

PM_{2.5} 短期暴露对结核病发病风险的个体精准评估

廖原¹, 门丹², 李一帆³, 李怀臣⁴, 龙飞³, 刘铤¹

(1. 山东大学齐鲁医学院公共卫生学院生物统计学系, 山东 济南 250012;

2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 山东第一医科大学第三附属医院呼吸与危重症医学科, 山东 济南 250031;

4. 山东第一医科大学附属山东省立医院呼吸与危重症医学科, 山东 济南 250021)

摘要: **目的** 探讨短期细颗粒物(2.5-micrometer particulate matter, PM_{2.5})暴露对结核发病风险的影响及其人群和时空异质性,为制定精准公共卫生干预策略提供科学依据。**方法** 收集2015年1月至2019年12月济南市1 207例新发结核病例数据,结合机器学习模型与地理信息系统,构建百米级网格化PM_{2.5}暴露评估模型,精准估计个体PM_{2.5}暴露水平;采用时间分层的病例交叉设计,通过条件logistic回归分析PM_{2.5}短期暴露(滞后0~3 d)与结核发病的关联,并评估年龄、性别、季节和居住地的效应差异。**结果** PM_{2.5}的质量浓度每增加1 μg/m³,结核发病风险在滞后2 d升高0.45%(95%CI:0.12%~0.78%,*P*<0.05)。亚组分析显示,老年人(*OR*=1.14, 95%CI: 0.974~1.32)、女性(*OR*=1.07, 95%CI: 1.03~1.11)、寒冷季节(*OR*=1.11, 95%CI: 1.05~1.19)及农村地区(*OR*=1.05, 95%CI: 1.02~1.08)的结核发病风险更高,关联有统计学意义(*P*<0.05)。**结论** PM_{2.5}短期暴露可显著增加结核发病风险,且在山东省济南市存在人群和季节异质性,需针对高风险群体及污染季节制定精准防控策略。

关键词: 空气污染;结核病;病例交叉设计;机器学习;地理信息系统

中图分类号:R122.7

文献标志码:A

Short-term effect of PM_{2.5} on the incidence of tuberculosis based on individual precise exposure assessment

LIAO Yuan¹, MEN Dan², LI Yifan³, LI Huaichen⁴, LONG Fei³, LIU Yi¹

(1. Department of Biostatistics, School of Public Health, Cheeloo College of Medicine, Shandong University,

Jinan 250012, Shandong, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University,

Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, The Third Affiliated Hospital of Shandong First Medical University, Jinan 250031, Shandong, China; 4. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine,

Shandong Provincial Hospital, Affiliated to Shandong First Medical University,

Jinan 250021, Shandong, China)

Abstract: Objective To investigate the impact of short-term exposure to 2.5-micrometer particulate matter (PM_{2.5}) on the risk of tuberculosis (TB) incidence and its heterogeneity across populations, space, and time, providing a scientific basis for developing targeted public health intervention strategies. **Methods** Data from 1,207 newly diagnosed TB cases in Jinan from from January 2015 to December 2019 were collected. By integrating machine learning models with geographic information systems, a hundred-meter grid-level PM_{2.5} exposure assessment model was constructed to precisely estimate individual PM_{2.5} exposure levels. A time-stratified case-crossover design was employed, and condi-

tional logistic regression was used to analyze the association between short-term PM_{2.5} exposure (0-3 days lag) and TB incidence, while evaluating effect differences by age, sex, season, and residential area. **Results** For each 1 μg/m³ increase in PM_{2.5} concentration, the risk of TB incidence increased by 0.45% (95% CI: 0.12%-0.78%) at a 2-day lag ($P<0.05$). Subgroup analyses revealed significantly higher risks among the elderly (OR=1.14, 95% CI: 0.974-1.32), females (OR=1.07, 95% CI: 1.03-1.11), during cold seasons (OR=1.11, 95% CI: 1.05-1.19), and in rural areas (OR=1.05, 95% CI: 1.02-1.08) ($P<0.05$). **Conclusion** Short-term PM_{2.5} exposure significantly increases the risk of TB incidence, with notable heterogeneity across populations and seasons in Jinan, Shandong Province, necessitating targeted prevention and control strategies for high-risk groups and polluted seasons.

