

• 疾病控制 •

PM_{2.5}暴露对急性心肌梗死死亡和寿命损失的影响

梁海晴, 容思靖, 康会丽, 王军

广州市海珠区疾病预防控制中心, 广东 广州 510288

摘要: **目的** 了解细颗粒物 (PM_{2.5}) 暴露对急性心肌梗死 (AMI) 死亡和寿命损失年 (YLL) 的影响。**方法** 通过中国人口死亡信息登记管理系统和广东省死亡医学证明管理信息系统收集 2020—2024 年广州市海珠区死亡病例资料, 同期大气污染物资料和气象资料分别来源于全国城市空气质量实时发布平台国家环境监测点和广州市天文台。采用分布滞后非线性模型 (DLNM) 建立单污染物模型及多污染物模型, 分析 PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响。**结果** 2020—2024 年海珠区 AMI 死亡病例 2 466 例, 男性 949 例, 女性 1 517 例; <65 岁 530 例, 65~74 岁 494 例, >74 岁 1 442 例。日均死亡例数 $M(Q_R)$ 为 1.3 (2.0) 例, 日均 YLL $M(Q_R)$ 为 16.4 (24.8) 人年。PM_{2.5} 日均质量浓度 $M(Q_R)$ 为 24.3 (18.0) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。单污染物模型结果显示, PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响均在累积滞后 7 d 时效应最大, PM_{2.5} 日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, AMI 死亡风险增加 8.793% (95%CI: 4.201%~13.588%), YLL 增加 2.059 (95%CI: 1.081~3.037) 人年。性别分层分析结果显示, PM_{2.5} 暴露对男性 AMI 死亡和男性、女性 YLL 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$); 年龄分层分析结果显示, PM_{2.5} 暴露对 <65 岁、65~74 岁组 AMI 死亡和 YLL 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$); 不同性别、年龄组间差异无统计学意义 (均 $P>0.05$)。多污染物模型结果显示, 在累积滞后 7 d 时, 原模型分别引入 NO₂、SO₂ 和 O₃ 后, PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$), 效应值较单污染物模型升高; 原模型引入 PM₁₀ 或 PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 后, PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响无统计学意义 (均 $P>0.05$)。**结论** 暴露于 PM_{2.5} 可增加 AMI 死亡风险和 YLL, 且对不同性别、年龄居民的影响存在差异。

关键词: 细颗粒物; 急性心肌梗死; 寿命损失年; 分布滞后非线性模型

中图分类号: R122.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5087 (2025) 11-1145-06

Effects of fine particulate matter exposure on acute myocardial infarction mortality and life lost

LIANG Haiqing, RONG Sijing, KANG Huili, WANG Jun

Haizhu District Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, Guangdong 510288, China

Abstract: Objective To investigate the effects of fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure on acute myocardial infarction (AMI) mortality and years of life lost (YLL). **Methods** Mortality data in Haizhu District, Guangzhou City from 2020 to 2024 were collected by the China Population Death Information Registration Management System and Guangdong Death Certificate Management System. Air pollution and meteorological data of the same period were obtained from the national environmental monitoring sites on the National Real-time Air Quality Release Platform and the Guangzhou Observatory, respectively. The single-pollutant model and multi-pollutant model were established by distributed lag non-linear model to analyze the effects of PM_{2.5} on AMI mortality and YLL. **Results** From 2020 to 2024, there were 2 466 AMI death cases in Haizhu District, including 949 males and 1 517 females. Among them, 530 cases were aged <65 years, 494 cases were aged 65–74 years, and 1 442 cases were aged >74 years. The median daily average number of deaths was 1.3 (interquartile range, 2.0) cases, and the median daily average YLL was 16.4 (interquartile range, 24.8) person years. The median daily average mass concentration of PM_{2.5} was 24.3 (interquartile range, 18.0) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In single-pollutant models, the maximum effects of PM_{2.5} on AMI mortality and YLL were observed at a cumulative lag of 7 days. For

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2025.11.013

基金项目: 2024 年广州市卫生健康科技项目 (20241A010090)

