· 疾病控制 ·

大气污染物对清远市呼吸系统疾病死亡的影响

张家泳，罗燕东，郭莉敏

清远市疾病预防控制中心，广东 清远 511500

摘要：目的　分析2018—2022年广东省清远市大气污染物细颗粒物（$PM_{2.5}$）、臭氧（O_3）和一氧化碳（CO）对呼吸系统疾病死亡的影响，为优化呼吸系统疾病防控策略提供依据。**方法**　通过中国疾病预防控制中心人口死亡信息登记管理系统收集2018—2022年清远市呼吸系统疾病死亡资料，通过中国环境监测总站收集同期清远市大气污染物资料。构建分布滞后非线性模型（DLNM）分析大气污染物与呼吸系统疾病死亡的关系，计算归因分值（AF）和归因死亡例数评估大气污染物对呼吸系统疾病死亡的归因风险。**结果**　2018—2022年清远市报告呼吸系统疾病死亡病例17 008例，年均报告死亡率为88.63/10万；$PM_{2.5}$、O_3和CO质量浓度*M*（Q_R）分别为23.83（21.22）、53.00（32.82）和770.83（295.29）μg/m³。DLNM分析结果显示，0～7 d滞后期内，呼吸系统疾病死亡的累积效应*RR*值总体随着$PM_{2.5}$、O_3和CO质量浓度的升高而上升。暴露当日（滞后0 d），$PM_{2.5}$（155.04 μg/m³）、CO（2 253.12 μg/m³）质量浓度较高时，死亡风险较大，*RR*值分别为1.520（95%*CI*：1.228～1.904）、1.891（95%*CI*：1.650～2.314）；滞后7 d，O_3质量浓度较高（148.08 μg/m³）时，死亡风险较大，*RR*值为1.341（95%*CI*：1.088～1.713）。暴露于$PM_{2.5}$、O_3和CO所致的呼吸系统疾病死亡*AF*分别为14.522%（95%*CI*：4.320%～24.265%）、8.598%（95%*CI*：3.760%～13.351%）和24.994%（95%*CI*：14.903%～34.056%），归因死亡例数分别为2 469（95%*CI*：735～4 128）、1 463（95% *CI*：639～2 270）和4 250（95%*CI*：2 534～5 793）例。**结论**　清远市$PM_{2.5}$、O_3和CO质量浓度与呼吸系统疾病死亡风险呈非线性关系，且受滞后效应影响；3种大气污染物暴露对呼吸系统疾病死亡存在明确归因负担，CO的归因负担最高，其次为$PM_{2.5}$和O_3。

关键词：$PM_{2.5}$；O_3；CO；呼吸系统疾病；分布滞后非线性模型；归因风险

中图分类号：R195　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-5087（2026）06-0630-05

Effect of air pollutants on respiratory disease mortality in Qingyuan City

ZHANG Jiayong, LUO Yandong, GUO Limin

Qingyuan Center for Disease Control and Prevention, Qingyuan, Guangdong 511500, China

Abstract: Objective　To analyze the effects of ambient air pollutants including fine particulate matter ($PM_{2.5}$), ozone (O_3) and carbon monoxide (CO) on mortality from respiratory diseases in Qingyuan City, Guangdong Province from 2018 to 2022, so as to provide the evidence for optimizing prevention and control strategies for respiratory diseases. **Methods**　Data on deaths caused by respiratory diseases in Qingyuan City from 2018 to 2022 were collected through the population death registration and management system of the Chinese Center for Disease Control and Prevention, and the corresponding data on ambient air pollutants were collected through the China National Environmental Monitoring Center. A distributed lag non-linear model (DLNM) was established to explore the association between air pollutants and mortality from respiratory diseases. Attributable fraction (AF) and attributable deaths were calculated to assess the attributable risks of air pollutants for respiratory disease mortality. **Results**　A total of 17 008 deaths due to respiratory diseases were reported in Qingyuan City from 2018 to 2022, with an average annual mortality of 88.63/10^5. The median mass concentrations of $PM_{2.5}$, O_3 and CO were 23.83 (interquartile range, 21.22), 53.00 (interquartile range, 32.82), and 770.83 (interquartile range, 295.29) μg/m³, respectively. The results of DLNM analysis showed that within the lag period

