

# 大气PM<sub>2.5</sub>暴露对居民超额死亡的风险评估

张开月<sup>1</sup>, 李小琴<sup>1</sup>, 夏俊鹏<sup>1</sup>, 戴翔宇<sup>1</sup>, 巫晶晶<sup>1</sup>, 蒋萌<sup>1</sup>, 王芳<sup>2</sup>, 陆盛华<sup>1</sup>

1.扬州市疾病预防控制中心环境健康科, 江苏 扬州 225100; 2.徐州医科大学, 江苏 徐州 221004

**摘要:** **目的** 评估大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 暴露对居民超额死亡的风险。**方法** 通过中国疾病预防控制中心信息系统收集2015—2021年江苏省扬州市居民死亡资料, 通过扬州市环境监测站和扬州市气象局分别收集同期PM<sub>2.5</sub>日均质量浓度和气象资料。基于广义相加模型分析大气PM<sub>2.5</sub>暴露对居民非意外死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的影响, 采用超额危险度 (ER) 和超额死亡数评估超额死亡风险。**结果** 2015—2021年扬州市PM<sub>2.5</sub>年均质量浓度  $M(Q_R)$  为38.00 (31.95)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 由2015年的51.75 (32.82)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  降至2021年的28.00 (23.42)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 年均非意外死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡数  $M(Q_R)$  分别为96 (22)、9 (5) 和38 (13) 例。PM<sub>2.5</sub>质量浓度每升高10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 对居民非意外死亡、居民呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的影响分别在累积滞后1 d ( $ER=0.528\%$ ,  $95\%CI: 0.293\% \sim 0.763\%$ )、累积滞后2 d ( $ER=0.917\%$ ,  $95\%CI: 0.125\% \sim 1.714\%$ ) 和累积滞后1 d ( $ER=0.595\%$ ,  $95\%CI: 0.232\% \sim 0.961\%$ ) 最大。2015—2021年扬州市归因于大气PM<sub>2.5</sub>暴露造成的居民非意外、呼吸系统疾病和循环系统疾病超额死亡数分别为2 125、412和977例; 与2015年相比, 2021年超额死亡数分别下降66.95%、75.53%和64.42%。**结论** 大气PM<sub>2.5</sub>质量浓度升高可能增加居民超额死亡的风险; 与2015年相比, 2021年大气PM<sub>2.5</sub>暴露导致的超额死亡数下降。

**关键词:** 细颗粒物; 死亡; 广义相加模型; 健康风险评估

**中图分类号:** R122 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5087 (2024) 11-0950-04

## Excess mortality risk associated with atmospheric PM<sub>2.5</sub> exposure

ZHANG Kaiyue<sup>1</sup>, LI Xiaoqin<sup>1</sup>, XIA Junpeng<sup>1</sup>, DAI Xiangyu<sup>1</sup>, WU Jingjing<sup>1</sup>, JIANG Meng<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>, LU Shenghua<sup>1</sup>  
1.Department of Environmental Health, Yangzhou Center for Disease Control and Prevention, Yangzhou, Jiangsu 225100, China; 2.Xuzhou Medical University, Xuzhou, Jiangsu 221004, China

**Abstract: Objective** To evaluate the risk of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) on excess mortality among residents. **Methods** The data of residential mortality in Yangzhou City, Jiangsu Province from 2015 to 2021 were collected from the Chinese Disease Prevention and Control Information System. The average daily mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and meteorology data were collected from the Yangzhou Environmental Monitoring Station and Yangzhou Meteorological Bureau, respectively. The effects of PM<sub>2.5</sub> on non-accidental mortality, mortality of respiratory diseases and mortality of circulatory diseases were evaluated using a generalized additive model. The risk of excess mortality was evaluated using excess risk (ER) and the number of excess mortality. **Results** The median average annual mass concentration of PM<sub>2.5</sub> was 38.00 (interquartile range, 31.95)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in Yangzhou City from 2015 to 2021, decreasing from 51.75 (interquartile range, 32.82)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 2015 to 28.00 (interquartile range, 23.42)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 2021. The median average annual number of non-accidental mortality, mortality of respiratory diseases and mortality of circulatory diseases were 96 (interquartile range, 22), 9 (interquartile range, 5) and 38 (interquartile range, 13) cases, respectively. The greatest effects of per 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  increase in PM<sub>2.5</sub> mass concentration on non-accidental mortality, mortality of respiratory diseases, and mortality of circulatory diseases were seen at a cumulative lag of 1 day ( $ER=0.528\%$ ,  $95\%CI: 0.293\% \sim 0.763\%$ ), a cumulative lag of 2

