

2018—2022 年中国西南某市相对湿度、温度与大气污染物对呼吸系统疾病死亡的影响

苏恒宇¹, 孙高峰², 谢惠芳¹

1.新疆医科大学公共卫生学院,新疆 乌鲁木齐 830017;2.乌鲁木齐市疾病预防控制中心

摘要:目的 探讨亚热带湿润气候下中国西南某盆地城市中不同组别的相对湿度、温度、大气污染物及其交互作用对呼吸系统疾病死亡的影响及滞后效应。方法 收集 2018—2022 年中国西南某市逐日的气象、空气污染物和居民呼吸系统死亡的资料,采用准泊松分布的分布滞后非线性模型(distributed lag-wise nonlinear model,DLNM)和广义加性模型(generalized additive model,GAM)进行时间序列分析。结果 该市呼吸系统疾病累积死亡 11 779 人。在 lag15 时,SO₂ 浓度每升高 10 ug/m³ 对人群呼吸系统疾病死亡的影响最大,RR=1.055(95%CI: 0.993~1.120)。单因素分组滞后模型中,极高温组($\geq P_{95}$)中温度每上升 1℃对呼吸系统疾病死亡的影响在 lag0 时最大,为 1.710(95%CI: 1.209~2.418)。多因素模型中,以 SO₂,NO₂ 为协同因素时,相对湿度对呼吸系统死亡影响在 lag18 时最大,为 1.026(95%CI: 1.000~1.053),温度对死亡的 RR 在 lag0 时最大,为 1.024(95%CI: 1.010~1.038)。交互作用显示:相对湿度、温度与各污染物均存在交互作用,60%~80%的湿度水平与 SO₂,NO₂ 交互产生的死亡风险最大。结论 各因素对呼吸系统疾病死亡存在独立影响和滞后效应。不同湿度水平与污染物交互作用对呼吸系统疾病死亡影响不同且可能存在协同或拮抗效应,其中中等湿度水平与污染物交互产生的死亡风险最大,高湿度与污染物交互产生的影响反而降低。

关键词:大气污染物;气象因素;呼吸系统疾病死亡;交互作用

中图分类号:R211;R122.7 文献标志码:A 文章编号:1003-8507(2025)03-447-08

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202409182

Influence of relative humidity, temperature and atmospheric pollutants on respiratory disease mortality in a city in southwest China from 2018 to 2022

SU Heng-yu*, SUN Gao-feng, XIE Hui-fang

*School of Public Health, Xinjiang Medical University, Urumqi, Xinjiang 830017, China

Abstract: Objective To explore the influence and lag effects of different groups of relative humidity, temperature, atmospheric pollutants and their interactions on respiratory disease mortality in a basin city in southwest China under a subtropical humid climate. **Methods** Daily meteorological, air pollutant and respiratory-related mortality data of residents in a city in southwest China from 2018 to 2022 were collected, and time-series analysis was carried out using the distributed lag-wise nonlinear model (DLNM) with quasi-Poisson distribution and the generalized additive model (GAM). **Results** A total of 11 779 people died of respiratory diseases in this city. At lag15, when the SO₂ concentration increased by 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, the impact on the respiratory disease mortality of the population was the greatest, with RR=1.055 (95%CI: 0.993-1.120). In the single-factor grouped lag model, in the extremely high-temperature group ($\geq P_{95}$), when the temperature increased by 1 °C, the impact on respiratory disease mortality was the greatest at lag0, which was 1.710 (95%CI: 1.209-2.418). In the multi-factor model, when SO₂ and NO₂ were taken as synergistic factors, the impact of relative humidity on respiratory mortality was the greatest at lag18, which was 1.026 (95%CI: 1.000-1.053), and the RR of temperature on mortality was the greatest at lag0, which was 1.024 (95%CI: 1.010-1.038). Interaction analysis showed that there were interactions among relative humidity, temperature and various pollutants, and the mortality risk generated by the interaction between 60%-80% humidity level and SO₂ and NO₂ was the greatest. **Conclusion** Each factor has an independent influence and lag effect on respiratory disease mortality. The interactions between different humidity levels and pollutants have different impacts on respiratory disease mortality and may have synergistic or antagonistic effects. Among them, the mortality risk generated by the interaction between medium humidity level and pollutants is the greatest, while the impact generated by the interaction between high humidity and pollutants is instead reduced.

Keywords: Atmospheric pollutants; Meteorological factors; Respiratorydisease mortality; Interaction

基金项目:新疆维吾尔自治区“十四五”高等学校特色学科-公共卫生与预防医学;新疆维吾尔自治区“天山英才”医药卫生高层次人才培养计划(TSYC202301B073)

作者简介:苏恒宇(1998—),男,硕士在读,研究方向:呼吸道疾病与环境研究

通信作者:谢惠芳,E-mail:xhfworld@sina.com

空气污染和气候变化是导致呼吸系统疾病发病和死亡的主要原因之一,极端气象条件能够增加人群呼吸系统疾病的发病率和死亡率,结局通常为非线性关系^[1]。最近的研究显示,在全球气候变化的背景下,应仔细考虑气候变化与空气污染之间的双向交互作用及其对呼吸系统疾病的影响^[2]。许多研究报道了温度的死亡率效应,但很少有研究湿度的死亡风险。中国空气污染和气候变化对呼吸系统疾病影响的研究主要集中在东部、长三角等地区^[3-5];中国西南城市的研究有限,特别是独特的地理和气候造成的高温高湿和重污染环境对呼吸系统疾病死亡的影响。本研究从环境医学的角度开展温度、相对湿度、污染物的单因素分析,以及单因素分组滞后、多因素及交互作用分别对某西南盆地城市人群呼吸系统疾病死亡的影响研究,以此揭示极端气象因素和大气污染物交互致病的成因,对保护当地居民健康具有重要的科学价值和现实意义,也为当地有效开展空气污染的风险评估和制定健康策略提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