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.06.020

基金项目：清远市科技计划项目（230914088723979）

作者简介：张家泳，硕士，主管医师，主要从事传染病预防控制工作，E-mail：986219368@qq.com

of 0–7 days, the cumulative *RR* on respiratory disease mortality generally increased along with the rising concentrations of $PM_{2.5}$, O_3 and CO. On the exposure day (lag 0 day), high concentrations of $PM_{2.5}$ (155.04 μg/m³) and CO (2 253.12 μg/m³) were associated with higher mortality risk, with the *RR* values of 1.520 (95%*CI*: 1.228–1.904) and 1.891 (95%*CI*: 1.650–2.314) respectively. A high O_3 concentration (148.08 μg/m³) at lag 7 days also led to higher mortality risk, with an *RR* value of 1.341 (95%*CI*: 1.088–1.713). The *AF* of respiratory disease mortality related to $PM_{2.5}$, O_3 and CO exposure was 14.522% (95%*CI*: 4.320%–24.265%), 8.598% (95%*CI*: 3.760%–13.351%) and 24.994% (95%*CI*: 14.903%–34.056%) respectively. The attributable deaths were 2 469 (95%*CI*: 735–4 128), 1 463 (95%*CI*: 639–2 270) and 4 250 (95%*CI*: 2 534–5 793). **Conclusions** Concentrations of $PM_{2.5}$, O_3 and CO in Qingyuan City had a non-linear relationship with the mortality risk of respiratory diseases, which was affected by lag effects. Exposure to the three air pollutants imposed substantial attributable burdens on respiratory disease mortality. CO contributed the highest burden, followed by $PM_{2.5}$ and O_3.

Keywords: particulate matter; ozone; carbon monoxide; respiratory diseases; distributed lag non-linear model; attributable risk

大气污染成为导致呼吸系统疾病发病和死亡的主要原因之一[1]，2023 年全球约有 790 万例死亡可归因于大气污染[2]。我国大气污染疾病负担较重，大气污染物对慢性阻塞性肺疾病等呼吸系统疾病死亡的贡献仍居前列，广东省的相关死亡负担处于全国中等水平[3]。研究表明，暴露于大气污染物可增加呼吸系统疾病死亡风险[4]，且暴露-反应关系呈现非线性与滞后性特征[5]。清远市地处广东省西北部，建材、陶瓷和有色金属加工等高排放行业比例较高，叠加地形、气象影响，呈现典型的复合型污染特征。近年来清远市人口老龄化程度加深，≥65 岁人口比例由 2018 年的 10.5% 上升至 2022 年的 13.8%[6]，老年人是呼吸系统疾病高发人群，疾病负担不容忽视。本研究采用分布滞后非线性模型（distributed lag non-linear model，DLNM）分析清远市大气污染物对呼吸系统疾病死亡的影响，为优化呼吸系统疾病防控策略提供依据。

1　资料与方法

1.1　资料来源

清远市呼吸系统疾病死亡资料来源于中国疾病预防控制信息系统人口死亡信息登记管理系统。大气污染物资料来源于中国环境监测总站（https://www.cnemc.cn）。人口资料来源于清远市统计年鉴。节假日资料来源于国务院办公厅平台发布的《国家法定节假日安排》。

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（第十次修订版）》（ICD-10）进行疾病编码，呼吸系统疾病编码为 J00~J99。通过中国疾病预防控制信息系统人口死亡信息登记管理系统收集 2018 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日清远市呼吸系统疾病死亡资料，包括年龄、根本死因和死亡时间等。通过中国环境监测总站收集同期清远市大气污染物资料，包括细颗粒物（$PM_{2.5}$）、可吸入颗粒物（PM_{10}）、二氧化硫（SO_2）、二氧化氮（NO_2）和一氧化碳（CO）的日均质量浓度，以及臭氧（O_3）的日最大 8 h 平均质量浓度。

