

· 论 著 ·

杭州市大气污染对居民死亡的影响研究

李朝康¹, 龚科米², 吕焯¹, 徐珊珊¹, 吕娜¹, 叶春³, 朱冰¹, 刘卫艳¹, 高兵¹, 徐虹¹1. 杭州市疾病预防控制中心健康危害因素监测所, 浙江 杭州 310021; 2. 浙江树人学院, 浙江 杭州 310015;
3. 杭州市气象服务中心, 浙江 杭州 310051

摘要: **目的** 了解杭州市大气污染对居民总死亡、呼吸系统疾病死亡、循环系统疾病死亡的影响。**方法** 通过浙江省慢性病监测信息管理系统收集2014—2016年杭州市居民死亡资料, 通过杭州市环境监测中心站收集同期环境空气质量数据, 通过杭州市气象局收集同期气象监测资料。采用基于Poisson分布的广义相加模型(GAM)分析PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和SO₂对居民总死亡、呼吸系统疾病死亡、循环系统疾病死亡的影响, 以超额危险度(ER)及其95%CI描述死亡风险。**结果** 2014—2016年杭州市日均总死亡、呼吸系统疾病死亡、循环系统疾病死亡人数M(Q_R)分别为111(30)、16(9)和37(14)人。单污染物模型分析结果显示, PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂每升高10 μg/m³, 居民总死亡风险分别增加0.47%(95%CI: 0.23%~0.70%)、0.37%(95%CI: 0.21%~0.53%)、1.06%(95%CI: 0.50%~1.61%)、3.08%(95%CI: 2.18%~3.99%), 呼吸系统疾病死亡风险分别增加0.60%(95%CI: 0.04%~1.16%)、0.45%(95%CI: 0.06%~0.83%)、2.01%(95%CI: 0.84%~3.20%)、6.06%(95%CI: 3.80%~8.37%), 循环系统疾病死亡风险分别增加0.45%(95%CI: 0.08%~0.83%)、0.44%(95%CI: 0.17%~0.71%)、1.43%(95%CI: 0.49%~2.37%)、3.66%(95%CI: 2.13%~5.22%), 且多在滞后2 d时效应最大。多污染物模型分析结果显示, 分别调整PM_{2.5}、NO₂和PM_{2.5}+NO₂+SO₂后, SO₂每上升10 μg/m³导致的呼吸系统疾病死亡风险较单污染物模型增加。**结论** 2014—2016年杭州市大气污染物PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和SO₂与居民总死亡风险、呼吸系统疾病死亡风险和循环系统疾病死亡风险均呈正相关, 多种污染物共同存在会增强SO₂对呼吸系统疾病死亡的影响。

关键词: 大气污染; 死亡风险; 呼吸系统疾病; 循环系统疾病

中图分类号: R122.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5087(2023)01-0011-06

Effect of air pollution on mortality among residents in Hangzhou City

LI Chaokang¹, GONG Kemi², LÜ Ye¹, XU Shanshan¹, LÜ Na¹, YE Chun³, ZHU Bing¹, LIU Weiyan¹, GAO Bing¹, XU Hong¹

1. Institute of Health Hazard Monitoring, Hangzhou Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou, Zhejiang 310021, China; 2. Zhejiang Shuren University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China; 3. Hangzhou Meteorological Service Center, Hangzhou, Zhejiang 310051, China

Abstract: Objective To examine the effects of air pollution on overall mortality, mortality of respiratory diseases, and mortality of circulatory diseases among residents in Hangzhou City. **Methods** Residents' mortality data in Hangzhou City from 2014 to 2016 were captured from Zhejiang Provincial Chronic Disease Surveillance Information Management System, and the ambient air quality in Hangzhou City from 2014 to 2016 were collected from Hangzhou Environmental Monitoring Center, while the meteorological monitoring data during the study period were collected from Hangzhou Meteorological Bureau. The effects of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ and SO₂ on overall mortality, mortality of respiratory diseases and mortality of circulatory diseases were evaluated a generalized additive model (GAM) based on Poisson distribution, and the risk of mortality was described with excess risk (ER) and its 95%CI. **Results** The daily M(Q_R) overall deaths, deaths from respiratory diseases and deaths from circulatory diseases were 111 (30), 16 (9) and 37 (14) persons in Hangzhou City from 2014 to 2016, respectively. A 10 μg/m³ increase in PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ and SO₂ resulted in 0.47% (95%CI:

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2023.01.003

基金项目: 杭州市卫生科技计划重点项目(0020190549)

作者简介: 李朝康, 硕士, 医师, 主要从事环境卫生工作

通信作者: 徐虹, E-mail: xuhong-123456@hotmail.com

0.23%–0.70%), 0.37% (95%CI: 0.21%–0.53%), 1.06% (95%CI: 0.50%–1.61%) and 3.08% (95%CI: 2.18%–3.99%) rises in the risk of overall mortality, 0.60% (95%CI: 0.04%–1.16%), 0.45% (95%CI: 0.06%–0.83%), 2.01% (95%CI: 0.84%–3.20%) and 6.06% (95%CI: 3.80%–8.37%) rises in the risk of mortality of respiratory diseases, and 0.45% (95%CI: 0.08%–0.83%), 0.44% (95%CI: 0.17%–0.71%), 1.43% (95%CI: 0.49%–2.37%) and 3.66% (95%CI: 2.13%–5.22%) rises in the risk of mortality of circulatory diseases, and the greatest effect was observed at a 2-day lag. Multi-pollutant model analysis showed that, after adjustment for PM_{2.5}, NO₂ and PM_{2.5}+NO₂+SO₂, a 10 μg/m³ increase in SO₂ resulted in an elevated risk of mortality of respiratory diseases than a single-pollutant model. **Conclusions** The air pollutants PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ correlated positively with the risk of overall mortality, mortality of respiratory diseases and mortality of circulatory diseases in Hangzhou City from 2014 to 2016, and the co-existence of multiple pollutants enhanced the effect of SO₂ on mortality of respiratory diseases.

Keywords: air pollution; mortality risk; respiratory disease; circulatory disease

大气污染是人类健康最主要的环境威胁之一, 暴露于大气污染会增加人群疾病发病率 (主要是呼吸系统和循环系统疾病) 和全因死亡率^[1-3]。2019 年全球疾病负担研究 (Global Burden of Disease Study 2019, GBD 2019) 显示, 环境颗粒物污染是暴露风险增加最多的因素之一, 占伤残调整寿命年 (disability adjusted life year, DALY) 的 1% 以上, 并且暴露量以每年超过 1% 的速度增加^[4]。世界卫生组织 (WHO) 预计, 到 2050 年, 大气污染对过早死亡的贡献可能增加 1 倍^[5]。近年来杭州市空气质量总体有所改善, 但由于高能耗产业和汽车保有量的快速增长, 空气污染造成的健康影响^[6-7] 仍需重点关注。为探究杭州市大气污染对居民死亡的影响, 本研究采用基于 Poisson 分布的时间序列分析大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 与居民总死亡、呼吸系统疾病死亡、循环系统疾病死亡的关联, 为大气污染短期健康效应评价提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

1.1.1 居民死亡资料 通过浙江省慢性病监测信息管理系统收集 2014—2016 年杭州市居民死亡资料。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), 筛选出总死亡、呼吸系统疾病死亡 (J00~J99) 和循环系统疾病死亡 (I00~I99) 居民纳入研究。

1.1.2 大气污染物与气象资料 同期杭州市每日大气污染物监测资料来源于杭州市环境监测中心站, 覆盖 11 个国控环保监测站点, 监测污染物包括细颗粒物 (PM_{2.5})、可吸入颗粒物 (PM₁₀)、二氧化氮 (NO₂) 和二氧化硫 (SO₂), 以 11 个国控监测点的日均值作为全市水平。气象资料来源于杭州市气象局, 包括日均温度、日均相对湿度和日均风速。大气污染物和气象

