

# 珠海市 2020—2023 年大气 PM<sub>2.5</sub> 的元素特征及健康风险评估

张瑰<sup>1</sup>, 吴雨蔓<sup>2</sup>, 职佳音<sup>3</sup>, 林丽玲<sup>1</sup>, 江倩文<sup>1</sup>, 黄利群<sup>1</sup>

1. 珠海市疾病预防控制中心, 广东 珠海 519000; 2. 威斯康星大学麦迪逊分校统计学院; 3. 新乡医学院公共卫生学院

**摘要:**目的 了解珠海市近年来大气 PM<sub>2.5</sub> 的元素特征及其健康风险, 为珠海市污染治理提供相关依据。方法 于 2020 年 4 月—2023 年 3 月在珠海市 3 个行政区每月定期采集 PM<sub>2.5</sub> 样本, 共取得 756 份样品, 通过 ICP-MS 法对 PM<sub>2.5</sub> 中元素含量进行测量, 并采用美国 EPA 吸入暴露模型计算健康风险。结果 每月在 34 种元素范围内对珠海市 PM<sub>2.5</sub> 样本进行分析, 大部分元素质量浓度表现为夏季低, 冬季高的特点, 其中重金属元素 3 年间年均浓度由大到小依次为锌(64.1 ng/m<sup>3</sup>) > 锰(14.2 ng/m<sup>3</sup>) > 铅(10.9 ng/m<sup>3</sup>) > 铜(6.57 ng/m<sup>3</sup>) > 砷(2.41 ng/m<sup>3</sup>) > 镍(1.91 ng/m<sup>3</sup>) > 钒(1.83 ng/m<sup>3</sup>) > 铬(1.62 ng/m<sup>3</sup>) > 锑(1.21 ng/m<sup>3</sup>) > 镉(0.54 ng/m<sup>3</sup>) > 铊(0.13 ng/m<sup>3</sup>) > 钴(0.12 ng/m<sup>3</sup>) > 汞(4.88 × 10<sup>-3</sup> ng/m<sup>3</sup>)。与之前珠海市的相关研究比较, 各元素质量浓度均有所下降, 但锑、铝、砷、铬、镍、硒有再次上涨的趋势。对 6 种致癌元素铬、钴、镍、砷、钼和镉, 10 种非致癌元素铝、钒、锰、铜、锌、硒、锑、钡、汞和铅进行健康评价, 结果显示非致癌元素风险均在人群可接受水平(HQ ≤ 1), 致癌元素铬和砷存在致癌风险(R > 10<sup>-6</sup>)。结论 珠海市大气 PM<sub>2.5</sub> 非致癌元素健康风险均在人群可接受水平, 致癌元素铬和砷存在致癌风险, 需重点关注。从元素质量浓度来看, 燃料和交通污染仍是治理重点。

**关键词:** 大气污染; PM<sub>2.5</sub>; 健康风险评估

中图分类号: R122.7 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)02-226-07

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202308489

## Element characteristics and health risk assessment of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Zhuhai, 2020 – 2023

ZHANG Gui\*, WU Yu-man, ZHI Jia-yin, LIN Li-ling, JIANG Qian-wen, HUANG Li-qun

\* Zhuhai Center for Disease Control and Prevention, Zhuhai, Guangdong 519000, China

**Abstract; Objective** To understand the characteristics of atmospheric PM<sub>2.5</sub> pollution elements and their health risk assessment in Zhuhai in recent years, in order to provide relevant basis for pollution control in Zhuhai. **Methods** From April 2020 to March 2023, PM<sub>2.5</sub> samples were collected on a monthly basis in three administrative regions of Zhuhai City, with a total of 756 samples obtained. The elemental contents in PM<sub>2.5</sub> were analysed by ICP-MS. The health risks were calculated using the US EPA inhalation exposure model. **Results** Monthly analysis of PM<sub>2.5</sub> samples in Zhuhai within the range of 34 elements. The mass concentrations of most elements were low in summer and high in winter. The annual average concentration of heavy metal elements in the three years of monitoring, from highest to lowest, was Zn(64.1 ng/m<sup>3</sup>) > Mn(14.22 ng/m<sup>3</sup>) > Pb(10.9 ng/m<sup>3</sup>) > Cu(6.57 ng/m<sup>3</sup>) > As(2.41 ng/m<sup>3</sup>) > Ni(1.91 ng/m<sup>3</sup>) > V(1.83 ng/m<sup>3</sup>) > Cr(1.62 ng/m<sup>3</sup>) > Sb(1.21 ng/m<sup>3</sup>) > Cd(0.54 ng/m<sup>3</sup>) > Tl(0.13 ng/m<sup>3</sup>) > Co(0.12 ng/m<sup>3</sup>) > Hg(4.88 × 10<sup>-3</sup> ng/m<sup>3</sup>). Compared with previous studies in Zhuhai, the mass concentration of each element has decreased, but Sb, Al, As, Cr, Ni and Se had a trend of rising again. A health assessment was conducted on 6 carcinogenic elements Cr, Co, Ni, As, Mo and Cd, as well as 10 non carcinogenic elements Al, V, Mn, Cu, Zn, Se, Sb, Ba, Hg, and Pb. The results showed that the risk of non carcinogenic elements was at an acceptable level for the population(HQ ≤ 1). Cr and As had a carcinogenic risk(R > 10<sup>-6</sup>). **Conclusion** The health risks of non carcinogenic elements PM<sub>2.5</sub> in the atmosphere of Zhuhai City are all at an acceptable level for the population. Cr and As pose a cancer risk and require special attention. From the perspective of element mass concentration, fuel and transportation pollution are still the key points of governance.