1.2.2　DLNM 构建

构建 DLNM，从暴露和滞后 2 个维度分析大气污染物与呼吸系统疾病死亡的关系[7]。DLNM 通过建立交叉基函数，采用 quasi-Poisson 分布作为连接函数，同时控制时间效应、星期几和节假日效应等混杂因素。建立每日大气污染物质量浓度矩阵。大气污染物暴露引发的呼吸系统疾病累积效应多集中在 7 d 以内[8-10]，本研究将最大滞后时间设置为 7 d。采用等比间隔设置滞后拐点，通过调整 ν 以避免模型过拟合。DLNM 公式：$\log[E(Y_t)] = \alpha + cb(X_t, lag) + ns(Z_t, \nu) + ns(time, \nu) + as.factor(dow) + as.factor(holiday)$。其中，$Y_t$ 为第 t 日的呼吸系统疾病死亡例数，α 为截距，X_t 为第 t 日的大气污染物日均质量浓度，Z_t 为第 t 日未纳入交叉基的其他大气污染物指标，lag 为滞后时间，cb（X_t，lag）为交叉基函数，ns 为自然平滑样条函数，time 为长期时间趋势，dow（星期几）效应和 holiday（节假日）效应以因子变量形式纳入模型，以控制其对模型的影响。基于最小赤池信息准则确定模型最优 ν[11]。选择 $PM_{2.5}$、O_3 和 CO 作为本研究重点分析的暴露因子，PM_{10}、SO_2 和 NO_2 作为协变量纳入模型，以控制多污染物的混杂效应。基于 DLNM 绘制累积暴露-反应曲线和暴露-滞后-反应关系图，并计算相对危险度（relative risk，RR）及其 95% 置信区间（confidence interval，CI）评估大气污染物质量浓度与呼吸系统疾病死亡的关系。

1.2.3　归因风险评估

在 DLNM 分析的基础上，参照 GASPARRINI 等[7]提出的方法，计算大气污染物暴露所致呼吸系统疾病死亡的归因分值（attributable fraction，AF）和归因死亡例数。采用二分类暴露模式（暴露或非暴露），将大气污染物质量浓度分布的第 2.5 百分位数（$P_{2.5}$）设为基线暴露水平。根据 $P_{2.5}$、第 50、75 和 97.5 百分位数（P_{50}、P_{75} 和 $P_{97.5}$）划分较低质量浓度（$P_{2.5}$~P_{50}）、中等质量浓度（P_{50}~P_{75}）和较高质量浓度（P_{75}~$P_{97.5}$），分别计算各区段相对于基线水平的累积效应 *RR* 值，进而估算对应的 *AF* 及归因死亡例数。归因死亡例数=*AF*×呼吸系统疾病死亡总例数。

1.3　统计分析

采用 Excel 2016 软件整理数据，采用 SPSS 21.0 软件统计分析。定量资料服从正态分布的采用均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）描述，不服从正态分布的采用中位数和四分位数间距［*M*（Q_R）］描述；定性资料采用相对数描述。采用线性插值法填补缺失值。采用 R 4.2.1 软件中的 DLNM 包构建 DLNM 模型、绘制累积暴露-反应曲线和暴露-滞后-反应关系图并进行归因风险评估。检验水准 α=0.05。

2　结　果

2.1　基本情况

2018—2022 年清远市报告呼吸系统疾病死亡病例 17 008 例，年均报告死亡率为 88.63/10 万。其中男性 10 955 例，占 64.41%；女性 6 053 例，占 35.59%。年龄 *M*（Q_R）为 81.00（14.00）岁。2018—2022 年清远市呼吸系统疾病每日死亡 *M*（Q_R）为 9.00（5.00）例。同期 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、O_3 和 CO 质量浓度 *M*（Q_R）分别为 23.83（21.22）、39.85（30.59）、8.04（3.84）、25.35（15.56）、53.00（32.82）和 770.83（295.29）μg/m³。