指标缺失率均 < 0.01%, 以缺失值前后 2 d 的监测结果的算术平均值填补^[8]。

1.2 方法 采用基于 Poisson 回归的广义相加模型 (generalized additive model, GAM) 分析杭州市大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 对每日居民总死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的急性效应。基本模型如下^[9]:

$$\lg [E(Y_t)] = \beta X_{(t-\delta)} + D_{dow} + H_{holiday} + s(date, \nu) + s(T_{temp}, \nu) + s(T_{RH}, \nu) + s(T_{ws}, \nu) + \alpha$$

式中: Y_t 为第 t 天实际死亡人数, $E(Y_t)$ 为第 t 天期望死亡人数; $X_{(t-\delta)}$ 表示第 $t-\delta$ 天大气污染物的日均浓度, δ 为滞后天数; β 为回归系数; D_{dow} 用于控制星期几效应; $H_{holiday}$ 用于控制节假日效应; s 为非参数平滑函数; $date$ 为日期变量; T_{temp} 为日均温度变量; T_{RH} 为日均相对湿度变量; T_{ws} 为日均风速变量; α 为截距。

根据赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 最小法则, 在调整气象因素、时间长期趋势和“星期几效应”等混杂因素的影响后, 将当日的 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 单独引入 GAM 模型, 分别选择滞后 0~7 d 进行分析; 为了避免各污染物之间的潜在共线性对结果的影响, 选择每个大气污染物滞后效应最明显的滞后天数 (最佳滞后天数), 分别构建多污染物模型作进一步分析。以超额危险度 (excess risk, ER) 及其 95%CI 作为效应指标, 表示大气污染物浓度每上升 10 μg/m³, 居民每日死亡风险增加或减少的百分比。

1.3 统计分析 采用 R 3.4.3 的 mgcv 软件包统计分析。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 Spearman 秩相关分析杭州市气象因素、大气污染物之间的相关性。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 杭州市大气污染与居民死亡基本情况 2014—2016年杭州市日均温度 $M(Q_R)$ 为 19.15 (13.98) °C、日均相对湿度 $M(Q_R)$ 为 76 (20) %，日均风速 $M(Q_R)$ 为 2.00 (1.00) m/s。PM_{2.5} 质量浓度为 (54.76±29.98) μg/m³，共有 231 d 超过国家标准 (GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[10]) 规定的 75 μg/m³，占 21.10%。PM₁₀ 质量浓度为 (83.60±42.61) μg/m³，共有 81 d 超过国家标准规定的 150 μg/m³，占 7.40%。NO₂ 质量浓度为 (44.89±16.37) μg/m³，共有 29 d 超过国家标准规定的 80 μg/m³，

占 2.65%。SO₂ 质量浓度为 (15.58±8.39) μg/m³，均在国家标准 150 μg/m³ 以内。杭州市日均总死亡人数 $M(Q_R)$ 为 111 (30) 人，其中呼吸系统疾病造成的日均死亡人数 $M(Q_R)$ 为 16 (9) 人，循环系统疾病造成的日均死亡人数 $M(Q_R)$ 为 37 (14) 人。

2.2 大气污染物、气象因素之间的相关性分析 Spearman 秩相关分析结果显示，大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂ 两两间以及每种大气污染物与温度、相对湿度、风速两两间均存在相关性 ($P<0.05$)，其中大气污染物两两间均呈正相关关系，每种大气污染物与温度、相对湿度、风速间分别呈负相关关系 ($P<0.05$)。见表 1。

表 1 2014—2016年杭州市大气污染物、气象因素间的 Spearman 秩相关分析 (r/P 值)

Table 1 Spearman rank correlation analysis of air pollutants and meteorological factors in Hangzhou City from 2014 to 2016 (r/P)