1.1.1 居民死亡数据 本研究从该市的疾病控制预防中心系统中检索了 2018 年 1 月—2022 年 12 月期间的每日死亡数据,包括户籍、死亡时间、直接死亡原因的信息。两名疾控专家根据《国际疾病分类第 10 版》(ICD-10)编码标准(J00-J99)对数据进行了筛选,排除了生前未居住该市 5 年的人群,确保数据的准确性和科学性。

1.1.2 气象数据和大气污染物数据 气象数据来自欧洲中程天气预报中心(ECMWF),其中包括日平均气温、气压、相对湿度和风速。空气污染物数据来源于哥白尼大气监测服务中心(CAMS),包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、O₃、NO₂。ECMWF 数据准确率可以达到 70%~90%,是通过全球气象观测网络(包括地面气象站、气象卫星等)进行数据收集。CAMS 通过卫星遥感技术、地面监测站、气象球等多种渠道收集大气成分数据,其高精度及准确的空间匹配度确保研究的精确性。

1.1.3 数据清洗和整理 数据质量控制包括消除偏离长期平均值超过三个标准差的缺失值和交叉检查值。死亡统计数据按日期与空气污染和气象数据相匹配。

1.2 统计学方法 空气污染物、气象因素和死亡数据

经检验均呈非正态分布,使用 R 版本 4.3.0 中的 stats 软件包进行了 Spearman 相关性检验。准泊松分布的 GAM 和 DLNM 模型能估计空气污染物、气象因

素及其相互作用之间的暴露-滞后-反应关系。利用 DLNM 进行单因素,单因素分组滞后和多因素分析,使用 GAM 开发双变量响应模型进行交互作用分析。

第一步,利用 DLNM 建立单污染模型,单污染分组滞后模型和多因素模型分析独立影响和滞后影响。基本代数表达式如下:

$$Y_t \sim \text{Poisson}(\mu_t)$$

$$\text{Log}(\mu_t) = \alpha + \beta T_t l(Q) + ns(\text{time}, v_1) + ns(\text{meteorology}, v_2) + \gamma \text{DOW}_t + \lambda \text{Holiday}_t - Eq \quad \text{公式(1)}$$

公式(1)中: μ_t 为第 t 日呼吸系统疾病死亡人数, β 、 γ 、 λ 为回归系数。 $T_t l$:各因素的交叉矩阵。确定大气污染物的最大滞后天数为 15 d,气象因素为 21,自由度 v 设置为 3。自然三次样条函数 ns 用于处理混杂因素。根据以往的研究^[4-5]和 AIC 信息准则(Akaike information guidelines),时间变量和各因素的自由度分别设置为 $v_1=7$ /年和 $v_2=3$ 。控制星期效应(DOW_t)和假日效应(Holiday_t)。

第二步,利用 GAM 建立双自变量响应模型。基本代数表达式如下:

$$\text{Log}(y_t) = \alpha + \beta \text{TS}(P_{tL}, X_t) + ns(X_t, \text{df}) + ns(X_t, \text{df}) + \gamma \text{Dow}_t + \lambda \text{holiday}_t - Eq \quad \text{公式(2)}$$

公式(2)中:TS 为薄板样条函数。TS(P_{tL}, X_t)为因素间的相互作用项,其中 P_{tL} 为第 L 天对第 t 天污染物的移动平均值。其余参数与 -Eq(1)保持一致。

鉴于该地区独特的地理位置,具有较高的温度和相对湿度,本研究考察了主要污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和温度、相对湿度这五种因素的分组滞后效应。由于全球范围内缺乏对高温低温、高湿低湿的统一定义,本研究利用温度和相对湿度的百分位数间隔以及《GB3095—2012》中规定的污染物阈值进行定义,根据“Min~初级标准~二级标准~Max”将 PM₁₀、PM_{2.5} 分为 3 组(NO₂ 只有一组阈值,即分为 2 组);根据“Min~P₅~P₂₅~P₇₅~P₉₅~Max”将温度和湿度分为 5 组进行单因素分组滞后分析。

本文中,所有空气污染物的浓度增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (CO 1 mg/m^3),气象指标增加 1 单位进行分析。结果以相对风险(relative risk, RR, 95%CI)呈现。因素对死亡风险的累积效应被定义为累积相对风险(cumulative relative risk, CRR, 95%CI)。本研究估计了从 lag 0 到 lag 15 和从 lag 0 到 lag 21 的单日滞后效应,其中 lag 0 和 lag 1 分别代表了第一天和第二天暴露因素对呼吸系统死亡的滞后效应;lag 01 表示暴露因素从第二天到第一天对死亡的累积滞后效应。采用双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

1.3 敏感性分析 通过改变模型中时间趋势的自由

度 $v(3,5,6)$ 参数来进行敏感性分析和评估建模方法的稳健性。

2 结果

2.1 基本情况 2018 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日, 该市共有 11 779 人死于呼吸系统疾病, 见表

表 1 2018—2022 年某市人群呼吸系统疾病死亡数、空气污染物和气象因子指标

Table 1 Number of respiratory disease deaths, air pollutants and meteorological factors in a municipal population from 2018 to 2022

类型	因素	($\bar{x} \pm s$)	最小值	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值	《GB3095-2012》 ^a
死亡人数		6.45 ± 5.61	0.00	3.00	5.00	10.00	51.00	
大气污染物	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	109.08 ± 31.23	44.13	86.32	103.95	127.77	337.58	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	152.18 ± 47.70	61.71	120.97	145.05	178.65	445.83	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	33.64 ± 5.30	17.41	29.89	33.59	37.32	51.05	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	41.40 ± 9.03	18.39	35.48	40.12	46.10	107.33	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	48.39 ± 21.36	4.63	31.92	45.13	64.56	121.59	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	CO(mg/m^3)	1.02 ± 0.34	0.32	0.78	0.95	1.22	2.43	4 mg/m^3
气象因素	日平均气温($^{\circ}\text{C}$)	18.24 ± 7.49	1.74	11.59	18.62	24.63	36.12	
	气压(hPa)	962.72 ± 8.35	945.20	955.15	963.24	969.55	985.22	
	风速(m/s)	1.76 ± 0.56	0.76	1.35	1.63	2.06	4.83	
	相对湿度(%)	75.79 ± 10.96	22.24	69.61	77.58	83.75	96.01	

