

淮安市 2020—2022 年 PM_{2.5} 中重金属污染的来源解析和健康风险评估

骆善彩, 张雯, 陈国才, 蒋蔓, 付瑞, 葛恒康

江苏省淮安市疾病预防控制中心营养与食品卫生科, 江苏 淮安 223001

摘要:目的 评估淮安市环境空气 PM_{2.5} 中重金属浓度水平、来源解析及其吸入途径的健康风险。方法 于 2020—2022 年在淮安市某监测点每月定期开展环境空气 PM_{2.5} 样品采集, 通过 ICP-MS 法测定 PM_{2.5} 中十种重金属含量, 采用富集因子法与主成分分析法, 进行重金属溯源性分析, 并按照国家“大气污染人群健康风险评估技术规范”方法, 评估重金属对人群吸入途径的健康风险。结果 2020—2022 年淮安市环境空气 PM_{2.5} 中重金属 Al、Mn、Pb、Cr、Ni、As、Se、Sb、Cd、Tl 的年均值分别为 131.11、28.52、20.61、8.09、5.95、4.11、2.62、1.84、0.76 和 0.18 ng/m³, 以上金属冬春季浓度水平均高于夏春季($Z=2.390 \sim 7.182$, 均 $P < 0.05$); 富集因子分析结果显示, Se、Cd、Sb、As、Pb、Tl 六种元素 EF > 100; 主成分分析显示, 淮安市 PM_{2.5} 中重金属主要来源于交通、工业生产、煤炭燃烧和自然排放的多种复合型污染; 对于非致癌效应, Sb、Al、As、Cd、Cr、Mn、Ni、Se 八种元素低于筛选浓度, 非致癌效应风险(HQ) < 1; 致癌效应, As、Cd、Cr 的超额致癌风险分别为 1.77×10^{-5} 、 1.37×10^{-6} 和 9.70×10^{-5} , 具有潜在的致癌风险。结论 淮安市环境空气 PM_{2.5} 中重金属来源为多重复合型污染, Sb、Al、As、Cd、Cr、Mn、Ni、Se 八种重金属非致癌效应在可接受水平, 但 As、Cd、Cr 三种金属元素具有潜在的致癌风险。

关键词: PM_{2.5}; 重金属; 污染特征; 来源解析; 健康风险评估

中图分类号: X171.5; X508 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)11-1962-06

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202403168

Source analysis and health risk assessment of heavy metal pollution in PM_{2.5} in Huai'an city from 2020 to 2022

LUO Shan-cai, ZHANG Wen, CHEN Guo-cai, JIANG Man, FU Rui, GE Heng-kang

Department of Nutrition and Food Hygiene, Center for Disease Control and Prevention, Huai'an, Jiangsu 223001, China

Abstract: Objective To evaluate the health risk of heavy metal concentration, source analysis and inhalation pathway of PM_{2.5} in ambient air of Huai'an city. **Methods** The ambient air PM_{2.5} samples were collected regularly at a monitoring site in Huai'an city from 2020 to 2022. The contents of 10 heavy metals in PM_{2.5} were determined by ICP-MS, and the traceability analysis of heavy metals was carried out by enrichment factor method and principal component analysis. According to the national "Technical Standard for Assessing Population Health Risk", the health risk of heavy metals to the population was evaluated. **Results** The annual average values of Al, Mn, Pb, Cr, Ni, As, Se, Sb, Cd and Tl in PM_{2.5} of Huai'an city from 2020 to 2022 were 131.11, 28.52, 20.61, 8.09, 5.95, 4.11, 2.62, 1.84, 0.76, and 0.18 ng/m³, respectively. The concentration levels of these metals in winter and spring were higher than those in summer and spring ($Z=2.390-7.182$, $P < 0.05$). The results of enrichment factor analysis showed that the elements EF of Se, Cd, Sb, As, Pb, and Tl 6 were more than 100. The principal component analysis showed that the heavy metals in PM_{2.5} in Huai'an city mainly came from mixed pollution of traffic, industrial production, coal combustion, and natural emission. For non-carcinogenic effects, Sb, Al, As, Cd, Cr, Mn, Ni, and Se 8 were lower than the screening concentration, and the risk of non-carcinogenic effects (HQ) was less than 1. For carcinogenic effects, the excess carcinogenic risks of As, Cd, and Cr were 1.77×10^{-5} , 1.37×10^{-6} , and 9.70×10^{-5} , respectively. **Conclusion** The sources of heavy metals in PM_{2.5} in Huai'an city are multiple compound pollution. The non-carcinogenic effects of Sb, Al, As, Cd, Cr, Mn, Ni, and Se 8 are acceptable, but As, Cd and Cr have potential carcinogenic risk.

