通过苯并[a]芘总毒性当量计算两个监测点成人经呼吸和皮肤接触所致风险。

呼吸的 ILCR 计算公式如下:

$$R_I = \frac{C_i(CSF_i \times (\frac{BW}{70})^{1/3}) \times IR_i \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf$$

式中:R<sub>I</sub> 为某化合物在某剂量下通过呼吸摄入可致人群终生致癌风险(无量纲);C<sub>i</sub> 为可吸入颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中 ΣBaP 的浓度(ng/m<sup>3</sup>);CSF<sub>i</sub> 为呼吸致癌强度因子(mg/kg/d)<sup>-1</sup>;BW 为体重(kg);IR 为呼吸速率(m<sup>3</sup>/d);EF 为年暴露频率(d/a);ED 为暴露年数(a),AT 为平均寿命(d),cf 为转换因子(10<sup>-6</sup>)。

皮肤接触的 ILCR 计算公式如下:

$$R_D = \frac{C_d \times (CSF_d \times (\frac{BW}{70})^{1/3}) \times AB \times SA \times EV \times AF_d \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf$$

式中:R<sub>D</sub> 为某化合物在某剂量下通过皮肤接触可致人群终生致癌风险(无量纲);C<sub>d</sub> 为可吸入颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中 ΣBaP 的浓度(ng/m<sup>3</sup>);CSF<sub>d</sub> 为呼吸致癌强度因子(mg/kg/d)<sup>-1</sup>;AB 为皮肤吸收比率(无量纲),SA 为皮肤暴露面积(cm<sup>2</sup>);EV 为暴露事件频率(event/d);AF<sub>d</sub> 为颗粒物与皮肤的吸附系数(mg/cm<sup>2</sup>/event)。

本文取呼吸和皮肤接触的 CSF 值为 3.14 和

37.47;AT 为 25 550 d;BW 为 60.2 kg;IR 为 32.73;EF 为 252;SA 为 5 333.33;AF<sub>d</sub> 为 0.04;AB 为 0.31<sup>[14]</sup>,结果见表 4。

表 4 不同监测点通过呼吸及皮肤接触所致个人风险

监测点	呼吸	皮肤接触	合计
西陵区	3.08×10 <sup>-6</sup>	7.43×10 <sup>-5</sup>	7.74×10 <sup>-5</sup>
伍家岗区	2.96×10 <sup>-6</sup>	7.14×10 <sup>-4</sup>	7.44×10 <sup>-5</sup>

2.3 金属和类金属

2.3.1 金属和类金属的浓度 12 种金属和类金属元素均有检出,其中汞元素的含量低于定量检出限。铝、砷、镉、锑、铊和铅的检出率均为 100%,见表 5。

表 5 PM<sub>2.5</sub> 中金属和类金属的浓度

检测项目	西陵区			伍家岗区		
	最大值 (ng/m <sup>3</sup> )	最小值 (ng/m <sup>3</sup> )	平均值 (ng/m <sup>3</sup> )	最大值 (ng/m <sup>3</sup> )	最小值 (ng/m <sup>3</sup> )	平均值 (ng/m <sup>3</sup> )
砷	0.053	n.d.	0.017	0.072	n.d.	0.013
铝	188.0	n.d.	75.7	277.0	n.d.	108.0
铬	8.7	n.d.	2.1	3.0	n.d.	1.0
锰	60.3	3.9	22.6	40.7	n.d.	14.9
镍	102.0	n.d.	2.2	39.5	n.d.	1.2
钾	23.3	1.5	7.7	24.0	1.1	7.7
硒	23.9	n.d.	6.6	20.3	n.d.	5.6
镉	4.8	0.2	1.5	5.4	0.1	1.4
锑	21.2	0.8	3.8	6.4	0.3	2.5
汞	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.0
铊	1.6	0.1	0.5	1.8	0.1	0.5
铅	112.0	8.8	40.9	120.0	4.4	41.9