注:^a 为 24 小时平均的二级浓度限值。

2.2 Spearman 相关性分析 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 呈正相关, r 为 1.00 ($P < 0.001$)。O₃ 与温度呈正相关, r 为 0.76 ($P < 0.001$)。CO 与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 呈负相关, 相关系数分别为 $r=0.70$ 、 $r=0.71$ 、 $r=0.73$ 、 $r=0.74$ (P all < 0.001)。温度与大气压呈负相关, 负相关系数为 $r=-0.88$ ($P < 0.001$)。风速与其余因素不存在强相关性。见图 1。

2.3 单因素模型 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 呼吸系统死亡的 RR 在 lag 0 最高, 分别为 1.009(95% CI:0.984 ~ 1.034)、1.010 (95% CI:0.991 ~ 1.029)。O₃、CO、NO₂、相对湿度的 RR 值随滞后时间的增加呈“M”形, 其中相对湿度的 CRR 在滞后时间 lag7 ~ lag18 之间存在统计学意义。SO₂ 随滞后时间呈逆“J”形。温度升高 1 $^{\circ}\text{C}$, 死亡的 RR 在 lag 0 最大, 为 1.018(95% CI: 1.006 ~ 1.030), 温度的 CRR 有统计学意义。见图 2。

2.4 单因素分组滞后模型 图 3 显示 PM_{2.5}、PM₁₀ 的第 3 组在 lag0 ~ lag2、lag8 ~ lag15 期间的 RR 高于其他组。NO₂ 的第 2 组在 lag10 ~ lag15 期间的 RR 高于第 1 组。温度第 5 组在 lag0 ~ lag2、lag5 ~ lag14、lag20 ~ lag21 期间的 RR 高于其余组且有统计学意义。相对湿度第 5 组在 lag0 ~ lag14、lag21 期间的 RR 低于其余组。

2.5 多污染物模型 本研究以温度的 RR 最高点 lag0 和相对湿度的 RR 最高点 lag18 为分析节点进行多污染物模型分析。Spearman 相关性检验中具有强

1。该市主要空气污染物为 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO₂。日平均气温为 18.24 $^{\circ}\text{C}$ (范围:10.75 ~ 25.73 $^{\circ}\text{C}$), 相对湿度平均值为 75.79%(范围:64.83% ~ 86.75%)。空气污染物浓度呈季节性变化,O₃ 在夏季达到峰值,NO₂、SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 在冬季较高。见图 1。

相关性的因素($r > 0.7$)没有被包括在同一个模型中^[5]且利用“ns”函数控制。见表 2。

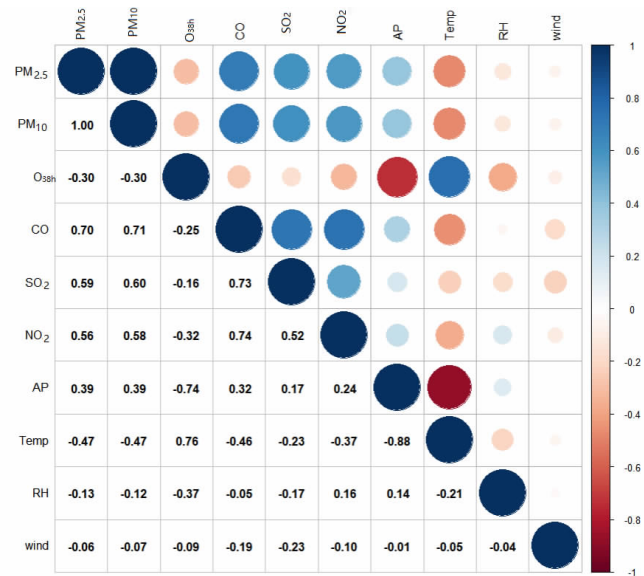


图 1 2018—2022 年某市大气污染物和气象因素的暴露滞后响应结果

Figure 1 The exposure lag response results of air pollutants and meteorological factors in a certain city from 2018 to 2022

2.6 交互作用 结果提示日均温度与 PM₁₀、PM_{2.5}、CO、SO₂、NO₂、相对湿度存在相互作用(P all < 0.05), 相对湿度也与各因子存在相互作用(P all < 0.001)。