**Keywords:** Air pollution; PM<sub>2.5</sub>; Health risk assessment

基金项目: 珠海市社会发展领域科技计划项目(ZH22036201210166PWC)

作者简介: 张瑰(1973—), 女, 本科, 主任技师, 研究方向: 理化检验金属元素检测方向

通信作者: 黄利群, E-mail: 361085480@qq.com

PM<sub>2.5</sub> 污染是全球突出问题,其作为载体携带的大量污染元素会严重危害人体健康,其中的重金属,如铅、镉等暴露于发育窗口期,容易对神经系统造成影响;砷、铅、汞、镉和铬等和癌症密切相关<sup>[1]</sup>。因气候和产业不同,各地的 PM<sub>2.5</sub> 元素特征多有其独特性。研究 PM<sub>2.5</sub> 元素污染特征有助于掌握当地 PM<sub>2.5</sub> 污染的整体情况,而健康风险评价可以确定 PM<sub>2.5</sub> 暴露对人体产生的健康效应,PM<sub>2.5</sub> 元素特征分析和健康评价研究在许多城市均有开展,如广州<sup>[2]</sup>、深圳<sup>[3]</sup>、济南<sup>[4]</sup>等。珠海市属于珠三角经济区城市之一,经济发达的同时也是大气污染的重点区域,杨毅红等人<sup>[5]</sup>曾对珠海市郊区的 PM<sub>2.5</sub> 痕量重金属做过污染特征分析和健康风险评价,但主要关注的是郊区污染,不能代表珠海市整体的污染情况。之后吴和岩等人<sup>[6]</sup>分析了 2017—2018 年珠海市 PM<sub>2.5</sub> 12 种元素的污染特征和来源,且与杨毅红的结果作对比,元素质量浓度均有所下降,燃煤、船舶、交通和工业污染仍为主要污染源,但其未进行健康风险评价,从现在来看研究时间也较早。本研究在珠海市 2020—2023 年连续 3 年采样的基础上,对收集到的 PM<sub>2.5</sub> 样本中 34 种元素铍(Be)、铝(Al)、钙(Ca)、钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、硒(Se)、钼(Mo)、镉(Cd)、锑(Sb)、钡(Ba)、汞(Hg)、铊(Tl)、铅(Pb)、钍(Th)、铀(U)、镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、镝(Dy)、铥(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)和钇(Y)进行浓度检测,并采用美国 EPA 健康暴露模型进行健康评价,为珠海市大气污染治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与制备

**1.1.1 采样点设置** 在珠海市 3 个行政区(香洲区、斗门区和金湾区)设采样监测点,采样点高度约为 12 m,周边无明显固定空气污染源及障碍物,距交通干道约 300 m。

**1.1.2 采样时间** 从 2020 年 4 月到 2023 年 3 月,每月 10—16 日,连续 7 天,每日采样时间设置为 20 h(上午 9 时至次日凌晨 5 时)。进行为期 3 年的采样,共采集 756 份 PM<sub>2.5</sub> 样品。

**1.1.3 采样仪器及滤膜** ZR-3920 型大气综合采样器(青岛众瑞,中国);石英滤膜(pall 美国)直径为 90 mm。

### 1.2 样品检测与分析

**1.2.1 样品处理与检测** 准确截取采样后滤膜的 1/8,用陶瓷剪刀剪碎置于 15 ml 刻度离心管底部,加入 10.0 ml 硝酸溶液(5+95)(默克超纯级 美国)浸没滤

膜,拧紧离心管的螺旋盖,于 70 ℃ 水浴超声浸提 3 h,取出放至室温,充分振荡后,用 0.45 μm 滤头过滤待测。用 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 美国)测定,以标准系列质量浓度为横坐标,被测元素计数值(CPS)与内标物计数值的比值为纵坐标,绘制标准曲线,计算被测溶液浓度。

**1.2.2 质量控制** 电感耦合等离子体质谱仪在有效检定周期内运行,并在分析前对仪器进行调谐(Agilent 美国)和质量校准,各元素标准曲线线性相关系数 $\geq 0.999 0$ 。每批进行 3 个试剂空白试验,试剂空白值小于方法检出限;3 个实验室空白滤膜试验,空白滤膜试验值小于方法定量限;取 10% 的样品进行平行双样测定,相对偏差 $< 15\%$ 。标准物质样品进行同样处理,每种元素测定值在质控样品规定的许可范围内;取空白滤膜,加入低、中、高三个浓度混合标准使用液,回收率满足在 80%~120% 之间。

**1.3 健康风险评价方法** PM<sub>2.5</sub> 经呼吸系统进入人体,参考美国 EPA 推荐的吸入暴露方程计算人体健康风险。参考 USEPA 和姜杰等人<sup>[3]</sup>的数据和研究结果,将元素分为致癌元素和非致癌元素。暴露剂量计算也分为两种情况,非致癌元素使用日均暴露剂量(average daily dose, ADD),致癌元素使用终身日暴露剂量(lifeaverage daily dose, LADD)表示,计算公式为:  $LADD(ADD) = (C \times IR \times ED) / (BW \times AT)$ ,式中  $C$  为污染物浓度,单位  $mg/m^3$ ;  $IR$  为呼吸速率,单位  $m^3/d$ ;  $ED$  为持续暴露时间,单位  $d$ ;  $BW$  为体重,单位  $kg$ ;  $AT$  为平均暴露时间,单位  $d$ 。经呼吸途径进入人体的暴露参数参考中国环境保护部和相关文献数据<sup>[3,7-8]</sup>,详见表 1。

表 1 经呼吸途径进入人体的暴露参数

Table 1 Exposure parameters for respiratory pathway into the human body

人群	IR( $m^3/d$ )	BW(Kg)	ED(d)	AT(d)
成年男性	18.00	65.0	30×365	70×365
成年女性	14.50	56.8	30×365	70×365
儿童	8.70	36.0	18×365	70×365

致癌元素的致癌风险评价公式为<sup>[4]</sup>:  $ILCR = LADD \times SF$ ,式中  $ILCR(R)$  为人群年均超额危险度,无量纲; $LADD$  为致癌元素终身暴露剂量,单位  $mg/(kg \cdot d)$ ;  $SF$  为致癌元素的致癌斜率因子,单位  $kg \cdot d/mg$ 。根据美国 EPA 推荐的参考风险数值,当  $R < 10^{-6}$  时,认为其引起癌症的风险较小; $R > 10^{-6}$ ,认为存在致癌风险。

