

合肥市 2018—2022 年大气 PM_{2.5} 中金属和类金属元素来源解析及健康风险评估

宋晓琼, 李建伟, 李四生, 葛成相, 李昌安

合肥市疾病预防控制中心, 安徽 合肥 230061

摘要:目的 了解合肥市大气 PM_{2.5} 中金属和类金属污染水平, 分析其来源和评估对人群健康影响。方法 利用石英滤膜采集 2018—2022 年合肥市大气 PM_{2.5}, 利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定石英滤膜中铝(Al)、铬(Cr)、锰(Mn)、镍(Ni)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)、锑(Sb)、铊(Tl)、铅(Pb)等 10 种金属和类金属元素含量; 采用相关性分析、聚类分析和主成分分析方法进行污染源解析; 利用健康风险模型评估 4 种致癌元素 As、Cd、Cr、Ni 和 5 种非致癌元素 Pb、Mn、Se、Al、Sb 污染对人群健康的影响。结果 合肥市大气 PM_{2.5} 中 10 种金属和类金属元素含量的年平均浓度为 Al > Pb > Mn > As > Se > Sb > Ni > Cr > Cd > Tl, 各元素平均浓度呈冬春高、夏秋低的季节性变化, 大部分元素年度平均浓度呈逐年下降趋势; 污染源分为包括燃煤、交通和工业生产的混合污染源、以地壳元素 Al 元素为代表的自然源和工业活动污染源三种; 致癌和非致癌元素经呼吸途径对暴露人群的年均超额危险度在 $4.22 \times 10^{-15} \sim 1.67 \times 10^{-7}$ 之间, 较人群可接受的危险度水平(10^{-6})低。结论 合肥市 PM_{2.5} 中被测元素主要来源有混合污染源、工业污染源以及自然源三类, 9 种元素的年均超额危险度远低于可接受的危险度水平(小于 10^{-6}), 均处于可接受水平。

关键词: ICP-MS; 金属和类金属; 大气污染; PM_{2.5}; 来源解析

中图分类号: R122.7 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)12-2164-06

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202403076

Source apportionment and health risk assessment of metal and metalloid elements in PM_{2.5} in Hefei, 2018 – 2022

SONG Xiao-qiong, LI Jian-wei, LI Si-sheng, GE Cheng-xiang, LI Chang-an

Hefei Center for Disease Control and Prevention, Hefei, Anhui 230061, China

Abstract: **Objective** To understand the air pollution level, to analyze the source apportionment of metals and metalloids in PM_{2.5} and to evaluate its health risk in the city of Hefei. **Methods** The concentration of 10 elements (As, Cd, Cr, Ni, Pb, Mn, Se, Al and Sb) in PM_{2.5} samples was collected in Hefei city from January 2018 to December 2022, which was used to analyze the pollution level and source apportionment was determined by inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). Correlation analysis, principal components analysis and cluster analysis were used to analyze the sources of metals and metalloids. A health risk assessment model was used to evaluate the health risk of population of 4 carcinogenic elements (As, Cd, Cr, Ni) and 5 non-carcinogenic elements (Pb, Mn, Se, Al, Sb). **Results** The total average concentration of 10 elements in PM_{2.5} was in an order of Al > Pb > Mn > As > Se > Sb > Ni > Cr > Cd > Tl and presented an obvious seasonal variation characteristic, higher in winter and spring, lower in summer and autumn. The mixed sources of coal burning, traffic and industry, dust and industrial emissions sources were the main sources of metals and metalloids in ambient PM_{2.5} in Hefei. The respiratory pathway exposures of these elements assessed by annual excess risk were between 1.67×10^{-7} and 4.22×10^{-15} , which were below the acceptable risk level of population (10^{-6}). **Conclusion** The main sources of metals in Hefei are mixed sources, soil dust sources and industrial sources. The respiratory pathway exposures of most of the elements assessed by annual excess risk are below the acceptable risk level of population.