Keywords: PM_{2.5}; Heavy metals; Pollution characteristics; Source analysis; Health risk assessment

基金项目: 江苏省卫健委预防医学课题(Ym2023023); 淮安市自然科学研究计划(联合专项)卫生健康类科研项目(HABL202249)

作者简介: 骆善彩(1989—), 男, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 环境流行病学

通信作者: 张雯, E-mail: 1031027000@qq.com

大量流行病学研究发现空气污染与多种健康结局密切相关,并且 PM_{2.5} 对人类健康影响最强^[1-2],已成为严重影响人类健康的公共卫生问题。PM_{2.5} 粒径较小,比表面积大,能吸附多环芳烃、无机离子、重金属等有害物质且在空气中悬浮时间长,极易成为其他有害物质的载体与反应体^[3]。相关研究发现随 PM_{2.5} 进入人体的砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、锰(Mn)、镍(Ni)、锑(Sb)、硒(Se)等重金属污染物具有高毒性、不可自然降解性和生物富集性,可危害人体呼吸系统、循环系统和消化系统等功^[4],甚至对人体具有致畸、致癌、致突变的毒性作用^[5]。

淮安市连续多年环保公报显示,大气细颗粒物(PM_{2.5})年平均浓度均超过国家环境空气质量 2 级标准(PM_{2.5}=35 μg/m³),为当地大气污染首要特征污染物,但尚缺乏 PM_{2.5} 中重金属元素对居民健康效应研究,本研究通过分析 2020—2022 年淮安市大气 PM_{2.5} 中重金属浓度水平和污染来源,并进行居民健康风险评估,为制定当地 PM_{2.5} 综合污染防控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置及采样时间 选取淮安市某建筑楼顶为项目采样点,采样高度约为 18 m,该采样点四周均无其他建筑物遮挡,也无其他重工业污染源。于每月 10—16 日和重污染天气(空气质量指数 AQI>200)时连续在监测点进行 PM_{2.5} 样品采集,每日采样 20 h 以上,2020—2022 年共采集空气样品 252 份。

1.2 样品处理与分析 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 PM_{2.5} 中十种金属元素 Sb、Al、As、Cd、Cr、Pb、Mn、Ni、Se、Tl 的含量进行分析。

1.3 富集因子法(enrichment factor, EF)^[6] 研究环境空气 PM_{2.5} 中重金属的富集程度,分析来源于人为活动还是来源于自然环境,以及其污染的贡献水平。

$$EF = (X_i/X_r)_{\text{颗粒}} / (X_i/X_r)_{\text{背景}} \quad \text{公式(1)}$$

X_r: 为参考元素含量或土壤背景值,本研究以 Al 为参比元素,因为 Al 在环境中分布均匀,变异系数低,性质稳定^[7]。X_i 为 PM_{2.5} 中重金属元素的含量或土壤背景值。(X_i/X_r)_{颗粒}: PM_{2.5} 中重金属元素的相对含量;(X_i/X_r)_{背景}: 地壳中相应元素相对含量。依据 Sutherland 富集因子值分级^[8],EF 值>10,元素来源主要为人为活动影响;EF 值≤10,元素来源于土壤等自然环境影响。

1.4 主成分分析 通过“降维”的原理从多个变量中筛选出具有代表性的主要因子,因子能够最大程度解释所有变量代表的信息^[9]。本研究对淮安市 PM_{2.5} 中十种金属元素进行主成分分析,基于方差计算,降维提