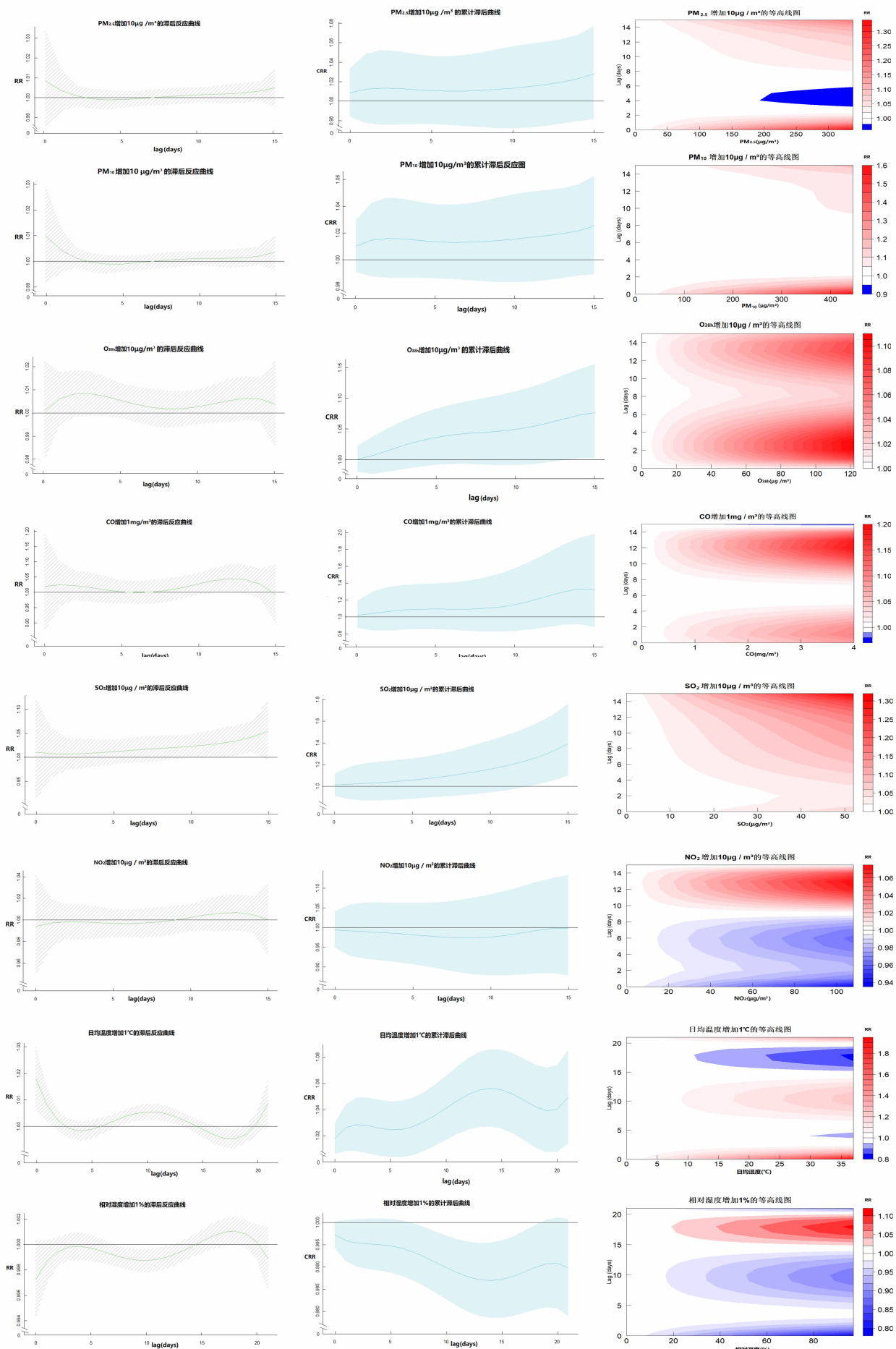
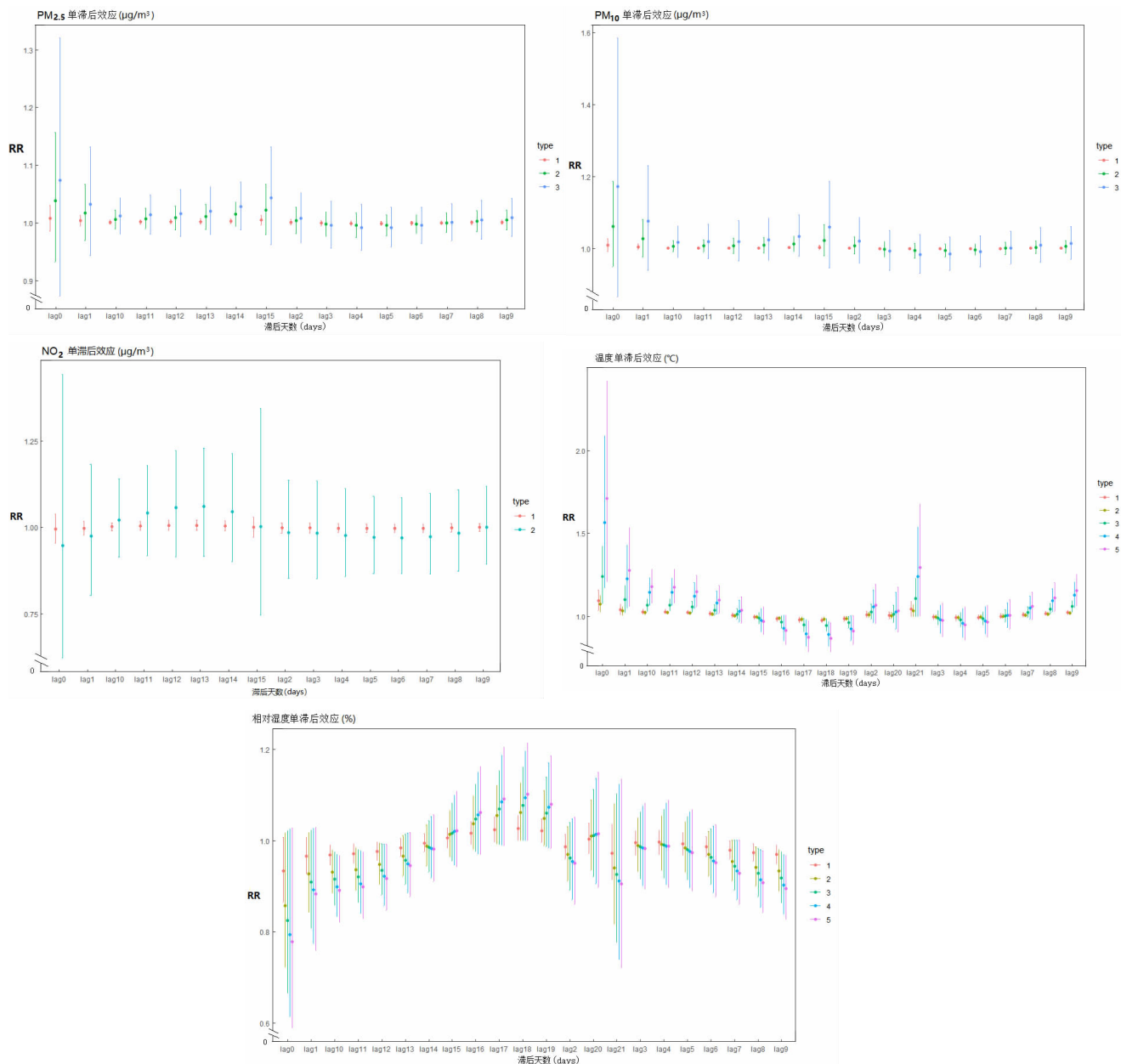