Keywords: ICP-MS; Metal and Metalloids; Source apportionment; PM_{2.5}; Source apportionment

大气中存在很多颗粒物, 这些颗粒物有大有小,

当颗粒物的空气动力学直径小于或等于 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 人们称之为 PM_{2.5}。PM_{2.5} 可以经呼吸系统进入人体内循环, 对人类身体健康造成影响^[1]。PM_{2.5} 粒径较小, 比表面积大, 容易附着的金属成分, 对人体危害大, 被引起了大家的广泛关注。目前, 文献已报道了

基金项目: 合肥市卫生健康应用医学研究项目 (Hwk2022zc047)

作者简介: 宋晓琼 (1986—), 女, 硕士, 主管检验技师, 研究方向: 环境等方面检测研究

通信作者: 宋晓琼, E-mail: sxqahu@163.com

我国很多城市的 $PM_{2.5}$ 中金属成分含量和污染来源^[1-3],但对合肥市大气 $PM_{2.5}$ 中金属成分情况鲜有报道。为了了解合肥大气 $PM_{2.5}$ 中金属类金属元素的浓度水平和来源,本文选取合肥市瑶海和滨湖两个区 2018 年 1 月至 2022 年 12 月期间大气 $PM_{2.5}$ 为研究对象,利用石英滤膜每月连续采集七天,共计采集样本 954 份,ICP-MS 测定样品中的铝(Al)、铬(Cr)、锰(Mn)、镍(Ni)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)、锑(Sb)、铊(Tl)、铅(Pb) 10 种金属类金属的元素含量,分析合肥市大气 $PM_{2.5}$ 中金属类金属元素的污染特征,研究合肥市大气 $PM_{2.5}$ 中主要金属和类金属元素的浓度水平,并利用 SPSS 软件中的聚类分析和因子分析初步探讨各种污染物的来源。根据健康风险评估模型和参数计算 9 种致癌和非致癌元素经呼吸途径对成年男性、成年女性和儿童的年均超额危险度,分析这些元素污染对人群健康的影响,为相关污染源的控制、保护人群健康提供理论支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器设备、试剂 仪器设备:电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS (NexION 300D,美国);大流量 $PM_{2.5}$ 采样器 (TH-150F 型,山东桑泽仪器有限公司,中国);超声波清洗器 (KQ5200E 型,昆山市超声仪器有限公司)。

试剂:金属元素混合标准溶液 (CL10-105HGY1/CL5-199MKBY1,PE);超纯硝酸(默克超纯硝酸)。

1.2 样品采集和检测方法 在合肥市滨湖区和瑶海区设立两个采样点,根据《空气污染对人群健康影响监测工作手册》采样方法,两个监测点采样在 2018 年 1 月至 2022 年 12 月期间,每年采集样品 12 个月,每月连续七日,每天采样时间不低于 20 小时,共采集有效滤膜 954 份。将采样后的石英滤膜放入 15 mL 的离心管中,用 10 mL 5% 的硝酸浸泡,然后在 70℃ 水浴中超声浸提 3 小时,冷却至室温后离心,取上层清液待测。最后,用 ICP-MS 测定 10 种金属类金属元素的含量。

1.3 质量控制和保证 采样、储存以及预处理的过程,均严格按照标准和操作规程,以确保数据准确可靠。金属元素含量分析所涉及的实验用品和容器均使用非金属的塑料、陶瓷等材料的用品,尽量避免本底干扰。在 ICP-MS 测试中采用 Ge 和 Rh 作为内标元素进行全程监控,各被测元素标准曲线的线性相关系数均 >0.999。

1.4 来源解析 将每个样品所检测到的 10 种金属和类金属元素浓度导入 SPSS 软件,并分别代入相关

性分析、聚类分析和主成分分析三种模型进行来源解析。

1.5 经呼吸途径暴露的健康风险评估 根据 USEPA 综合危险度信息数据库和国际癌症研究机构的研究成果^[2-6],本文选择致癌物质 As,Cd,Cr 和 Ni 和非致癌物物质 Pb,Se,Mn,Sb 和 Al 作为研究对象进行健康风险评估。首先查阅《中国人群暴露参数手册》^[6] 和相关文献^[4] 中的数据使用公式(1)计算各元素各人群分别对应的致癌物质暴露剂量(LADD)和非致癌物质暴露剂量(ADD),其次把 LADD 或 ADD 代入公式(2)或(3)计算人群年均超额危险度(R),研究各类人群对应相关元素的致癌或非致癌风险。

$$LADD = \frac{C \times IR \times ED}{BW \times AT} \text{ 或 } ADD = \frac{C \times IR \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式(1)中: C 为滤膜中各待测元素近五年的平均浓度,单位为 mg/m^3 ; IR 为呼吸速率,成年男性、女性和儿童分别取 18.0,14.5 和 $8.7m^3/d$; ED 为暴露持续时间,成人取 30×365 天,儿童取 10×365 天; BW 为成年男性、女性和儿童的平均体重,分别取 65.0,56.8 和 36.0 千克; AT 为平均暴露时间,式(1)中各人群的致癌或非致癌 AT 值分别取 70×365 和 30×365 天。