作者简介: 梁海晴, 硕士, 主管医师, 主要从事疾病预防与控制工作

通信作者: 王军, E-mail: 1046594653@qq.com

per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increment in the daily average concentration of $\text{PM}_{2.5}$, the excess risk of AMI mortality increased by 8.793% (95%CI: 4.201% to 13.588%), and YLL increased by 2.059 (95%CI: 1.081 to 3.037) person-years. Gender-stratified analyses showed that $\text{PM}_{2.5}$ significantly affected AMI mortality in males and YLL in males and females (all $P < 0.05$). Age-stratified analyses revealed that $\text{PM}_{2.5}$ significantly affected AMI mortality and YLL among residents aged < 65 years and 65–74 years (all $P < 0.05$). However, the difference between genders or the two age groups was not statistically significant (both $P > 0.05$). In multi-pollutant models, when NO_2 , SO_2 , or O_3 were introduced respectively at a cumulative lag of 7 days, the effects of $\text{PM}_{2.5}$ on AMI mortality and YLL were enhanced compared to the single-pollutant model (all $P < 0.05$). When PM_{10} was introduced alone or in combination with PM_{10} , SO_2 , NO_2 , and O_3 , the effects of $\text{PM}_{2.5}$ on AMI mortality and YLL were not statistically significant (all $P > 0.05$). **Conclusion** Exposure to $\text{PM}_{2.5}$ may increase the risk of AMI mortality and YLL, with varying effects across populations of different genders and ages.

Keywords: fine particulate matter; acute myocardial infarction; years of life lost; distributed lag non-linear model

《2023 中国卫生健康统计年鉴》显示,心脏病是我国城市及农村居民的首要死亡原因,其中冠心病死亡率居心脏病首位^[1]。急性心肌梗死(acute myocardial infarction, AMI)作为冠心病的主要临床表现形式,2005 年以来死亡率呈快速上升趋势,疾病负担较重^[2]。大气污染居我国死因第三位,细颗粒物(fine particulate matter, $\text{PM}_{2.5}$)是主要大气污染物,与心血管疾病密切相关,对人体存在广泛的不良健康影响^[3]。超额危险度(excess risk, ER)主要评估死亡风险,寿命损失年(years of life lost, YLL)综合考虑过早死亡和死亡时的期望寿命,是反映疾病负担的重要指标。本研究收集 2020—2024 年广州市海珠区死亡病例资料、同期大气污染物资料和气象资料,考虑 $\text{PM}_{2.5}$ 所致健康效应存在非线性和滞后性,采用分布滞后非线性模型(distributed lag non-linear model, DLNM)分析 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源

2020—2024 年海珠区死亡病例资料来源于中国人口死亡信息登记管理系统和广东省死亡医学证明管理信息系统;同期大气污染物资料来源于全国城市空气质量实时发布平台(<https://air.cnemc.cn:18007>)国家环境监测点数据;同期气象资料来源于广州市天文台。

1.2 方法

1.2.1 资料收集

按照《疾病和有关健康问题的国际统计分类(第十次修订本)》(ICD-10),AMI 编码为 I21~I22。收集死亡日期为 2020 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日死亡病例资料,包括性别、出生日期、死亡日期、死亡地点和根本死因等。根据世界卫生组织 2019 年

中国居民寿命表的期望寿命^[4],计算 AMI 死亡病例的 YLL。本研究将年龄划分为 < 65 岁、65~74 岁和 > 74 岁组^[5]。 $\text{PM}_{2.5}$ 、可吸入颗粒物(inhalable particulate matter, PM_{10})、二氧化硫(sulphur dioxide, SO_2)、二氧化氮(nitrogen dioxide, NO_2)和臭氧(ozone, O_3)的日均质量浓度基于国家环境监测点逐小时质量浓度数据计算,日均温度和日均相对湿度基于广州市天文台逐小时数据计算,采用均值插补法处理逐小时质量浓度数据缺失值。