非致癌元素的非致癌风险评价公式为:  $HQ$  (hazard quotient) =  $ADD/RfD$ ,式中  $RfD$  为参考剂量,

单位 mg/(kg·d)。当 HQ≤1 时,认为元素的非致癌风险较小;当 HQ>1 时,则认为存在非致癌风险。相应元素的 SF 和 RfD 值见表 2<sup>[3,5,9-13]</sup>。

表 2 经呼吸途径进入人体的剂量-反应参数

Table 2 Dose-response parameters of respiratory pathway into the human

元素	SF(kg·d/mg)	元素	RfD[mg/(kg·d)]
As	20.07	Hg	1.00 × 10 <sup>-4</sup>
Cd	8.40	Pb	4.30 × 10 <sup>-4</sup>
Cr	56.00	Mn	3.00 × 10 <sup>-4</sup>
Ni	1.19	Cu	2.00 × 10 <sup>-3</sup>
Mo	4.95 × 10 <sup>-3</sup>	Zn	1.00 × 10 <sup>-2</sup>
Co	9.80	V	7.00 × 10 <sup>-3</sup>
		Ba	2.00 × 10 <sup>-1</sup>
		Se	5.00 × 10 <sup>-3</sup>
		Al	4.00 × 10 <sup>-4</sup>
		Sb	4.00 × 10 <sup>-4</sup>

## 2 结果

### 2.1 2020—2023 年珠海市大气 PM<sub>2.5</sub> 元素浓度分析

2020.4—2023.3 对珠海市大气 PM<sub>2.5</sub> 进行了为期 3 年的采集,并分析了 34 种元素,并非每月均检测了 34 种元素,其中钙、钆和铀 2020.4—2021.3 未检测,13 种稀土元素在 2022.4—2023.3 进行检测,各元素月均浓度值见表 3。2020.4—2023.3 的 3 年年均浓度排序前五位分别为锌(74.85 ng/m<sup>3</sup>)> 铝(41.69 ng/m<sup>3</sup>)> 锰(14.47 ng/m<sup>3</sup>)> 铅(12.78 ng/m<sup>3</sup>)> 铜

(7.08 ng/m<sup>3</sup>)、钙(170.09 ng/m<sup>3</sup>)> 锌(63.85 ng/m<sup>3</sup>)> 铝(46.07 ng/m<sup>3</sup>)> 锰(14.12 ng/m<sup>3</sup>)> 铅(10.29 ng/m<sup>3</sup>)、钙(215.02 ng/m<sup>3</sup>)> 铝(56.57 ng/m<sup>3</sup>)> 锌(53.59 ng/m<sup>3</sup>)> 锰(14.06 ng/m<sup>3</sup>)> 铅(9.56 ng/m<sup>3</sup>)。检测的元素中我们主要关注对人体危害较大的 13 种重金属元素,包括砷、镉、铬、钴、钒、铈、锑、锰、铜、汞、镍、铅和锌,3 年总年均浓度由大到小依次为锌(64.1 ng/m<sup>3</sup>)> 锰(14.22 ng/m<sup>3</sup>)> 铅(10.9 ng/m<sup>3</sup>)> 铜(6.57 ng/m<sup>3</sup>)> 砷(2.41 ng/m<sup>3</sup>)> 镍(1.91 ng/m<sup>3</sup>)> 钒(1.83 ng/m<sup>3</sup>)> 铬(1.62 ng/m<sup>3</sup>)> 锑(1.21 ng/m<sup>3</sup>)> 镉(0.54 ng/m<sup>3</sup>)> 铈(0.13 ng/m<sup>3</sup>)> 钴(0.12 ng/m<sup>3</sup>)> 汞(4.88 × 10<sup>-3</sup> ng/m<sup>3</sup>)。其中大部分元素为每年的夏季浓度最低,冬季(11 月—1 月)最高,但第三年峰值前移,出现在 9 或 10 月份;而钒和镍为每年 3 月份浓度最高。

两种非金属元素砷和硒的总体变化趋势与重金属元素一致,3 年间全年月均值极差第二年最小(第二年月均值极差:砷为 5.45 ng/m<sup>3</sup>,硒为 2.64 ng/m<sup>3</sup>)。

放射性元素钍和铀从 2021.4 开始检测,这两种元素的月均浓度峰值出现时间基本一致,均在 9 或 10 月份。

13 种稀土元素 2022.4—2023.3 的年均值浓度排序为 Ce>La>Nd>Y>Pr>Gd>Sm>Dy>Er>Yb>Eu>Ho>Tm,总体表现为秋季高,夏季低,峰值基本在 10 月份。

表 3 2020 年 4 月—2023 年 3 月珠海市大气 PM<sub>2.5</sub> 中各元素月均值浓度(ng/m<sup>3</sup>)

Table 3 Monthly mean concentrations of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Zhuhai from April 2020 to March 2023(ng/m<sup>3</sup>)