$$R = \frac{1 - \exp(-LADD \times SF)}{L} \quad (2)$$

$$R = \frac{ADD \times 10^{-6}}{RfD \times L} \quad (3)$$

式(2)和(3)中: SF 为致癌斜率因子,单位为 $(kg \cdot d)/mg$; RfD 为经呼吸暴露下的参考剂量,单位为 $mg/(kg \cdot d)$,本文由 USEPA 综合危险度信息数据库^[2-6] 选取 20.07,8.4,56,1.19 分别作为 As,Cd,Cr 和 Ni 4 种致癌元素的 SF 值,选取 4.3×10^{-4} , 3.0×10^{-4} , 1.0×10^{-4} , 4.0×10^{-4} , 4.0×10^{-4} , 分别作为 Pb,Se,Mn,Sb 和 Al 元素 5 种非致癌元素的 RfD 值; L :为人均寿命 70 年。

2 结果与讨论

2.1 合肥市大气 $PM_{2.5}$ 中金属和类金属元素的浓度水平 样品经前处理后,用 ICP-MS 检测 10 种金属和类金属含量,计算各待测元素含量浓度的平均值,年平均浓度,季平均浓度等结果见表 1。从表 1 可以看出,10 种被测元素均被检出,样品中各元素的平均浓度由高到低排序为 $Al > Pb > Mn > As > Se > Sb > Ni > Cr > Cd > Tl$,Al,Pb 和 Mn 的浓度明显高于其他元素,所占测定元素的总质量体积浓度的百分比比较高。从表 1 中 2018—2022 年年平均浓度也能看出从 2018 年到 2022 年主要金属和类金属元素除了 Al,Mn 和 Pb 与地表相关的元素之外的平均浓度总体呈下降趋势,这一方面说明环境在逐渐好转,另一方面

2020—2023 年的新冠疫情对人们日常生活和工业生产活动造成一定影响,空气质量有所好转。以铝为代表的其他地表元素呈先降后升状态可能与 2022 年年

均降水量较前几年少的有关,同时也可能与疫情以后人们的各项生产活动逐步恢复,对地表元素影响更加直接,造成 Al、Mn 和 Pb 三种元素浓度增加。

表 1 合肥市 2018—2022 年大气 PM_{2.5} 中主要金属和类金属含量的平均浓度,年平均浓度和季平均浓度 (ng/m³)

Table 1 Average concentrations, year average concentrations and season average concentrations of metal and metalloid elements in PM_{2.5} of Hefei in 2018 - 2022

元素	2018—2022 年 总平均浓度	2018—2022 年年平均浓度					2018—2022 年季平均浓度			
		2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	春	夏	秋	冬
Al	90.2	74.5	100.0	49.3	49.3	145.1	102.0	52.2	101.0	102.0
Cr	1.5	2.2	1.6	1.1	1.1	1.4	1.6	1.3	1.5	1.9
Mn	22.4	23.8	26.2	15.8	15.8	19.0	24.8	15.9	22.8	29.4
Ni	1.7	1.9	1.1	1.2	1.2	3.1	1.5	1.2	1.5	1.6
As	4.9	6.3	5.1	4.5	4.5	4.1	5.5	3.8	4.2	6.2
Se	3.7	4.9	4.9	2.9	2.9	2.6	3.8	3.1	3.0	5.1
Cd	0.8	1.2	1.0	0.6	0.6	0.6	0.9	0.6	0.6	1.2
Sb	2.7	3.8	3.0	2.2	2.2	2.0	2.8	2.0	2.5	3.8
Tl	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.4
Pb	26.4	51.5	31.8	13.8	13.8	14.8	25.0	18.7	19.7	44.3