**DOI:** 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2024.11.007

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (72204211); 扬州市疾病预防控制中心本级课题项目 (YZJK202304)

**作者简介:** 张开月, 硕士, 主管医师, 主要从事环境与健康工作

**通信作者:** 陆盛华, E-mail: 470495319@qq.com

days ( $ER=0.917\%$ ,  $95\%CI: 0.125\%-1.714\%$ ) and a cumulative lag of 1 day ( $ER=0.595\%$ ,  $95\%CI: 0.232\%-0.961\%$ ), respectively. The number of excess mortality caused by  $PM_{2.5}$  on non-accidental mortality, mortality of respiratory diseases, and mortality of circulatory diseases in Yangzhou City from 2015 to 2021 were 2 125, 412 and 977 cases, respectively; compared with 2015, the number of excess mortality in 2021 decreased by 66.95%, 75.53% and 64.42%, respectively.

**Conclusions** An increase in the mass concentration of atmospheric  $PM_{2.5}$  may elevate the risk of excess mortality among residents. Compared to 2015, the number of excess deaths attributed to exposure to atmospheric  $PM_{2.5}$  declined in 2021.

**Keywords:** fine particulate matter; mortality; generalized additive model; health risks assessment

世界卫生组织 (WHO) 报告显示, 全球 99% 的人口生活在空气质量不达标的环境中<sup>[1]</sup>。我国每年约 400 万人因空气污染过早死亡, 其中细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 超标是空气污染的主要问题<sup>[2]</sup>。研究表明  $PM_{2.5}$  质量浓度升高会增加居民因呼吸系统疾病和循环系统疾病死亡的风险<sup>[3-5]</sup>。本研究收集江苏省扬州市 2015—2021 年大气  $PM_{2.5}$  质量浓度和居民死亡资料, 评估大气  $PM_{2.5}$  暴露对居民超额死亡的风险。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

2015—2021 年扬州市居民死亡资料来源于中国疾病预防控制中心信息系统。根据《疾病和有关健康问题的国际统计分类 (第十次修订本)》(ICD-10), 选择非意外 (A00~R99)、呼吸系统疾病 (J00~J99) 和循环系统疾病 (I00~I99) 死亡资料纳入分析。同期  $PM_{2.5}$  日均质量浓度来源于扬州市环境监测站。同期气象资料来源于扬州市气象局, 包括日均温度和日均相对湿度。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 时间序列分析

采用 R 4.4.1 软件构建广义相加模型分析  $PM_{2.5}$  暴露对居民死亡风险。构建模型:

$$\log[EY_t] = \beta Z_t + DOW + ns(time, \nu) + ns(temperature, \nu) + ns(RH, \nu) + intercept$$

式中:  $Y_t$  为第  $t$  日的死亡数;  $\beta$  为暴露-反应关系系数;  $Z_t$  为第  $t$  日  $PM_{2.5}$  日均质量浓度;  $DOW$  为星期几效应, 作为哑变量纳入模型;  $ns()$  为自然平滑样条函数;  $time$  为日期;  $\nu$  为自由度,  $temperature$  为日均温度;  $RH$  为日均相对湿度;  $intercept$  为截距。基于赤池信息准则最小法则, 日期的  $\nu$  为 6, 日均温度和日均相对湿度的  $\nu$  均为 3。

#### 1.2.2 超额死亡风险分析

采用超额危险度 (excess risk, ER) 表示  $PM_{2.5}$

质量浓度每升高  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 每日死亡数增加或减少的百分比。分别计算大气  $PM_{2.5}$  暴露当日至滞后 5 d 的单日滞后 ER 值及累积滞后 1~5 d 的 ER 值。计算公式:  $ER = [exp(\beta \times 10) - 1] \times 100\%$ 。