指标	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	温度	相对湿度	风速
PM _{2.5}	0.943/<0.001	0.696/<0.001	0.685/<0.001	-0.374/<0.001	-0.240/<0.001	-0.301/<0.001
PM ₁₀	—	0.695/<0.001	0.711/<0.001	-0.314/<0.001	-0.393/<0.001	-0.288/<0.001
SO ₂	—	0.640/<0.001	—	-0.453/<0.001	-0.493/<0.001	-0.166/<0.001
NO ₂	—	—	—	-0.521/<0.001	-0.066/0.030	-0.404/<0.001
温度	—	—	—	—	0.085/0.005	-0.031/0.299
相对湿度	—	—	—	—	—	-0.140/<0.001

2.3 大气污染物与居民死亡的关联分析

2.3.1 单污染物模型分析 调整气象因素、时间长期趋势和“星期几效应”的影响后，PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 均能增加居民总死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的风险。PM_{2.5} 每上升 10 μg/m³ 对居民总死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的影响均在滞后 2 d 时达到最大；PM₁₀ 每上升 10 μg/m³ 对居民总死亡和循环系统疾病死亡的影响均在滞后 2 d 时达到最大，对呼吸系统疾病死亡的影响在滞后 5 d 时达到最大；NO₂ 每上升 10 μg/m³ 对居民总死亡和循环系统疾病死亡的影响均在当天达到最大，对呼吸系统疾病死亡影响在滞后 2 d 时达到最大；SO₂ 每上升 10 μg/m³ 对居民总死亡和循环系统疾病死亡的影响均在滞后 2 d 时达到最大，对呼吸系统疾病死亡的影响在滞后 4 d 时达到最大。见表 2。

2.3.2 多污染物模型分析 分别调整 PM₁₀、NO₂、SO₂ 和 PM₁₀+NO₂+SO₂ 后，PM_{2.5} 每上升 10 μg/m³ 对居民死亡的影响均无统计学意义。

调整 NO₂ 后，PM₁₀ 每上升 10 μg/m³，居民总死

亡和循环系统疾病死亡风险较单污染物模型下降，而对呼吸系统疾病死亡的影响无统计学意义；分别调整 PM_{2.5}、SO₂ 和 PM_{2.5}+NO₂+SO₂ 后，结果均无统计学意义。

调整 PM_{2.5} 后，NO₂ 每上升 10 μg/m³，居民总死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡风险较单污染物模型下降；调整 PM₁₀ 后，NO₂ 每上升 10 μg/m³，居民呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡风险较单污染物模型变化不大，总死亡风险结果无统计学意义；分别调整 SO₂ 和 PM_{2.5}+PM₁₀+SO₂ 后，结果均无统计学意义。

分别调整 PM_{2.5}、NO₂、PM_{2.5}+NO₂+SO₂ 后，SO₂ 每上升 10 μg/m³，居民总死亡风险较单污染模型下降，呼吸系统疾病死亡风险上升，循环系统疾病死亡风险变化不大。见表 3。

3 讨论

本研究采用基于 Poission 分布的时间序列模型分析 2014—2016 年杭州市大气污染物对居民总死亡、呼吸系统疾病死亡和循环系统疾病死亡的影响，结果显示 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 均能显著增加居民死亡

表 2 大气污染物对居民死亡的滞后效应分析 [ER (95%CI) %]
Table 2 The lag effect of air pollutants on mortality among residents [ER (95%CI)%]