图 2 2018—2022 年该市 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、温度和相对湿度的单因素分组滞后效应

Figure 2 Single-factor grouping lag effects of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, Temp and RH in the city from 2018 to 2022



注:PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 type1、2、3 分别代表 Min ~ 初级标准、初级标准 ~ 二级标准、二级标准 ~ Max; 温度和湿度中 type1、2、3、4、5 分别代表 Min ~ P₅、P₅ ~ P₂₅、P₂₅ ~ P₇₅、P₇₅ ~ P₉₅、P₉₅ ~ Max; NO₂ 中 type1、2 分别代表 min ~ 阈值、阈值 ~ max。

图 3 2018—2022 年该市 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、温度和相对湿度的单因素分组滞后效应

Figure 3 Single-factor grouping lag effects of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, Temp and RH in the city from 2018 to 2022

表 2 2018—2022 年某市空气污染物和气象因素的多污染物模型

Table 2 Multi-pollutant model of air pollutants and meteorological factors in a certain city from 2018 to 2022

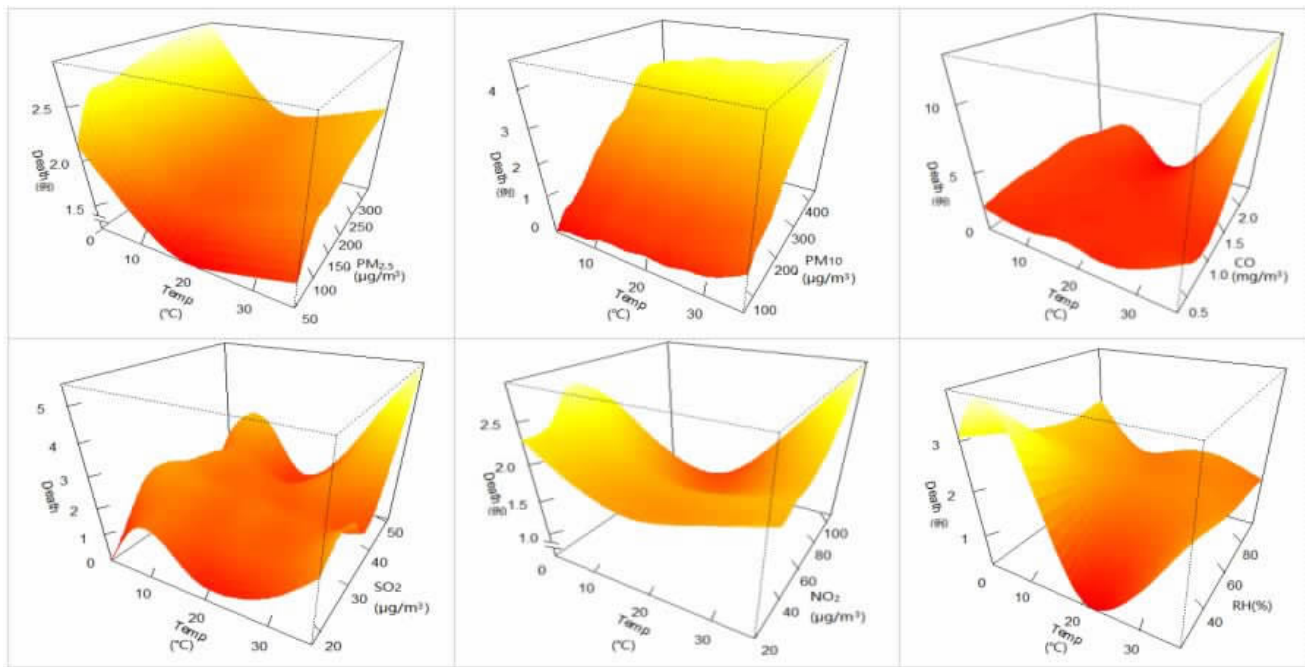
因素	RR(95%CI)	因素	RR(95%CI)
温度	1.018(1.006 ~ 1.030) ^{ac}	相对湿度	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +PM _{2.5}	1.017(1.007 ~ 1.027) ^{ac}	相对湿度 +PM _{2.5}	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +PM ₁₀	1.017(1.006 ~ 1.027) ^{ac}	相对湿度 +PM ₁₀	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +CO	1.020(1.006 ~ 1.033) ^{ac}	相对湿度 +CO	1.025(1.000 ~ 1.050) ^{bc}
温度 +SO ₂	1.022(1.008 ~ 1.036) ^{ac}	相对湿度 +SO ₂	1.025(1.000 ~ 1.051) ^{bc}
温度 +NO ₂	1.020(1.008 ~ 1.033) ^{ac}	相对湿度 +NO ₂	1.022(1.001 ~ 1.050) ^{bc}
温度 +PM _{2.5} +SO ₂	1.018(1.000 ~ 1.030) ^{ac}	相对湿度 +O _{3sh}	1.010(0.984 ~ 1.037) ^b
温度 +PM _{2.5} +NO ₂	1.017(1.006 ~ 1.030) ^{ac}	相对湿度 +PM _{2.5} +SO ₂	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +PM ₁₀ +SO ₂	1.017(1.005 ~ 1.029) ^{ac}	相对湿度 +PM _{2.5} +NO ₂	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +PM ₁₀ +NO ₂	1.017(1.005 ~ 1.029) ^{ac}	相对湿度 +PM ₁₀ +SO ₂	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +SO ₂ +NO ₂	1.024(1.010 ~ 1.038) ^{ac}	相对湿度 +PM ₁₀ +NO ₂	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
温度 +PM _{2.5} +SO ₂ +NO ₂	1.018(1.006 ~ 1.031) ^{ac}	相对湿度 +PM _{2.5} +O _{3sh}	1.000(0.999 ~ 1.002) ^b
温度 +PM ₁₀ +SO ₂ +NO ₂	1.018(1.005 ~ 1.031) ^{ac}	相对湿度 +PM ₁₀ +O _{3sh}	1.000(0.999 ~ 1.002) ^b
		相对湿度 +NO ₂ +SO ₂	1.026(1.000 ~ 1.053) ^{bc}
		相对湿度 +PM _{2.5} +NO ₂ +SO ₂	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
		相对湿度 +PM ₁₀ +NO ₂ +SO ₂	1.001(1.000 ~ 1.002) ^{bc}
		相对湿度 +NO ₂ +SO ₂ +O _{3sh}	1.015(0.987 ~ 1.044) ^b
		相对湿度 +PM _{2.5} +NO ₂ +SO ₂ +O _{3sh}	1.001(0.999 ~ 1.002) ^b
		相对湿度 +PM ₁₀ +NO ₂ +SO ₂ +O _{3sh}	1.001(0.999 ~ 1.002) ^b