注:n.d.为低于检出限,统计时以 0 计算。

2.3.2 铅和镉风险评估 对空气中重金属铅、镉影响进行评估,主要考虑经皮肤接触和呼吸系统进入,因此日平均暴露量 CDI[mg/(kg·d)]=CD<sub>inh</sub>+CD<sub>lder</sub>。

$$CD_{inh} = \frac{C \times In \times EF \times ED \times CF}{PEF \times BW \times AT}$$
$$CD_{lder} = \frac{C \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

式中:CD<sub>inh</sub>、CD<sub>lder</sub> 分别为经吸入途径日均暴露量、皮肤接触日均暴露量,单位为 mg/(kg·d);C 为暴露点重金属含量,mg/kg;EF 为暴露频率,d/a;ED 为暴露年限,a;CF 为单位转换因子;BW 为平均体重,kg;AT 为平均暴露时间,非致癌暴露时间为 ED×365 d,致癌暴露时间为 70×365 d;In 为呼吸频率,m<sup>3</sup>/d;PEF 为颗粒物排放因子,m<sup>3</sup>/kg;SA 为暴露皮肤表面积,cm<sup>2</sup>;SL 皮肤黏着度,mg/(cm<sup>2</sup>·d);ABS 为皮肤吸收因子,无量纲。见表 6。

非致癌风险大小用风险商(HQ)表示:HQ=CDI/

RfD,式中 RfD 为 USEPA 研究确定的参考计量值,单位为  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。致癌风险的大小用致癌指数(CR)表示; $\text{ILCR} = \text{CDI} \times \text{SF}$ ,式中 SF 为 USEPA 提供的致癌元素的致癌校正参数斜率因子,单位为  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

表 6 铅镉风险评估计算取值<sup>[15-17]</sup>

参数	项目	取值
In	呼吸频率( $\text{m}^3/\text{d}$ )	20
PEF	颗粒物排放因子( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	$1.36 \times 10^9$
SA	暴露皮肤面积( $\text{cm}^2$ )	5 700
SL	皮肤黏着度( $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ )	0.07
ABS	皮肤吸收因子	0.01
EF	暴露频率( $\text{d}/\text{a}$ )	365
ED	暴露年限(a)	30
BW	平均体重(kg)	70
AT	平均暴露时间(d)	$\text{ED} \times 365$ (非致癌); $70 \times 365$ (致癌)
CF	单位转换因子	根据单位转换值确定
镉 SF	致癌校正参数斜率因子( $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ )	0.38

根据 USEPA 的风险评价标准,当  $\text{HQ} > 1$  时,存在非致癌风险;当  $10^{-6} < \text{ILCR} < 10^{-4}$  时,表示具有潜在致癌风险;当  $> \text{ILCR}^{-4}$  时,表示风险很高,需要优先处理,见表 7、表 8。

表 7 西陵区大气中重金属非致癌风险指数和致癌风险

重金属	非致癌风险指数				致癌风险
	手口摄入	吸入	皮肤接触	合计	
铅	0.217	$1.58 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-3}$	0.219	/
镉	$9.20 \times 10^{-3}$	$6.76 \times 10^{-7}$	$1.06 \times 10^{-3}$	$1.03 \times 10^{-2}$	$4.26 \times 10^{-8}$

注:铅为非致癌物,不计算致癌风险。

表 8 伍家岗区大气中重金属非致癌风险指数和致癌风险

重金属	非致癌风险指数				致癌风险
	手口摄入	吸入	皮肤接触	合计	
铅	0.205	$1.49 \times 10^{-5}$	$1.57 \times 10^{-3}$	0.207	/
镉	$7.67 \times 10^{-3}$	$5.64 \times 10^{-7}$	$8.82 \times 10^{-4}$	$8.55 \times 10^{-3}$	$3.55 \times 10^{-8}$

注:铅为非致癌物,不计算致癌风险。

3 讨论

宜昌空气  $\text{PM}_{2.5}$  污染较为严重,两个监测点  $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度达到《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定的二级标准值(限值  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的不足 50%,有的甚至在二级标准值的 3 倍以上。季节变化趋势基本为冬季>春季>秋季>夏季,主要是由于冬季高气压的影响,大气疏散能力较差,颗粒物容易聚集,而夏季空气稀释能力较强。