2.2　大气污染物对呼吸系统疾病死亡的影响

2.2.1　$PM_{2.5}$ 对呼吸系统疾病死亡的影响

0~7 d 滞后期内，呼吸系统疾病死亡的累积效应 *RR* 值总体随着 $PM_{2.5}$ 质量浓度的升高而上升，见图 1A。在暴露当日（滞后 0 d），$PM_{2.5}$ 质量浓度较高（155.04 μg/m³）时，死亡风险较大，*RR* 值为 1.520（95%*CI*：1.228~1.904），见图 2A。暴露于 $PM_{2.5}$ 所致的呼吸系统疾病死亡 *AF* 为 14.522%（95%*CI*：4.320%~24.265%），归因死亡例数为 2 469（95%*CI*：735~4 128）例。暴露于较高质量浓度 $PM_{2.5}$ 所致的呼吸系统疾病死亡 *RR* 值为 1.167（95%*CI*：1.013~1.358），*AF* 为 2.839%（95%*CI*：0.250%~5.221%），归因死亡例数为 91（95%*CI*：8~168）例；暴露于较低质量浓度和中等质量浓度 $PM_{2.5}$ 所致呼吸系统疾病死亡的归因风险无统计学意义。

2.2.2　O_3 对呼吸系统疾病死亡的影响

0~7 d 滞后期内，呼吸系统疾病死亡的累积效应 *RR* 值总体随着 O_3 质量浓度的升高而上升，见图 1B。在滞后 7 d，O_3 质量浓度较高（148.08 μg/m³）时，死亡风险较大，*RR* 值为 1.341（95%*CI*：1.088~1.713），见图 2B。暴露于 O_3 所致的呼吸系统疾病死亡 *AF* 为 8.598%（95%*CI*：3.760%~13.351%），归因死亡例数为 1 463（95%*CI*：639~2 270）例。暴露于中等质量浓度 O_3 所致的呼吸系统疾病死亡 *RR* 值为 1.240（95%*CI*：1.052~1.459），*AF* 为 5.260%（95%*CI*：1.274%~8.757%），归因死亡例数为 445（95%*CI*：107~741）例；暴露于较低质量浓度和较高质量浓度 O_3 所致呼吸系统疾病死亡的归因风险无统计学意义。

2.2.3　CO 对呼吸系统疾病死亡的影响

0~7d 滞后期内，呼吸系统疾病死亡的累积效应 *RR* 值总体随着 CO 质量浓度的升高而上升，见图 1C。在暴露当日（0 d），CO 质量浓度较高（2 253.12 μg/m³）时，死亡风险较大，*RR* 值为 1.891（95%*CI*：1.650~2.314），见图 2C。暴露于 CO 所致的呼吸系统疾病死亡 *AF* 为 24.994%（95%*CI*：14.903%~34.056%），归因死亡例数为 4 250（95%*CI*：2 534~5 793）例；暴露于较低质量浓度、中等质量浓度、较高质量浓度 CO 所致的呼吸系统疾病死亡 *RR* 值分别为 1.355（95%*CI*：1.150~1.622）、1.451（95%*CI*：1.236~1.687）和 1.511（95%*CI*：1.262~1.778）；*AF* 分别为 5.246%（95%*CI*：3.091%~7.190%）、13.009%（95%*CI*：7.608%~17.950%）和 4.051%（95%*CI*：1.881%~5.955%），归因死亡例数分别为 170（95%*CI*：100~233）、1 078（95%*CI*：631~1 488）和 140（95%*CI*：65~206）例。

3　讨　论

本研究结果显示，2018—2022 年清远市 $PM_{2.5}$、O_3 和 CO 质量浓度与呼吸系统疾病死亡风险呈非线性关系，且受滞后效应影响，与其他研究结果[12]一致。在 3 种大气污染物中，CO 的 *AF* 较高，归因死亡例数较多；$PM_{2.5}$、O_3 的 *AF* 相对较低，归因死亡例数相对较少。