注: ^a表示 lag0; ^b表示 lag18; ^c表示 P<0.05。

2.6.1 温度与各污染物交互作用 低温下,PM_{2.5}、PM₁₀ 的浓度升高对死亡风险升高有显著影响。在中温时(19℃左右),低水平的 PM_{2.5}、SO₂、相对湿度与温度相互作用对死亡的影响很小。高浓度的 CO、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和高温交互作用产生的影响最为显著。见图 4。

低浓度污染物交互作用对死亡数增加的影响不大。湿度升高到 60%~80%时,与高浓度的 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 交互作用对疾病死亡产生影响增加。随着湿度继续上升,PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO₂ 与相对湿度交互作用对呼吸系统疾病死亡数的影响有不同程度的下降。见图 5。

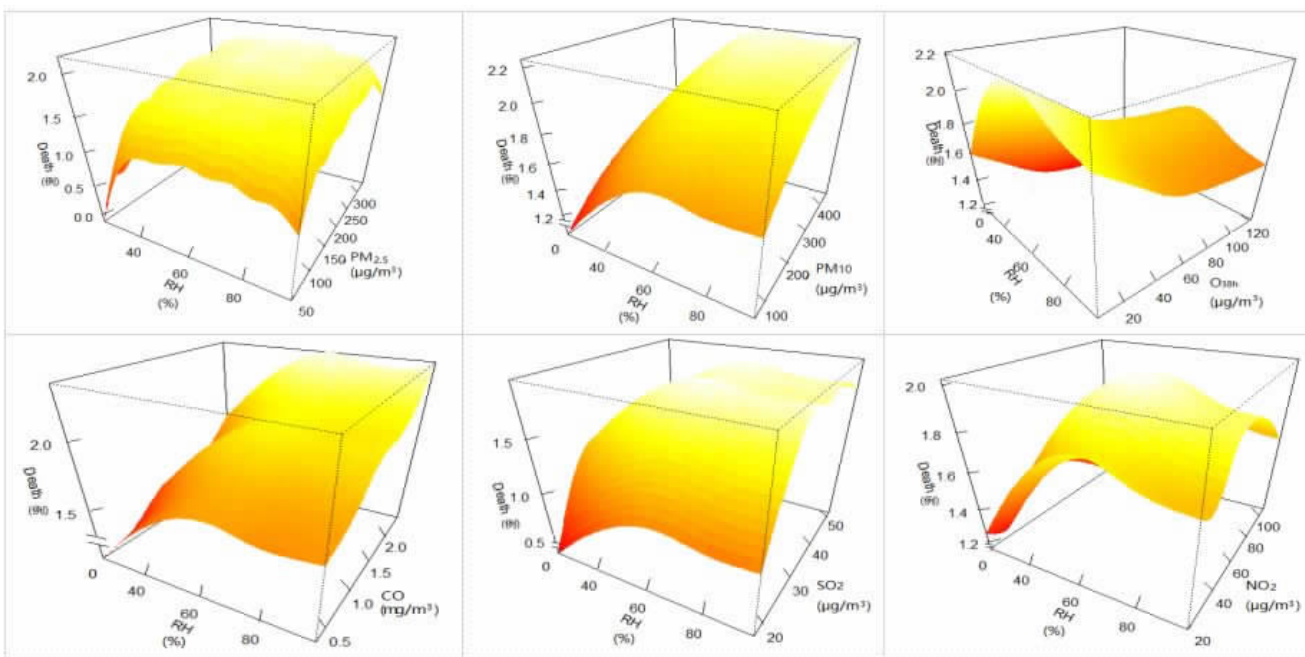
2.6.2 相对湿度与各污染物的交互作用 低湿度与



注:Temp 为日平均温度;RH 为相对湿度。

图 4 2018—2022 年某市温度与大气污染物交互作用的的双自变量三维模型

Figure 4 Dual-independent variable 3D model of the interaction between temperature and atmospheric pollutants in a city from 2018 to 2022



注:RH 为相对湿度。

图 5 2018—2022 年某市相对湿度与大气污染物交互作用的用双自变量三维模型

Figure 5 Double-independent variable 3D model for the interaction between relative humidity and air pollutants in a city in 2018 to 2022

2.7 敏感性分析 结果表明分别改变时间趋势的自由度和滞后天数的参数设置对气象因素和空气污染物的累积暴露响应曲线影响不大,提示该模型的稳定性较好。

3 讨论

本研究是为数不多关于相对湿度与大气污染物对呼吸系统疾病死亡数影响的研究,具有一定的研究价值和意义。结果显示温度、相对湿度和各污染物的独立效应和联合效应对呼吸系统疾病死亡人数的影响存在不同程度的暴露-滞后-效应。