宜昌空气  $\text{PM}_{2.5}$  中 PAHs 的组成主要是 4~6 环,占 PAHs 总量的 90%以上;西陵区和伍家岗区的苯并[a]芘年均浓度分别为  $1.80 \text{ ng}/\text{m}^3$  和  $1.73 \text{ ng}/\text{m}^3$ ,超

过国家限量标准  $1.00 \text{ ng}/\text{m}^3$ ;两个监测点的多环芳烃的终身致癌风险分别为  $7.74 \times 10^{-5}$  和  $7.44 \times 10^{-5}$ ,表明存在潜在致癌风险,应采取相应措施,从源头上减少目标污染物的形成。同时,采取一定的人体防护措施,减少皮肤与大气颗粒物的接触,降低终生致癌风险。

宜昌空气  $\text{PM}_{2.5}$  中主要重金属污染物是铝、铅、镉和砷,两个监测点的铅、镉非致癌风险指数均小于 1,镉的致癌风险分别为  $4.26 \times 10^{-8}$  和  $3.55 \times 10^{-8}$ ,表明铅镉所致风险可忽略。

参考文献

[1] 冯利红,李永刚,赵岩,等. 天津市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.

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

[3] 张莹,刘丽伟,宁贵财,等. 兰州市大气污染物的分布特征及其对人体健康的影响[J]. 卫生研究,2015,44(5):723-729.

[4] 刘爱明,杨柳. 大气重金属离子的来源分析和毒性效应[J]. 环境与健康杂志,2011,28(9):839-842.

[5] 陈建安,郭萍,张景平,等. 山区公路边铅污染对居民健康影响的研究[J]. 环境与健康杂志,2009,26(11):985-987.

[6] Edisio P, Jose ABN, Bernard JS, et al. The contribution of heavy metal pollution derived from highway runoff to Guanabara Bay sediments-Rio de Janeiro/Brazil[J]. An Acad Bras Cienc,2007,79(4):793-750.

[7] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. GB3095-2012,《环境空气质量标准》[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.

[8] Nisbeti ICT, Lagoy PK. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic Hydrocarbons (PAHs) [J]. Regul Toxicol Pharm, 1992, 16(3):209-300.

[9] Muller P, Leece B, Raha D. Scientific criteria document for multimedia environmental standards development: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Part 1: dose response assessment[M]. Ottawa, Ontario: Ministry of the Environment and Energy, 1996:78.

[10] 张莉,张原,祁士华,等. 武汉市洪山区春季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度及多环芳烃组成特征[J]. 中国环境科学,2015,35(8):2319-2325.

[11] US Environmental Protection Agency. Regional screening levels for chemical contaminants at superfund sites. Regional screening table. User's guide [R]. [http://www.Epa.gov/reg3hwmd/risk/human/b-concentration\\_table/usersguide.htm](http://www.Epa.gov/reg3hwmd/risk/human/b-concentration_table/usersguide.htm), USEPA, 2012.

[12] 吴明红,陈稼璐,陈祖怡,等. 多环芳烃在上海近郊大气颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$ ) 中的污染特征、来源及其健康风险评估[J]. 上海大学学报,2014,20(4):521-530.

[13] 董继元,刘兴荣,张本忠,等. 上海市居民暴露于多环芳烃的健康风险评估[J]. 生态环境学报,2014,24(1):126-132.

[14] USEPA. Dermal exposure assessment: principles and applications[EB/OL]. (2013-10-09) [2016-10-10]. <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=12188>.

[15] Zhao HR, Xia BC, Chen F, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China[J]. Sci Total Environ, 2012(417/418):45-54.

[16] EPA/600/R-09/052F Exposure Factors Handbook: 2011 edition [S]. EPA/600/R-09/052F, Washington DC, 2011.

[17] 杨立辉,柯钊跃,谢志宜,等. 广东某铅锌矿周边地区大气颗粒物重金属水平及人群暴露风险评估[J]. 中国环境监测,2015,31(1):48-53.