取特征值大于 1 的主因子进行分析,用于评价 PM_{2.5} 中重金属来源解析。

1.5 重金属风险评估 参照国家大气污染人群健康风险评估技术规(WS/T 666—2019)方法开展健康风险评估,包括致癌效应与非致癌效应。根据美国环境保护局 IRIS 网站查询各重金属经吸入途径体的毒理学参数推荐值^[10],发现五种元素(As、Cd、Cr、Pb、Ni)具有致癌性参数,八种元素(Sb、Al、As、Cd、Cr、Mn、Ni、Se)具有非致癌性参数。见表 1。

1.5.1 筛选浓度计算

$$\text{致癌效应: SCA} = (\text{AT} \times \text{Target Risk}) / (\text{IUR} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}) \quad \text{公式(2)}$$

$$\text{非致癌效应: SCA} = (\text{AT} \times \text{Target Risk HQ} \times \text{Rfc} \times 1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3) / (\text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}) \quad \text{公式(3)}$$

SCA 为筛选浓度(μg/m³);AT 为平均时间,等于预期寿命(y)×365(d/y)×24(h/d);Target Risk 为致癌效应基准风险,为 1.0×10⁻⁶;Target Risk HQ 为非致癌效应基准风险,HQ=1.0;IUR 为吸入单位风险(μg/m³)⁻¹,Rfc 为参考浓度(mg/m³);ET、EF、ED 分别为暴露时间(h/d)、暴露频率(d/y)和暴露持续时间(y),本研究假设居民持续暴露在空气环境中,参考《中国人群暴露参数手册(成人卷)》^[11],ET、EF、ED 取值分别为 24(h)、365(d/y)和预期寿命 74.8(y)带入公式计算。通过筛选浓度计算致癌效应:Pb 与 Ni 的暴露浓度低于筛选浓度,非致癌效应,八种元素均低于筛选浓度,以上情况终止下一步的健康风险评估,最终致癌效应中的 As、Cd、Cr 三种元素的暴露浓度高于筛选浓度,将进一步进行致癌性效应的健康风险评估。见表 1。

1.5.2 超额致癌风险评估

$$EC = (\text{CA} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}) / \text{AT} \quad \text{公式(4)}$$

$$\text{Excess Cancer Risk} = \text{IUR} \times \text{EC} \quad \text{公式(5)}$$

EC 为暴露浓度(μg/m³),CA 为 PM_{2.5} 中重金属在空气中浓度(μg/m³),此处以年均值带入计算;Excess Cancer Risk 为超额致癌发病风险,IUR、ET、EF、ED、AT 的意义与取值同公式(2)。Excess Cancer Risk:<1.0×10⁻⁶,认为该污染物引起癌症风险较低;1.0×10⁻⁶~1.0×10⁻⁴,认为该污染物具有潜在的致癌风险;>1.0×10⁻⁴认为该污染物引起癌症风险较高^[9]。

1.6 统计学分析 运用 SPSS 25.0 对数据进行统计学分析,PM_{2.5} 中重金属分布特征采用(均数±标准差),中位数及四分位数[M(P₂₅,P₇₅)]进行统计学描述,由于重金属分布不服从正态分布,不同季节间比较采用非参数秩和检验(Mann-Whitney U),检验水准 α=0.05。

2 结果

2.1 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属浓度分析 2020—2022 年,淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属 Al、Mn、Pb、Cr、Ni、As、Se、Sb、Cd、Tl 的年均值分别为 131.11、28.52、20.61、8.09、5.95、4.11、2.62、1.84、0.76、

和 0.18 ng/m³;As、Cd、Pb 年均值均低于《环境空气质量标准(GB3095—2012)》中给出的参考浓度限值^[12]。冬春季十种元素浓度明显高于夏春季,并且比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。见表 2。

表 1 各重金属经吸入途径体的剂量-反应参数、筛选浓度及是否进行下一步健康风险评估

Table 1 Dose-response parameters, screening concentrations and whether to conduct further health risk assessment for each heavy metal through inhalation pathway