金属和类金属元素夏季、秋季、冬季浓度比较见图 1,从图 1 中我们可以更直观的看出,合肥市大气 PM_{2.5} 中各被测元素的含量显现出比较明显的季节性。整体来讲,监测点大部分被测元素的浓度都呈现出从春季到夏季逐渐降低,夏季到秋季逐步增高,到冬季达到最高,国内其他城市如南宁、银川等也呈现出夏秋低冬春高的规律^[7-8],并且有文献报道合肥市 PM_{2.5} 中其他类别污染物含量呈现类似规律^[9-10]。这可能与合肥所处地理位置和呈现的气候现象有关,一般来说合肥冬季和春季降雨减少,大气扩散条件较差,雾霾等重污染天气状况频繁出现,市区空气质量明显恶化,相应的 PM_{2.5} 中各被测元素浓度也会达到最高。而合肥地区夏秋季节空气湿度较大,降雨量增加,湿沉降通过冲刷、雨水等机制使空气质量得到改善,因此全年最低值一般会出现出现在夏秋季节。

2.2 合肥市 2018—2022 年大气 PM_{2.5} 中主要金属和类金属元素的相关性分析 为了探究合肥市区 PM_{2.5} 中主要金属和类金属的元素相关性,我们利用 SPSS 软件分析被测元素的皮尔逊相关系数,从表 2 中可以清楚地看到,除了 Al 与 As 相关性较小,Ni 与部分元素相关性较小,其他元素均具有相关性,具有同源的可能性较大,同时也说明污染物来源复杂,需要进一步分析。

2.3 合肥市 2018—2022 年大气 PM_{2.5} 中主要金属和类金属元素的聚类分析 为了探寻合肥市大气 PM_{2.5} 中金属和类金属的来源,我们继续用 SPSS 软件进行了聚类分析,图 2 中横坐标表示欧氏距离,一般认为,元素在纵坐标距离越短越容易聚成一类,当欧式距离小于 5 时,可分为三类,从 Cd 到 As 元素,7 种元素最先聚集在一起,可能来源于石油燃烧和工业排放^[11-14]。然后与 Pb 和 Mn 元素聚集,可能来自交通污染^[11]。Al 在地壳金属元素中含量排首位是一种典型的地壳元素,在欧式距离图中可以清楚地看出 Al 单独成一组,这也跟相关文献的报道一致^[12],可能来自恶劣天气带来的灰霾,建筑工地施工作业的扬尘,道路上各类汽车移动带起的灰尘,以及人类农业和林业等活动造成的扬尘等。

2.4 有害物的来源分析 经聚类分析得出初步结论后,为了进一步探索合肥市区大气 PM_{2.5} 中主要金属和类金属元素的来源,本文继续用 SPSS 软件中因子分析法分析各元素可能的来源。表 3 为旋转后的成分矩阵,从表 3 可知,结合元素聚类分析结果,影响合肥大气污染的主要成份有三种,主成份 1 中 Tl、Cd、Pb、Se、As 和 Sb 元素所占载荷较大,方差贡献率达

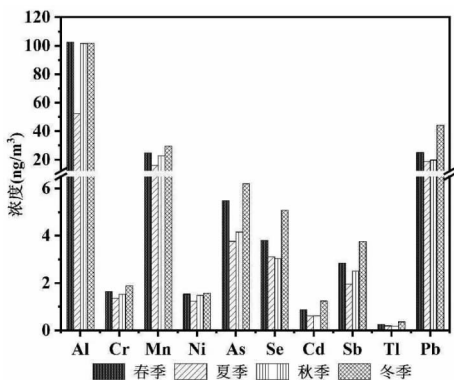


图 1 合肥市 2018—2022 年主要金属和类金属元素元素夏季、秋季、冬季浓度比较 (ng/m³)

Fig. 1 Season average concentrations of metal and metalloid elements in PM_{2.5} of Hefei in 2018—2022

表 2 合肥市 2018—2022 年 PM_{2.5} 中主要金属和类金属元素相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficients of metal and metalloid elements in PM_{2.5} of Hefei in 2018 - 2022

	Al	Cr	Mn	Ni	As	Se	Cd	Sb	Tl	Pb
Al	1.000									
Cr	0.173 ^a	1.000								
Mn	0.394 ^a	0.461 ^a	1.000							
Ni	0.086 ^a	0.196 ^a	0.055	1.000						
As	0.052	0.294 ^a	0.316 ^a	-0.003	1.000					
Se	0.106 ^a	0.364 ^a	0.577 ^a	-0.018	0.648 ^a	1.000				
Cd	0.073 ^b	0.280 ^a	0.412 ^a	0.003	0.722 ^a	0.744 ^a	1.000			
Sb	0.104 ^a	0.260 ^a	0.436 ^a	0.000	0.381 ^a	0.537 ^a	0.492 ^a	1.000		
Tl	0.096 ^a	0.286 ^a	0.370 ^a	0.030	0.700 ^a	0.739 ^a	0.749 ^a	0.438 ^a	1.000	
Pb	0.098 ^a	0.291 ^a	0.371 ^a	0.025	0.612 ^a	0.704 ^a	0.749 ^a	0.508 ^a	0.867 ^a	1.000