参考 WS/T 666—2019《大气污染人群健康风险评估技术规范》<sup>[6]</sup>, 计算  $PM_{2.5}$  暴露导致的超额死亡数。计算公式如下:

$$\Delta X = X \times \left\{ 1 - \frac{1}{exp[\beta \times (C - C_0)]} \right\}$$

式中:  $\Delta X$  为每日超额死亡数;  $X$  为每日死亡数;  $\beta$  为广义相加模型的暴露-反应关系系数;  $C$  为  $PM_{2.5}$  日均质量浓度;  $C_0$  为  $PM_{2.5}$  参考质量浓度, 参照 GB 3095—2012《环境空气质量标准》<sup>[7]</sup> 的二级标准,  $PM_{2.5}$  年均质量浓度限值为  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

## 2 结果

### 2.1 扬州市 $PM_{2.5}$ 和居民死亡情况

2015—2021 年扬州市  $PM_{2.5}$  年均质量浓度  $M(Q_R)$  为  $38.00 (31.95) \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 由 2015 年的  $51.75 (32.82) \mu\text{g}/\text{m}^3$  降至 2021 年的  $28.00 (23.42) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015—2021 年扬州市居民非意外死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡数分别为 251 020、24 875 和 100 844 例, 年均死亡数  $M(Q_R)$  分别为 96 (22)、9 (5) 和 38 (13) 例。见表 1。年均温度  $M(Q_R)$  为  $17.00 (7.60) \text{ }^\circ\text{C}$ , 年均相对湿度  $M(Q_R)$  为  $76.00\% (9.00\%)$ 。

### 2.2 大气 $PM_{2.5}$ 暴露对居民超额死亡的影响

大气  $PM_{2.5}$  暴露对居民非意外死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的影响均存在滞后效应。 $PM_{2.5}$  质量浓度每升高  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 对居民非意外死亡的影响在累积滞后 1 d 达到最大; 对居民呼吸系统疾病死亡的影响在累积滞后 2 d 达到最大; 对居民循环系统疾病死亡的影响在累积滞后 1 d 达到最大。见表 2。

### 2.3 大气 $PM_{2.5}$ 暴露导致的超额死亡数

2015—2021 年扬州市大气  $PM_{2.5}$  暴露导致的非

意外超额死亡数为 2 125 例，占非意外死亡数的 0.85%；呼吸系统疾病超额死亡数为 412 例，占呼吸系统疾病死亡数的 1.66%；循环系统疾病超额死亡数为 977 例，占循环系统疾病死亡数的 0.97%。与 2015 年相比，2021 年大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露的非意外、呼吸系统疾病、循环系统疾病超额死亡数分别下降 66.95%、75.53% 和 64.42%。见表 1。

表 1 2015—2021 年扬州市死亡数和大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露导致的超额死亡数

Table 1 The number of mortality and excess mortality caused by atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Yangzhou City from 2015 to 2021

年份	死亡数			超额死亡数		
	非意外	呼吸系 统疾病	循环系 统疾病	非意外	呼吸系 统疾病	循环系 统疾病
2015	34 061	3 944	13 192	466	94	208
2016	35 613	3 767	14 774	382	77	182
2017	33 435	3 496	13 241	323	64	144
2018	36 107	3 792	14 136	341	68	153
2019	35 572	3 745	14 123	263	54	123
2020	37 590	2 978	15 465	196	32	93
2021	38 642	3 153	15 913	154	23	74
合计	251 020	24 875	100 844	2 125	412	977

### 3 讨论

2015—2021 年扬州市大气 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度  $M(Q_n)$  为 38.00 (31.95)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超过国家二级标准限值 (35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[7]</sup>，但 2021 年 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度低于 2015 年，与以往研究结果<sup>[8]</sup> 相同。这可能与

2013 年国务院《大气污染防治行动计划》<sup>[9]</sup> 出台以来，扬州市聚焦重点行业、重点区域采取的整治措施有关，大气污染防治措施取得成效。

大气 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度每升高 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，非意外死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的最大滞后效应 ER 值分别为 0.528%、0.917% 和 0.595%，与江苏省常州市<sup>[10]</sup> 的研究结果相近，但远低于江苏省南通市<sup>[11]</sup> 2017—2019 年的研究结果 (11.85%、17.18%、15.50%)。这可能与不同地区 PM<sub>2.5</sub> 成分、气候特征和人口结构等不同有关<sup>[12]</sup>，提示在本地区开展大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露健康风险评估的重要性。