元素	毒理学参数推荐值		筛选浓度(SCA)		暴露年均浓度 (ng/m ³)	是否继续健康风险评估
	致癌参数 IUR (μg/m ³) ⁻¹	非致癌参数 Rfc (mg/m ³)	致癌效应筛选浓度 (ng/m ³)	非致癌效应筛选浓度 (ng/m ³)		
Sb	—	3.0 × 10 ⁻⁴	—	300	1.84	否
Al	—	5.0 × 10 ⁻³	—	5 000	131.11	否
As	4.3 × 10 ⁻³	1.5 × 10 ⁻⁵	0.23	15	4.11	是
Cd	1.8 × 10 ⁻³	1.0 × 10 ⁻⁵	0.56	10	0.76	是
Cr	1.2 × 10 ⁻²	1.0 × 10 ⁻⁴	0.08	100	8.09	是
Pb	1.2 × 10 ⁻⁵	—	83.33	—	20.61	否
Mn	—	5.0 × 10 ⁻⁵	—	50	28.52	否
Ni	2.6 × 10 ⁻⁴	9.0 × 10 ⁻⁵	3.84	90	5.95	否
Se	—	2.0 × 10 ⁻²	—	20 000	2.62	否
Tl	—	—	—	—	0.18	否

注:可参考的毒性资料对应的 CAS 名称为 As-无机 As,Cr-六价 Cr,Pb-磷酸 Pb,Ni-Ni 的可溶性盐,Tl-Tl(可溶性盐),其他元素与元素名相同;“—”代表未查询到该金属元素毒理学参数推荐值或无法计算筛选浓度。

表 2 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属浓度分析(ng/m³)

Table 2 Analysis of heavy metal concentration in ambient air PM_{2.5} in Huai' an city (ng/m³)

元素	冬春季(n=126)		夏秋季(n=126)		Z 值	P 值	全年(n=252)		国家标准 ^[12]
	$\bar{x} \pm s$	$M(P_{25}, P_{75})$	$\bar{x} \pm s$	$M(P_{25}, P_{75})$			$\bar{x} \pm s$	$M(P_{25}, P_{75})$	
Sb	2.28 ± 1.57	1.98 (1.23, 2.87)	1.39 ± 0.88	1.14 (0.80, 1.67)	6.059	<0.001	1.84 ± 1.34	1.44 (0.97, 2.35)	—
Al	157.12 ± 112.72	125.50 (91.53, 184.00)	105.10 ± 95.48	90.75 (51.48, 131.25)	5.246	<0.001	131.11 ± 107.46	107.50 (71.13, 156.00)	—
As	4.63 ± 2.76	4.00 (2.80, 5.82)	3.58 ± 2.68	3.20 (1.93, 4.76)	3.749	<0.001	4.11 ± 2.76	3.52 (2.32, 5.23)	6
Cd	0.93 ± 0.51	0.82 (0.57, 1.17)	0.59 ± 0.56	0.43 (0.30, 0.65)	7.181	<0.001	0.76 ± 0.56	0.61 (0.38, 0.98)	5
Cr	10.43 ± 13.99	4.19 (2.34, 13.23)	5.74 ± 6.79	3.08 (1.77, 7.18)	2.680	0.007	8.09 ± 11.22	3.78 (2.10, 8.02)	—
Pb	26.02 ± 14.49	21.65 (16.00, 34.10)	15.21 ± 7.95	13.05 (9.57, 19.60)	7.206	<0.001	20.61 ± 12.86	17.40 (11.83, 24.88)	500
Mn	34.29 ± 18.39	31.15 (19.33, 46.93)	22.74 ± 16.74	17.35 (11.15, 28.68)	5.707	<0.001	28.52 ± 18.48	23.70 (14.70, 38.63)	—
Ni	7.40 ± 8.29	4.47 (2.44, 7.62)	4.50 ± 3.59	3.23 (2.19, 5.91)	2.390	0.017	5.95 ± 6.54	3.83 (2.26, 6.75)	—
Se	3.00 ± 2.09	2.40 (1.54, 4.12)	2.24 ± 1.44	1.97 (1.11, 3.07)	2.885	0.004	2.62 ± 1.83	2.17 (1.31, 3.53)	—
Tl	0.22 ± 0.15	0.18 (0.13, 0.28)	0.14 ± 0.11	0.12 (0.07, 0.19)	5.566	<0.001	0.18 ± 0.14	0.14 (0.09, 0.24)	—

