

济南市大气 PM_{2.5} 铅污染特征、变化趋势与风险评估

王燕¹, 高衍新¹, 李仁波¹, 江媛媛¹, 隋少峰²

1. 山东省疾病预防控制中心公共卫生监测评价所, 山东 济南 250014
2. 上海市疾病预防控制中心健康危害因素监测与控制所, 上海 200336

摘要:

[背景] 多项研究表明大气 PM_{2.5} 中重金属对人群健康有影响, 而 PM_{2.5} 中铅污染长期低浓度暴露对人群健康影响的研究有限。

[目的] 探讨济南市大气 PM_{2.5} 中铅污染特征, 评估其慢性健康风险。

[方法] 收集济南市 2014—2019 年逐日 PM_{2.5} 质量浓度(后称浓度)数据, 分析 PM_{2.5} 浓度的逐年变化趋势; 另在济南市的主要工业区(历城区)和生活区(市中区)分别设置一个监测点, 于 2014—2019 年的每个月 10—16 日采样(共采样 493 d, 部分缺失; 其中采暖期 172 d, 非采暖期 321 d)。每个监测点每天采集 2 个 PM_{2.5} 样品, 分别采用石英纤维滤膜用于铅的检测, 玻璃纤维滤膜用于 PM_{2.5} 浓度测定, 共采集 986 份样品。采样仪器为 100 L·min⁻¹ 的大流量 PM_{2.5} 采样器, 每天累计采样时间为 20~24 h。采用称重法测量 PM_{2.5} 浓度, 电感耦合等离子体质谱法测定 PM_{2.5} 样品中铅浓度。分析 2014—2019 年 PM_{2.5} 中铅的年平均浓度、富集因子水平与单位质量 PM_{2.5} 中铅水平变化趋势以及采暖期与非采暖期的差异等。利用 WS/T 777—2021《化学物质环境健康风险评估技术指南》评估大气 PM_{2.5} 中铅的健康风险。

[结果] PM_{2.5} 中铅的年平均浓度范围为 23.2~154.7 ng·m⁻³; 2015—2019 年采暖期平均浓度高于非采暖期, 2015 年、2017—2019 年差异有统计学意义($P < 0.01$ 或 0.001)。2014—2019 年铅的富集因子范围为 200~1342; 在 2015 年、2017—2018 年采暖期该因子高于非采暖期, 差异有统计学意义($P < 0.05$ 或 0.001)。单位质量 PM_{2.5} 中铅水平为 493~1944 ng·mg⁻¹, 2014 年、2017—2018 年采暖期和非采暖期其均值的差异均有统计学意义($P < 0.05$ 或 0.001)。PM_{2.5} 中铅的年平均浓度和富集水平的年度变化呈下降趋势, 单位质量 PM_{2.5} 中铅水平也呈下降趋势。2014—2019 年, 济南市 PM_{2.5} 中铅的致癌风险范围为 1.69×10⁻⁸~2.45×10⁻⁶, 整体趋势逐年下降, 第 95 百分位数环比下降 3%~46%。2017 年以后, PM_{2.5} 中铅暴露的人群致癌风险降至可接受水平($< 1 \times 10^{-6}$)。

[结论] 2015—2019 年, 采暖期 PM_{2.5} 中铅浓度、富集因子大多较非采暖期升高, 但单位质量 PM_{2.5} 中铅水平变化不完全一致。2014—2016 年, 铅暴露对人群健康有致癌风险; 2017 年以后, PM_{2.5} 中铅暴露对人群的致癌风险处于可接受水平。

关键词: 大气污染; PM_{2.5}; 铅; 污染特征; 风险评估

Pollution characteristics, long-term variation trend, and health risk assessment of lead in ambient PM_{2.5} in Jinan WANG Yan¹, GAO Yanxin¹, LI Renbo¹, JIANG Yuanyuan¹, SUI Shaofeng² (1. Department of Public Health Surveillance and Evaluation, Shandong Center for Disease Control and Prevention, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Division of Health Risk Factors Monitoring and Control, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

[Background] A number of studies have shown that heavy metals in atmospheric PM_{2.5} have impacts on human health, while studies on the impact of long-term and low-concentration exposure to lead in PM_{2.5} on human health are limited.

[Objective] To investigate the pollution characteristics of lead in ambient PM_{2.5} and assess its chronic health risks.