年份	月份	铍(Be)	铝(Al)	钙(Ca)	钒(V)	铬(Cr)	锰(Mn)	钴(Co)	镍(Ni)	铜(Cu)	锌(Zn)	砷(As)	硒(Se)	
2020	4	5.53 × 10 <sup>-3</sup>	59.11	-	2.93	1.29	15.68	0.12	2.54	6.85	139.24	2.92	1.67	
	5	4.88 × 10 <sup>-3</sup>	33.17	-	1.55	0.91	13.21	0.11	1.70	4.81	58.04	2.31	1.59	
	6	1.24 × 10 <sup>-3</sup>	12.51	-	0.96	0.35	3.80	0.04	0.91	1.67	20.57	0.33	0.43	
	7	1.20 × 10 <sup>-3</sup>	24.00	-	1.05	0.36	2.95	0.04	0.49	1.50	9.30	0.23	0.39	
	8	1.67 × 10 <sup>-3</sup>	14.57	-	1.02	0.37	3.81	0.03	0.83	1.57	15.01	0.28	0.32	
	9	2.15 × 10 <sup>-3</sup>	10.10	-	1.47	0.60	9.49	0.07	1.31	3.67	45.20	0.67	0.62	
	10	5.16 × 10 <sup>-3</sup>	40.60	-	1.33	2.51	15.84	0.14	1.77	9.90	89.73	4.20	1.94	
	11	8.09 × 10 <sup>-3</sup>	68.39	-	1.46	4.07	25.43	0.22	1.77	13.97	119.53	4.03	2.48	
	12	9.08 × 10 <sup>-3</sup>	54.92	-	1.67	3.48	32.51	0.20	2.63	15.73	131.72	7.22	3.14	
	2021	1	14.73 × 10 <sup>-3</sup>	93.76	-	2.26	2.44	31.06	0.22	2.71	14.11	152.53	6.66	2.53
		2	6.64 × 10 <sup>-3</sup>	61.34	-	2.72	0.85	9.90	0.15	2.82	6.83	56.85	2.34	1.55
		3	4.67 × 10 <sup>-3</sup>	27.80	-	3.39	0.88	10.03	0.14	3.15	4.37	60.45	1.34	1.21
年均值		5.42 × 10 <sup>-3</sup>	41.69	-	1.82	1.51	14.47	0.12	1.89	7.08	74.85	2.71	1.49	
4		1.68 × 10 <sup>-3</sup>	24.80	81.20	2.91	0.68	9.79	0.11	2.64	3.72	41.96	1.09	0.97	
5		1.14 × 10 <sup>-3</sup>	11.13	127.30	1.43	0.43	5.56	0.05	0.96	2.09	17.21	0.26	0.51	
6		2.14 × 10 <sup>-3</sup>	13.14	76.80	1.14	0.30	4.98	0.03	0.73	1.27	20.18	0.30	0.49	
7		3.40 × 10 <sup>-3</sup>	42.17	83.85	1.40	0.94	6.39	0.07	1.34	2.02	35.40	0.56	0.51	
8		1.40 × 10 <sup>-3</sup>	20.52	240.90	1.14	0.21	8.37	0.05	1.00	3.46	46.96	0.51	0.48	
9		3.93 × 10 <sup>-3</sup>	41.48	238.92	1.14	1.42	13.13	0.07	1.27	4.68	64.82	2.12	1.20	
10		3.41 × 10 <sup>-3</sup>	34.63	109.39	0.88	1.56	10.13	0.08	1.26	6.54	60.99	2.72	1.36	
11	9.34 × 10 <sup>-3</sup>	75.20	327.02	1.18	2.29	26.74	0.17	1.69	15.34	116.78	3.11	2.49		

(续表)

年份	月份	铍(Be)	铝(Al)	钙(Ca)	钒(V)	铬(Cr)	锰(Mn)	钴(Co)	镍(Ni)	铜(Cu)	锌(Zn)	砷(As)	硒(Se)
2022	12	$9.09 \times 10^{-3}$	54.40	237.13	1.88	2.88	31.52	0.18	2.58	14.89	160.38	5.71	3.12
	1	$7.70 \times 10^{-3}$	77.80	263.56	1.53	2.94	28.22	0.17	2.18	12.20	103.93	4.01	2.50
	2	$2.65 \times 10^{-3}$	65.94	108.77	1.50	1.84	12.75	0.15	1.74	10.65	53.10	2.06	1.07
	3	$3.85 \times 10^{-3}$	91.54	146.21	3.19	1.71	11.80	0.15	3.62	2.93	44.45	1.22	1.03
	年均值	$4.14 \times 10^{-3}$	46.06	170.09	1.61	1.43	14.12	0.11	1.75	6.65	63.85	1.97	1.31
	4	$4.88 \times 10^{-3}$	49.74	175.28	2.41	2.11	11.92	0.16	2.82	3.95	43.90	2.17	0.78
	5	$2.07 \times 10^{-3}$	24.99	91.67	0.83	2.10	9.26	0.08	1.39	4.05	34.51	0.73	0.72
	6	$0.96 \times 10^{-3}$	17.99	99.55	1.04	1.64	6.55	0.04	1.19	2.50	27.02	0.42	0.71
	7	$3.03 \times 10^{-3}$	27.12	110.36	1.45	1.52	4.93	0.08	1.46	0.90	29.19	0.18	0.42
	8	$2.28 \times 10^{-3}$	31.30	90.32	1.29	0.99	5.20	0.05	1.55	1.65	32.09	0.45	0.53
2023	9	$18.07 \times 10^{-3}$	140.54	282.18	2.43	3.23	25.53	0.17	2.51	11.27	113.52	8.52	4.81
	10	$10.79 \times 10^{-3}$	96.34	516.21	1.02	2.94	26.43	0.20	1.83	14.13	88.63	4.47	2.67
	11	$4.46 \times 10^{-3}$	55.59	243.39	4.10	2.03	14.83	0.14	3.28	5.97	70.40	1.68	1.65
	12	$6.57 \times 10^{-3}$	54.48	343.43	0.61	2.80	22.36	0.11	1.44	9.60	71.70	4.32	2.47
	1	$7.54 \times 10^{-3}$	31.39	242.90	2.25	0.80	6.67	0.09	1.71	5.28	30.64	2.23	1.03
	2	$2.94 \times 10^{-3}$	53.29	132.57	3.12	1.29	11.12	0.12	2.53	4.97	44.23	1.62	1.10
	3	$9.42 \times 10^{-3}$	96.06	252.42	4.22	1.55	23.95	0.17	3.37	7.34	57.18	3.66	2.10
	年均值	$6.08 \times 10^{-3}$	56.57	215.02	2.06	1.92	14.06	0.12	2.09	5.97	53.59	2.54	1.58

  