污染物	滞后天数/d	总死亡	呼吸系统疾病死亡	循环系统疾病死亡
PM _{2.5}	0	0.17 (-0.08 ~ 0.42)	0.62 (-0.01 ~ 1.24)	0.33 (-0.09 ~ 0.76)
	1	0.25 (0.03 ~ 0.48) ^a	0.44 (-0.12 ~ 1.01)	0.33 (-0.05 ~ 0.72)
	2	0.47 (0.23 ~ 0.70) ^a	0.60 (0.04 ~ 1.16) ^a	0.45 (0.08 ~ 0.83) ^a
	3	0.19 (-0.04 ~ 0.41)	0.40 (-0.15 ~ 0.96)	0.20 (-0.17 ~ 0.58)
	4	-0.07 (-0.28 ~ 0.15)	0.21 (-0.33 ~ 0.76)	-0.09 (-0.46 ~ 0.28)
	5	-0.15 (-0.37 ~ 0.06)	0.45 (-0.09 ~ 1.00)	-0.17 (-0.54 ~ 0.20)
	6	-0.11 (-0.33 ~ 0.11)	0.43 (-0.11 ~ 0.98)	-0.21 (-0.58 ~ 0.16)
	7	-0.06 (-0.28 ~ 0.16)	0.57 (0.03 ~ 1.12) ^a	-0.44 (-0.81 ~ -0.07) ^a
PM ₁₀	0	0.11 (-0.08 ~ 0.29)	0.36 (-0.11 ~ 0.82)	0.27 (-0.05 ~ 0.58)
	1	0.23 (0.07 ~ 0.39) ^a	0.27 (-0.14 ~ 0.68)	0.34 (0.06 ~ 0.62) ^a
	2	0.37 (0.21 ~ 0.53) ^a	0.41 (0.01 ~ 0.81) ^a	0.44 (0.17 ~ 0.71) ^a
	3	0.23 (0.08 ~ 0.39) ^a	0.23 (-0.16 ~ 0.62)	0.25 (-0.01 ~ 0.52)
	4	0.07 (-0.08 ~ 0.23)	0.30 (-0.09 ~ 0.68)	0.05 (-0.21 ~ 0.31)
	5	-0.04 (-0.19 ~ 0.11)	0.45 (0.06 ~ 0.83) ^a	-0.06 (-0.32 ~ 0.31)
	6	-0.04 (-0.20 ~ 0.11)	0.21 (-0.18 ~ 0.59)	-0.07 (-0.33 ~ 0.19)
	7	-0.09 (-0.25 ~ 0.06)	0.28 (-0.11 ~ 0.67)	-0.30 (-0.57 ~ -0.04) ^a
NO ₂	0	1.06 (0.50 ~ 1.61) ^a	1.53 (0.15 ~ 2.94) ^a	1.43 (0.49 ~ 2.37) ^a
	1	0.96 (0.46 ~ 1.45) ^a	1.68 (0.44 ~ 2.94) ^a	1.25 (0.42 ~ 2.09) ^a
	2	0.94 (0.48 ~ 1.40) ^a	2.01 (0.84 ~ 3.20) ^a	0.99 (0.21 ~ 1.77) ^a
	3	0.53 (0.08 ~ 0.99) ^a	1.22 (0.06 ~ 2.39) ^a	0.56 (-0.20 ~ 1.34)
	4	0.23 (-0.22 ~ 0.68)	1.06 (-0.09 ~ 2.21)	-0.09 (-0.85 ~ 0.67)
	5	0.16 (-0.29 ~ 0.61)	1.45 (0.31 ~ 2.60) ^a	-0.43 (-1.18 ~ 0.32)
	6	0.03 (-0.41 ~ 0.47)	0.79 (-0.33 ~ 1.93)	-0.07 (-0.82 ~ 0.68)
	7	-0.46 (-0.91 ~ -0.01) ^a	0.71 (-0.42 ~ 1.86)	-1.08 (-1.83 ~ 0.33) ^a
SO ₂	0	1.52 (0.47 ~ 2.57) ^a	2.86 (0.26 ~ 5.52) ^a	2.49 (0.71 ~ 4.30) ^a
	1	2.30 (1.37 ~ 3.23) ^a	4.53 (2.21 ~ 6.90) ^a	2.45 (0.89 ~ 4.04) ^a
	2	3.08 (2.18 ~ 3.99) ^a	4.90 (2.65 ~ 7.21) ^a	3.66 (2.13 ~ 5.22) ^a
	3	2.62 (1.73 ~ 3.52) ^a	5.06 (2.82 ~ 7.35) ^a	2.67 (1.17 ~ 4.20) ^a
	4	2.33 (1.44 ~ 3.22) ^a	6.06 (3.80 ~ 8.37) ^a	2.45 (0.95 ~ 3.97) ^a
	5	1.76 (0.87 ~ 2.65) ^a	5.20 (2.95 ~ 7.50) ^a	1.73 (0.24 ~ 3.25) ^a
	6	1.32 (0.45 ~ 2.20) ^a	4.89 (2.68 ~ 7.16) ^a	1.62 (0.14 ~ 3.12) ^a
	7	1.73 (0.84 ~ 2.62) ^a	3.28 (1.03 ~ 6.57) ^a	0.97 (-0.53 ~ 2.49)