[Methods] Daily PM_{2.5} concentration data in Jinan from 2014 to 2019 were collected, and the year-by-year trend of PM_{2.5} concentration was analyzed. Licheng District (an industrial area) and Shizhong District (a residential area) were elected to install an ambient PM_{2.5} monitoring station



DOI 10.11836/JEOM22380

基金项目

国家科技基础资源调查专项子课题 (2017FY101200-09)

作者简介

王燕(1978—), 女, 硕士, 副主任医师;
E-mail: swallow-wangyan@163.com

通信作者

隋少峰, E-mail: shaofengsui@163.com

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2022-09-13

录用日期 2023-04-18

文章编号 2095-9982(2023)07-0811-06

中图分类号 R122.2

文献标志码 A

引用

王燕, 高衍新, 李仁波, 等. 济南市大气 PM_{2.5} 铅污染特征、变化趋势与风险评估 [J]. 环境与职业医学, 2023, 40(7): 811-816.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM22380

Funding

This study was funded.

Correspondence to

SUI Shaofeng, E-mail: shaofengsui@163.com

Editorial Board Members' authorship No

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2022-09-13

Accepted 2023-04-18

To cite

WANG Yan, GAO Yanxin, LI Renbo, et al. Pollution characteristics, long-term variation trend, and health risk assessment of lead in ambient PM_{2.5} in Jinan [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(7): 811-816.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM22380

respectively. The sampling instrument was a $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ high-flow $\text{PM}_{2.5}$ sampler, with a cumulative sampling time of 20-24 h per day, using a quartz fiber filter membrane for lead detection and a glass fiber filter membrane for $\text{PM}_{2.5}$ determination. The sampling frequency was 7 consecutive days per month from the 10th to the 16th (A total of 493 d were sampled and some were missing; 172 d during the heating period and 321 d during the non-heating period). Two $\text{PM}_{2.5}$ samples were collected in one monitoring site each day. A total of 986 samples were collected in one monitoring site. The lead content in $\text{PM}_{2.5}$ samples was detected by inductively coupled plasma mass spectrometry. The concentration of $\text{PM}_{2.5}$ was measured by weighing method. The annual average concentration and enrichment factor of lead in $\text{PM}_{2.5}$, the change trend of lead content per unit mass of $\text{PM}_{2.5}$, and the difference between heating period and non-heating period from 2014 to 2019 were estimated. *Technical guide for environment health risk assessment of chemical exposure* (WS/T 777-2021) was used to assess the health risks of exposure to lead in $\text{PM}_{2.5}$.

[Results] The average annual concentration of lead in $\text{PM}_{2.5}$ ranged from $23.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ to $154.7 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. The average concentration in heating period from 2015 to 2019 was higher than that in non-heating period, and the differences in 2015, 2017, and 2019 were statistically significant ($P < 0.01$ or 0.001). The enrichment factors ranged from 200 to 1342 in 2014 to 2019. The average enrichment factors in heating period in 2015, 2017, and 2018 was higher than those in non-heating period, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$ or 0.001). The lead contents per unit mass of $\text{PM}_{2.5}$ ranged from $493 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$ to $1944 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$, and the differences between heating period and non-heating period in 2014, 2017, and 2018 were statistically significant ($P < 0.05$ or 0.001). The average annual concentration and enrichment factor of lead in $\text{PM}_{2.5}$ showed a downward trend, and thus the lead content per unit mass of $\text{PM}_{2.5}$ also decreased. From 2014 to 2019, the carcinogenic risk of lead in $\text{PM}_{2.5}$ in Jinan ranged from 1.69×10^{-8} to 2.45×10^{-6} , showing a significant downward trend year by year, and the 95th percentile decreased by 3%-46% from the previous year. The carcinogenic risk level of lead was reduced to an acceptable level ($< 1 \times 10^{-6}$) after 2017.

[Conclusion] From 2015 to 2019, lead concentration and enrichment factor in $\text{PM}_{2.5}$ increase during heating period compared with non-heating period, but it is not completely consistent of lead content in $\text{PM}_{2.5}$ per unit mass. From 2014 to 2016, exposure to lead in $\text{PM}_{2.5}$ may elevate carcinogenic risk to human. After 2017, the carcinogenic risks of exposure to lead in $\text{PM}_{2.5}$ are at an acceptable level.

Keywords: atmospheric pollution; $\text{PM}_{2.5}$; lead; pollution characteristics; risk assessment

作为我国大气污染的主要污染物之一, $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物粒径小, 可以直接进入人体下呼吸道, 导致人群呼吸系统、循环系统疾病患病率和死亡率升高^[1-5]。 $\text{PM}_{2.5}$ 富集重金属能力远高于 PM_{10} , 王琼等^[6]对采暖期不同粒径颗粒物的金属富集能力研究发现, 粒径小于 $2.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其对重金属铅的富集水平是粒径 $4.7\sim 10.0 \mu\text{m}$ 颗粒物的 1.97 倍, 且易进入人体下呼吸道和肺泡, 对人体健康危害更大。