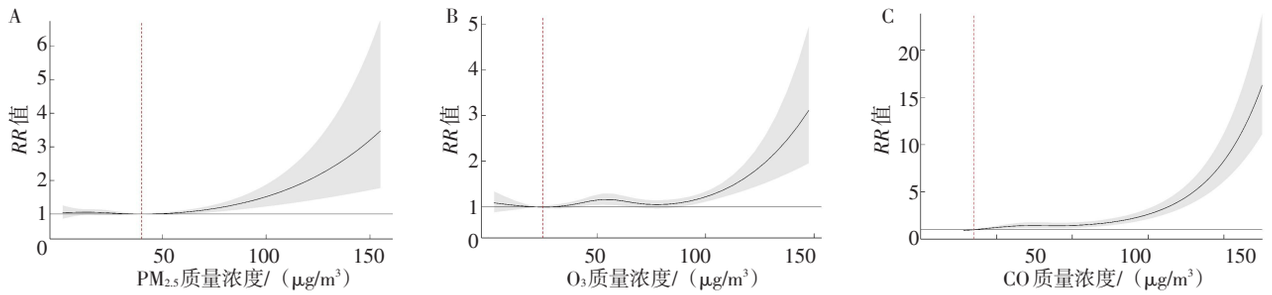


图 1　2018—2022 年清远市 $PM_{2.5}$、O_3和CO对呼吸系统疾病死亡风险影响的累积效应

Figure 1　Cumulative effects of $PM_{2.5}$, O_3 and CO on respiratory disease mortality risk in Qingyuan City from 2018 to 2022

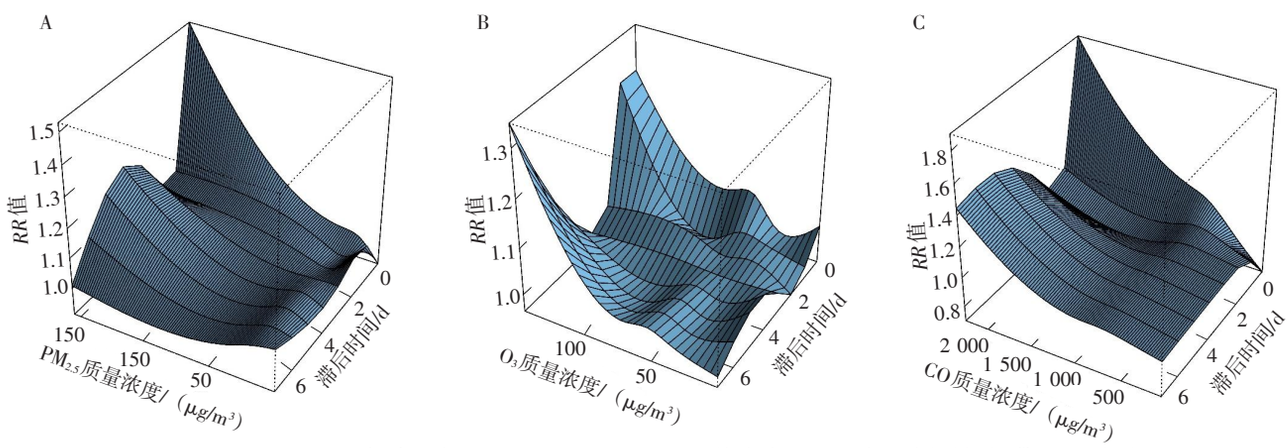


图 2　2018—2022 年清远市 $PM_{2.5}$、O_3和CO对呼吸系统疾病死亡风险影响的暴露-滞后-反应关系

Figure 2　Exposure-lag-response relationship of $PM_{2.5}$, O_3 and CO on respiratory disease mortality risk in Qingyuan City from 2018 to 2022

$PM_{2.5}$暴露与呼吸系统疾病死亡风险呈剂量-反应正相关，归因风险分析结果显示，14.522% 的呼吸系统死亡可归因于 $PM_{2.5}$ 暴露。有其他研究显示，13.8% 的死亡归因于 $PM_{2.5}$，其中呼吸系统疾病比例最高[13]。我国石家庄市[14]的研究同样验证了正相关关系，并发现污染水平降低可显著减弱健康效应。其致病机制主要与 $PM_{2.5}$ 的物理化学特性有关：亚微米级粒径（<2.5 μm）使其具备长距离传输能力，表面吸附的多环芳烃等有毒物质可穿透呼吸道防御屏障，通过氧化应激和炎症反应导致肺泡结构损伤，严重时可引发呼吸衰竭导致死亡[15]。结合清远市建材和陶瓷等工业排放特征，建议重点加强陶瓷、水泥等高排放企业的烟气深度治理与无组织排放管控，并在呼吸道疾病流行期针对老年人、儿童和慢性呼吸系统疾病患者发布健康提示。