PM_{2.5}、PM₁₀ 作为该市首要的大气颗粒污染物,对人群死亡风险影响较大。PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度升高对呼吸系统疾病死亡造成的危害存在及时效应。本研究显示,PM₁₀ 的 RR 值略大于 PM_{2.5},但部分研究^[5-6]认为 PM_{2.5} 的危害更大,这可能与该地区环境中 PM₁₀ 浓度更大有关。从 lag14 起,PM_{2.5} 的 CRR 值为 1.023(95% CI:0.980 ~ 1.068),大于 PM₁₀ 的 CRR 值 1.022(95% CI:0.988 ~ 1.056),说明 PM_{2.5} 对人体呼吸系统累积的危害更大,这可能是由于 PM_{2.5} 的物理特性携带更多有害物质,造成更大的危害。本研究发现,高温造成的死亡风险要大于低温,而 Kristie L.Ebi^[7]发现呼吸道死亡率与低温的关联性更强。这可能与该地区并不存在极寒冷(<0℃)天气,反而高温天气(≥25℃)占到了每年的 29%有关。从生物学机制来看,高温可能导致呼吸道黏膜干燥,也可能使人们更容易出现脱水和电解质紊乱,导致不良的呼吸道症状加重^[8]。因此,该地高温对呼吸系统疾病死亡的影响更为显著。

单因素分组滞后分析显示,极高温组(30 ~ 37℃)的 RR 值为 1.710(95% CI:1.209 ~ 2.418),温度阈值和死亡风险结果均高于 chen^[9]在中国其他亚热带城市的极高温(29 ~ 31.6℃)研究结果[RR=1.27(95% CI:1.17 ~ 1.38)],这可能是因为该地区的特殊环境和各地区人群对温度的耐受性不同而造成的差异。本研究显示湿度滞后曲线除 lag17 ~ 19 外,极低湿度组(Min ~ P₅)对人群呼吸系统疾病死亡影响最大,与俞^[10]研究结果类似,湿度越低,人群上呼吸道疾病发生率越高。此外,高湿度易滋生霉菌等细菌,可能会增加呼吸道疾病的发生。

本研究发现 SO₂ 作为协同因素纳入 PM_{2.5} 模型中时,死亡的 RR 降低了,继续纳入 NO₂、O₃ 时,联合作用产生的 RR 要大于 PM_{2.5} 的独立效应,这可能是各污染物之间存在拮抗或协同相加作用,这与乌鲁木齐的研究结果不同^[11],这可能是两地环境中污染物浓度不同而造成的差异。当各污染物纳入温度和湿度模型中,RR 有不同程度的升高,提示各污染物与温度、

湿度联合作用对人群呼吸道死亡的影响较大,其中 NO₂、SO₂ 与湿度联合作用的 RR 增长最为明显,可能是湿度的增加促进了 NO₂ 和 SO₂ 向 NO₄²⁻ 和 SO₄²⁻ 转化^[12],根据 Sung-Hee H 的研究发现,SO₄²⁻ 与呼吸急诊就诊有关^[13],根据动物实验发现,长期 NO₄²⁻ 暴露导致呼吸功能显著下降,主要表现为气流阻塞,肺中性粒细胞浸润增加 7.90%^[14]。因此,针对该地高湿度的气候环境,我们不仅需要关注颗粒污染物的浓度,也应该注意气态污染物对人群的影响,需制定和出台相应的空气治理措施,减少污染物和湿度联合作用对人群呼吸系统疾病的影响。

双自变量响应模型显示,在不同温度和湿度水平下,各因素对人群呼吸道死亡的影响不完全一致。在低温、低湿度时,各因素浓度的增加,呼吸系统疾病死亡人数上升,其中低温-低湿造成的死亡风险大于高温-高湿。包海荣^[15]研究发现低温和干燥的环境(温度≤11℃,相对湿度≤50%)会增加 COPD 患者的就诊风险。当温度和湿度上升到中度水平后,人群的死亡结局相反。温度上升到 19℃(P₅₀),各因素浓度变化对人群呼吸道死亡造成的影响最小,这与贵州的研究结果类似^[16]。湿度上升到 60% ~ 80%(P₂₅ ~ P₅₀)时,各因素浓度变化对死亡造成的影响最大,此时污染物浓度在吸湿特性下持续增大,且较高湿度容易使大气形成逆温层,降低大气的扩散能力,减少光解反应^[17],从而影响呼吸系统健康。随着温度继续上升,高温-高浓度 CO 的死亡风险最大,这可能是高温环境下,空气中 CO 升高,人体为了调节体温散热会增加呼吸频率,吸入更多的 CO,导致组织和器官缺氧,加剧呼吸系统的负担^[18]。但室外环境中 CO 浓度不会骤然增大,因此普遍情况下,CO 的影响仍有滞后性。湿度达到极高值 84%(P₇₅)之后,污染物与湿度交互作用对人群呼吸道死亡产生的影响存在不同程度的降低,与昆明地区的研究类似^[19]。在中国五座城市的研究发现^[20],低湿度与儿童呼吸系统疾病门诊量增加有关,高湿度与就诊量降低有关。这可能是因为,极高湿度会与污染物相互作用,形成水溶液或气溶胶物质,减少了空气中的浓度,对人群呼吸系统的影响反而降低了。

本研究存在一定的局限性:站点间的监测结果存在偏差;不同气象因素条件下的行为变化(如空调使用和室内外活动时间)可能会使污染物与个人实际暴露量间存在差异。

该市常见污染物和温度、湿度均会独立影响呼吸系统疾病的死亡风险,污染物之间也存在协同或拮抗效应。温度、湿度和各因素之间的相互作用造成的影响不同。因此更应针对该地区特殊的高温高湿高污