注: a 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。b 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

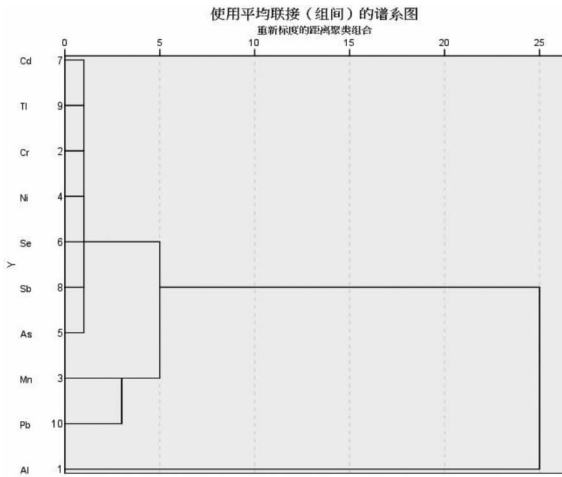


图 2 合肥市 2018—2022 年大气 PM_{2.5} 中主要金属和类金属元素聚类分析图

Fig. 2 Tree diagram of cluster analysis of metal and metalloid elements in PM_{2.5} of Hefei in 2018—2022

48.2%, 其中 Cd 可能来源于燃煤、燃油和煤矿^[15], Se 可能来源于煤炭燃烧和金属冶炼, As 和 Sb 也可能由于煤炭燃烧, As 也有文献报道来源于农药和杀虫剂, 其中较高的 Pb 有文献报道来源于民用燃煤和汽车尾气^[16], 因此成份 1 可认为是包含了燃烧、工业和交通的混合污染源^[16]。成份 2 主要由 Al、和 Mn 组成, 方差贡献率达 13.0%, Al 作为地壳中含量最高的金属元素, 广泛存在于地球表面, Mn 也经常被认为是来源于地表^[15], 可能来源于道路和建筑扬尘属于自然源。成份 3 由 Ni、Cr 组成, Cr 经常被认为来源于工业冶炼和石油燃烧等工业活动, 可认为是工业源^[15]。

2.5 各元素污染人群健康风险评价 为了评价各元素可能对人群健康造成的影响, 本文根据健康风险评估模型和参数计算了 9 种致癌和非致癌元素通过呼吸途径对成年男性、成年女性和儿童的年均超额危险度, 如表 4 所示, 表 4 中使用公式和数据结果均来自前文 1.4 中所述。从表 4 可以看出, 9 种被测元素中

表 3 合肥市 2018—2022 年大气 PM_{2.5} 中金属类金属元素因子分析结果

Table 3 Principal component analysis results of metal and metalloid elements in PM_{2.5} of Hefei in 2018 - 2022

元素	成分		
	1	2	3
Tl	0.899		
Cd	0.884		
Pb	0.880		
Se	0.834		
As	0.818		
Sb	0.561		
Al		0.825	
Mn		0.752	
Ni			0.921
Cr			0.533
方差贡献/%	48.2	13.000	10.000
指示来源	混合污染源	地壳源	工业源

年均超额危险度水平均在 $4.22 \times 10^{-14} \sim 1.67 \times 10^{-7}$ 之间, 其中危险度水平最高的 As 元素 (1.67×10^{-7}), 依然较人群可接受的危险度 (10^{-6}) 低。经排序后可以看见, 其中各元素对各人群的超额危险度由高到低排序依次为 As > Cr > Cd > Ni > Al > Mn > Pb > Sb > Se, 前四种致癌元素对人群的健康风险比非致癌元素高。另外, 成年男性的健康风险比成年女性和儿童高, 这与很多文献报道相符^[17-18]。虽然文中计算出的 9 种元素的年均超额危险度均处于可接受水平, 但由于文中仅使用室外监测站点获得的大气污染物浓度进行暴露评估, 没有考虑室内空气污染物对暴露的贡献, 以及室内外浓度及成分的差异, 可能低估人群的实际暴露水平, 增大暴露评估的不确定性。