O_3暴露对呼吸系统疾病死亡影响呈现滞后效应，一定质量浓度的 O_3 暴露可增加呼吸系统疾病死亡风险，8.598% 的呼吸系统疾病死亡可归因于 O_3 暴露，且效应在时间维度上呈延迟分布。一项基于全国 96 个区县的研究结果显示，O_3 质量浓度每升高 10 μg/m³，呼吸系统疾病死亡率增加 0.76%[16]。其致病机制在于：O_3 可经呼吸道深入肺部，激活肺部应激信号，诱导细胞因子、白介素等炎症介质产生，促使中性粒细胞向气道和肺泡迁移与聚集，从而导致呼吸系统炎症及组织损伤[17]。建议重点加强 O_3 前体物的协同减排，在 O_3 高值时段发布公众健康防护指引，避免老年人和慢性呼吸系统疾病患者在高质量浓度 O_3 时段进行户外活动，并在基层医疗机构加强相关患者的长期随访及哮喘、慢性阻塞性肺疾病急性加重的早期识别。

CO 暴露与呼吸系统疾病死亡呈现明显的剂量-反应关系，*RR* 值随着 CO 质量浓度的升高而增加。此外，清远市 24.994% 的呼吸系统死亡可归因于 CO 暴露，YANG 等[18]研究结果显示，北京市 2.39% 的呼吸系统死亡归因于 CO 暴露。*AF* 存在较大差异，可能主要是由于以下两方面原因：其一，污染源结构不同，清远市陶瓷、冶金等传统工业比例较高，工业燃烧过程中 CO 排放强度大，而北京市的 CO 主要来源于机动车尾气；其二，模型参数设置差异（如滞后时间、基线暴露水平和协变量控制等）也可能影响归因风险估算。从毒理学机制来看，CO 的毒性作用主要源于其与血红蛋白的结合能力约为氧气的 240 倍，

这种竞争性结合可显著降低血红蛋白运输氧的能力，导致组织缺氧，进而加剧呼吸系统疾病的临床症状[13]。建议针对陶瓷、水泥、建材和有色金属加工等高耗能行业推进工艺优化，提高燃烧效率，从源头降低 CO 排放；同时将 CO 质量浓度纳入本地空气污染健康风险预警体系，面对呼吸系统慢性病患者、老年人等敏感人群发布分级健康防护指引。

综上所述，清远市 $PM_{2.5}$、O_3 和 CO 质量浓度与呼吸系统疾病死亡风险呈非线性关系，且受滞后效应影响；3 种大气污染物暴露对呼吸系统疾病死亡存在明确归因负担，CO 的归因负担最高，其次为 $PM_{2.5}$ 和 O_3。清远市大气污染物 $PM_{2.5}$、O_3 和 CO 质量浓度与呼吸系统疾病的死亡之间存在明确的关联性，呼吸系统疾病的死亡可以直接或间接地归因于大气污染物 $PM_{2.5}$、O_3 和 CO 的影响，这凸显了改善空气质量对保护公众健康的重要性。

参考文献

[1] HU S L, XUE X W, XU J Y, et al.Association of short-term exposure to ambient air pollution and temperature with bronchiectasis mortality: a nationwide time-stratified case-crossover study [J/OL]. EBioMedicine, 2024, 110 [2026-06-04]. http://doi.org/10.1016/j.ebiom.2024.105465.

[2] Health Effects Institute.State of global air 2025: a report on air pollution and its role in the world's leading causes of death [EB/OL]. [2026-06-04].https://www.stateofglobalair.org/resources.