1.2.2 构建 DLNM

AMI 死亡例数近似服从 Poisson 分布,采用基于 Poisson 分布的 DLNM 分析 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露对 AMI 死亡的影响,模型函数为 $\log[E(Y_t)] = \alpha + cb(X_t, \nu = 3) + ns(\text{time}, \nu = 7 \times 5) + ns(\text{temp}_m, \nu = 2) + ns(\text{rh}_m, \nu = 2) + \text{DOW} + \text{Holiday}$; AMI YLL 服从正态分布,采用基于正态分布的 DLNM 分析 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露对 AMI YLL 的影响,模型函数为 $E(YLL_t) = \alpha + cb(X_t, \nu = 3) + ns(\text{time}, \nu = 7 \times 5) + ns(\text{temp}_m, \nu = 2) + ns(\text{rh}_m, \nu = 2) + \text{DOW} + \text{Holiday}$ 。

以上式中: Y_t 、 YLL_t 分别为第 t 日 AMI 死亡例数、YLL; α 为截距; $cb()$ 表示交叉基函数, X_t 为第 t 日 $\text{PM}_{2.5}$ 日均质量浓度, ν 为自由度; $ns()$ 为自然立方样条函数, time 为控制长期趋势和季节性的时间变量, temp_m 为日均温度, rh_m 为日均相对湿度; DOW 为星期几效应; Holiday 为节假日效应。根据前期研究^[6-7],以模型广义交叉检验(general cross validation, GCV)值最小为标准,设定最大滞后时间为 7 d 并确定 ν 。 $\text{PM}_{2.5}$ 对 AMI 每日死亡例数的影响以 ER 值及其 95%CI 描述,对 AMI 每日 YLL 的影响以 β 值及其 95%CI 描述。

根据单污染物模型确定效应最明显的滞后时间,按性别和年龄组进行分层分析,构建 $\text{PM}_{2.5}$ 和其他 4 种大气污染物(PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 O_3)的多污染物模

型，评估 PM_{2.5} 是否存在独立健康效应。

1.2.3 分层分析

按性别、年龄分别分层分析，基于 Z 分布计算层间差异的 95%CI，对层间差异进行比较^[8]，公式为 $(\hat{Q}_1 - \hat{Q}_2) \pm 1.96\sqrt{(s_{\hat{x}1})^2 + (s_{\hat{x}2})^2}$ 。式中： \hat{Q}_1 、 \hat{Q}_2 为各分层的效应估计值（ER 值或 β 值）； $s_{\hat{x}1}$ 和 $s_{\hat{x}2}$ 分别为对应估计值的标准误。

1.3 统计分析

采用 R 4.4.2 软件的 dlnm、splines 和 mgcv 软件包统计分析。采用 Spearman 秩相关分析 PM_{2.5} 与其他大气污染物、气象因素的相关性。采用 ER 值和 β 值分别表示 PM_{2.5} 日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，AMI 死亡风险变化的百分比、YLL 的变化量。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 基本情况

2020—2024 年海珠区 AMI 死亡病例 2 466 例，其中男性 949 例，女性 1 517 例；<65 岁 530 例，65~74 岁 494 例，>74 岁 1 442 例；日均死亡例数 $M(Q_R)$ 为 1.3 (2.0) 例，日均 YLL $M(Q_R)$ 为 16.4

(24.8) 人年。日均温度 $M(Q_R)$ 为 24.0 (9.4) $^{\circ}\text{C}$ ，日均相对湿度 $M(Q_R)$ 为 71.4% (18.4%)。PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 O₃ 日均质量浓度 $M(Q_R)$ 分别为 24.3 (18.0)、42.1 (27.1)、6.2 (2.1)、33.6 (18.0) 和 57.7 (37.7) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.2 PM_{2.5} 与其他大气污染物、气象因素的相关性分析

PM_{2.5} 与 PM₁₀ ($r_s=0.949$)、NO₂ ($r_s=0.638$)、SO₂ ($r_s=0.580$) 和 O₃ ($r_s=0.399$) 呈正相关 (均 $P<0.001$)，与日均温度 ($r_s=-0.291$) 和日均相对湿度 ($r_s=-0.381$) 呈负相关 (均 $P<0.001$)。