注：^a表示P<0.05。

风险，总体在滞后 2 天时的效应最明显，与同类研究报道^[11-13]类似。

近年来大气颗粒物已经成为我国城市主要的大气污染物，例如 PM_{2.5} 会渗入呼吸区域^[14]，有研究发现暴露于 PM_{2.5} 硫酸盐与心肺死亡有关^[15]；其他一些研究报告了 PM_{2.5} 的几种化学成分与死亡率的关系，包括主要颗粒物成分如元素碳、有机碳和硝酸盐，以及微量成分如镍和砷^[16]。有效降低颗粒物浓度对于降

低疾病负担和提高人群健康具有重大意义。本研究发 现 PM_{2.5}、PM₁₀ 每上升 10 μg/m³，居民总死亡、呼吸 系统疾病死亡、循环系统疾病死亡风险均增加，与同 类研究报道一致。一项涵盖 652 个城市的研究发 现，PM₁₀、PM_{2.5} 浓度升高与日全因死亡率增加、日 心血管死亡率增加、日呼吸系统死亡率增加均相 关，在对气态污染物进行调整后，这些关联仍有统 计学意义^[17]。包含 24 541 名女性的丹麦护士队列

表 3 大气污染物对居民死亡影响的多污染物模型分析 [ER (95%CI) %]

Table 3 A multi-pollutant model analysis of the effect of air pollutants on mortality among residents [ER (95%CI) %]

污染物	调整因素	总死亡	呼吸系统疾病死亡	循环系统疾病死亡
PM _{2.5}	未调整	0.47 (0.23 ~ 0.70) ^a	0.60 (0.04 ~ 1.16) ^a	0.45 (0.08 ~ 0.83) ^a
	PM ₁₀	0.33 (-0.33 ~ 1.01)	1.38 (-0.28 ~ 3.08)	0.48 (-0.65 ~ 1.63)
	NO ₂	0.27 (-0.01 ~ 0.56)	0.09 (-0.58 ~ 0.76)	0.27 (-0.19 ~ 0.72)
	SO ₂	0.15 (-0.14 ~ 0.43)	-0.05 (-0.70 ~ 0.60)	-0.04 (-0.48 ~ 0.40)
	PM ₁₀ +NO ₂ +SO ₂	0.22 (-0.47 ~ 0.90)	0.69 (-0.75 ~ 2.16)	-0.64 (-1.61 ~ 0.34)
PM ₁₀	未调整	0.37 (0.21 ~ 0.53) ^a	0.45 (0.06 ~ 0.83) ^a	0.44 (0.17 ~ 0.71) ^a
	PM _{2.5}	0.10 (-0.38 ~ 0.59)	-0.48 (-1.68 ~ 0.74)	-0.03 (-0.85 ~ 0.79)
	NO ₂	0.28 (0.08 ~ 0.48) ^a	<0.01 (-0.50 ~ 0.50)	0.37 (0.03 ~ 0.71) ^a
	SO ₂	0.07 (-0.13 ~ 0.27)	-0.17 (-0.66 ~ 0.33)	0.08 (-0.25 ~ 0.42)
	PM _{2.5} +NO ₂ +SO ₂	-0.09 (-0.60 ~ 0.43)	-0.80 (-1.91 ~ 0.32)	0.54 (-0.21 ~ 1.30)
NO ₂	未调整	1.06 (0.50 ~ 1.61) ^a	2.01 (0.84 ~ 3.20) ^a	1.43 (0.49 ~ 2.37) ^a
	PM _{2.5}	0.68 (0.12 ~ 1.24) ^a	1.91 (0.51 ~ 3.33) ^a	1.41 (0.33 ~ 2.50) ^a
	PM ₁₀	0.46 (-0.12 ~ 1.04)	2.02 (0.55 ~ 3.50) ^a	1.45 (0.31 ~ 2.60) ^a
	SO ₂	0.07 (-0.49 ~ 0.63)	0.80 (-0.61 ~ 2.24)	1.01 (-0.11 ~ 2.14)
	PM _{2.5} +PM ₁₀ +SO ₂	0.24 (-0.43 ~ 0.91)	1.16 (-0.39 ~ 2.72)	1.14 (-0.09 ~ 2.39)
SO ₂	未调整	3.08 (2.18 ~ 3.99) ^a	6.06 (3.80 ~ 8.37) ^a	3.66 (2.13 ~ 5.22) ^a
	PM _{2.5}	2.40 (1.20 ~ 3.60) ^a	7.82 (5.11 ~ 10.59) ^a	3.74 (1.95 ~ 5.57) ^a
	PM ₁₀	2.84 (1.73 ~ 3.98) ^a	7.89 (5.03 ~ 10.84) ^a	3.39 (1.49 ~ 5.32) ^a
	NO ₂	3.01 (1.92 ~ 4.11) ^a	6.95 (4.27 ~ 9.71) ^a	3.79 (1.93 ~ 5.68) ^a
	PM _{2.5} +PM ₁₀ +NO ₂	2.19 (0.85 ~ 3.55) ^a	7.86 (4.88 ~ 10.92) ^a	3.41 (1.40 ~ 5.47) ^a

