

·论 著·

2017—2019 年苏州市大气主要污染物 PM_{2.5} 与人群死亡风险的关系

王瑛,朱小红,刘强,周晓龙,赵敏娴,陆颂文,杨海兵
苏州市疾病预防控制中心环境卫生科,江苏 苏州 215000

摘要:目的 选择苏州市大气中首要污染物细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})等作为本次健康风险评估的主要污染物,评估 PM_{2.5} 污染对人群非意外总死亡、呼吸系统疾病死亡以及循环系统疾病死亡的急性健康风险。方法 收集 2017 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日常住人口全死因个案资料,采用时间序列广义相加泊松回归模型,在控制时间趋势和气象因素等混杂因素的基础上分析苏州市 PM_{2.5}、可吸入颗粒物(inhalable particulate matter, PM₁₀)、NO₂、臭氧 8 h(O₃-8h)、CO、SO₂ 等污染物暴露与人群的死亡风险关系。结果 当参照浓度为 35 μg/m³ 时,2017—2019 年期间苏州 PM_{2.5} 急性效应造成的死亡人数分别为 460(95%CI: 197~725)例、469(95%CI: 200~741)例和 353(95%CI: 151~556)例;PM_{2.5} 对苏州市非意外死亡人数的影响存在滞后效应表现。对于单日死亡效应,PM_{2.5} 滞后效应表现为先降低再缓慢升高的趋势,单日滞后 3 天(lag3)的效应最大,即滞后 3 天的 PM_{2.5} 浓度每升高 10 μg/m³,引起非意外死亡的相对危险度(RR)值为 1.003 4(95%CI: 1.001 0~1.005 5)。结论 2017—2019 年苏州市大气中 PM_{2.5} 浓度与居民超额死亡风险显著相关。

关键词:细颗粒物;人群死亡;时间序列分析;超额死亡

中国图书资料分类号:R122

文献标识码:A

文章编号:1004-1257(2021)20-2803-06

DOI:10.13329/j.cnki.zyyjk.20211009.001

Relationship between atmospheric pollutants PM_{2.5} and human death risk in Suzhou City from 2017-2019

WANG Ying, ZHU Xiao-hong, LIU Qiang, ZHOU Xiao-long, ZHAO Min-xian, LU Song-wen, YANG Hai-bing

Environmental Hygiene Department, Suzhou Center for Disease Control and Prevention, Suzhou Jiangsu, 215000, China

Abstract: **Objective** Selecting the fine particulate matter(PM_{2.5}), the primary pollutant in the atmosphere of Suzhou City, as the main pollutant in this health risk assessment, to assess the acute health risk of PM_{2.5} to non-accidental total death, death from respiratory diseases and death from circulatory diseases. **Methods** The data on all cause of death cases of residents from January 1, 2017 to December 31, 2019, were collected. Time series generalized additive Poisson regression model was used to analyze the relationship between the exposure of PM_{2.5}, inhalable particulate matter (PM₁₀), nitrogen dioxide (NO₂), 8 hours ozone average concentration (O_{3-8h}), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂) in Suzhou City and human death risk after controlling for confounding factors such as time trends and meteorological factors. **Results** When the reference concentration was 35 μg/m³, 460(95%CI: 197-725), 469(95%CI: 200-741) and 353(95%CI: 151-556) deaths were caused by the acute effects of PM_{2.5} in Suzhou during 2017-2019. There was a lag effect of PM_{2.5} on the number of non-accidental deaths in Suzhou City. As for the single-day death effect, the lag effect of PM_{2.5} showed a trend of first decreasing and then slowly increasing. Lag3 effect was the largest, that is, the relative risk (RR) of non-accidental death was 1.003 4(95%CI: 1.001 0-1.005 5) for every 10 g/m³ increase in PM_{2.5} concentration after 3-day lag. **Conclusion** From 2017-2019, the concentration of PM_{2.5} in the atmosphere in Suzhou City is significantly correlated with the excess death risk of residents.

Keywords: Fine particulate matter; Death of the population; Time series analysis; Excess deaths

随着工业进程的深入发展以及全球疾病谱的转变,大气污染被 WHO 评价为对健康影响最大的环境危险因素。研究表明,颗粒物是大气污染物的首要成分。国际癌症研究机构(international agency for research on cancer, IARC)也已经早在 2013 年就将大气颗粒物列为一类致癌物^[1-2]。近年来,大气颗粒物介导的作用于人群

非意外死亡率、循环系统疾病和呼吸系统疾病的发病率的方式成为公共卫生的研究热点^[3]。综合近 10 年来大气颗粒物的文献分析显示,大气细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})每增加 10 μg/m³,人群非意外总死亡、循环系统疾病和呼吸系统死亡率平均提高 1.76%、2.19% 和 1.68%^[4-6]。目前针对空气污染较重的地区,如京津冀、珠三角地区及南京市等已有很多的专题研究^[7-8]。苏州市作为长三角宜居城市,颗粒物浓度接近国家二级限值。由于缺失苏州市大气颗粒物污染对死亡急性影响的研