Key words: Air pollution; Tuberculosis; Case-crossover design; Machine learning; Geographic information systems

结核病 (tuberculosis, TB) 是由结核分枝杆菌 (*Mycobacterium tuberculosis*, Mtb) 引起的一种慢性呼吸道传染病, 是全球范围内由单一传染源导致死亡率最高的疾病, 在发展中国家尤为严重——医疗资源配置不均与防控体系薄弱进一步加剧了其传播与疾病负担^[1-3]。2023年, 中国新发病例为 74.1 万例 (发病率为 52/10 万), 位居全球第 3 (占全球 6.8%), 仅次于印度 (26%) 和印度尼西亚 (10%)^[4]。细颗粒物 (2.5-micrometer particulate matter, PM_{2.5}) 的急性暴露可能通过抑制肺泡巨噬细胞免疫应答、增强呼吸道炎症反应以及改变病原体-宿主相互作用等机制, 促进 Mtb 感染与疾病进展^[5]。

然而, 在精准评估 PM_{2.5} 暴露与结核病发病之间个体水平关联的研究仍存在一定局限性: 当前基于区域污染水平或传统暴露估计方法 (如“最近监测点法”^[6] 或“概率加权法”^[7]) 的研究, 难以应对空气污染显著的空间异质性及个体暴露水平的复杂性^[8-9], 同时也未能充分控制多种混杂因素, 可能导致对 PM_{2.5} 暴露健康效应的评估出现显著偏倚^[10-11]。因此, 如何在控制混杂因素的基础上准确评估 PM_{2.5} 暴露对个体结核病发病的影响, 仍然是环境流行病学种亟待解决的关键问题。

本研究旨在整合济南市高精度 PM_{2.5} 监测数据、气象、环境及人口等多源信息, 结合地理信息系统 (geographic information system, GIS) 与机器学习算法, 构建 PM_{2.5} 短期暴露的精准评估模型, 并采用时间分层的病例交叉以设计控制个体层面的混杂因素, 从而揭示 PM_{2.5} 短期暴露与结核病发病在个体水平上的关联, 为制定有针对性的公共卫生干预策略提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究覆盖 2015 年 1 月至 2019 年 12 月济南

市 8 区 2 县 (莱芜区与钢城区于 2019 年 1 月行政区划调整后归属济南市, 因历史监测标准差异与数据连续性限制, 未纳入分析)。病例数据来源于同期中国结核病管理信息系统登记的济南市新发活动性肺结核患者。诊断依据《肺结核诊断标准 (WS 288-2017)》^[12]。纳入标准: ①临床诊断为新发活动性肺结核; ②登记有详细居住地址; ③入院前在该地址连续居住 ≥6 个月。排除复治结核病例。

PM_{2.5} 日质量浓度数据来自济南市 16 个地面空气污染监测站, 基于每小时 PM_{2.5} 浓度计算得出, 由中国国家环境监测中心 (<http://www.cnemc.cn/>) 发布; 逐日气象变量包括: 温度 (°C)、湿度 (%)、风速 (m/s), 数据来自美国国家气候数据中心的公开 FTP 服务器 (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/>)。

济南市道路网络矢量数据 (涵盖国道、省道、县道、村道、旧街道、客运道路、渡船、城市高速公路、公路、铁路和其他道路共 11 种)、30 m 空间分辨率的数字高程模型与土地利用类型数据 (包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地) 均来源于中国科学院地理科学与资源研究所^[13]。归一化植被指数数据的时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 250 m, 来自 Terra 卫星的中分辨率成像光谱仪 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13Q1/#data-availability>)。100 m × 100 m 年度人口密度数据来自 WorldPop 项目 (<https://www.worldpop.org/>)。

1.2 方法

1.2.1 研究设计

本研究采用时间分层病例交叉设计。以每位结核病患者的诊断日期为“病例日”, 在同一月份内选择相同星期几的其他日期作为“对照日” (如诊断日前第 28 天), 以此控制时间趋势、季节性和个体不随时间变化的混杂因素。

1.2.2 个体 PM_{2.5}暴露水平评估

1.2.2.1 空间插值初步估计

基于济南市 16 个固定监测站点的每日 PM_{2.5} 质量浓度数据,在 ArcGIS 10.2 软件中采用“留一样条”插值算法,构建济南市日级 PM_{2.5} 质量浓度空间表面。该算法在插值每个目标点时,排除该点本身的观测值,仅使用其他 15 个站点的数据进行样条函数拟合,以减轻局部过拟合。同时,纳入济南市周边地市的 90 个监测站点数据用于校正行政边界及农村区域的浓度梯度。

1.2.2.2 机器学习模型构建与优化

采用 Python3.9 软件进一步建立 XGBoost 机器学习模型^[14]。所有空间预测变量均统一至 GCS_WGS_1984 坐标系,并在不同空间缓冲区尺度(100、200、300、500、800、1 000、1 300、1 500、1 800 及 2 000 m)内与 16 个监测站点的 PM_{2.5} 观测值按日期进行关联。模型输入变量还包括 PM_{2.5} 的一阶自回归项、年份、月份、年内第几天及星期几,用以控制时间自相关、长期趋势、季节性和周末/节假日效应^[15]。