注：^a表示 P<0.05。

研究发现，长期暴露于低水平的 PM_{2.5}、PM₁₀ 与总死亡率及心血管疾病和呼吸系统疾病的死亡率有关^[18]。基于我国中部地区 7 年死亡记录的时间序列研究表明，短期暴露于 PM_{2.5}、PM₁₀ 与脑血管疾病死亡率较高的风险显著相关^[19]。PM_{2.5}、PM₁₀ 与居民死亡的多污染物模型分析结果显示，与单污染物模型相比，PM_{2.5}、PM₁₀ 对死亡的效应减弱甚至消失，这可能是由于污染物两两间相关性较高，影响了模型中效应值的估计。

本研究还发现，NO₂、SO₂ 浓度升高与居民总死亡、呼吸系统疾病死亡、循环系统疾病死亡风险增加均相关。一项涵盖我国 21 个城市的荟萃分析结果也表明，SO₂、NO₂ 浓度的升高会导致居民每日总死亡率、心脑血管疾病和呼吸系统疾病的死亡率增加^[20]。本研究中，调整 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 后，NO₂ 浓度升高导致的死亡风险有所下降，与一项涉及全球 26 个城市的荟萃分析结果^[21] 类似。但在分别调整 PM_{2.5}、NO₂ 和 PM_{2.5}+NO₂+SO₂ 后，SO₂ 浓度上升导致的呼吸系统疾病死亡风险较单污染物模型上升，提示多污染物共同作

用可以增强 SO₂ 对居民呼吸系统疾病死亡的影响，因此在治理大气 SO₂ 的同时需关注 PM 和 NO₂。

本研究存在一些局限性。第一，时间序列设计不能完全排除生态学谬误，本研究以杭州市 11 个国控环保监测站的空气污染物日平均浓度作为个体暴露的估计，未分析个体水平上的大气污染物暴露，可能导致暴露量分类错误，忽略了空气污染对环境的空间影响。第二，未调整与居民死亡相关的其他个体层面的风险因素，如现病史、既往史、烟草暴露、饮食行为和身体活动情况等。第三，仅收集了杭州市 3 年的数据，无法分析长期趋势^[22]，后续研究可扩大研究区域和时段。

参考文献

[1] COHEN A J, BRAUER M, BURNETT R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. Lancet, 2017, 389 (10082): 1907-1918.
 [2] 徐琪, 叶辉, 朱冰, 等. 大气 PM_{2.5} 与呼吸系统、心脑血管疾病急救病例数的相关性研究 [J]. 预防医学, 2022, 34 (7): 710-714.