注:As、Cd、Pb 在国家环境空气质量标准(GB3095—2012)具有年均值标准;“—”代表在国家标准中暂无相关限值标准。

2.2 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属富集因子 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中十种重金属元素年均总和为 203.78 ng/m³,占 PM_{2.5} 质量浓度构成比为 0.39%,十种

金属元素年均浓度由高到低为 Al、Mn、Pb、Cr、Ni、As、Se、Sb、Cd、Tl,占金属总含量分别为 64.34%、13.99%、10.12%、3.97%、2.92%、2.02%、1.29%、0.90%、0.37%和

0.09%。富集因子结果显示,九种元素 EF 值均>10,说明以上元素均受人类活动污染影响,其中 Se、Cd、Sb、As、Pb、Tl 六种元素 EF>100,说明严重富集,受人为活动影响更重。见表 3。

表 3 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属富集因子

Table 3 Heavy metal enrichment factors in ambient air PM_{2.5} in

Huai'an city

元素	年均含量(ng/m ³)	地壳丰度(μg/g)	EF 值
Sb	1.84	0.60	1 941.37
Al	131.11	83 000.00	1.00
As	4.11	2.20	1 182.66
Cd	0.76	0.20	2 405.61
Cr	8.09	110.00	46.56
Pb	20.61	12.00	1 087.27
Mn	28.52	1 300.00	13.89
Ni	5.95	89.00	42.32
Se	2.62	0.08	20 732.59
Tl	0.18	0.40	284.88

2.3 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属主成分分析
本研究将十种金属元素纳入因子分析,显示 KMO=0.804, Bartlett 球形度检验($\chi^2=2 116.457, P<0.001$),适合做因子分析,显示结果特征根>1 有 3 个主因子,说明 PM_{2.5} 中重金属元素主要来源 3 种类型,主因子 1 方差贡献率为 49.190%,载荷绝对值较高的元素为 Pb(0.878)、Se(0.860)、Tl(0.812)、Cd(0.782)、Sb(0.769)和 As(0.764);主因子 2 方差贡献率为 20.404%,载荷绝对值较高的元素为 Cr(0.987)和 Ni(0.983);主因子 3 方差贡献率为 10.098%,载荷绝对值较高的元素为 Al(0.933)。见表 4。

表 4 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中重金属主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis of heavy metals in ambient

air PM_{2.5} in Huai'an city

元素	主因子 1	主因子 2	主因子 3
Pb	0.878	-0.060	0.356
Se	0.860	-0.023	0.131
Tl	0.812	-0.145	0.298
Cd	0.782	0.241	0.070
Sb	0.769	-0.044	0.262
As	0.764	0.127	-0.033
Mn	0.586	0.062	0.653
Cr	0.038	0.987	0.000
Ni	0.018	0.983	0.030
Al	0.128	0.013	0.933
特征值	4.919	2.040	1.010
方差贡献(%)	49.190	20.404	10.098
累积方差贡献率(%)	49.190	69.593	79.691

2.4 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中 As、Cd、Cr 健康风险评估
健康风险评估结果显示,As、Cd、Cr 的全年超额致癌风险分别为 1.77×10^{-5} 、 1.37×10^{-6} 和 9.70×10^{-5} ;对数据进行冬春季与夏春季分层分析,As、Cd、Cr 的超额致癌风险值介于 $0.77 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-4}$ 之间,并且三种元素致癌风险值均冬春季>夏秋季,并且结果主要介于 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 之间,说明淮南市大气 PM_{2.5} 中 As、Cd、Cr 对人群具有潜在的致癌风险。见表 5。

表 5 淮南市环境空气 PM_{2.5} 中 As、Cd、Cr 健康风险评估结果

Table 5 Health risk assessment of arsenic, cadmium, and chromium in ambient air PM_{2.5} in Huai'an city

元素	冬春季(n=126)	夏秋季(n=126)	全年(n=252)
As	1.99×10^{-5}	1.54×10^{-5}	1.77×10^{-5}
Cd	1.67×10^{-6}	0.77×10^{-6}	1.37×10^{-6}
Cr	1.25×10^{-4}	6.89×10^{-5}	9.70×10^{-5}