年份	钼(Mo)	镉(Cd)	锑(Sb)	钡(Ba)	汞(Hg)	铊(Tl)	铅(Pb)	钍(Th)	铀(U)
2020	0.53	1.95	1.38	3.31	$5.61 \times 10^{-3}$	0.17	13.84	-	-
	0.35	1.57	0.83	3.50	$6.17 \times 10^{-3}$	0.17	9.27	-	-
	0.06	0.28	0.20	1.42	$3.85 \times 10^{-3}$	0.02	1.78	-	-
	0.04	0.10	0.12	0.66	$2.04 \times 10^{-3}$	0.01	1.45	-	-
	0.06	0.02	0.13	1.51	$0.97 \times 10^{-3}$	0.01	1.14	-	-
	0.13	0.18	0.45	1.69	$1.78 \times 10^{-3}$	0.06	3.74	-	-
	0.62	0.77	1.55	4.28	$8.98 \times 10^{-3}$	0.21	18.25	-	-
	0.65	1.14	1.96	7.20	$14.22 \times 10^{-3}$	0.37	24.09	-	-
	0.74	1.10	2.83	7.20	$30.08 \times 10^{-3}$	0.31	26.89	-	-
	2021	0.65	1.58	3.63	11.71	$17.20 \times 10^{-3}$	0.32	33.83	-
0.52		0.42	1.40	6.62	$8.66 \times 10^{-3}$	0.08	11.99	-	-
0.35		0.30	0.86	2.81	$3.87 \times 10^{-3}$	0.07	7.14	-	-
0.39		0.78	1.28	4.33	$8.62 \times 10^{-3}$	0.15	12.78	-	-
0.36		0.18	0.45	4.79	$1.49 \times 10^{-3}$	0.06	4.78	$12.96 \times 10^{-3}$	$4.68 \times 10^{-3}$
0.10		0.05	0.25	0.92	$0.76 \times 10^{-3}$	0.03	2.97	$8.10 \times 10^{-3}$	$3.36 \times 10^{-3}$
0.11		0.04	0.20	0.98	$1.24 \times 10^{-3}$	0.01	2.64	$5.31 \times 10^{-3}$	$1.93 \times 10^{-3}$
0.32		0.11	0.23	3.11	$1.00 \times 10^{-3}$	0.06	3.28	$9.65 \times 10^{-3}$	$8.03 \times 10^{-3}$
0.10		0.05	0.18	1.23	$1.03 \times 10^{-3}$	0.01	3.39	$4.58 \times 10^{-3}$	$2.82 \times 10^{-3}$
0.33		0.23	0.79	2.94	$2.17 \times 10^{-3}$	0.09	6.70	$21.28 \times 10^{-3}$	$26.21 \times 10^{-3}$
2022	0.40	0.51	1.21	3.68	$8.25 \times 10^{-3}$	0.17	11.61	$11.43 \times 10^{-3}$	$8.99 \times 10^{-3}$
	0.63	1.01	2.56	9.93	$147.28 \times 10^{-3}$	0.42	24.99	$43.28 \times 10^{-3}$	$20.58 \times 10^{-3}$
	0.93	1.38	3.06	8.74	$24.53 \times 10^{-3}$	0.34	28.27	$37.45 \times 10^{-3}$	$20.03 \times 10^{-3}$
	1.05	0.95	2.32	12.21	$14.12 \times 10^{-3}$	0.22	20.71	$25.49 \times 10^{-3}$	$16.91 \times 10^{-3}$
	0.48	0.37	1.22	27.36	$5.03 \times 10^{-3}$	0.09	8.50	$7.42 \times 10^{-3}$	$7.30 \times 10^{-3}$
	0.59	0.19	1.00	3.44	$3.15 \times 10^{-3}$	0.04	5.61	-	$10.62 \times 10^{-3}$
	0.45	0.42	1.12	6.61	$17.50 \times 10^{-3}$	0.13	10.29	$16.99 \times 10^{-3}$	$10.95 \times 10^{-3}$
	0.69	0.27	1.11	3.34	$3.12 \times 10^{-3}$	0.06	7.62	$23.53 \times 10^{-3}$	$12.47 \times 10^{-3}$
	0.55	0.15	0.93	2.60	$1.49 \times 10^{-3}$	0.06	4.14	$4.65 \times 10^{-3}$	$5.73 \times 10^{-3}$
	0.22	0.10	0.30	2.10	$1.49 \times 10^{-3}$	0.01	3.52	$4.66 \times 10^{-3}$	$4.48 \times 10^{-3}$
2023	0.25	0.03	0.25	1.92	$1.88 \times 10^{-3}$	0.01	1.14	$10.85 \times 10^{-3}$	$8.17 \times 10^{-3}$
	0.27	0.06	0.77	3.33	$1.49 \times 10^{-3}$	0.01	2.66	$3.78 \times 10^{-3}$	$5.48 \times 10^{-3}$
	1.12	1.25	2.86	13.31	$5.69 \times 10^{-3}$	0.37	26.10	$45.57 \times 10^{-3}$	$27.95 \times 10^{-3}$
	1.03	0.93	2.24	9.11	$21.40 \times 10^{-3}$	0.26	15.34	$44.59 \times 10^{-3}$	$22.86 \times 10^{-3}$
	0.75	0.33	1.40	5.32	$1.76 \times 10^{-3}$	0.09	6.39	$15.92 \times 10^{-3}$	$10.79 \times 10^{-3}$
	1.01	0.87	2.12	6.37	$8.41 \times 10^{-3}$	0.28	19.40	$14.70 \times 10^{-3}$	$18.79 \times 10^{-3}$
	0.28	0.20	0.77	12.06	$8.88 \times 10^{-3}$	0.05	5.65	$24.91 \times 10^{-3}$	$5.28 \times 10^{-3}$
	0.37	0.34	0.73	4.70	$1.49 \times 10^{-3}$	0.09	8.21	$14.89 \times 10^{-3}$	$7.16 \times 10^{-3}$
	0.65	0.65	1.27	5.92	$1.49 \times 10^{-3}$	0.17	14.59	$41.95 \times 10^{-3}$	$14.48 \times 10^{-3}$
	0.60	0.43	1.23	5.84	$4.88 \times 10^{-3}$	0.12	9.56	$20.83 \times 10^{-3}$	$11.97 \times 10^{-3}$

(续表)