金属元素和类金属元素是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分, 与 $\text{PM}_{2.5}$ 引起的不良健康效应密切相关^[7]。铅是无阈值致癌物, 铅附着在 $\text{PM}_{2.5}$ 上, 通过吸入途径进入呼吸系统, 沉积在肺部, 进入血液^[8]。铅的长期暴露对人体健康影响较大, 可以影响血红素的合成等生化过程和神经系统发育, 引起血压升高, 甚至导致肺癌等^[9-14]。

$\text{PM}_{2.5}$ 中铅暴露特征为低浓度长期暴露, 因此对 $\text{PM}_{2.5}$ 中铅的健康风险评估尤为重要^[15-16]。由于数据陈旧且仅进行趋势预测, 欧洲的环境疾病负担研究表明, 环境铅污染导致的健康寿命损失可能被严重低估^[17]。在成都、上海和广州三个城市开展的相关研究多局限于单一年度的现状^[15, 18-19], 关于大气中铅污染长期变化趋势和控制效果的报道较少。为了深入了解济南市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属铅浓度的长期变化趋势、污染特征及其对人群健康的影响, 本研究对近年来济南市大气

$\text{PM}_{2.5}$ 铅暴露的变化趋势进行分析, 对其慢性健康效应进行风险评估, 了解铅暴露风险动态变化, 为大气污染治理的控制政策调整提供依据。

1 材料与方法

1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来源及采样

济南市 2014—2019 年逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度(后称浓度)数据来自济南市环保局。另, 选择济南市中心城区的主要工业生产区(历城区)和生活区(市中区)为 $\text{PM}_{2.5}$ 监测点。为了避免交通主干道路机动车尾气对 $\text{PM}_{2.5}$ 采样的影响, 选择小学校园作为监测点位; $\text{PM}_{2.5}$ 采样设备点设置于教学楼楼顶距离地面 $10\sim 15 \text{ m}$ 。于 2014—2019 年, 每个月 10—16 日采样(2014 年缺失 10 d, 2018 年缺失 1 d, 共采样 493 d; 其中采暖期 172 d, 非采暖期 321 d)。每个监测点每天同时采集 2 份样品, 分别采用玻璃纤维滤膜(Whatman, 英国)和石英纤维滤膜采样, 用于测定 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 $\text{PM}_{2.5}$ 中铅的浓度; 共采集各 986 份样品。采样前用分析天平(梅特勒, 美国)称量滤膜, 采样泵为 TH-150F 型中流量 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器(武汉天虹, 中国), 采样流量为 $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 每天累计采样时长为 $20\sim 24 \text{ h}$ 。采集后的玻璃纤维滤膜再次称重, 记录滤膜的增重, 根据采样体积计算得出 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度。

1.2 PM_{2.5} 中铅的测定

取适量石英纤维滤膜,称重,用陶瓷剪刀剪碎,放入 15 mL 离心管 (BD Falcon, 美国) 底部,加入 5% HNO₃ 10 mL。将离心管 70 °C 水浴超声浸提 3 h,取出离心管放至室温,然后将离心管放入低速离心机 (3 234×g, Centrifuge 5804, Eppendorf, 德国) 离心 5 min,取出上清液待测。采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP/MS, ICAP-QC model, Thermo Fisher Scientific, 美国) 测定待测样品中的铅元素。采用铅的标准溶液 (1 000 μg·mL⁻¹, 中国计量科学院标准物质 GBW08619) 配置标准样品浓度,使用 ICP/MS 依次测定试剂空白、标准曲线系列、样品和质控样品。由标准曲线得出样品中的铅质量,根据大气采样体积计算得出大气 PM_{2.5} 中铅浓度。单位质量 PM_{2.5} 中铅水平为 PM_{2.5} 中铅浓度除以 PM_{2.5} 浓度。引入内标,通过对滤膜参考物质重复测定和加标回收试验分别控制检测的精密度和准确度。

1.3 铅富集因子

富集因子 (enrichment factor, EF) 是指气溶胶中某种元素相较于地壳表层相应元素的富集程度,可以判断环境介质中的某种元素来自自然源还是人为源^[20]。EF ≥ 40, 表示该元素富集程度极强,主要来自人为源。EF 的计算公式为 $EF = (C_x/C_{x-ref}) / (C_y/C_{y-ref})$, C_x 为 PM_{2.5} 中研究元素的质量浓度, C_{x-ref} 为 PM_{2.5} 中参比元素质量浓度。C_y 为地壳中研究元素质量浓度, C_{y-ref} 为地壳中参比元素质量浓度^[21-22]。选择铝 (Al) 元素为参比元素。元素基准值采用济南市土壤的元素基准值^[23]。