2.3 PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响

PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡的影响在滞后 0、1 d 和累积滞后 1~7 d 有统计学意义 (均 $P<0.05$)；累积滞后 7 d 时效应最大，PM_{2.5} 日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，AMI 死亡风险增加 8.793% (95%CI: 4.201%~13.588%)。PM_{2.5} 暴露对 AMI YLL 的影响在滞后 0、1、2 d 和累积滞后 1~7 d 有统计学意义 (均 $P<0.05$)；累积滞后 7 d 时效应最大，PM_{2.5} 日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，YLL 增加 2.059 (95%CI: 1.081~3.037) 人年。见图 1。

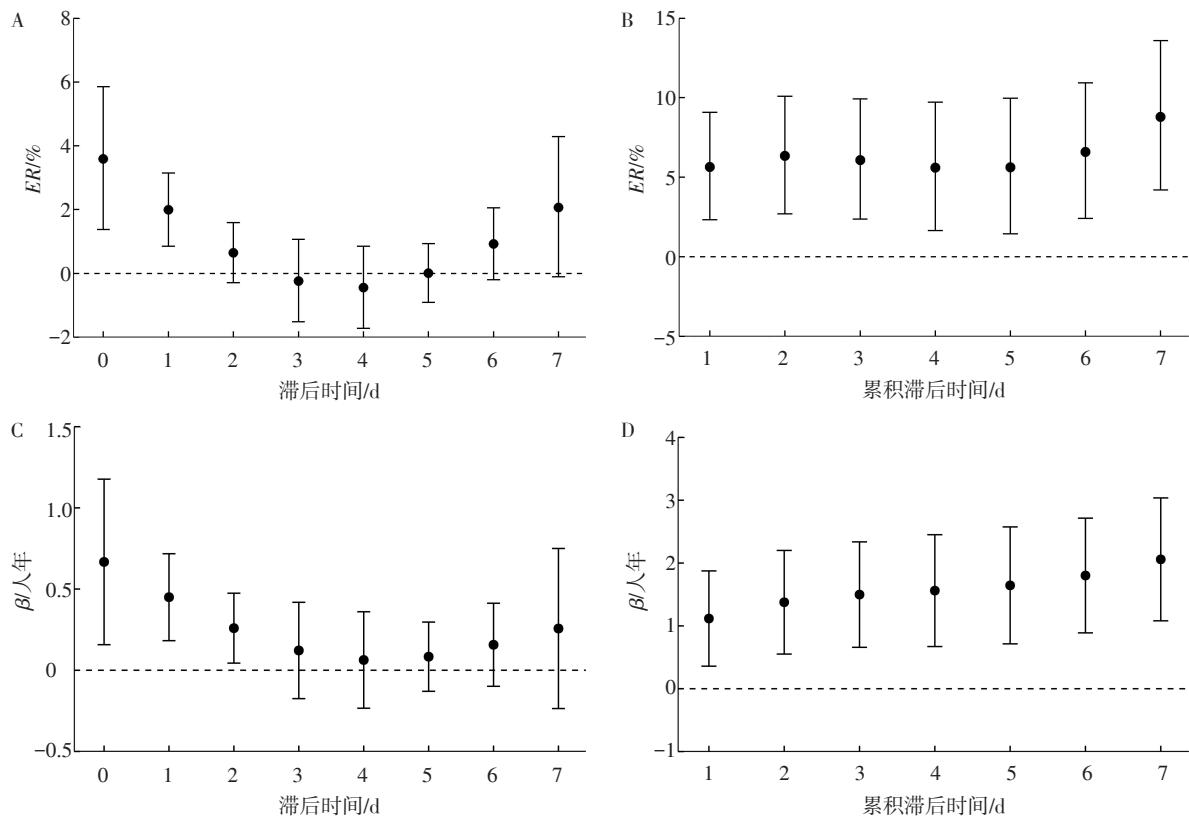


图 1 PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的滞后效应分析

Figure 1 Lag effects of PM_{2.5} on AMI mortality and YLL

2.4 PM_{2.5}暴露对不同性别 AMI 死亡和 YLL 的影响

PM_{2.5}暴露对男性 AMI 死亡的影响有统计学意义 ($P<0.05$), PM_{2.5}日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 男性 AMI 死亡风险增加 9.400% (95%CI: 3.513%~15.621%)。PM_{2.5}暴露对男性、女性 AMI YLL 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$), 其中对男性影响的效应更大, PM_{2.5}日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 男性 YLL 增加 1.532 (95%CI: 0.718~2.345) 人年; 不同性别间差异无统计学意义 (95%CI: -2.016%~0.008%, $P=0.052$)。见表 1。

2.5 PM_{2.5}暴露对不同年龄组 AMI 死亡和 YLL 的影响

PM_{2.5}暴露对 <65 岁、65~74 岁组 AMI 死亡和

YLL 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$), 层间比较结果显示, 2 个年龄组在 PM_{2.5}对 AMI 死亡 (95%CI: -17.223%~13.040%, $P=0.787$) 和 YLL (95%CI: -0.652%~1.161%, $P=0.582$) 影响的差异无统计学意义; PM_{2.5}暴露对 >74 岁组 AMI 死亡和 YLL 的影响无统计学意义 (均 $P>0.05$)。PM_{2.5}暴露对 65~74 岁组 AMI 死亡影响效应最大, PM_{2.5}日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, AMI 死亡风险增加 16.462% (95%CI: 6.020%~27.933%); PM_{2.5}暴露对 <65 岁组 AMI YLL 的影响效应最大, PM_{2.5}日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, YLL 增加 1.039 (95%CI: 0.236~1.842) 人年。见表 1。