3 结论

从本文研究结果可以看出合肥市区大气 PM_{2.5} 中颗粒物的金属类金属成分复杂, 样品中 10 种待测元素均被检出, 其平均浓度由高到低依次排序为 Al >

表 4 合肥市 PM_{2.5} 中 9 种金属类金属元素的人群健康风险评估值

Table 4 Evaluation results on human health risk of 9 metal and metalloid elements in PM_{2.5} of Hefei

元素	成年男性	成年女性	儿童
Sb	2.71×10^{-11}	2.49×10^{-11}	7.87×10^{-12}
Al	8.93×10^{-10}	8.23×10^{-10}	2.60×10^{-10}
Pb	2.43×10^{-10}	2.24×10^{-10}	7.06×10^{-11}
Mn	2.96×10^{-10}	2.73×10^{-10}	8.60×10^{-11}
Se	1.45×10^{-14}	1.34×10^{-14}	4.22×10^{-15}
As	1.67×10^{-7}	1.54×10^{-7}	4.86×10^{-8}
Cd	1.17×10^{-8}	1.08×10^{-8}	3.41×10^{-9}
Cr	1.46×10^{-7}	1.35×10^{-7}	4.25×10^{-8}
Ni	3.48×10^{-9}	3.20×10^{-9}	1.01×10^{-9}

Pb > Mn > As > Se > Sb > Ni > Cr > Cd > Tl, 其中 Al、Pb 和 Mn 三种元素所占比重较大。

经 SPSS 软件分析数据后得出, 大部分元素具有相关性, 说明这些元素可能具有同源性。经聚类和因子分析进一步探讨污染源, 可将合肥市区大气污染物来源分为包含了燃烧、工业和交通的混合污染源、包含了建筑和道路扬尘的自然源和包含工业排放和石油燃烧的工业源。

经健康风险评估模型和参数计算后可知, 合肥市区 PM_{2.5} 中 9 种致癌和非致癌元素的年均超额危险度均比人群可接受的危险度水平低, 说明经过这几年相关部门的综合治理, 合肥市区大气污染状况在得到有效缓解。

综上所述, 合肥市区大气 PM_{2.5} 中 10 种被测元素内 Al、Pb 及 Mn 元素的含量较高, 且被测元素具有相关性, 这些大气污染元素可能主要来源于工业和交通运输污染以及建筑和扬尘污染。被检测的 9 种元素的年均超额危险度比人群可接受的危险度水平低, 这些结果提醒我们需要在工业生产污染和道路交通污染, 以及大气扬尘等方面进行多方位综合治理, 进一步提高合肥空气质量。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] 杨小波, 杨财平, 李琴娜, 等. 2017 - 2021 年宜昌市两区大气 PM_{2.5} 中 12 种金属和类金属监测分析[J]. 职业, 2023, 39(4): 515 - 518.
Yang XB, Yang CP, Li QN, et al. Monitoring and analysis of 12 metals and metalloids in atmospheric PM_{2.5} in two districts of Yichang City from 2017 - 2021 [J]. Occupation and Health, 2023, 39(4): 515 - 518.

[2] 谢志磊, 谢非, 苏益娴, 等. 内蒙古自治区 PM_{2.5} 中金属元素的地球化学特征及其健康风险[J/OL]. 环境化学: 1 - 17 [2024 - 05 - 11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20240218.0859.002.html>.
Xie ZL, Xie F, Su YX, et al. Geochemical characteristics and

health risks of metal elements in PM_{2.5} from Inner Mongolia Autonomous Region [J/OL]. Environmental Chemistry: 1 - 17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20240218.0859.002.html>.