1.4 健康风险评估

根据 WS/T 777—2021 《化学物质环境健康风险评估指南》评估 PM_{2.5} 中铅的致癌风险^[24]。

致癌风险用 CR 表征,计算公式为 $CR = LADD_{inh} \times IUR \times CF$, 其中 $LADD_{inh} = (C \times EF \times ED \times ET) / LT$ 。LADD_{inh} 是经吸入途径进入人体的化学物质的终生日平均浓度 (mg·m⁻³); C 是空气中化学物质的浓度 (mg·m⁻³); EF 是暴露频率 (d·年⁻¹); ED 是暴露周期 (年,本研究为 30 年); ET 是暴露时间 (h·d⁻¹,本研究为 24 h·d⁻¹); LT 是终生暴露时间 (h,本研究为 613 200 h)。CR 是致癌风险; CF 是转换因子,取值 1 000 μg·mg⁻¹; IUR 是铅吸入致癌单位风险因子,取值 $1.2 \times 10^{-5} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ ^[25]。CR < 1 × 10⁻⁶, 引起癌症的风险较低; $1 \times 10^{-6} \leq CR < 1 \times 10^{-4}$, 有癌症风险; CR ≥ 1 × 10⁻⁴, 引起的癌症风险较高。

1.5 数据收集与统计分析

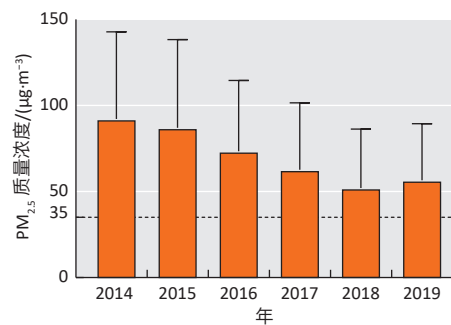
采用 SPSS 20.0 分析数据, Graphpad prism 8 制作统计图。非采暖期和采暖期的 PM_{2.5} 中铅浓度、富集

因子、单位质量 PM_{2.5} 中铅水平和致癌风险比较采用非参数 Mann-Whitney 检验; 检验水准 α=0.05, 双侧检验。

2 结果

2.1 PM_{2.5} 浓度变化趋势

2014—2019 年, PM_{2.5} 年均浓度为 52.1~92.1 μg·m⁻³, 见图 1。均超出 GB 3095—2012 《环境空气质量标准》中 PM_{2.5} 年平均浓度限值 (35 μg·m⁻³)。在同一年度, 采暖期平均浓度 (74.6~118.5 μg·m⁻³) 均高于非采暖期 (40.9~79.1 μg·m⁻³)。2014—2018 年, PM_{2.5} 年均值下一年度与上一年度相比, 均有下降, 但 2019 年 PM_{2.5} 年均值比 2018 年升高。2014 年有 57.8% 的天数超过了日均浓度限值 (75 μg·m⁻³); 2014—2018 年, 超标天数比例逐年下降; 2018 年超标天数比例最低, 为 17.3%。



[注] 虚线为 GB 3095—2012 《环境空气质量标准》中的 PM_{2.5} 年平均浓度限值 (35 μg·m⁻³)。

图 1 济南市 2014—2019 年 PM_{2.5} 浓度变化趋势

Figure 1 The variation trend of PM_{2.5} concentration in Jinan from 2014 to 2019

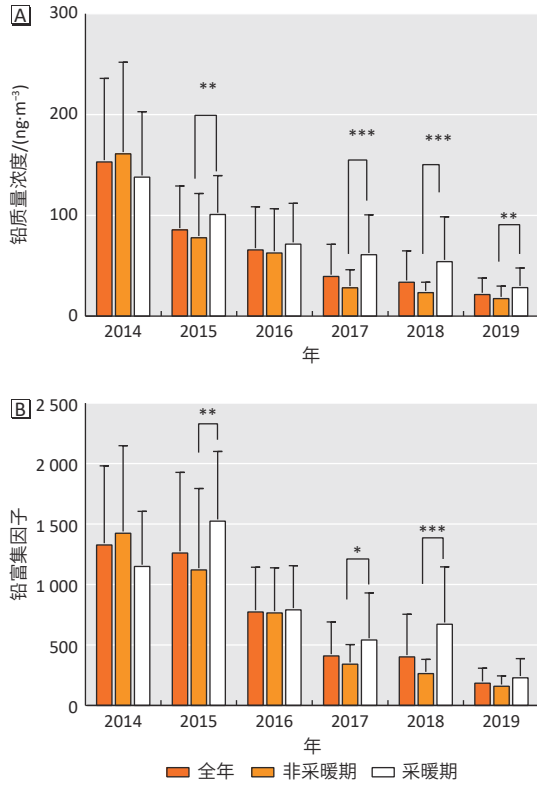
2.2 铅污染的变化趋势

2.2.1 大气 PM_{2.5} 中铅的年平均浓度 2014—2019 年, PM_{2.5} 中铅的年平均浓度为 23.2~154.7 ng·m⁻³, 见图 2A。根据 GB 3095—2012 《环境空气质量标准》, 铅年平均浓度限值为 0.5 μg·m⁻³^[26]。2014—2019 年, 铅的年平均浓度均低于 0.5 μg·m⁻³, 均未超标。