表 1 PM_{2.5}暴露对不同性别、年龄组 AMI 死亡和 YLL 的滞后效应分析
Table 1 Lag effects of PM_{2.5} on AMI mortality and YLL among different gender and age groups

项目	死亡		YLL	
	ER (95%CI) /%	P值	β (95%CI) /人年	P值
性别				
女	7.147 (-0.152~14.980)	0.064	0.527 (0.003~1.051)	0.049
男	9.400 (3.513~15.621)	0.002	1.532 (0.718~2.345)	<0.001
年龄/岁				
<65	14.371 (4.409~25.283)	0.007	1.039 (0.236~1.842)	0.011
65~74	16.462 (6.020~27.933)	0.003	0.785 (0.364~1.205)	<0.001
>74	4.171 (-1.590~10.269)	0.168	0.235 (-0.094~0.564)	0.161

2.6 多污染物模型分析

PM_{2.5}暴露在累积滞后 7 d 时, 分别引入 NO₂、SO₂ 和 O₃, 对 AMI 死亡和 YLL 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$), 效应值较单污染物模型升高; 分别引

入 PM₁₀ 或 PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃, PM_{2.5}暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响无统计学意义 (均 $P>0.05$)。见表 2。

表 2 PM_{2.5}暴露对 AMI 死亡和 YLL 影响的多污染物模型分析
Table 2 Multi-pollutant model analysis of effects of PM_{2.5} on AMI mortality and YLL

变量	死亡		YLL	
	ER (95%CI) /%	P值	β (95%CI) /人年	P值
PM _{2.5} +PM ₁₀	6.936 (-7.352~23.427)	0.377	0.810 (-2.245~3.865)	0.603
PM _{2.5} +NO ₂	10.116 (2.872~17.869)	0.008	2.331 (0.829~3.833)	0.002
PM _{2.5} +SO ₂	12.320 (6.089~18.916)	<0.001	2.517 (1.281~3.754)	<0.001
PM _{2.5} +O ₃	9.648 (4.755~14.769)	<0.001	2.261 (1.196~3.325)	<0.001
PM _{2.5} +PM ₁₀ +SO ₂ +NO ₂ +O ₃	4.409 (-10.219~21.421)	0.585	0.577 (-2.623~3.777)	0.724