- [3] LIN H, TAO J, DU Y, et al. Particle size and chemical constituents of ambient particulate pollution associated with cardiovascular mortality in Guangzhou, China [J]. *Environ Pollut*, 2016, 208 (Part B): 758-766.
- [4] GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 [J]. *Lancet*, 2020, 396 (10258): 1223-1249.
- [5] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. *Nature*, 2015, 525 (7569): 367-371.
- [6] 徐珊珊, 吕焯, 刘卫艳, 等. 大气 PM_{2.5} 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.
- [7] MO Z, FU Q, LYU D, et al. Impacts of air pollution on dry eye disease among residents in Hangzhou, China: a case-crossover study [J]. *Environ Pollut*, 2019, 246: 183-189.
- [8] 吴芸芸, 王子豪, 李群英, 等. 2014—2018 年重庆市主要城区大气 PM_{2.5} 水平与居民非意外死亡的关系 [J]. *环境与职业医学*, 2020, 37 (8): 735-740.
- [9] 路凤, 李亚伟, 李成橙, 等. 时间序列分析在空气污染与健康领域的应用及其 R 软件实现 [J]. *中国卫生统计*, 2018, 35 (4): 622-625.
- [10] 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.
- [11] 何晓庆, 王小红, 罗进斌. 大气 PM₁₀ 与呼吸系统疾病死亡的关系研究 [J]. *预防医学*, 2019, 31 (10): 987-991.
- [12] 顾雯雯, 杨洛贤, 程庆林. 大气 PM_{2.5} 对呼吸系统疾病死亡率影响的 Meta 分析 [J]. *预防医学*, 2018, 30 (11): 1100-1106.
- [13] 王任洪. 兰州市大气污染与呼吸、循环系统疾病死亡的时间序列分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [14] SEATON A, MACNEE W, DONALDSON K, et al. Particulate air pollution and acute health effects [J]. *Lancet*, 1995, 345 (8943): 176-178.
- [15] LI P, XIN J, WANG Y, et al. Association between particulate matter and its chemical constituents of urban air pollution and daily mortality or morbidity in Beijing City [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22 (1): 358-368.
- [16] BURNETT R T, BROOK J, DANN T, et al. Association between particulate- and gas-phase components of urban air pollution and daily mortality in eight Canadian cities [J]. *Inhal Toxicol*, 2000, 12 (Suppl. 4): 15-39.
- [17] LIU C, CHEN R, SERA F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities [J]. *N Engl J Med*, 2019, 381 (8): 705-715.
- [18] SO R, JØRGENSEN J T, LIM Y H, et al. Long-term exposure to low levels of air pollution and mortality adjusting for road traffic noise: a Danish Nurse Cohort study [J/OL]. *Environ Int*, 2020, 143 [2022-11-26]. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105983>.
- [19] YAN Y, CHEN X, GUO Y, et al. Ambient air pollution and cerebrovascular disease mortality: an ecological time-series study based on 7-year death records in central China [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28 (21): 27299-27307.
- [20] 马洪群, 崔莲花. 大气污染物 (SO₂、NO₂) 对中国居民健康效应影响的 meta 分析 [J]. *职业与健康*, 2016, 32 (8): 1038-1044.
- [21] MILLS I C, ATKINSON R W, ANDERSON H R, et al. Distinguishing the associations between daily mortality and hospital admissions and nitrogen dioxide from those of particulate matter: a systematic review and meta-analysis [J/OL]. *BMJ Open*, 2016, 6 (7) [2022-11-26]. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2015-010751>.
- [22] BHASKARAN K, GASPARRINI A, HAJAT S, et al. Time series regression studies in environmental epidemiology [J]. *Int J Epidemiol*, 2013, 42 (4): 1187-1195.

收稿日期: 2022-09-27 修回日期: 2022-11-26 本文编辑: 徐文璐