2014—2019 年, PM_{2.5} 中铅的年平均浓度呈逐年下降趋势。铅在采暖期和非采暖期的浓度整体都呈下降趋势, 与年平均浓度变化一致。2015 年、2017—2019 年采暖期和非采暖期的铅浓度差异有统计学意义 (P < 0.01 或 P < 0.001), 均为采暖期高于非采暖期。见图 2A。

2.2.2 铅的富集因子 2014—2019 年, 全年铅的富集因子范围为 200~1 342, 呈逐年下降趋势。2015 年 (P < 0.01)、2017 年 (P < 0.05) 和 2018 年 (P < 0.001) 均

为采暖期铅的富集因子高于非采暖期。见图 2B。



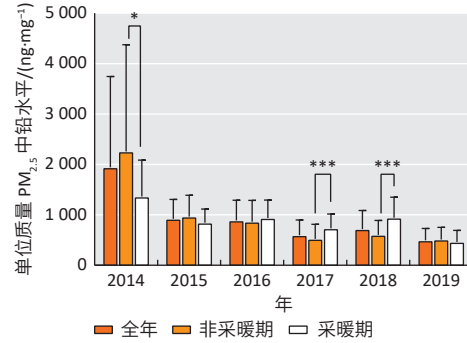
[注] *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$ 。

图 2 济南市 2014—2019 年 $PM_{2.5}$ 铅浓度 (A) 和铅富集因子 (B) 的变化趋势

Figure 2 The variation trend of lead concentration (A) and EF in $PM_{2.5}$ (B) in Jinan from 2014 to 2019

2.2.3 单位质量 $PM_{2.5}$ 中铅水平 2014—2019 年, 年平均单位质量 $PM_{2.5}$ 中铅水平为 $493 \sim 1944 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。2014 年、2017—2018 年, 采暖期与非采暖期差异有统计学意义 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.001$); 2014 年, 非采暖期高

于采暖期, 2017—2018 年, 采暖期高于非采暖期。2014 年单位质量 $PM_{2.5}$ 中铅水平最高 ($1944 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$), 是 2019 年 ($493 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$) 的 3.9 倍。见图 3。

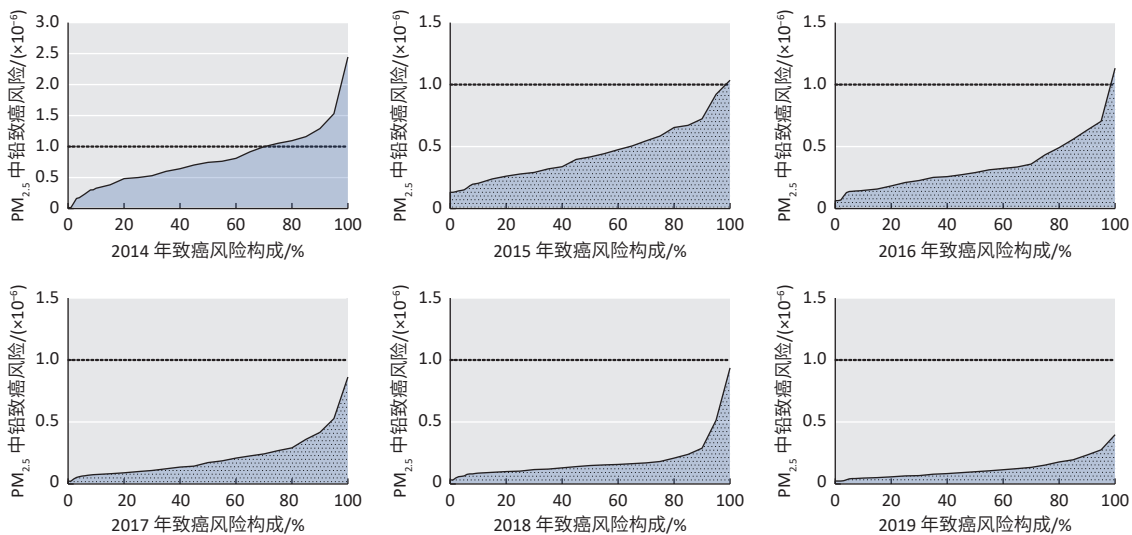


[注] *: $P < 0.05$; ***: $P < 0.001$ 。

图 3 济南市 2014—2019 年年均单位质量 $PM_{2.5}$ 中铅水平
Figure 3 The variation trend of lead content per unit mass of $PM_{2.5}$ in Jinan from 2014 to 2019