基金项目:苏州市科教兴卫青年科技项目(KJXW2017055)

作者简介:王瑛,男,主管医师,主要从事环境卫生工作。

通信作者:朱小红,副主任医师 E-mail: 605604859@qq.com

由于缺失苏州市大气颗粒物污染对死亡急性影响的研

究报告,因此,我们连续收集2017—2019年苏州市大气污染物和居民每日死亡数据,采用基于广义相加模型(generalized additive model, GAM)的时间序列分析方法,探讨颗粒物污染与人群死亡的相关关系,为深层次研究、制定苏州市地方性环境防控政策提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源 2017年1月1日—2019年12月31日苏州市大气污染物的数据以及气象资料分别来源于苏州市环境监测中心和苏州市气象局,其日均浓度来源于8个国控监测点的日平均值。大气污染物数据主要包括SO₂、NO₂、CO、O₃-8h、PM_{2.5}、可吸入颗粒物(inhalable particulate matter, PM₁₀);气象资料包括温度(℃),相对湿度(%),气压(Hpa)以及风速(m/s)。

1.2 方法 苏州市县级以上医疗机构、各社区卫生院和民营医院均开展死亡病例网络报告工作,网络报告系统完善。本次收集了2017年1月1日—2019年12月31日苏州市的常住人口全死因个案资料,数据来源于中国疾病预防控制中心死因登记系统。按照国际疾病分类第十版(ICD-10)进行疾病分类,其ICD编码分别为:非意外总死亡(A00-R99)、循环系统疾病死亡(I00-I99)和呼吸系统疾病死亡(J00-J99)。

1.3 统计学分析 采用的统计学软件为R4.0.2软件和AirQ,分析指标为大气PM_{2.5}浓度每升高10 μg/m³,每日死亡人数增加或减少的相对危险度(RR),检验水准为0.05。

1.3.1 描述分析及相关分析 本次分析中数值变量不满足正态分布,我们采用中位数及四分数间距描述大气污染物、气象参数及非意外死亡的平均水平;采用Spearman的秩相关分析大气污染物及气象条件的相关性。

1.3.2 广义相加模型 本次评估采用GAM分析PM_{2.5}暴露与苏州市非意外死亡风险之间的关系,并控制大气其他污染物以及气象因素的混杂影响,即分析PM_{2.5}质量浓度每上升10 μg/m³,非意外死亡的RR,并根据广义交

叉检验来确定平滑参数的值。其具体GAM模型如下。

$$\text{Log}E(Y_i) = \alpha + \beta X_i + \sum \delta_i Q_{ti} + \text{DOW}(\text{Week}) + \text{vocation} + \sum s_j(Z_{ij}, df_j)$$

式中:Y_i—第i天当日死亡(门诊)人数;E(Y_i)—i日死亡人数(医院门诊)的数学期望值;α—截距;β—PM_{2.5}的回归系数;X_i—第i日PM_{2.5}的浓度;δ_i—其他大气污染物的回归系数;Q_{ti}—第i日其他大气污染物的浓度;s—平滑样条函数;j为非线性相关变量,区别平滑样条函数和分析变量函数,代替i;Z_{ij}—第i日与PM_{2.5}非线性相关的变量,包括温度,相对湿度,气压以及风速等气象指标;df—自由度;DOW—反应“星期几效应”的哑变量;vocation—法定节假日变量。

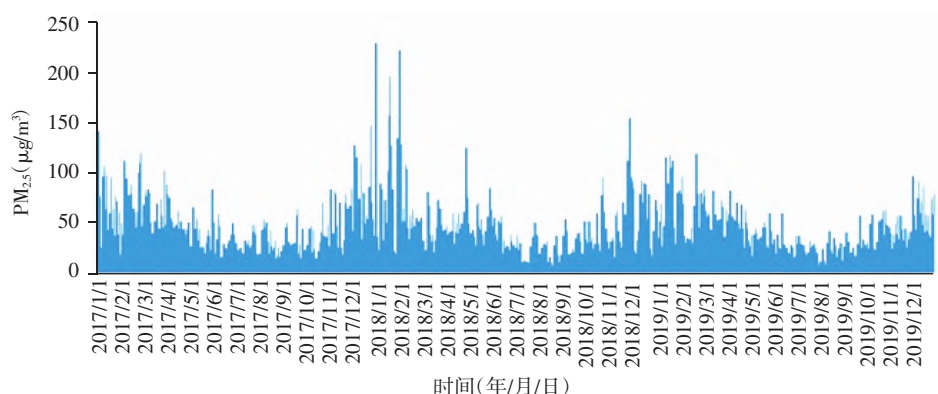
引入PM_{2.5}污染物模型,并考虑其滞后效应,选择lag0~lag7进行分析,其中lag0表示当日效应,lag1表示滞后1日效应,以此类推;移动平均效应中,选择lag01~lag07进行分析,其中lag01表示滞后0~1天的平均滞后效应,lag02表示滞后0~2天的平均滞后效应,以此类推。