年份	月份	钇(Y)	镧(La)	铈(Ce)	镨(Pr)	钕(Nd)	钐(Sm)	
2022	4	0.067 4	0.094 5	0.147 0	0.016 8	0.067 4	0.014 2	
	5	0.035 7	0.040 2	0.051 8	0.004 8	0.034 5	0.001 9	
	6	0.024 0	0.022 0	0.030 7	0.002 6	0.013 4	0.002 3	
	7	0.044 1	0.035 7	0.054 9	0.006 8	0.026 6	0.006 3	
	8	0.033 3	0.028 6	0.039 6	0.003 1	0.017 9	0.002 9	
	9	0.131 0	0.217 0	0.304 0	0.039 2	0.147 0	0.024 9	
	10	0.139 0	0.264 0	0.343 0	0.056 5	0.207 0	0.029 7	
	11	0.069 5	0.070 8	0.089 5	0.009 8	0.045 5	0.007 0	
	12	0.060 5	0.135 0	0.154 0	0.026 2	0.091 7	0.010 5	
	2023	1	0.053 6	0.141 0	0.155 0	0.026 6	0.093 0	0.010 3
		2	0.044 3	0.073 5	0.094 6	0.014 8	0.054 2	0.008 7
		3	0.098 4	0.185 0	0.313 0	0.037 2	0.139 0	0.026 9
年均值		0.066 7	0.109 0	0.148 0	0.020 4	0.078 1	0.012 1	
年份	铕(Eu)	钆(Gd)	镝(Dy)	钬(Ho)	铒(Er)	铥(Tm)	镱(Yb)	
2022	0.002 34	0.013 0	0.010 8	0.001 79	0.005 07	0.000 293	0.003 90	
	0.000 16	0.002 5	0.001 6	0.000 09	0.000 13	0.000 020	0.000 24	
	0.000 34	0.002 6	0.002 1	0.000 29	0.000 97	0.000 078	0.000 60	
	0.001 28	0.006 2	0.005 4	0.001 39	0.003 42	0.000 407	0.002 14	
	0.000 16	0.002 9	0.002 0	0.000 09	0.000 46	0.000 020	0.000 23	
	0.003 81	0.024 0	0.018 8	0.002 94	0.009 03	0.000 505	0.007 48	
	0.004 28	0.030 9	0.029 6	0.004 10	0.010 20	0.000 559	0.008 40	
	0.000 47	0.007 0	0.005 7	0.000 08	0.001 78	0.000 020	0.001 33	
	0.001 92	0.011 9	0.008 4	0.002 18	0.003 83	0.000 545	0.003 41	
	2023	0.002 00	0.011 3	0.007 8	0.002 17	0.003 73	0.000 573	0.003 59
		0.001 84	0.009 0	0.006 1	0.001 33	0.003 04	0.000 397	0.002 42
		0.005 22	0.025 5	0.017 7	0.003 55	0.008 55	0.001 070	0.006 71
0.001 98		0.012 2	0.009 7	0.001 66	0.004 18	0.000 374	0.003 37	

注：“-”表示当月未检测此元素。

2.2 健康风险评价 根据公式及表 2 的参数计算 6 种致癌元素铬、钴、镍、砷、钼、镉和 10 种非致癌元素铝、钒、锰、铜、锌、硒、锑、钡、汞、铅的风险评价 R 值和 HQ 值,计算结果见表 4。

由表 4 可见采样期间,10 种非致癌元素风险均在人群可接受水平内(HQ ≤ 1),致癌元素风险除铬和砷外也均在人群可接受范围内(R < 10<sup>-6</sup>)。从年龄和性别来看表现为成年男性 > 成年女性 > 儿童。

表 4 2020 年 4 月—2023 年 3 月珠海市大气 PM<sub>2.5</sub> 元素风险评价

Table 4 The risk assessment of atmospheric PM<sub>2.5</sub> elements in Zhuhai from April 2020 to March 2023

元素	致癌元素 R[ × 10 <sup>-6</sup> ]			元素	非致癌元素 HQ		
	成年男性	成年女性	儿童		成年男性	成年女性	儿童
铬(Cr)	10.76	9.92	5.63	铝(Al)	1.43 × 10 <sup>-2</sup>	1.32 × 10 <sup>-2</sup>	0.75 × 10 <sup>-2</sup>
钴(Co)	0.13	0.12	0.07	钒(V)	3.10 × 10 <sup>-5</sup>	2.86 × 10 <sup>-5</sup>	1.63 × 10 <sup>-5</sup>
镍(Ni)	0.27	0.25	0.14	锰(Mn)	5.62 × 10 <sup>-3</sup>	5.19 × 10 <sup>-3</sup>	2.95 × 10 <sup>-3</sup>
砷(As)	5.73	5.29	3.00	铜(Cu)	3.90 × 10 <sup>-4</sup>	3.59 × 10 <sup>-4</sup>	2.04 × 10 <sup>-4</sup>
钼(Mo)	2.82 × 10 <sup>-4</sup>	2.60 × 10 <sup>-4</sup>	1.48 × 10 <sup>-4</sup>	锌(Zn)	7.61 × 10 <sup>-4</sup>	7.01 × 10 <sup>-4</sup>	3.98 × 10 <sup>-4</sup>
镉(Cd)	0.54	0.50	0.28	硒(Se)	3.47 × 10 <sup>-5</sup>	3.20 × 10 <sup>-5</sup>	1.82 × 10 <sup>-5</sup>
				锑(Sb)	3.60 × 10 <sup>-4</sup>	3.31 × 10 <sup>-4</sup>	1.88 × 10 <sup>-4</sup>
				钡(Ba)	3.32 × 10 <sup>-6</sup>	3.06 × 10 <sup>-6</sup>	1.74 × 10 <sup>-6</sup>
				汞(Hg)	1.21 × 10 <sup>-5</sup>	1.12 × 10 <sup>-5</sup>	0.63 × 10 <sup>-5</sup>
				铅(Pb)	3.00 × 10 <sup>-3</sup>	2.77 × 10 <sup>-3</sup>	1.57 × 10 <sup>-3</sup>

### 3 讨论

珠海市 PM<sub>2.5</sub> 元素浓度秋冬高,夏季低,与吴和岩<sup>[6]</sup>和杨毅红<sup>[5]</sup>等人的研究结果一致。但本研究

PM<sub>2.5</sub> 大部分元素浓度高峰在 9—11 月份,不同于吴和岩的研究结果(12—2 月),这可能是近几年气候变化导致。吴和岩等人检测的 2017—2018 年珠海市 PM<sub>2.5</sub> 元素浓度与杨毅红等人检测的 2014—2015 年相比大幅度减少,而本研究中 PM<sub>2.5</sub> 元素浓度与 2017—