3 讨论

2020—2022 年淮南市 PM_{2.5} 中 As、Cd、Pb 年均值均低于国家限值标准,冬春季十种重金属浓度均明显高于夏春季,该现象可能与冬春季气温低存在逆温现象,污染物不容易扩散,并且淮安处于江苏北部,与京津冀鲁等华北地区接壤,冬春季是华北地区雾霾最严重时节,淮安冬春季为西北风主流风向,大量外来污染物输入,从而有利于雾霾天气持续形成。

主成分分析得出 PM_{2.5} 中重金属元素主要来源于三种类型,主因子 1 方差贡献率为 49.190%,载荷绝对值较高的元素为 Pb、Se、Tl、Cd、Sb、As、Mn (均>0.586),其中 Se、Cd、Sb、As、Pb、Tl 的 EF 值均大于 100,与富集分析结果一致,说明以上元素严重富集,主要受到人类活动影响;有研究表明 Pb 作为汽车尾气排放的主要特征标志物^[13],Se 来源于石油或煤炭燃烧^[14],Cd、Tl 主要来源于有色金属的冶炼、煅烧,矿石的烧结^[15-16],Sb、As 主要来源于煤炭的燃烧^[17-18]。淮安近年来经济快速持续发展,城镇化建设加快,大量重工业企业入驻,锅炉燃煤企业增多,汽车保有量持续增加,因此主因 1 可以认为淮安 PM_{2.5} 中重金属主要受城镇化建设、交通运输及重工业生产等人为活动影响。主因子 2 方差贡献率为 20.404%,载荷绝对值较高的元素为 Cr(0.987)、Ni(0.983),Cr 主要来源于冶金、金属加工、电镀和皮革加工等;Ni 主要来源于冶炼矿石及冶炼钢铁^[9],淮安具有淮钢等大型钢铁厂,可能是空气中 Ni 元素的主要来源。主因子 3 方差贡献率 10.098%,载荷绝对值较高的元素为 Al(0.933),Al 主要来源于自然来源,可以认为是自然壳环境排放的影响^[20]。

健康风险评估结果显示淮南市 PM_{2.5} 中八种重金属非致癌效应在可接受水平, As、Cd、Cr 超额致癌发病风险分别为 1.77×10^{-5} 、 1.37×10^{-6} 和 9.70×10^{-5} , 具有潜在的致癌风险。因此地方政府应引起关注, 加强大气重金属污染物的监测, 分析其来源并对重污染企业进一步监督检查, 减少排放, 对于预防肿瘤及关联疾病发生具有重要意义。