1.2.2.3 个体暴露值提取

基于显著预测变量及最优半径 r 重新采样生成网格化日均 PM_{2.5} 质量浓度表面。针对每位结核病例的居住地址进行地理编码^[16],方法是将每个地址与地名录记录进行匹配,并通过谷歌地理编码服务和 ArcGIS 中的地理处理工具箱确定其经纬度坐标,再根据发病日期及对照日期从浓度表面提取对应的网格估计值,匹配个体相应的 PM_{2.5} 暴露估计值。

1.2.3 变量定义

温暖季节(暖季)与寒冷季节(冷季)分别定义为 4 月至 9 月与 10 月至次年 3 月^[17];年轻人与老年人分别被定义为年龄 < 65 岁和 ≥ 65 岁的人^[18];居住地类型依据国家统计局城乡划分标准,分为城市与农村;将国家法定公共假期定义为二元变量(是=1,否=0)。

1.3 统计学处理

采用 R 4.1.2 统计学软件实现条件 logistic 回归模型。计数资料用 $n(\%)$ 表示;组间比较采用 χ^2 检验。PM_{2.5} 的质量浓度、气象变量采用 $\bar{x} \pm s$ 描述,并报告 P_5 、 P_{25} 、 P_{50} 、 P_{75} 和 P_{95} ,组间比较采用成组 t 检验。采用 Spearman 相关分析描述 PM_{2.5} 质量浓度与气象变量间的相关性。检验水准 $\alpha = 0.05$ (双侧)。

1.3.1 暴露-反应关系分析

采用条件 logistic 回归模型分析 PM_{2.5} 短期暴露与结核发病的关联^[19]。以滞后 0~3 d 的 PM_{2.5} 质量

浓度作为暴露指标。为控制气象混杂,使用自由度为 3 的自然三次样条函数对当日环境温度和相对湿度进行平滑调整。调整节假日变量。计算 PM_{2.5} 质量浓度每增加 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 及四分位数间距(interquartile range, IQR)增加所对应的发病风险百分比变化及其 95% CI。计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{百分比变化} &= (e^{\beta \times \text{IQR}} - 1) \times 100\%, \\ 95\% \text{ CI 上限} &= (e^{\beta - 1.96 \times \text{SE}} \times \text{IQR} - 1) \times 100\%, \\ 95\% \text{ CI 下限} &= (e^{\beta + 1.96 \times \text{SE}} \times \text{IQR} - 1) \times 100\%, \end{aligned}$$

式中, β 为条件 logistic 回归模型的回归系数, SE 为相应的标准误差。

1.3.2 异质性分析与效应修饰评估

按年龄、性别、季节、居住地进行分层分析。采用以下 Z 检验公式比较亚组间回归系数的差异:

$$Z = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\sqrt{\text{SE}_1^2 + \text{SE}_2^2}},$$

其中 β_1 和 β_2 是两组的比值比(odd ratio, OR)系数, SE_1 和 SE_2 是各自 OR 的标准误差^[20]。

1.3.3 敏感性分析

为检验模型稳健性,进行以下分析:①调整不同滞后时间的 PM_{2.5} 暴露;②使用惩罚多项式样条重新拟合温度和相对湿度,以增强模型对非线性协关系的控制能力,优化滞后效应估计并提高其灵活性与准确性。

1.3.4 暴露估计模型性能评价

采用 10 折整体交叉验证、10 折时间交叉验证及空间留一交叉验证,评估 XGBoost 模型的预测性能。评价指标包括决定系数(coefficient of determination, R^2)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)。

2 结果

2.1 一般资料

共纳入 1 207 例新发活动性肺结核病例,其中男 798 例(66.1%),女 409 例(33.9%);年龄 0.5~94 (42.9±19.4)岁,65 岁以下患者 1 014 例(84.0%),65 岁及以上 193 例(16.0%),年龄分布差异具有统计学意义($\chi^2 = 558.4, P < 0.001$);农村地区患者 648 例(53.7%),城市地区 559 例(46.3%),城乡分布差异有统计学意义($\chi^2 = 6.6, P < 0.001$);暖季病例 630 例(52.2%),冷季病例 577 例(47.8%),季节分布差

异无统计学意义($\chi^2 = 2.3, P = 0.127$)。细菌学检查结果阴性 812 例(67.3%),阳性 395 例(32.7%),两者差异有统计学意义($\chi^2 = 142.2, P < 0.001$)。

诊断当日污染物与气象参数统计结果显示,PM_{2.5}的日均质量浓度为(68.0±44.0) μg/m³,最小值为 22.8 μg/m³,最大值为 154 μg/m³;暖季[(55.9±27.1) μg/m³]低于冷季[(81.1±54.0) μg/m³],差异