3 讨论

本研究采用 DLNM 进行时间序列分析, 发现 2020—2024 年海珠区 PM_{2.5}暴露增加 AMI 死亡风险和 YLL, 且对不同性别、年龄组 AMI 死亡和 YLL 的影响存在差异。PM_{2.5}暴露增加 AMI 死亡风险, PM_{2.5}

日均质量浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 在累积滞后 7 d 时 AMI 死亡风险增加 8.793%。既往研究结果显示, 呼和浩特市^[9] PM_{2.5}日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 滞后 1 d 时循环系统疾病死亡风险增加 6.31% (95%CI: 2.39%~10.42%); 山西省阳泉市^[10] PM_{2.5}日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 滞后 0 d 时心血管疾

病死亡风险增加 2.27% (95%CI: 0.73%~3.20%), 与本研究结果基本一致, 但滞后性较不明显。CHEN 等^[5]对我国 30 个县进行 Meta 分析发现, PM_{2.5} 日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 滞后 0 d 时 AMI 死亡风险增加 0.42% (95%CI: 0.03%~0.81%); 江苏省扬州市^[11] PM_{2.5} 日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 累积滞后 1 d 时循环系统疾病死亡风险增加 0.595% (95%CI: 0.232%~0.961%), 与本研究的效应值和滞后时间差异较大。以上结果可能与不同地区的 PM_{2.5} 来源及成分、人群健康水平和医疗资源, 以及研究方法和模型设定存在差异有关^[12-13]。

本研究结果显示, PM_{2.5} 暴露增加 AMI YLL, PM_{2.5} 日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 累积滞后 7 d 时 AMI YLL 增加 2.059 人年。目前研究主要评估大气污染物暴露对全死因、心血管系统疾病或缺血性心脏病疾病负担的影响: 北京市昌平区^[14] PM_{2.5} 日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 累积滞后 21 d 时心血管系统疾病 YLL 增加 1.47 (95%CI: 0.23~2.70) 人年; 石家庄市^[8] PM_{2.5} 日均质量浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 滞后 0 d 时心血管系统疾病 YLL 增加 1.73 (95%CI: 0.15~3.32) 人年。以上研究虽涉及的疾病不同, 但与本研究的效应值接近。

分层分析结果显示, PM_{2.5} 暴露对不同性别和年龄组 AMI 死亡和 YLL 的影响存在差异。性别方面, PM_{2.5} 暴露仅对男性 AMI 死亡的影响有统计学意义, 可能因为男性室外活动及职业暴露时间更长, 且男性吸烟、饮酒比例更高, 吸烟者、饮酒者对 PM_{2.5} 所致的心血管疾病更易感^[15-16]。年龄方面, PM_{2.5} 暴露对 <65 岁、65~74 岁组 AMI 死亡和 YLL 的影响均有统计学意义, 对 >74 岁组则无统计学意义。可能因为 >74 岁组户外活动较少, 或存在幸存者偏差。CHEN 等^[5]研究发现, PM_{2.5} 暴露仅对 65~74 岁居民全死因有统计学意义, 与本研究结果存在差异。目前关于性别、年龄与大气污染物暴露对心血管疾病影响的研究结果^[17-18]不一致, 性别、年龄分层后样本量分布不均, 可能对结果产生一定影响, PM_{2.5} 暴露对心血管疾病影响在不同人群中的差异仍待进一步研究。

在多污染物模型中, 累积滞后 7 d 时, 原模型引入 PM₁₀ 或 PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 后, PM_{2.5} 暴露对 AMI 死亡和 YLL 的影响无统计学意义。可能与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 存在强相关性有关, 二者的排放源和化学组分相似^[19], 当模型同时纳入 PM₁₀ 及包括其在内的多种大气污染物时, 会产生共线性问题。原模型分别引入

NO₂、SO₂ 和 O₃ 后, PM_{2.5} 对 AMI 死亡和 YLL 影响有统计学意义, 且效应值较单污染物模型升高, 与既往研究结果^[8, 10]不一致, 提示 PM_{2.5} 与其他大气污染物存在相互作用, 且模型设计及数据处理等均会影响研究结果。建议相关部门加强大气污染综合治理, 提高空气质量, 保障公众健康。