滞后效应分析结果显示，大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露对非意外死亡和循环系统疾病死亡的单日滞后和累积滞后效应均在当日达到最大，对呼吸系统疾病死亡的单日滞后和累积滞后效应均在滞后 1 d 达到最大，与以往研究结果<sup>[10, 13]</sup> 相近。这种差异可能与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度、暴露强度及个体的敏感性有关，也可能与疾病引起多器官生理功能变化的滞后效应有关<sup>[14]</sup>。

超额死亡数分析结果显示，随着大气 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的降低，归因于大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露的非意外、呼吸系统疾病和循环系统疾病超额死亡数降低，与 2015 年相比，2021 年分别下降了 66.95%、75.53% 和 64.42%。这一结果与北京市<sup>[15]</sup>、南京市<sup>[16]</sup> 和南昌市<sup>[17]</sup> 的研究结果相近，表明降低 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度对减少居民超额死亡具有显著的健康效益，为开展健康教育、预测预警工作提供依据。

表 2 大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露与死亡的暴露-反应关系 [ER (95%CI) %]

Table 2 Exposure-response relationship between atmospheric PM<sub>2.5</sub> and mortality [ER (95%CI) %]

滞后时间/d	非意外死亡	呼吸系统疾病死亡	循环系统疾病死亡
单日滞后			
0	0.451 (0.249~0.653) ①	0.231 (-0.370~0.836)	0.541 (0.228~0.856) ①
1	0.324 (0.128~0.521) ①	0.779 (0.196~1.365) ①	0.337 (0.032~0.642) ①
2	0.083 (-0.107~0.273)	0.478 (-0.083~1.043)	0.133 (-0.161~0.429)
3	0.001 (-0.190~0.180)	0.061 (-0.491~0.617)	0.022 (-0.268~0.314)
4	-0.143 (-0.330~0.043)	-0.481 (-1.028~0.068)	-0.204 (-0.493~0.085)
5	-0.182 (-0.367~0.003)	-0.317 (-0.861~0.229)	-0.152 (-0.439~0.136)
累积滞后			
1	0.528 (0.293~0.763) ①	0.725 (0.026~1.430) ①	0.595 (0.232~0.961) ①
2	0.499 (0.233~0.765) ①	0.917 (0.125~1.714) ①	0.589 (0.177~1.003) ①
3	0.467 (0.171~0.765) ①	0.892 (0.011~1.782) ①	0.565 (0.105~1.027) ①
4	0.364 (0.037~0.691) ①	0.560 (-0.408~1.538)	0.418 (-0.089~0.928)
5	0.238 (-0.117~0.595)	0.345 (-0.706~1.407)	0.308 (-0.244~0.862)

注：①表示  $P < 0.05$ 。

- 共识意见 (2017 年) [J]. 中国中西医结合消化杂志, 2017, 25 (11): 805-811.
- [17] 刘珊珊, 陆忠华. ALT 水平正常的慢性乙型肝炎患者的血清学特征及肝组织病理学分析 [J]. 临床肝胆病杂志, 2024, 40 (5): 940-945.
- [18] 康艳. 肝功能、血脂、血糖联合检测应用于非酒精性脂肪肝患者病情评估的价值 [J]. 临床医学, 2023, 43 (2): 47-49.
- [19] LEE J H, BAEK S Y, JANG E J, et al. Oxysveratrol ameliorates nonalcoholic fatty liver disease by regulating hepatic lipogenesis and fatty acid oxidation through liver kinase B1 and AMP-activated protein kinase [J]. Chem Biol Interact, 2018, 289 (3): 68-74.
- [20] 唐英琪, 李英, 田坚. 2 型糖尿病患者合并非酒精性脂肪性肝病的影响因素分析 [J]. 预防医学, 2021, 33 (3): 292-294.
- [21] DAI W, LIU H Y, ZHANG T J, et al. Dairy product consumption was associated with a lower likelihood of non-alcoholic fatty liver disease: a systematic review and meta-analysis [J/OL]. Front Nutr, 2023 [2024-08-23]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1119118>.
- [22] HAO S Q, MING L, LI Y F, et al. Modulatory effect of camel milk on intestinal microbiota of mice with non-alcoholic fatty liver disease [J/OL]. Front Nutr, 2022, 9 [2024-08-23]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1072133>.
- [23] AHADI M, MOLOOGHI K, MASOUDIFAR N, et al. A review of non-alcoholic fatty liver disease in non-obese and lean individuals [J]. J Gastroenterol Hepatol, 2021, 36 (6): 1497-1507.