作为风险评估研究, 本研究尚存在一定不确定性和局限性, 首先, 空气暴露浓度以室外监测 PM_{2.5} 中重金属浓度纳入年度分析, 直接以年均重金属浓度计算终身暴露量, 未考虑到研究人群在室内污染物暴露浓度与室外差异, 导致暴露量存在不确定性。其次, 国内尚缺乏相关的暴露参数数据库, 剂量-反应关系毒理学参数直接选取美国环境保护局 IRIS 网站推荐值, 并且暴露参数仅参照中国成年人群参数, 没有考虑不同年龄、性别的人群的个体差异, 造成对环境空气中重金属的敏感性不同, 可能导致研究结果存在不确定性。最后, 本研究仅设置一个监测点, 监测周期为三年, 这可能与淮南市 PM_{2.5} 中重金属真实分布情况存在一定差异。因此下一步需考虑增加监测点及延长监测周期, 来进一步研究 PM_{2.5} 中金属元素组分与人群健康的效应。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] Li SC, Guo B, Jiang Y, et al. Long-term Exposure to Ambient PM_{2.5} and Its Components Associated With Diabetes: Evidence From a Large Population-Based Cohort From China[J]. *Diabetes Care*, 2023, 46(1): 111-119.
- [2] 孙凤霞, 先兆娟, 韦丽, 等. 南京市大气 PM_{2.5} 污染控制对循环系统疾病的健康收益评估 [J]. *现代预防医学*, 2023, 50(11): 1970-1974, 2002.
Sun FX, Xian ZJ, Wei L, et al. Evaluation of health benefits of atmospheric PM_{2.5} pollution control on circulatory system diseases in Nanjing[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2023, 50(11): 1970-1974, 2002.
- [3] 胡芸迪, 杜小红, 戚发秋, 等. 西北某工业区周围空气采暖期与非采暖期 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征、来源分析及人群健康风险评估[J]. *现代预防医学*, 2022, 49(2): 227-231, 235.
Hu YD, Du XH, Qi FQ, et al. Pollution characteristics, source analysis and population health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} during heating and non-heating periods in an industrial area in Northwest China [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2022, 49(2): 227-231, 235.
- [4] Zhou XL, Xie MM, Zhao MX, et al. Pollution characteristics and human health risks of PM_{2.5}-bound heavy metals: a 3-year observation in Suzhou, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(7): 5145-5162.
- [5] Du HX, Ren LH, Zhao MS, et al. Characterization of metal elements in atmospheric PM_{2.5} and health risk assessment in Heze in winter from 2017 to 2018 [J]. *Environmental Science*, 2024, 45 (3): 1361-1370.
- [6] 汪林. 富集因子法判定大气中颗粒物来源[EB/OL]. [2024-05-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=FC2wxXHna7pXWcogDcON8DNisfQUkmYSr8OQOR8SLZhrw_9TsMivGRiDubh9ZoGrM1FkH6-NGWQG5Tq13GCmoRhaTFbkwEZdjYt6dVDEhdZgJNOURCZgw1pVuSACRN1fhZsmDOVSMgWILAhro6YAg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
Wang L. Enrichment factor method to determine the source of particulate matter in the atmosphere[EB/OL]. [2024-05-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=FC2wxXHna7pXWcogDcON8DNisfQUkmYSr8OQOR8SLZhrw_9TsMivGRiDubh9ZoGrM1FkH6-NGWQG5Tq13GCmoRhaTFbkwEZdjYt6dVDEhdZgJNOURCZgw1pVuSACRN1fhZsmDOVSMgWILAhro6YAg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [7] 吴红璇, 史常青, 张艳, 等. 乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1167-1175.
Wu HX, Shi CQ, Zhang Y, et al. Characteristics and source apportionment of dustfall pollution in the coal mine area and surrounding areas of Wuhai city in spring[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1167-1175.
- [8] Kyllönen K, Karlsson V, Ruoho-Airola T. Trace element deposition and trends during a ten year period in Finland[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2260-2269.
- [9] 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_{2.5} 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2024, 43(1): 275-286.
Lei M, Ma JH, Yang LP, et al. Pollution characterization, source identification and health risk assessment of PM_{2.5}-bound metals in main cities of Henan province in winter under different air quality levels[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(1): 275-286.
- [10] United States Environmental Protection Agency. Regional screening levels (RSLs) [EB/OL]. [2024-05-10]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls>.
- [11] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection. Manual of exposure parameters for Chinese population[M]. Beijing: China Environment Press, 2013.
- [12] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 3095-2012 Ambient air quality standard [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- [13] 李兰兰, 梁雪, 李晶晶, 等. 中国大气污染防治政策与空气污染治理——基于城市级面板数据的实证研究 [J]. *生态经济*, 2024, 40(3): 179-186.
Li LL, Liang X, Li JJ, et al. Air pollution Control Policy and Air pollution control in China: An empirical study based on city-level panel data[J]. *Ecological Economics*, 2024, 40(3): 179-186.
- [14] 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 等. 郑州市大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 1706-1715.
Qu GH, Sun JP, Wang SB, et al. Pollution characterization, source