2018 年相比进一步减少,但镉、铝、砷、铬、镍、硒在 2023 年有再次上涨的趋势,表明珠海市大气污染总体治理效果较好,只是还需关注出现上涨趋势的污染元素。钙元素浓度在 2021.4—2023.3 位于第一位,电力、钢铁及珠海市海上风电项目等多个行业均会产生大量的钙。PM<sub>2.5</sub>中的两种非金属元素砷和硒可能是燃煤发电厂燃烧时释放,在冷却时附着在颗粒物表面<sup>[14]</sup>。除这些元素外,珠海市相关研究表明,钒和镍为船舶排放的标志污染物,其浓度会较内陆城市高<sup>[5-6]</sup>。

大气中的重金属不仅会通过呼吸途径损害人体,还会通过食物链危害人体健康<sup>[15]</sup>。本研究关注的重金属污染物中,锌、锰、铅、铜、砷 3 年采样期间均排在前五位,其中铅和砷主要来自煤炭燃烧<sup>[16-17]</sup>,锌来自铜冶炼、发动机的润滑油、机动车尾气和轮胎磨损<sup>[18]</sup>。锰长期暴露会造成神经损伤,儿童期接触锰可能会导致智力低下等问题<sup>[19]</sup>,其主要来自垃圾焚烧<sup>[20]</sup>和化石燃料释放<sup>[18]</sup>。铜的主要污染来源是交通,汽车尾气的排放、刹车时制动器和轮胎的摩擦等行为均会释放出大量的铜<sup>[17,21]</sup>。放射性元素钷和铀主要来自地壳<sup>[22]</sup>,具体的污染来源和规律还需进一步分析。稀土元素年均值浓度高峰出现在秋季,与刘岩等<sup>[23]</sup>的研究结果一致,但总体趋势不同,可能是城市污染来源不同导致。参考厦门市<sup>[24]</sup>研究结果,珠海市稀土元素可能来自交通汽车尾气和燃煤排放。

本研究结果显示,珠海市 PM<sub>2.5</sub>非致癌风险排序为 Al > Mn > Pb > Zn > Cu > Sb > Se > V > Hg > Ba 均在人群可接受水平内;致癌风险排序为 Cr > As > Cd > Ni > Co > Mo,其中 Cr 和 As 存在致癌风险。有研究表明,Cr 主要来自交通和工业污染<sup>[4]</sup>,长期暴露会导致退行性疾病和癌症,还会对男性生殖系统造成损害<sup>[25-26]</sup>。As 主要来自煤炭燃烧,产前暴露于 As 会导致儿童神经发育迟缓<sup>[27]</sup>,长期 As 暴露还有可能诱发皮肤癌<sup>[28]</sup>。Cr 和 As 污染需重点关注,主要加强对交通和工业的管控并减少煤炭燃烧。致癌和非致癌风险按年龄、性别分析,均为成年男性 > 成年女性 > 儿童,这可能与成年人每日换气量、室外空气暴露时间长有关,且男性体重大于女性,每日呼吸空气量更多。

综上所述,珠海市大气 PM<sub>2.5</sub>污染元素除来自自然来源外,主要来自燃料燃烧和机动车相关污染排放,船舶排放也是珠海市的典型污染来源;非致癌风险均在人群可接受水平,Cr 和 As 存在致癌风险,需重点关注;燃料和机动车污染问题仍是治理的重点。

本研究分析的元素较为全面,进行了 3 年的 PM<sub>2.5</sub>收集和分析,从 PM<sub>2.5</sub>各元素质量浓度方面进行

比较,探讨珠海市污染防治的效果,为今后重点污染元素的确定提供依据。研究的不足在于研究中采用的风险评价公式只考虑了吸入途径,未综合其他暴露方式,低估了健康风险。

**利益冲突声明** 本研究不存在任何利益冲突

## 参考文献

- Parida L, Patel TN. Systemic impact of heavy metals and their role in cancer development: a review [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(6): 766.
- 袁鸾,徐伟嘉,岳玎利,等. 广州不同环境空气 PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征与风险评价[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(6): 91-100.  
Yuan L, Xu WJ, Yue DL, et al. Pollution characteristics and risk assessment of metals in ambient PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(6): 91-100.
- 姜杰,李瑞园,丘红梅,等. 深圳大气 PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *实用预防医学*, 2019, 26(7): 781-785.  
Jiang J, Li RY, Qiu HM, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in ambient PM<sub>2.5</sub> in Shenzhen [J]. *Practical Preventive Medicine*, 2019, 26(7): 781-785.
- 周瑞文,陈敏,李园园,等. 济南市冬季 PM<sub>2.5</sub>中元素的污染特征、来源及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2023, 42(4): 1280-1292.  
Zhou RW, Chen M, Li YY, et al. Pollution characteristics, sources and health risk assessment of elements in PM<sub>2.5</sub> during wintertime in Jinan city [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(4): 1280-1292.
- 杨毅红,贾燕,卞国建,等. 珠海市郊区大气 PM<sub>2.5</sub>中元素特征及重金属健康风险评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1553-1561.  
Yang YH, Jia Y, Bian GJ, et al. Elemental characteristics and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in a suburb of Zhuhai city [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1553-1561.
- 吴和岩,黄利群,宁婷,等. 珠海市 2017—2018 大气 PM<sub>2.5</sub>污染成份特征及金属元素来源解析[J]. *现代预防医学*, 2022, 49(1): 27-31.  
Wu HY, Huang LQ, Ning T, et al. Pollution characteristics and source of metal elements in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Zhuhai City, 2017-2018 [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2022, 49(1): 27-31.
- 中华人民共和国环境保护部. 中国人群环境暴露行为模式研究报告(成人卷)[M]. 北京:中国环境出版社,2013.  
Ministry of Environmental Protection, PRC. Study on environmental exposure behavior patterns in Chinese population (adult volume) [M]. Beijing: China Environment Press, 2013.
- 花中霞,王小青,马辉,等. 石家庄市大气 PM<sub>2.5</sub>中 As 和 Cr 的污染特征及其健康风险评价[J]. *医学动物防制*, 2022, 38(2): 112-116.  
Hua ZX, Wang XQ, Ma H, et al. Pollution characteristics and health risk assessment on As and Cr in atmospheric PM<sub>2.5</sub> of Shijiazhuang [J]. *Journal of Medical Pest Control*, 2022, 38(2): 112-116.
- 雷森,马嘉晖,杨璐平,等. 不同空气质量下河南主要城市冬季

- PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征、来源解析及健康风险评价[J/OL]. 环境化学, 1 - 12 [2023 - 12 - 13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20230424.2120.022.html>.
- Lei M, Ma JH, Yang LP, et al. Pollution characterization, source identification and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub> - bound metals in main cities of Henan province in winter under different air quality levels[J/OL]. Environmental Chemistry, 1 - 12 [2023 - 12 - 13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20230424.2120.022.html>.
- [10] 张勇, 陈荣祥, 保玉心, 等. 遵义市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 179 - 184.  
Zhang Y, Chen RX, Bao YX, et al. Health risk assessment and pollution characteristics of heavy metals from PM<sub>2.5</sub> in Zunyi[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(6): 179 - 184.
- [11] 赵明升, 任丽红, 李刚, 等. 2018—2019 年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5376 - 5386.  
Zhao MS, Ren LH, Li G, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub> heavy metals in Tianjin and Qingdao in winter of 2018 - 2019[J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5376 - 5386.
- [12] 周少磊, 刘波. 北京市通州区监测点 2016—2018 年 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素污染特征及健康风险评价[J]. 包头医学院学报, 2021, 37(6): 49 - 52, 55.  
Zhou SL, Liu B. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Tongzhou district of Beijing from 2016 to 2018[J]. Journal of Baotou Medical College, 2021, 37(6): 49 - 52, 55.
- [13] 杨孟, 王慧, 吴丹, 等. 南京市 PM<sub>2.5</sub> 中痕量元素的健康风险评价[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(1): 171 - 179.  
Yang M, Wang H, Wu D, et al. Health risk evaluation of trace elements in PM<sub>2.5</sub> in Nanjing city[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(1): 171 - 179.
- [14] Rai P, Furger M, Slowik JG, et al. Characteristics and sources of hourly elements in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> during wintertime in Beijing[J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116865.
- [15] 陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 等. 2000—2018 年我国大气重金属沉降通量时空变化特征[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4413 - 4424.  
Chen QY, Gao YB, Ni RX, et al. Temporal and spatial variation characteristics of heavy metal in atmospheric deposition in China from 2000 to 2018[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4413 - 4424.
- [16] Lin YC, Zhang YL, Song WH, et al. Specific sources of health risks caused by size - resolved PM - bound metals in a typical coal - burning city of northern China during the winter haze event[J]. Science of the Total Environment, 2020, 734: 138651.
- [17] 李玉霞, 赵正昱, 谷欣, 等. 运城市区秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. 环境监控与预警, 2023, 15(5): 163 - 170, 186.  
Li YX, Zhao ZY, Gu X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in autumn and winter in Yuncheng city[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2023, 15(5): 163 - 170, 186.
- [18] 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 等. 临沂市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中元素分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2036 - 2043.  
Lu P, Zhao XY, Yin BH, et al. Distribution characteristics and source apportionment of elements bonded with PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Linyi[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2036 - 2043.
- [19] 田应宽, 余琴, 陈中宝, 等. 染锰大鼠脱锰后体内锰分布与变化的实验研究(英文)[J]. 遵义医科大学学报, 2022, 45(4): 417 - 426.  
Tian YK, Yu Q, Chen ZB, et al. Experimental study on the distribution and change of Manganese in Manganese exposure rats after Manganese removal[J]. Journal of Zunyi Medical University, 2022, 45(4): 417 - 426.
- [20] Zhou J, Wu S, Pan Y, et al. Enrichment of heavy metals in fine particles of municipalsolid waste incinerator (MSWI) flyash and associated health risk[J]. Waste Management, 2015, 43: 239 - 246.
- [21] 李宏艳, 赵志新, 何秋生, 等. 山西介休焦化区 PM<sub>2.5</sub> 重金属污染特征、关键毒性组分与来源[J]. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1528 - 1538.  
Li HY, Zhao ZX, He QS, et al. Pollution characteristics, key toxic components and sources of PM<sub>2.5</sub> - bound heavy metals in coking polluted area of Jiexiu, Shanxi[J]. China Environmental Science, 2023, 43(4): 1528 - 1538.
- [22] Zytoon MA, Aburas HM, Abdulsalam MI. Determination of 40K, 232Th and 238U activity concentrations in ambient PM<sub>2.5</sub> aerosols and the associated inhalation effective dose to the public in Jeddah City, Saudi Arabia[J]. Journal of Environment Radioactivity, 2014, 129: 148 - 156.
- [23] 刘岩, 许佳君, 周昊, 等. 北京大气细颗粒物中稀土元素污染特征与来源[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(7): 110 - 116.  
Liu Y, Xu JJ, Zhou H, et al. Pollution characteristics and potential sources of rare earth elements in fine particulate matter of Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(7): 110 - 116.
- [24] Wang SS, Yu RL, Hu GR, et al. Distribution and source of rare earth elements in PM<sub>2.5</sub> in Xiamen, China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry / SETAC, 2017, 36(12): 3217 - 3222.
- [25] Hossini H, Shafie B, Niri AD, et al. A comprehensive review on human health effects of Chromium: insights on induced toxicity[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(47): 70686 - 70705.
- [26] Zhao L, Islam R, Wang YF, et al. Epigenetic regulation in chromium -, nickel - and Cadmium - induced carcinogenesis[J]. Cancers, 2022, 14(23): 5768.
- [27] Chen H, Zhang HL, Wang X, et al. Prenatal Arsenic exposure, Arsenic metabolism and neurocognitive development of 2 - year - old children in low - arsenic areas[J]. Environment International, 2023, 174: 107918.
- [28] Zeng QB, Zhang AH. Assessing potential mechanisms of arsenic - induced skin lesions and cancers: Human and in vitro evidence[J]. Environmental Pollution, 2020, 260: 113919.