有统计学意义($t = 10.1, P < 0.001$);农村地区[(69.7±47.4) μg/m³]高于城市地区[(66.0±39.6) μg/m³],差异有统计学意义($t = -1.5, P < 0.001$)。其他参数均值分别为温度(15.3±10.6)℃,湿度 57.1%±18.2%,风速(2.4±1.0) m/s,海拔(69.6±94.2)m。见表 1。

表 1 诊断当日颗粒物及气象参数统计

Table 1 Statistics for particulate matter and meteorological parameters on the day of diagnosis

变量	数值	百分位数				
		P ₅	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₉₅
PM _{2.5} /(μg/m ³)	68.0±44.0	22.8	37.8	55.5	85.0	154.0
温度/℃	15.3±10.6	-1.7	5.4	17.0	24.6	29.9
湿度/%	57.1±18.2	30.0	43.1	56.3	71.2	86.5
风速/(m/s)	2.4±1.0	1.2	1.8	2.3	2.9	4.4
海拔/m	69.6±94.2	9.6	21.3	35.1	72.1	280.8

2.2 PM_{2.5}暴露估计模型

XGBoost 机器学习模型交叉验证结果显示,当空间缓冲区半径为 300 米时,模型各项性能指标达到最优。其中,10 折整体交叉验证的 R² 为 0.90,

RMSE 为 14.70 μg/m³,表明该模型具有较高的预测精度与稳健性,适用于后续个体化暴露评估。见表 2。

表 2 XGBoost 模型的交叉验证结果

Table 2 Cross validation results of the XGBoost model

类型	指标	100 m	200 m	300 m	500 m	800 m	1 000 m	1 300 m	1 500 m	1 800 m	2 000 m
10 折整体	R ²	0.87	0.89	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
交叉验证	RMSE	16.95	15.96	14.70	14.63	15.35	15.69	15.03	15.21	14.93	14.70
	MAE	9.00	9.04	8.22	8.38	8.80	8.99	8.69	8.70	8.53	8.36
	MAPE	17.66	19.21	16.14	15.81	16.86	18.03	17.28	16.78	16.80	16.45
10 折时间	R ²	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88
交叉验证	RMSE	17.42	17.01	17.03	17.79	16.75	16.74	16.41	16.34	15.94	15.78
	MAE	10.54	10.36	10.18	10.12	10.16	10.03	9.93	9.93	9.73	9.70
	MAPE	21.20	20.34	19.09	19.84	19.51	19.29	19.18	18.94	19.02	19.02
空间留一	R ²	0.82	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83
交叉验证	RMSE	19.94	19.52	19.00	18.99	18.72	18.20	18.34	17.80	17.80	16.81
	MAE	12.31	12.04	11.90	11.74	11.61	11.45	11.49	11.13	11.15	11.14
	MAPE	31.76	24.06	22.75	22.42	22.47	21.90	21.91	21.37	22.02	21.86

2.3 PM_{2.5}与气象变量的相关性

Spearman 相关分析结果显示,PM_{2.5}浓度与环境温度($r_s = -0.34$)、风速($r_s = -0.21$)呈负相关,与湿度呈正相关($r_s = 0.19$),风速与湿度呈负相关($r_s = -0.38$);温度与湿度之间呈正相关($r_s = 0.18$);相关性均有统计学意义($P < 0.05$)。见图 1。

2.4 PM_{2.5}对结核发病的滞后效应

条件 logistic 回归模型分析结果显示,PM_{2.5}短期暴露与结核发病风险呈显著正相关。滞后特异性分析结果显示,风险在滞后 2 d 达到峰值,PM_{2.5}质量浓度每增加 1 μg/m³,发病风险升高 0.45%(95%CI: 0.12%~0.78%, $P < 0.05$)。累积暴露-反应曲线呈近似线性上升趋势,无显著阈值效应。见图 2。