参考文献

- [1] 国家卫生健康委员会. 2023 中国卫生健康统计年鉴 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2024.
National Health Commission of China. China health statistics year-book 2023 [M]. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2024. (in Chinese)
- [2] 国家心血管病中心, 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2023 概要 [J]. 中国循环杂志, 2024, 39 (7): 625-660.
National Center for Cardiovascular Diseases, the Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on cardiovascular health and diseases in China 2023: an updated summary [J]. Chin Circul J, 2024, 39 (7): 625-660. (in Chinese)
- [3] GBD 2021 Risk Factors Collaborators. Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 [J]. Lancet, 2024, 403 (10440): 2162-2203.
- [4] World Health Organization. Global Health Observatory data repository: life tables by country China [EB/OL]. [2025-08-07]. <https://apps.who.int/gho/data/view.main.60340?lang=en>.
- [5] CHEN C, ZHU P F, LAN L, et al. Short-term exposures to PM_{2.5} and cause-specific mortality of cardiovascular health in China [J]. Environ Res, 2018, 161: 188-194.
- [6] HUANG K, DING K, YANG X J, et al. Association between short-term exposure to ambient air pollutants and the risk of tuberculosis outpatient visits: a time-series study in Hefei, China [J/OL]. Environ Res, 2020, 184 [2025-08-07]. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109343>.
- [7] HO A F W, HU Z X, WOO T Z C, et al. Ambient air quality and emergency hospital admissions in Singapore: a time-series analysis [J/OL]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19 (20) [2025-08-07]. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013336>.
- [8] 曲玥, 曾芳婷, 陈风格, 等. 石家庄市大气颗粒物对居民循环系统疾病死亡的寿命损失年影响的研究 [J]. 现代预防医学, 2023, 50 (3): 426-431, 450.
QU Y, ZENG F T, CHEN F G, et al. A study on the effect of atmospheric particulate matter on life lost years of death from circulatory diseases in Shijiazhuang [J]. Mod Prev Med, 2023, 50 (3): 426-431, 450. (in Chinese)
- [9] 贾蕊芮, 杨升美, 张晨光, 等. 2018—2021 年 PM_{2.5} 与呼和浩特市居民循环系统疾病死亡的关系分析 [J]. 实用预防医学, 2024, 31 (6): 645-649.