2.3 $PM_{2.5}$ 中铅的健康风险评估

2014—2019 年济南市 $PM_{2.5}$ 中铅的 CR 值范围为 $1.69 \times 10^{-8} \sim 2.45 \times 10^{-6}$; 各年度 CR 均值及其 95%CI 依次为: $0.80 (0.17 \sim 1.70) \times 10^{-6}$ 、 $0.45 (0.15 \sim 0.94) \times 10^{-6}$ 、 $0.35 (0.13 \sim 0.99) \times 10^{-6}$ 、 $0.21 (0.06 \sim 0.59) \times 10^{-6}$ 、 $0.18 (0.06 \sim 0.72) \times 10^{-6}$ 、 $0.12 (0.03 \sim 0.31) \times 10^{-6}$, 呈下降趋势。图 4 中阴影面积为铅的致癌风险百分位数分布。2014 年, 致癌风险约 30% 超过可接受水平 (1×10^{-6}), 可能存在癌症风险; 2015 年后, 致癌风险下降至 1×10^{-6} 以下; 2016 年, 约 3% 致癌风险超过 1×10^{-6} 。2017—2019 年, 致癌风险均低于 1×10^{-6} , 引起癌症的风险较低, 且呈逐年降低的趋势。



[注] 图中阴影面积为铅的致癌风险百分位数分布; 虚线为 1×10^{-6} , 即可接受水平。

图 4 济南市 2014—2019 年 $PM_{2.5}$ 中铅致癌风险的百分位数图

Figure 4 Percentile probability distribution of lead associated carcinogenic risk in $PM_{2.5}$ in Jinan from 2014 to 2019

3 讨论

PM_{2.5} 组分复杂, 主要包括多环芳烃、金属和类金属等有机成分和无机成分。不同地区 PM_{2.5} 各组分成分和含量不同, 与颗粒物的形成和来源有关^[27]。王丽珩等^[28]对 2016—2020 年济南市 PM_{2.5} 中铅、铬、锰等 12 种重金属的浓度特征进行了分析, 铅的质量浓度位居前三位。本研究发现, 济南市 PM_{2.5} 中铅浓度、单位质量 PM_{2.5} 中铅水平和致癌风险整体呈逐年下降趋势。

济南市 2015 年 PM_{2.5} 中铅浓度(87.4 ng·m⁻³) 高于广州两个区同年度的铅浓度(0.059、0.051 μg·m⁻³)^[18] 和上海 2009—2010 年普陀区的铅浓度(59 ng·m⁻³)^[19]。济南市 2016 年的铅浓度(67.5 ng·m⁻³) 低于北京同年度的铅浓度(108.19 ng·m⁻³)^[29], 也低于成都 2016—2017 年初的铅浓度(320.5 ng·m⁻³)^[30] 和上海宝山区的 2009—2010 年铅浓度(133 ng·m⁻³)^[19]。与中国其他城市相比, 济南市铅浓度处于中等污染水平。

PM_{2.5} 中的铅主要来源于化石燃料燃烧、冬季采暖、工业生产和汽车尾气等^[7, 27]。2014—2019 年, 济南市 PM_{2.5} 中铅的富集因子为 200~1342, 均大于 40, 说明主要来自人为污染源。济南市 PM_{2.5} 中金属的研究表明, 其中砷、铬、硒和铅作为第一主成分, 贡献率为 35.94%, 煤炭燃烧是大气中铅的主要来源之一^[16]。2016—2017 年初成都铅富集因子高于 1000^[30], 济南的水平略低于成都。

2015—2019 年, 济南市采暖期 PM_{2.5} 中铅浓度高于非采暖期, 与青岛和哈尔滨的结果一致^[31-32], 可能与冬季采暖有关。

济南市 PM_{2.5} 年平均浓度均为采暖期高于非采暖期。但单位质量 PM_{2.5} 中铅水平与 PM_{2.5} 浓度不一致, 2014 年非采暖期高于采暖期。单位质量 PM_{2.5} 中铅水平与颗粒物铅的来源有关, 水平较高的样品机动车尾气贡献较大, 较低的样品土壤扬尘和燃煤飞灰贡献较大^[27]。2014 年非采暖期铅水平高于采暖期, 可能与非采暖期机动车尾气排放量较高有关。