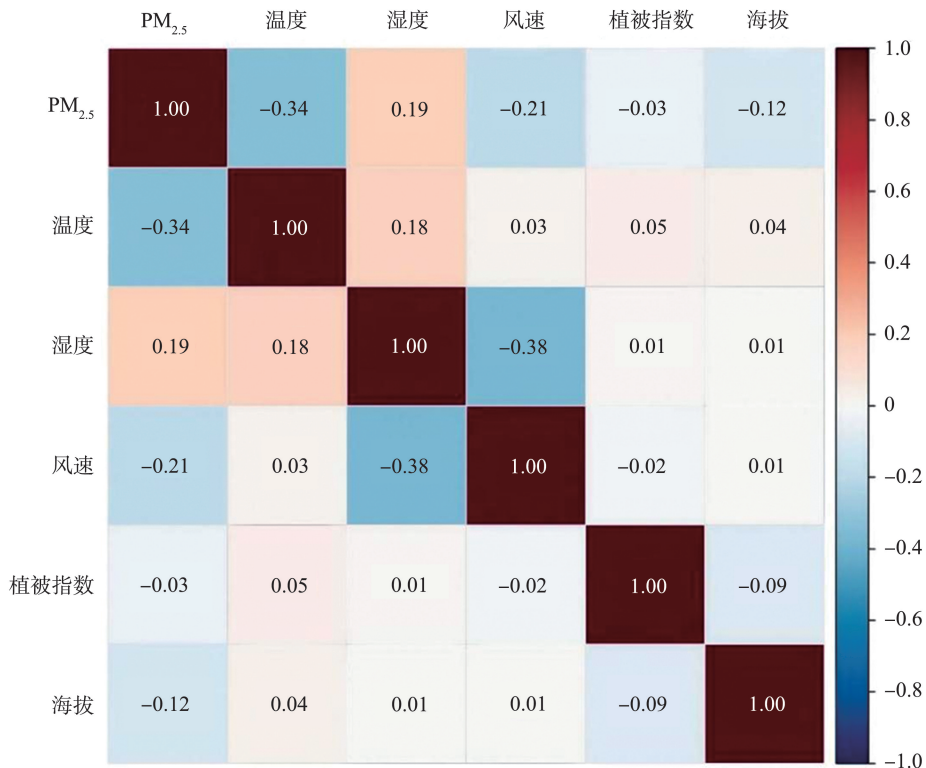


图1 2015—2019年气象变量之间的 Spearman 相关性

Figure 1 Spearman correlation between meteorological variables from 2015 to 2019

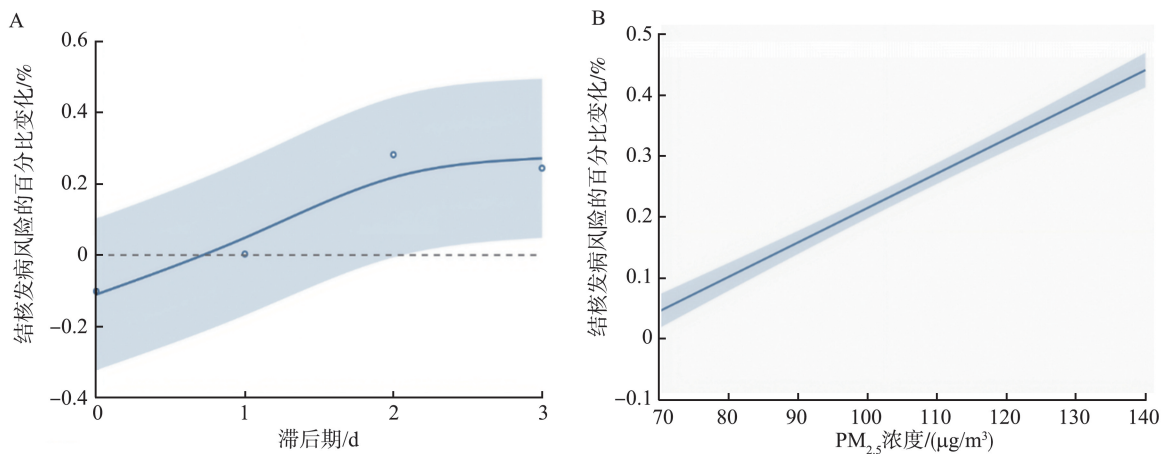


图2 PM_{2.5}浓度与结核发病风险的关联

A: 滞后 0~3 d PM_{2.5}浓度与结核发病风险的关联模式; B: 累积暴露-反应曲线。

Figure 2 Association between PM_{2.5} concentration and risk of tuberculosis development

A: Patterns of association between lagged 0-3 day PM_{2.5} concentrations and risk of tuberculosis development; B: Cumulative exposure-response curve.