- JIA X R, YANG S M, ZHANG C G, et al. Relationship between PM_{2.5} and deaths due to circulatory system diseases among residents in Hohhot city, 2018–2021 [J]. *Pract Prev Med*, 2024, 31 (6): 645–649. (in Chinese)
- [10] 张文军, 雷立健. 2019—2020年阳泉市大气PM_{2.5}污染与居民心血管疾病死亡效应的时间序列分析 [J]. *实用预防医学*, 2023, 30 (8): 908–912.
- ZHANG W J, LEI L J. Time series analysis on the effect between atmospheric PM_{2.5} pollution and deaths from cardiovascular diseases among residents in Yangquan city, 2019–2020 [J]. *Pract Prev Med*, 2023, 30 (8): 908–912. (in Chinese)
- [11] 张开月, 李小琴, 夏俊鹏, 等. 大气PM_{2.5}暴露对居民超额死亡的风险评估 [J]. *预防医学*, 2024, 36 (11): 950–952.
- ZHANG K Y, LI X Q, XIA J P, et al. Excess mortality risk associated with atmospheric PM_{2.5} exposure [J]. *China Prev Med J*, 2024, 36 (11): 950–952. (in Chinese)
- [12] TIAN Y H, MA Y, WU J H, et al. Ambient PM_{2.5} chemical composition and cardiovascular disease hospitalizations in China [J]. *Environ Sci Technol*, 2024, 58 (37): 16327–16335.
- [13] 王照恩, 卢海琼, 王晨, 等. 不同来源PM_{2.5}长期暴露对人群健康影响的研究进展 [J]. *科学通报*, 2025, 70 (22): 3616–3628.
- WANG Z E, LU H Q, WANG C, et al. A review of advances in health effects from long-term exposure to PM_{2.5} from different sources [J]. *Sci Bull*, 2025, 70 (22): 3616–3628 (in Chinese)
- [14] 李静, 王焕新, 屈龙, 等. PM_{2.5}对北京市昌平区居民心血管系统疾病死亡的短期影响 [J]. *中华流行病学杂志*, 2019, 40 (3): 331–334.
- LI J, WANG H X, QU L, et al. Short term effect of PM_{2.5} on cardiovascular mortality in residents in Changping district, Beijing [J]. *Chin J Epidemiol*, 2019, 40 (3): 331–334. (in Chinese)
- [15] ZHANG Y Q. All-cause mortality risk and attributable deaths associated with long-term exposure to ambient PM_{2.5} in Chinese adults [J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55 (9): 6116–6127.
- [16] LUO H H, ZHANG Q L, YU K X, et al. Long-term exposure to ambient air pollution is a risk factor for trajectory of cardiometabolic multimorbidity: a prospective study in the UK Biobank [J/OL]. *EBioMedicine*, 2022, 84 [2025–08–07]. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104282>.
- [17] 方博, 李琦, 晋珊, 等. 2013—2020年上海市空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物短期暴露导致的循环系统疾病超额死亡风险评估 [J]. *疾病监测*, 2024, 39 (12): 1547–1554.
- FANG B, LI Q, JIN S, et al. Risk assessment of excess circulatory disease mortality attributed to short-term exposure to particulate matter with aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$ in Shanghai, 2013–2020 [J]. *Dis Surveill*, 2024, 39 (12): 1547–1554. (in Chinese)
- [18] 赵静. 乌海市空气污染与心血管疾病死亡风险相关关系的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2022.
- ZHAO J. Study on the relationship between air pollution and cardiovascular disease mortality risk in Wuhai city [D]. Hohhot: Inner Mongolia Medical University, 2022. (in Chinese)
- [19] 黄晓波, 刘冠伦, 梁永贤, 等. 深圳市道路扬尘化学组分特征及来源研究 [J]. *当代化工研究*, 2024 (18): 105–107.
- HUANG X B, LIU G L, LIANG Y X, et al. Study on chemical composition characteristics and sources of road dust in Shenzhen [J]. *Mod Chem Res*, 2024 (18): 105–107. (in Chinese)
- 收稿日期: 2025–05–16 修回日期: 2025–08–07 本文编辑: 高碧玲

(上接第1144页)

- [12] 杨丽娟, 段禹, 张燕杰, 等. 动态因子模型在我国人均GDP对肺结核发病率影响研究中的应用 [J]. *中国卫生统计*, 2019, 36 (3): 351–353, 357.
- YANG L J, DUAN Y, ZHANG Y J, et al. Application of dynamic factor model in the research of per capita gross domestic production on the incidence of tuberculosis in China [J]. *Chin J Health Stat*, 2019, 36 (3): 351–353, 357. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国民政部, 全国老龄办. 2023年国家老龄事业发展公报 [EB/OL]. [2025–08–25]. <https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202410/P020241012307602653540.pdf>.
- [14] 倪妮, 黄飞, 王倪, 等. 2016—2020年全国流动人口肺结核流行特征分析 [J]. *疾病监测*, 2023, 38 (7): 819–824.
- NI N, HUANG F, WANG N, et al. Epidemic characteristics of pulmonary tuberculosis in migrants in China, 2016–2020 [J]. *Dis Surveill*, 2023, 38 (7): 819–824. (in Chinese)
- [15] JAMSHIDI P, DANAEI B, ARBABI M, et al. Silicosis and tuberculosis: a systematic review and meta-analysis [J/OL]. *Pulmonology*, 2025, 31 (1) [2025–08–25]. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2023.05.001>.
- 收稿日期: 2025–05–06 修回日期: 2025–08–25 本文编辑: 徐亚慧