染物浓度的环境进行治理和防控,不同湿度水平与大气气态污染物交互作用产生的影响尤其值得关注。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] Stansfeld SA. Noise effects on health in the context of air pollution exposure [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(10): 12735–12760.
- [2] Borge R, Requía WJ, Yagüe C, et al. Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period 1993–2017[J]. *Environment International*, 2019, 133(Pt B): 105272.
- [3] Yang CM, Zhuo QQ, Chen JY, et al. Analysis of the spatio-temporal network of air pollution in the Yangtze River Delta urban agglomeration, China[J]. *PLOS One*, 2022, 17(1): e0262444.
- [4] 张莉君, 东春阳, 许慧慧, 等. 上海市大气污染与某综合医院儿科呼吸系统疾病门诊人次的关系 [J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(8): 741–746.
- Zhang LJ, Dong CY, Xu HH, et al. Association between ambient air pollution and pediatric respiratory disease outpatients in a hospital in Shanghai [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2020, 37(8): 741–746.(In Chinese)
- [5] 刘思宇, 武梦霞, 冯美慧, 等. 济南市大气颗粒物与呼吸系统疾病住院量的时间序列研究 [J]. *中国预防医学杂志*, 2022, 23(8): 589–594.
- Liu SY, Wu MX, Feng MH, et al. Time series of atmospheric particulate matter and respiratory diseases in Jinan [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2022, 23(8): 589–594.(In Chinese)
- [6] 田元睿, 俞浩, 赵小兰, 等. 大气颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)污染与泰州市居民死亡的关系分析[J]. *现代预防医学*, 2023, 50(2): 245–249, 271.
- Tian YR, Yu H, Zhao XL, et al. Analysis of the relationship between atmospheric particulate matter(PM_{2.5} and PM₁₀)pollution and death of residents in Taizhou city [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2023, 50(2): 245–249, 271.(In Chinese)
- [7] Ebi KL, Vanos J, Baldwin JW, et al. Extreme weather and climate change: population health and health system implications[J]. *Annual Review of Public Health*, 2021, 42: 293–315.
- [8] 刘英, 刘嘉彤, 王金霞, 等. 大气氧化性污染物与气温对我国某地区人群疾病死亡影响的交互作用研究[J]. *中华疾病控制杂志*, 2024, 28(9): 1043–1052, 1060.
- Liu Y, Liu JT, Wang JX, et al. Interactive effects of oxidant air pollutants and temperature on disease mortality in a region of China [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2024, 28(9): 1043–1052, 1060.(In Chinese)
- [9] Chen RJ, Yin P, Wang LJ, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities[J]. *BMJ (Clinical Research ed)*, 2018, 363: k4306.
- [10] 俞科爱, 孙仕强, 贺天锋, 等. 2014 年影响宁波市上呼吸道疾病门诊量的气象条件分析[J]. *卫生研究*, 2018, 47(4): 581–587.
- Yu KA, Sun SQ, He TF, et al. Analysis of meteorological conditions affecting the upper respiratory outpatients in Ningbo City [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2018, 47(4): 581–587.(In Chinese)
- [11] 武迪, 时雨, 依里帕·依力哈木, 等. 乌鲁木齐市常见空气污染物对呼吸系统疾病死亡数的影响 [J]. *中国预防医学杂志*, 2024, 25(1): 13–21.
- Wu D, Shi Y, Yiripaili W, et al. Effect of common air pollutants on deaths from respiratory diseases in Urumqi [J]. *China Preventive Medicine*, 2024, 25(1): 13–21.(In Chinese)
- [12] 李澳, 王亚飞, 崔景文, 等. 北京市大兴新城地区疫情前后细颗粒物二次气溶胶变化特征及潜在源分析 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44(7): 340–352.
- Li A, Wang YF, Cui JW, et al. Characteristics of secondary aerosol changes in fine particulate matter before and after the outbreak in Daxing Xincheng District, Beijing and potential source analysis[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(7): 340–352.(In Chinese)
- [13] Hwang SH, Lee JY, Yi SM, et al. Associations of particulate matter and its components with emergency room visits for cardiovascular and respiratory diseases[J]. *PLOS One*, 2017, 12(8): e0183224.
- [14] Zhang JS, Cheng HX, Wang DB, et al. Chronic exposure to PM_{2.5} nitrate, sulfate, and ammonium causes respiratory system impairments in mice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(5): 3081–3090.
- [15] 包海荣, 刘晓菊, 谭恩丽, 等. 兰州市气温和相对湿度对慢性阻塞性肺疾病患者门诊就诊人次的影响及其交互效应[J]. *北京大学学报:医学版*, 2020, 52(2): 308–316.
- Bao HR, Liu XJ, Tan EL, et al. Effects of temperature and relative humidity on the number of outpatients with chronic obstructive pulmonary disease and their interaction effect in Lanzhou, China[J]. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 2020, 52(2): 308–316.(In Chinese)
- [16] 杜娟, 唐应萍, 何平, 等. 基于 DLNM 探讨气温对死因别死亡的影响[J]. *微量元素与健康研究*, 2023, 6(6): 2, 8.
- Du J, Tang YP, He P, et al. Explore the effect of temperature on cause of death based on DLNM [J]. *Trace element and Health Research*, 2023, 6(6): 2, 8.(In Chinese)
- [17] 高嵩, 田蓉, 郭彬, 等. 长三角典型城市 PM_{2.5} 浓度变化特征及与气象要素的关系[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(9): 142–155.
- Gao S, Tian R, Guo B, et al. Characteristics of PM_{2.5} concentration and its relations with meteorological factors in typical cities of the Yangtze river delta [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(9): 142–155.(In Chinese)
- [18] 陈丽, 应圣洁, 陈林利, 等. 大气低浓度一氧化碳对上海市闵行区呼吸系统疾病死亡人群影响分析 [J]. *预防医学情报杂志*, 2021, 37(3): 419–424.
- Chen L, Ying SJ, Chen Lin L, et al. Analysis of the impact of low atmospheric carbon monoxide on respiratory diseases in Minhang District, Shanghai [J]. *Journal of Preventive Medical Intelligence*, 2021, 37(3): 419–424.(In Chinese)
- [19] 杨芳园, 潘娅婷, 杨韬, 等. 昆明市臭氧污染特征及气象条件影响分析[J]. *云南大学学报:自然科学版*, 2024, 46(2): 299–308.
- Yang FY, Pan YT, Yang T, et al. Analysis of ozone pollution characteristics and meteorological conditions in Kunming[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 46(2): 299–308.(In Chinese)
- [20] Li M, Tang J, Yang HH, et al. Short-term exposure to ambient particulate matter and outpatient visits for respiratory diseases among children: A time-series study in five Chinese cities[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128214.