2.5 PM_{2.5}健康效应的异质性分析

分层分析与 Z 检验结果显示, PM_{2.5}暴露对结核发病风险的影响存在人群与时空异质性, 关联有统计学意义 ($P < 0.05$)。相比年轻人 (OR = 1.02, 95% CI: 0.99 ~ 1.05), 老年人的发病风险更高 (OR = 1.14, 95% CI: 0.97 ~ 1.32), 差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 女性发病风险 (OR = 1.07, 95% CI: 1.03 ~ 1.11) 高于男性 (OR = 1.01, 95% CI: 0.97 ~ 1.06), 差

异有统计学意义 ($P < 0.05$); 寒冷季节的发病风险 (OR = 1.11, 95% CI: 1.05 ~ 1.19) 高于温暖季节 (OR = 0.708, 95% CI: 0.66 ~ 0.78), 差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 农村地区人群的发病风险 (OR = 1.05, 95% CI: 1.02 ~ 1.08) 高于城市地区 (OR = 1.01, 95% CI: 0.94 ~ 1.07), 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。见图 3。

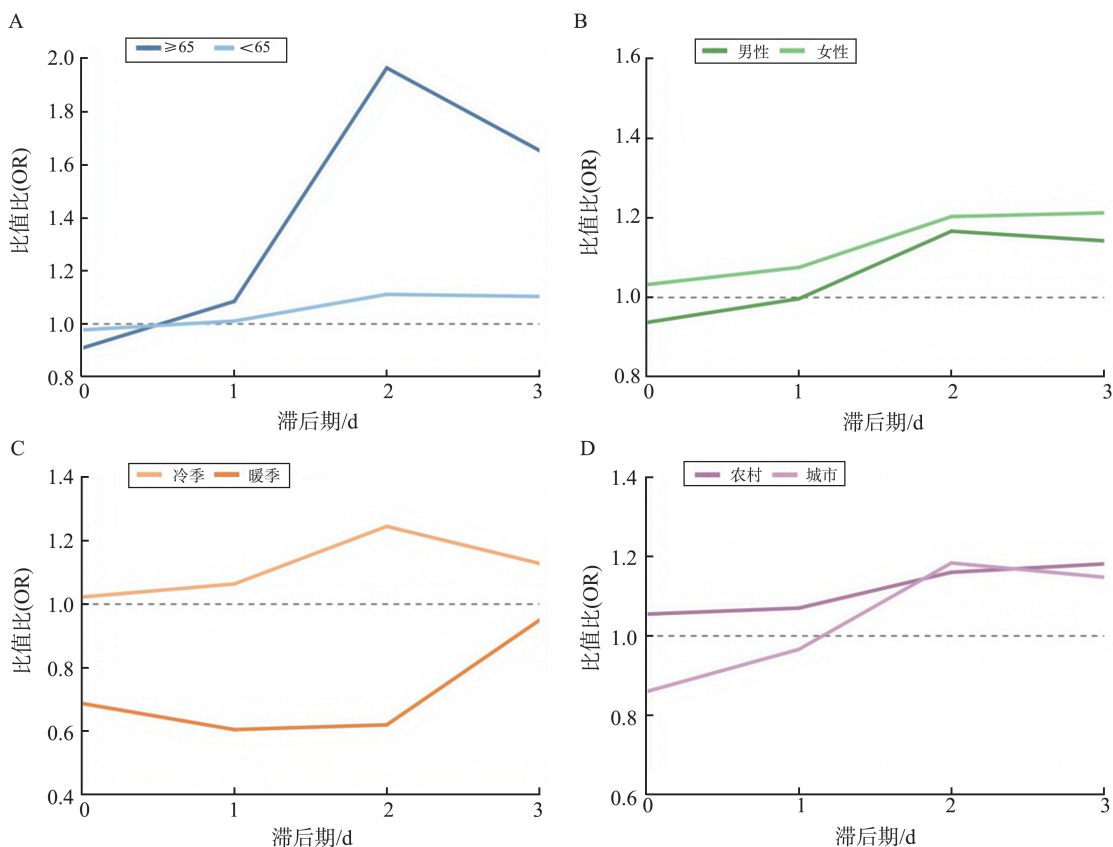


图3 滞后0~3 d 结核病发病风险与 PM_{2.5}浓度关系的折线图

A: 年龄; B: 性别; C: 季节; D: 居住地。

Figure 3 Increasing risk of tuberculosis incidence with lagged 0-3 day PM_{2.5} concentrations

A: Age; B: Gender; C: Season; D: Place of residence.

2.6 敏感性分析结果

通过调整滞后窗口与非线性控制方式的敏感性分析结果显示,PM_{2.5}与结核发病风险的正向关联保持稳健。高质量浓度 PM_{2.5}暴露的急性效应更为显著,且环境温度在滞后 1~3 d 表现出独立的正向影响。见图 4。