收稿日期: 2024-05-23 修回日期: 2024-08-23 本文编辑: 高碧玲

## (上接第 952 页)

本研究存在一定局限性。采用环境监测站 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度代表个体暴露水平, 在评估健康效应时可能存在偏差。其他大气污染物可能与 PM<sub>2.5</sub> 存在交互作用, 影响评估模型的稳定性。未来研究应进一步考虑这些因素以提高评估的准确性。

## 参考文献

- [1] World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution [EB/OL]. [2024-10-07]. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [2] WANG Y Z, WANG Y F, XU H, et al. Ambient air pollution and socioeconomic status in China [J/OL]. Environ Health Perspect, 2022, 130 (6) [2024-10-07]. <https://doi.org/10.1289/EHP9872>.
- [3] 徐珊珊, 吕焯, 刘卫艳, 等. 大气 PM<sub>2.5</sub> 污染对淳安县居民呼吸系统疾病和症状的影响 [J]. 预防医学, 2021, 33 (10): 988-993.
- [4] LI T T, ZHANG Y, JIANG N, et al. Ambient fine particulate matter and cardiopulmonary health risks in China [J]. Chin Med J (Engl), 2023, 136 (3): 287-294.
- [5] 李朝康, 龚科米, 吕焯, 等. 杭州市大气污染对居民死亡的影响研究 [J]. 预防医学, 2023, 35 (1): 11-16.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 大气污染人群健康风险评估技术规范: WS/T 666-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [7] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [8] 张开月, 金武, 姚庆兵, 等. 扬州市空气细颗粒物与居民死亡关系的时间序列分析 [J]. 南通大学学报 (医学版), 2019, 39 (4): 299-301.
- [9] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. [2024-10-07]. [https://www.gov.cn/jzwgk/2013-09/12/content\\_2486773.htm](https://www.gov.cn/jzwgk/2013-09/12/content_2486773.htm).
- [10] 陈志永, 易仁玲, 陈小岳, 等. 2015—2021 年常州市大气 PM<sub>2.5</sub> 暴露对人群超额死亡的风险评估 [J]. 实用预防医学, 2024, 31 (6): 641-645.
- [11] 何智敏, 曹子轩, 许滋宁, 等. 南通市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染所致人群超额死亡风险评估 [J]. 环境与健康杂志, 2021, 38 (2): 152-156.
- [12] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (1): 166-174.
- [13] 何晓庆, 罗进斌, 王小红, 等. 金华市大气污染物短期暴露对居民死亡和寿命损失年的影响 [J]. 预防医学, 2024, 36 (5): 383-387.
- [14] 王秦, 李焯焯, 陈晨, 等. 我国雾霾天气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及其对人群健康的影响 [J]. 中华医学杂志, 2013, 93 (34): 2691-2694.
- [15] 陈菁, 彭金龙, 徐彦森. 北京市 2014—2020 年 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 时空分布与健康效应评估 [J]. 环境科学, 2021, 42 (9): 4071-4082.
- [16] 孙凤霞, 熊丽林, 杨华凤, 等. 2013—2019 年南京市大气 PM<sub>2.5</sub> 短期暴露对人群超额死亡风险评估 [J]. 中华疾病控制杂志, 2021, 25 (11): 1257-1263.
- [17] 江文斌, 鲁柯柯, 何加芬, 等. 2016—2020 年南昌市大气 PM<sub>2.5</sub> 短期暴露对人群循环系统疾病超额死亡的风险评估 [J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13 (4): 280-285.

收稿日期: 2024-08-27 修回日期: 2024-10-07 本文编辑: 古兰芳