- [3] 陈宇, 施泉清, 宋寅生, 等. 镇江市大气 PM_{2.5} 中金属和类金属元素的健康风险评估[J]. 职业与健康, 2023, 39(24): 3392 - 3396.
Chen Y, Shi QQ, Song YS, et al. Health risk assessment of metals and metalloids in PM_{2.5} of Zhenjiang City [J]. Occupation and Health, 2023, 39(24): 3392 - 3396.
- [4] 吉报子曲, 吉秀亮. 2018—2020 年西宁市城区 PM_{2.5} 中金属污染特征及健康风险评估[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(9): 694 - 699.
Ji BZQ, Ji XL. Pollution characteristics of metals in PM_{2.5} and their health risk assessment in Xining, China, 2018—2020 [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(9): 694 - 699.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Regional screening levels (RSLs) - Generic tables [EB/OL]. [2024 - 05 - 11]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>.
- [6] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
Zhao XG, Duan XL. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (adults) [M]. Beijing: China Environment Press, 2014.
- [7] 秦贱荣, 张新英, 黄炳丽, 等. 南宁市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及其健康风险评估[J]. 环, 2020, 43(7): 35 - 44.
Qin JR, Zhang XY, Huang JL, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metal in atmospheric PM_{2.5} in Nanning City [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7): 35 - 44.
- [8] 齐爱, 张亚娟, 丁亚磊, 等. 银川市城区大气 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(7): 591 - 594.
Qi A, Zhang YJ, Ding YL, et al. Characteristics and source of metal elements in ambient PM_{2.5} in urban area of Yinchuan [J]. Journal of Environmental and Health, 2017, 34(7): 591 - 594.
- [9] 李四生, 单晓梅, 常君瑞, 等. 合肥市大气颗粒物 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征及健康风险初步评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(11): 1954 - 1958.
Li SS, Shan XM, Chang JR, et al. Pollution characteristics and health - risk initial assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons of PM_{2.5}, Hefei [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(11): 1954 - 1958.
- [10] 葛成相, 沈彤, 张霞, 等. 合肥市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃分布特征、源解析及致癌风险评价[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(3): 204 - 212.
Ge CX, Shen T, Zhang X, et al. Source apportionment and carcinogenic risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Hefei [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(3): 204 - 212.
- [11] 刘杰, 高敏, 梁俊宁, 等. 陕西省某工业园区春季大气降尘重金属污染特征及评价[J]. 环境科学研究, 2019, 32(7): 1195 - 1203.

(下转第 2187 页)

- disrupted by light at night and mistimed food intake alter hormonal rhythms and metabolism [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(4): 3392.
- [8] Kant AK. Eating patterns of US adults: Meals, snacks, and time of eating [J]. *Physiology & Behavior*, 2018, 193(Pt B): 270–278.
- [9] Bertéus forslund H, Lindroos AK, Sjöström L, et al. Meal patterns and obesity in Swedish women – a simple instrument describing usual meal types, frequency and temporal distribution [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2002, 56(8): 740–747.
- [10] Allison KC, Lundgren JD, O’rreardon JP, et al. The night eating questionnaire (NEQ): psychometric properties of a measure of severity of the night eating syndrome [J]. *Eating Behaviors*, 2008, 9(1): 62–72.
- [11] Gill S, Panda S. Smartphone App reveals erratic diurnal eating patterns in humans that can be modulated for health benefits [J]. *Cell Metabolism*, 2015, 22(5): 789–798.
- [12] Zhang S, Ang MHJ, Xiao WD, et al. Detection of activities by wireless sensors for daily life surveillance: eating and drinking [J]. *Sensors*, 2009, 9(3): 1499–1517.
- [13] Veronda AC, Allison KC, Crosby RD, et al. Development, validation and reliability of the Chrononutrition Profile – Questionnaire [J]. *Chronobiology International*, 2020, 37(3): 375–394.
- [14] Lira NDCC, Dearatúo SM, De medeiros ACQ, et al. Translation, adaptation and validation of the Chrononutrition Profile – Questionnaire (CP – Q) in Brazilian Portuguese [J]. *Chronobiology International*, 2023, 40(4): 473–482.
- [15] 林艳伟, 王婷仙, 倪进东. 老年人社会支持评价量表的汉化及信效度检验 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2022, 26(7): 834–838, 861.
- Lin YW, Wang TX, Ni JD. Reliability and validity of Chinese version of the social support appraisals scale for older people [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2022, 26(7): 834–838, 861.
- [16] 刘贤臣, 唐茂芹, 胡蕾, 等. 匹兹堡睡眠质量指数的信度和效度研究 [J]. *中华精神科杂志*, 1996, 29(2): 103–107.
- Liu XC, Tang MQ, Hu L, et al. Reliability and validity of the Pittsburgh quality index [J]. *Chinese Journal of Psychiatry*, 1996, 29(2): 103–107.
- [17] Borisenkov MF, Tserne T, Bakutova L, et al. Afternoon school shift is associated with increased risk of overweight/obesity in 11–14-year-old females with early and intermediate chronotype [J]. *Pediatric Obesity*, 2023, 18(8): e13039.
- [18] Teixeira GP, Da cunha NB, Azeredo CM, et al. Eating time variation from weekdays to weekends and its association with dietary intake and BMI in different chronotypes: findings from National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2017–2018 [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2024, 131(7): 1281–1288.
- [19] Yang Y, Li SX, Zhang Y, et al. Chronotype is associated with eating behaviors, physical activity and overweight in school-aged children [J]. *Nutrition Journal*, 2023, 22(1): 50.
- [20] 谢文华. Spearman 相关系数的变量筛选方法 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- Xie WH. Variable screening based on spearman correlation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [21] 余红梅, 罗艳虹, 萨建, 等. 组内相关系数及其软件实现 [J]. *中国卫生统计*, 2011, 28(5): 497–500.
- Yu HM, Luo YH, Sa J, et al. Intraclass correlation coefficient and software procedures [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2011, 28(5): 497–500.
- [22] Arab A, Karimi E, Garaulet M, et al. Social jetlag and obesity: A systematic review and meta-analysis [J]. *Obesity Reviews*, 2024, 25(3): e13664.
- [23] Kaur S, Ng CM, Tang SY, et al. Weight status of working adults: The effects of eating misalignment, chronotype, and eating jetlag during mandatory confinement [J]. *Chronobiology International*, 2023, 40(4): 406–415.
- [24] Bazzani A, Marantonio S, Andreozzi G, et al. Late chronotypes, late mealtimes. Chrononutrition and sleep habits during the COVID-19 lockdown in Italy [J]. *Appetite*, 2022, 172: 105951.