- identification, and health risks of atmospheric Particle-Bound heavy metals in PM_{2.5} in Zhengzhou city: based on high-resolution data[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 1706-1715.
- [15] 唐大镜, 常会云, 张莹, 等. 2017-2019 年石家庄市 PM_{2.5} 中重金属污染及健康风险评价 [J]. *现代预防医学*, 2021, 48(7): 1177-1180, 1197.
- Tang DJ, Chang HY, Zhang Y, et al. Pollution characteristics and health risk evaluation of heavy metal particles in PM_{2.5} in Shijiazhuang, 2017-2019[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 48(7): 1177-1180, 1197.
- [16] 石晓兰, 宗政, 彭辉, 等. 近 10 年华北背景大气 PM_{2.5} 中重金属健康风险及污染来源的变化 [J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5335-5343.
- Shi XL, Zong Z, Peng H, et al. Changes in health risks and pollution sources of atmospheric PM_{2.5}-bound metals in a background site in North China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5335-5343.
- [17] 肖凯, 任学昌, 陈仁华, 等. 典型西北钢铁城市冬季大气颗粒物重金属来源解析及健康风险评价——以嘉峪关为例[J]. *环境化学*, 2022, 41(5): 1649-1660.
- Xiao K, Ren XC, Chen RH, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in air particulates of typical northwest steel cities in winter: A case study in Jiayuguan [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(5): 1649-1660.
- [18] 程馨, 孙家佺, 凌凯. 城市大气颗粒物中锑污染研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(1): 123-127.
- Cheng X, Sun JN, Ling K. Research progress of Antimony pollution in urban atmospheric particulate matter [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2024, 46(1): 123-127.
- [19] 任万辉, 李云丹, 苏枫枫, 等. 沈阳市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1029-1037.
- Ren WH, Li YD, Su CC, et al. Pollution characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Shenyang[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1029-1037.
- [20] Wang X, Wang B, Xiao LL, et al. Sources of 24-h personal exposure to PM_{2.5}-bound metals: results from a panel study in Wuhan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(22): 27555-27564.

收稿日期: 2024-03-13

(上接第 1961 页)

- 107-119.
- [17] Du QZ, Wang JW, Fu XW, et al. Diffusion and accumulation in cultivated vegetable plants of di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) from a plastic production factory[J]. *Food Additives & Contaminants. Part a, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 2010, 27(8): 1186-1192.
- [18] Huang LH, Qiao YQ, Deng SX, et al. Phthalates in house dust in Chinese urban residences: Concentrations, partition, origin and determinants[J]. *Chemosphere*, 2022, 286(Pt 2): 131703.
- [19] 肖达, 邵墨, 付焯, 等. 表面印刷型地垫产品质量安全风险调研 [J]. *塑料工业*, 2023, 51(9): 143-147.
- Xiao D, Shao Z, Fu Y, et al. Investigation on quality and safety risk of surface printed floor mats [J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(9): 143-147.
- [20] Liujia F, Lixin W, Kexin W, et al. Phthalates in glass window films of chinese university dormitories and their associations with indoor decorating materials and personal care products [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22): 15297.
- [21] 卢春阳, 马奇菊, 苏福海. 电子电气产品邻苯二甲酸酯管控法规标准及企业应对[J]. *质量与认证*, 2020, (5): 69-72.
- Lu CY, Ma QJ, Su FH. Regulations and standards for the management and control of phthalates in electronic and electrical products and response of enterprises [J]. *China Quality Certification*, 2020, (5): 69-72.
- [22] 张庆, 张颖, 牛志广. 饮用水系统中邻苯二甲酸酯的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(12): 114-121.
- Zhang Q, Zhang Y, Niu ZG. Contamination profiles and health risk assessment of phthalates in drinking water systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(12): 114-121.
- [23] 吴倩兰, 雷景铮, 王利军. 大学校园室内环境 PM_{2.5} 中 PAEs 污染特征及暴露风险 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(10): 2525-2535.
- Wu QL, Lei JZ, Wang LJ. Pollution characteristics and exposure risks of PAEs in PM_{2.5} of indoor environment on university campus[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(10): 2525-2535.
- [24] Ali N, Alhakamy NA, Ismail IMI, et al. Exposure to phthalate and organophosphate esters via indoor dust and PM₁₀ is a cause of concern for the exposed saudi population [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(4): 2125.
- [25] Mao SH, He CQ. Effect of particle size and environmental conditions on the release of di-(2-ethylhexyl) phthalate from microplastics[J]. *Chemosphere*, 2023, 345: 140474.

收稿日期: 2023-12-12