铅为无阈值致癌物^[25], 通过促进细胞凋亡, DNA 氧化损伤, 抑癌基因 P53 转录表达异常引起癌症^[33]。虽然金属铅的年平均浓度低于环境空气质量标准限值, 根据致癌风险百分位数图, 2014—2016 年, 铅的致癌风险仍有 3%~30% 超过可接受水平。在铅年平均浓度仅为标准限值的 1/5 时, 成都的致癌风险有 10% 超出可接受水平^[15]。这提示铅浓度和致癌风险的百分位数分布分析相结合, 更能全面反映铅的致癌风险。

本研究局限性在于未考虑室内暴露, 仅以室外暴

露评价人群健康风险可能存在偏差。监测点覆盖区域和采样天数有限, 均存在不确定性。PM_{2.5} 中的组分如镉、铬、砷、镍等都有致癌效应, 不同金属组分间可能会存在联合作用^[27], 仅评估铅单组分可能会低估人群致癌风险。

从 2013 年起, 济南市政府采取了一系列的大气污染防治政策, 包括推广新能源的使用, 改进生产工艺, 减少高污染煤炭使用, 淘汰或改造燃煤锅炉, 加强大气污染防治的宣传等^[34]。2014—2019 年, PM_{2.5} 浓度和铅浓度呈逐年下降趋势, 致癌风险降至可接受水平, 说明防控政策取得了一定成效。

参考文献

- [1] WANG C, TU Y, YU Z, et al. PM_{2.5} and cardiovascular diseases in the elderly: an overview [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12(7): 8187-8197.
- [2] POPE III CA, BURNETT RT, THUN MJ, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA*, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [3] POPE CA, DOCKERY DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2006, 56(6): 709-742.
- [4] TAJ T, MALMQVIST E, STROH E, et al. Short-term associations between air pollution concentrations and respiratory health —comparing primary health care visits, hospital admissions, and emergency department visits in a multi-municipality study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(6): 587.
- [5] FANG X, FANG B, WANG C, et al. Comparison of frequentist and Bayesian generalized additive models for assessing the association between daily exposure to fine particles and respiratory mortality: a simulation study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(5): 746.
- [6] 王琼, 李亚伟, 刘静怡, 等. 采暖期北京市不同粒径颗粒物 16 种元素的分布特征研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(12): 1065-1069. WANG Q, LI YW, LIU JY, et al. Distribution characteristics of 16 elements in particles with different sizes during heating period in Beijing [J]. *J Environ Health*, 2016, 33(12): 1065-1069.
- [7] 赵朕, 罗小三, 索晨, 等. 大气 PM_{2.5} 中重金属研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(3): 273-277. ZHAO Z, LUO XS, SUO C, et al. Research advance on heavy metals in atmospheric PM_{2.5} [J]. *J Environ Health*, 2017, 34(3): 273-277.
- [8] ATSDR. Course WB2832: lead toxicity: what are routes of exposure to lead? [EB/OL]. [2020-12-24]. https://www.atsdr.cdc.gov/csem/leadtoxicity/exposure_routes.html.
- [9] TONG S, MCMICHAEL AJ. The magnitude, persistence and public health significance of cognitive effects of environmental lead exposure in childhood [J]. *J Environ Med*, 1999, 1(2): 103-110.
- [10] TONG S, VON SCHIRNDING YE, PRAPAMONTOL T. Environmental lead exposure: a public health problem with global dimensions [J]. *Servir*, 2000, 49(1): 35-43.
- [11] REUBEN A, CASPI A, BELSKY DW, et al. Association of childhood blood lead levels with cognitive function and socioeconomic status at age 38 years and with IQ change and socioeconomic mobility between childhood and adulthood [J]. *JAMA*, 2017, 317(12): 1244-1251.
- [12] GAMBELUNGHE A, SALLSTEN G, BORNÉ Y, et al. Low-level exposure to