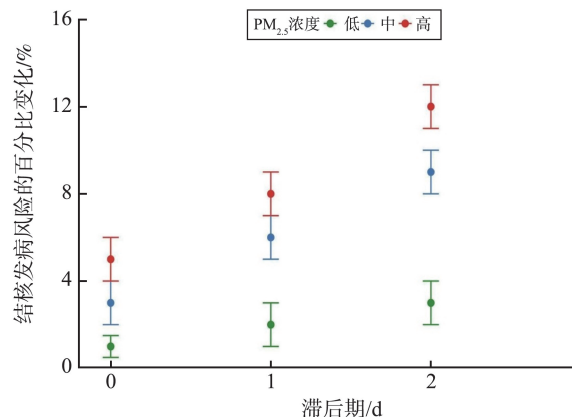


图4 不同滞后期内 PM_{2.5}浓度四分位数(高、中、低)对结核发病风险的百分比变化

Figure 4 Percentage change in risk of tuberculosis by quartile (high, medium and low) of PM_{2.5} concentration at different lags

3 讨论

本研究利用高分辨率机器学习模型与病例交叉设计,精确评估了个体 PM_{2.5}短期暴露对结核病发病的急性影响。结果提示,PM_{2.5}暴露后 2~3 d 内是结核病发病风险升高的关键窗口期,且存在显著的人群与季节异质性。这一发现为理解空气污染驱动结核病发病的急性时间模式提供了新证据,并强调在污染事件发生后的极短期内,针对高风险人群实施精准干预的必要性。

研究表明,PM_{2.5}短期暴露与结核病风险增加相关,但报告的风险峰值时间存在差异(如滞后 3 d 或更宽的时间窗口)^[21-22]。本研究结果发现,风险峰值为暴露后 2 d,不仅提示 PM_{2.5}可通过急性免疫抑制等机制快速影响发病^[23],且精确的时间界定有助于在公共卫生实践中更精准地划定高风险时段,为实施时效性干预提供了依据。

Ding 等^[23]研究发现,免疫衰老群体会放大空气污染的健康损害。本研究发现老年人群的发病风险更高,与上述研究结论基本一致。老年人群因免

疫功能衰退,可能更易受空气污染触发的感染与发病影响。该结果提示,在制定空气污染健康防护策略时,应明确将老年人列为重点防护对象,并开展针对性的健康教育与早期筛查。

本研究发现农村地区 $PM_{2.5}$ 暴露与结核发病的关联强度可能更高。这一差异可能与农村地区污染源(如生物质燃烧)特性、地形气候导致的污染物局部累积^[24-26],以及城乡在医疗服务可及性与环境健康素养上的差距有关^[27-28]。因此,未来的环境健康干预需重视城乡差异,在农村地区应协同推进清洁能源改造、基层呼吸系统疾病防控能力提升与环境健康促进。

本研究存在一定的局限性:①仅分析 $PM_{2.5}$ 单一污染物的效应,可能在一定程度上低估 $PM_{2.5}$ 对结核病发病的总体影响;②部分区域空气质量监测站点覆盖面积有限或存在数据缺失,可能导致 $PM_{2.5}$ 暴露评估存在一定误差;③将结核确诊日期定义为发病时间,可能因患者就诊延迟而导致时间界定偏差。

综上所述,短期暴露于 $PM_{2.5}$ 可增加结核病的发病风险,且在暴露后 1-3 d 内累积效应持续增强; $PM_{2.5}$ 对结核病发病的影响具有显著的时间异质性和人群差异。建议重点推进地区农村清洁能源改造并加强冬季污染应急减排措施,建立面向免疫脆弱人群的结核病监测与防护体系。

参考文献:

- [1] World Health Organization. Global tuberculosis report 2024 [R]. Geneva: World Health Organization, 2024.
- [2] Dye C, Glaziou P, Floyd K, et al. Prospects for tuberculosis elimination[J]. *Annu Rev Public Health*, 2013, 34: 271-286. doi:10.1146/annurev-publhealth-031912-114431
- [3] Ramsay LC, Richardson M, Miranda RN, et al. Inclusion of non-medical interventions in model-based economic evaluations for tuberculosis: a scoping review[J]. *PLoS One*, 2023, 18(8): e0290710. doi:10.1371/journal.pone.0290710
- [4] Chen Z, Wang T, Du JL, et al. Decoding the WHO global tuberculosis report 2024: a critical analysis of global and Chinese key data[J]. *Zoonoses*, 2025, 5(1): 999. doi:10.15212/zoonoses-2024-0061
- [5] Liu C, Chen RJ, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities[J]. *N Engl J Med*, 2019, 381(8): 705-715.
- [6] Nock R, Sebban M, Bernard D. A simple locally adaptive nearest neighbor rule with application to pollution forecasting [J]. *Int J Patt RecognArtif Intell*, 2003, 17(8): 1369-1382.
- [7] Bell TL. Theory of optimal weighting of data to detect climatic change[J]. *J Atmos Sci*, 1986, 43(16): 1694-1710. doi:10.1175/1520-0469(1986)043<1694:toowod>2.0.co;2
- [8] Li H, Ge M, Zhang MX. Spatio-temporal distribution of tuberculosis and the effects of environmental factors in China[J]. *BMC Infect Dis*, 2022, 22(1): 565. doi:10.1186/s12879-022-07539-4
- [9] Peptenatu D, Băloiu AM, Andronic O, et al. Spatio-temporal pattern of tuberculosis distribution in Romania and particulate matter pollution associated with risk of infection[J]. *Geohealth*, 2024, 8(2): e2023GH000972. doi:10.1029/2023GH000972
- [10] Lai TC, Chiang CY, Wu CF, et al. Ambient air pollution and risk of tuberculosis: a cohort study[J]. *Occup Environ Med*, 2016, 73(1): 56-61.
- [11] Su JG, Shahriary E, Sage E, et al. Development of over 30-years of high spatiotemporal resolution air pollution models and surfaces for California [J]. *Environ Int*, 2024, 193: 109100. doi:10.1016/j.envint.2024.109100
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 肺结核诊断标准(WS 288-2017)[J]. *新发传染病电子杂志*, 2018, 3(1): 59-61.
- [13] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2018[2025-02-24]. doi:10.12078/2018070201
- [14] Chen TQ, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system[C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco California USA. ACM, 2016: 785-794. doi:10.1145/2939672.2939785
- [15] Di Q, Kloog I, Koutrakis P, et al. Assessing $PM_{2.5}$ exposures with high spatiotemporal resolution across the continental United States [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(9): 4712-4721.
- [16] Ge EJ, Zhang X, Wang XM, et al. Spatial and temporal analysis of tuberculosis in Zhejiang Province, China, 2009-2012[J]. *Infect Dis Poverty*, 2016, 5: 11. doi:10.1186/s40249-016-0104-2
- [17] Niu Y, Niu HT, Meng X, et al. Associations between air pollution and the onset of acute exacerbations of COPD: a time-stratified case-crossover study in China [J]. *Chest*, 2024, 166(5): 998-1009.
- [18] Yang KJ, Yang X, Jin CY, et al. Global burden of type 1 diabetes in adults aged 65 years and older, 1990-2019: population based study[J]. *BMJ*, 2024, 385: e078432. doi:10.1136/bmj-2023-078432
- [19] Janes H, Sheppard L, Lumley T. Case-crossover analyses of air pollution exposure data: referent selection strat-

- egies and their implications for bias[J]. *Epidemiology*, 2005, 16(6): 717-726.
- [20] Altman DG, Bland JM. How to obtain the *P* value from a confidence interval[J]. *BMJ*, 2011, 343: d2304. doi: 10.1136/bmj.d2304
- [21] Zhu PP, Gong ZY, Li JH, et al. Racial/ethnic disparities in tuberculosis incidence linked to PM_{2.5} constituents and their sources in the United States, 2000-2019: a population-based study[J]. *BMC Infect Dis*, 2025, 25(1): 751. doi: 10.1186/s12879-025-11141-9
- [22] Huang K, Ding K, Yang XJ, 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]. *Environ Res*, 2020, 184: 109343. doi: 10.1016/j.envres.2020.109343
- [23] Ding F, Liu XL, Hu ZY, et al. Association between ambient temperature, PM_{2.5} and tuberculosis in Northwest China[J]. *Int J Environ Health Res*, 2024, 34(9): 3173-3187.
- [24] 王治非, 王在峰, 吕晨, 等. 济南市冬季大气污染时空分布特征及潜在污染源区分析[J]. *山东科学*, 2023, 36(4): 114-121.
- WANG Zhifei, WANG Zaifeng, LYU Chen, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of air pollution and potential source areas in winter of Jinan [J]. *Shandong Science*, 2023, 36(4): 114-121.
- [25] Jung CC, Huang CY, Su HJ, et al. Impact of agricultural activity on PM_{2.5} and its compositions in elementary schools near corn and rice farms[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 906: 167496. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167496
- [26] Wei GY, Han GS, Lang XX. Cultural heritage site selection characteristics and the impact of the natural environment in Jinan city, China [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 31038. doi: 10.1038/s41598-024-82201-4
- [27] Guo JZ, Liu C, Liu F, et al. Tuberculosis disease burden in China: a spatio-temporal clustering and prediction study[J]. *Front Public Health*, 2025, 12: 1436515. doi: 10.3389/fpubh.2024.1436515
- [28] Xu JX, Ma J. Urban-rural disparity in the relationship between geographic environment and the health of the elderly[J]. *Appl Spatial Anal Policy*, 2024, 17(3): 1335-1357.

(编辑:郑潇)