收稿日期: 2024-01-16

(上接第 2168 页)

- Liu J, Gao M, Liang JN, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in spring Atmospheric Dust of an industrial park in Shaanxi province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(7): 1195–1203.
- [12] 刘晓涛, 聂立刚, 甄国新, 等. 北京市某区大气 PM_{2.5} 中金属元素质量浓度及其来源 [J]. *职业与健康*, 2019, 35(10): 1389–1392.
- Liu XT, Nie LG, Zhen GX, et al. Mass concentration and source analysis of metal elements in atmospheric PM_{2.5} in a district of Beijing [J]. *Occupation and Health*, 2019, 35(10): 1389–1392.
- [13] Chen H, Lu XW, Li LY, et al. Metal contamination in campus dust of Xi’an, China: a study based on multivariate statistics and spatial distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 484: 27–35.
- [14] 熊秋林, 赵文吉, 束同同, 等. 北京降尘重金属污染水平及其空间变异特征 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 1743–1750.
- Xiong QL, Zhao WJ, Shu TT, et al. Heavy metal pollution levels and spatial variation characteristics of dust deposition in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(12): 1743–1750.
- [15] 张逸冰, 梁轶群, 张远, 等. 2017—2019 年峰峰矿区 PM_{2.5} 中重金属来源解析及生态风险评价 [J]. *环境工程*, 2023, 41(8): 242–250.
- Zhang YB, Liang YQ, Zhang Y, et al. Source apportionment and ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in the Fengfeng mining area in 2017–2019 [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(8): 242–250.
- [16] 吉秀亮, 杨君胜, 谢晓媛, 等. 西宁市城区冬、春季大气 PM_{2.5} 中金属和类金属元素浓度差异及来源分析 [J]. *医学动物防制*, 2023, 39(9): 832–836.
- Ji XL, Yang JS, Xie XY, et al. Analysis of different in concentrations and sources of metals and metalloids in atmospheric PM_{2.5} in water and spring in urban areas of Xining city [J]. *Journal of Medical Pest Control*, 2023, 39(9): 832–836.
- [17] 刘英莉, 孟春燕, 钱庆增, 等. 某市秋冬季大气 PM_{2.5} 中金属元素的健康风险评价 [J]. *环*, 2018, 35(7): 602–606.
- Liu YL, Meng CY, Qian QZ, et al. Health risk assessment of metal elements in autumn and winter atmospheric PM_{2.5} in a city [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2018, 35(7): 602–606.
- [18] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气 PM_{2.5} 中有毒金属元素的环境风险评价 [J]. *地*, 2018, 46(5): 456–462.
- Zhang YF, Yu RL, Hu GR, et al. Environmental risk assessment of toxic metal elements in PM_{2.5} of Quanzhou city [J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(5): 456–462.

收稿日期: 2024-03-05