- lead, blood pressure, and hypertension in a population-based cohort[J]. *Environ Res*, 2016, 149: 157-163.
- [13] SONG H, LIU J, CAO Z, et al. Analysis of disease profile, and medical burden by lead exposure from hospital information systems in China[J]. *BMC Public Health*, 2019, 19(1): 1170.
- [14] CAMAJ PR, GRAZIANO JH, PRETENI E, et al. Long-term effects of environmental lead exposure on blood pressure and plasma soluble cell adhesion molecules in young adults: a follow-up study of a prospective cohort in Kosovo[J]. *J Environ Public Health*, 2018, 2018: 3180487.
- [15] 杜艳君, 张翼, 刘睿聪, 等. 成都市PM_{2.5}中金属元素吸入暴露的慢性健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(12): 1061-1064.
DU YJ, ZHANG Y, LIU RC, et al. Chronic health risk assessment of exposure to metals in PM_{2.5} by inhalation in Chengdu[J]. *J Environ Health*, 2016, 33(12): 1061-1064.
- [16] SUI S, NG J, GAO Y, et al. Pollution characteristics and chronic health risk assessment of metals and metalloids in ambient PM_{2.5} in Licheng District, Jinan, China[J]. *Environ Geochem Health*, 2020, 42(7): 1803-1815.
- [17] HÄNNINEN O, KNOL AB, JANTUNEN M, et al. Environmental burden of disease in Europe: assessing nine risk factors in six countries[J]. *Environ Health Perspect*, 2014, 122(5): 439-446.
- [18] 李敏, 连晓文, 王静, 等. 广州两城区大气PM_{2.5}金属成分的污染特征[J]. *环境与职业医学*, 2016, 33(7): 650-656.
LI M, LIAN XW, WANG J, et al. Pollution characteristics of Metal components in PM_{2.5} in two districts of Guangzhou[J]. *J Environ Occup Med*, 2016, 33(7): 650-656.
- [19] WANG J, HU Z, CHEN Y, et al. Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J]. *Atmos Environ*, 2013, 68: 221-229.
- [20] LOSKA K, WIECHUŁA D, KORUS I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environ Int*, 2004, 30(2): 159-165.
- [21] DODD JA, ONDOV JM, TUNCEL G, et al. Multimodal size spectra of submicrometer particles bearing various elements in rural air[J]. *Environ Sci Technol*, 1991, 25(5): 890-903.
- [22] TAYLOR SR, MCLENNAN SM. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Rev Geophys*, 1995, 33(2): 241-265.
- [23] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3): 265-306.
CHENG HX, LI K, LI M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. *Earth Sci Front*, 2014, 21(3): 265-306.
- [24] 化学物质环境健康风险评估技术指南: WS/T 777—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Technical guide for environmental health risk assessment of chemical exposure: WS/T 777—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [25] CALEPA. OEHA chemical database—Air[EB/OL]. [2022-06-10]. <https://oehha.ca.gov/air/chemicals/lead-and-lead-compounds>.
- [26] 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
Ambient air quality standard: GB 3095—2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [27] 李万伟, 李晓红, 徐东群. 大气颗粒物中重金属分布特征和来源的研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2011, 28(7): 654-657.
LI W W, LI X H, XU D Q. Advances in the study on distribution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric particulates[J]. *J Environ Health*, 2011, 28(7): 654-657.
- [28] 王丽珩, 彭秀苗, 张迎建, 等. 2016~2020年济南市两城区大气PM_{2.5}中金属元素浓度特征及慢性健康风险评估[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2021, 59(12): 63-69,77.
WANG LH, PENG XM, ZHANG YJ, et al. Concentration characteristics and chronic health risk assessment of metal elements in atmospheric PM_{2.5} in two districts of Jinan from 2016 to 2020[J]. *J Shandong Univ (Health Sci)*, 2021, 59(12): 63-69,77.
- [29] 王琼, 李亚伟, 郝舒欣, 等. 北京市大气PM_{2.5}中17种元素的污染特征研究[J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(12): 1069-1072.
WANG Q, LI YW, HAO SX, et al. Pollution characteristics of 17 kinds of elements in ambient PM_{2.5} in Beijing[J]. *J Environ Health*, 2016, 33(12): 1069-1072.
- [30] LI Y, ZHANG Z, LIU H, et al. Characteristics, sources and health risk assessment of toxic heavy metals in PM_{2.5} at a megacity of southwest China[J]. *Environ Geochem Health*, 2016, 38(2): 353-362.
- [31] HAO Y, GUO Z, YANG Z, et al. Seasonal variations and sources of various elements in the atmospheric aerosols in Qingdao, China[J]. *Atmos Res*, 2007, 85(1): 27-37.
- [32] 刘彦飞, 于倩, 许丹, 等. 哈尔滨大气PM_{2.5}中人为源元素化学组成特征及来源[J]. *黑龙江科技学院学报*, 2012, 22(3): 247-251.
LIU YF, YU Q, XU D, et al. Chemical composition characteristics and origin of artificial pollution elements in PM_{2.5} in Harbin[J]. *J Heilongjiang Univ Sci Technol*, 2012, 22(3): 247-251.
- [33] 李永福, 孙平, 李江华. 铅致癌分子机制的研究进展[J]. *癌症进展*, 2017, 15(12): 1386-1388.
LI YF, SUN P, LI JH. Advances in molecular mechanisms of lead carcinogenesis[J]. *Oncol Prog*, 2017, 15(12): 1386-1388.
- [34] 山东省生态环境厅. 2013山东省环境状况公报[EB/OL]. [2022-06-20]. http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjzkgb/201406/t20140630_1122657.html.
Shandong Provincial Department of Ecological Environment. Environmental status bulletin of Shandong province 2013[EB/OL]. [2022-06-20]. http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjzkgb/201406/t20140630_1122657.html.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)