[3] YU T C, JIANG Y X, CHEN R J, et al.National and provincial burden of disease attributable to fine particulate matter air pollution in China, 1990-2021: an analysis of data from the Global Burden of Disease Study 2021 [J].Lancet Planet Health, 2025, 9 (3): 174-185.

[4] DĄBROWIECKI P, BADYDA A, CHCIAŁOWSKI A, et al.Influence of selected air pollutants on mortality and pneumonia burden in three Polish Cities over the years 2011-2018 [J/OL].J Clin Med, 2022, 11 (11) [2026-06-04]. http://doi.org/10.3390/jcm11113084.

[5] SUN W, DING C, JIANG Z Y, et al.The impact of ambient air pollution on allergic rhinitis symptoms: a prospective follow-up study [J/OL].Toxics, 2024, 12 (9) [2026-06-04].http://doi.org/10.3390/toxics12090663.

[6] 清远市统计局 . 清远统计年鉴 2023 [M]. 北京：中国统计出版社，2023.

[7] GASPARRINI A, LEONE M.Attributable risk from distributed lag models [J/OL].BMC Med Res Methodol, 2014, 14 (1) [2026-06-04].http://doi.org/10.1186/1471-2288-14-55.

[8] FENG Q, CHEN Y, SU S, et al.Acute effect of fine particulate matter and respiratory mortality in Changsha, China: a time-series analysis [J/OL].BMC Pulm Med, 2022, 22 (1) [2026-06-04].http://doi.org/10.1186/s12890-022-02216-3.

[9] WU H, LU K K, FU J J.A time-series study for effects of ozone on respiratory mortality and cardiovascular mortality in Nanchang, Jiangxi Province, China [J/OL].Front Public Health, 2022, 10 [2026-06-04].http://doi.org/10.3389/fpubh.2022.864537.

[10] SONG J H, QIU W H, HUANG X Z, et al.Association of ambient carbon monoxide exposure with hospitalization risk for respiratory diseases: a time series study in Ganzhou, China [J/OL]. Front Public Health, 2023, 11 [2026-06-04]. http://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1106336.

[11] HAO Q, GAO Q, ZHAO R, et al.The effect and attributable risk of daily temperature on category C infectious diarrhea in Guangdong Province, China [J].Environ Sci Pollut Res Int, 2022, 29 (16): 23963-23974.

[12] 李朝康，龚科米，吕烨，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.

[13] GRISALES-ROMERO H, PIÑEROS-JIMÉNEZ J G, NIETO E, et al.Local attributable burden disease to $PM_{2.5}$ ambient air pollution in Medellín, Colombia, 2010-2016 [J/OL]. F1000Research, 2021, 10 [2026-06-04]. http://doi.org/10.12688/f1000research.52025.2.

[14] GUAN M Y, SUN C Y, TANG D J, et al.A time-series analysis on the association between fine particulate matter and daily mortality: Shijiazhuang City, Hebei Province, China, 2015-2020 [J]. China CDC Wkeely, 2022, 4 (11): 226-231.

[15] GOU A P, TAN G Z, DING X B, et al.Urban-rural difference in the lagged effects of $PM_{2.5}$ and PM_{10} on COPD mortality in Chongqing, China [J/OL].BMC Public Health, 2023, 23 (1) [2026-06-04].http://doi.org/10.1186/s12889-023-16113-9.

[16] 何敏 . 中国 96 个区/县大气 $PM_{2.5}$、NO_2 和 O_3 对人群死亡的急性效应及其交互作用 [D]. 北京：中国疾病预防控制中心，2021.

[17] MANISALIDIS I, STAVROPOULOU E, STAVROPOULOS A, et al.Environmental and health impacts of air pollution: a review [J/OL]. Front Public Health, 2020, 8 [2026-06-04]. http://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014.

[18] YANG Y, LI R, LI W, et al.The association between ambient air pollution and daily mortality in Beijing after the 2008 Olympics: a time series study [J/OL].PLoS One, 2013, 8 (10) [2026-06-04].https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076759.

收稿日期：2026-01-27 **修回日期**：2026-06-04 **本文编辑**：刘亚敏