2 结果

2.1 数据收集

2.1.1 环境空气质量和气象数据收集 与环境空气质量状况相关的数据包括:气象资料、环境空气质量监测资料等。其中气象资料包括苏州市每日的温度、相对湿度等常规气象指标监测数据,由苏州市气象局提供。常规空气质量监测资料为苏州市区9个国控点空气质量监测站点PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO和O₃等6种空气污染物每日监测浓度,由苏州市环境监测站提供。2017—2019年苏州市大气PM_{2.5}日均值浓度见图1。

2.1.2 死因监测、医院门诊数及人口统计学资料收集 2017—2019年某市常住人口日死亡数变化趋势见图2。收集到2017—2019年苏州市的分地区、分性别、分年龄的常住人口学资料,数据来源于2017—2019年苏州统计年鉴。



注:PM_{2.5}—细颗粒物。

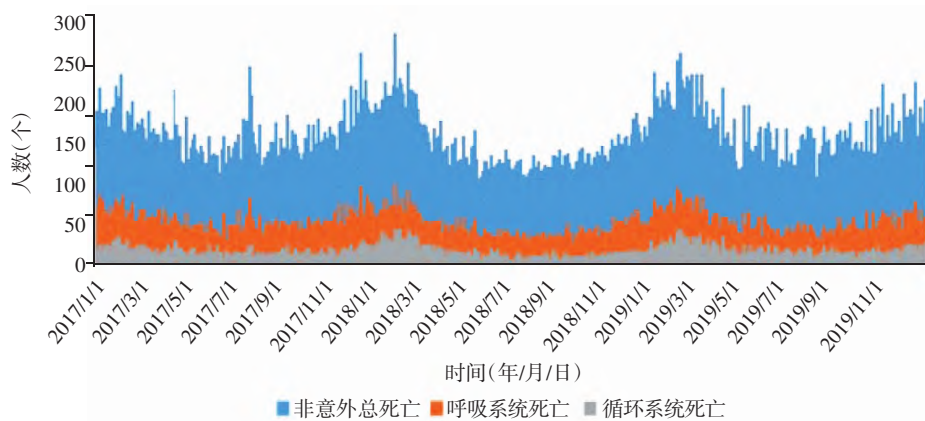


图2 苏州市常住人口日死亡数

2.2 时间序列分析模型计算及结果

2.2.1 日死亡数、主要污染物 $PM_{2.5}$ 浓度及气象因素的描述结果 2017—2019 年苏州非意外总死亡数 146 247 人(年均 48 749 人), 呼吸系统死亡数 27 359 人(年均 9 120 人), 循环系统死亡数 37 798 人(年均 12 599 人), 日非意外总死亡中位数为 129(111~153), 日呼吸系统死亡中位数为 20(13~35), 日循环系统死亡中位数为 35(18~47)。2017—2019 年苏州市日气温的中位数为 18.6(9.7~25.2)℃, 相对湿度的日均值为 73.0(64.0~82.0)%, 日均风速为 2.4(1.9~3.1)m/s。大气污染物 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 O_3 -8 h、CO 的全年日均中位浓度为 34.0(24.0~50.0) $\mu g/m^3$ 、56.0(42.0~80.0) $\mu g/m^3$ 、42.0(32.0~54.0) $\mu g/m^3$ 、8.0(5.0~12.0) $\mu g/m^3$ 、94.0(66.5~131.0) $\mu g/m^3$ 和 0.6(0.5~0.8) mg/m^3 。见表 1。

表 1 2017—2019 年苏州市日非意外总死亡数、主要大气污染物浓度及气象因素水平

因素	$\bar{x} \pm s$	最小值	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值
日非意外总死亡(例)	134±34	33	111	129	153	274
日呼吸系统疾病死亡(例)	25±16	2	13	20	35	97
日循环系统疾病死亡(例)	35±19	3	18	35	47	95
平均气温(℃)	17.8±9.0	-1.2	9.7	18.6	25.2	35.7
相对湿度(%)	72.6±12.7	31.0	64.0	73.0	82.0	99.0
风速(m/s)	2.6±1.0	0.2	1.9	2.4	3.1	8.2
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	41.1±25.6	8.0	24.0	34.0	50.0	222.0
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	64.4±31.8	11.0	42.0	56.0	80.0	249.0
NO_2 ($\mu g/m^3$)	44.8±18.0	14.0	32.0	42.0	54.0	129.0
SO_2 ($\mu g/m^3$)	9.2±5.0	2.0	5.0	8.0	12.0	32.0
O_3 -8h($\mu g/m^3$)	101.3±46.4	7.0	66.5	94.0	131.0	252.0
CO(mg/m^3)	0.7±0.3	0.2	0.5	0.6	0.8	2.0

注: $PM_{2.5}$ —细颗粒物; PM_{10} —可吸入颗粒物; O_3 -8 h—臭氧 8 h 平均浓度。

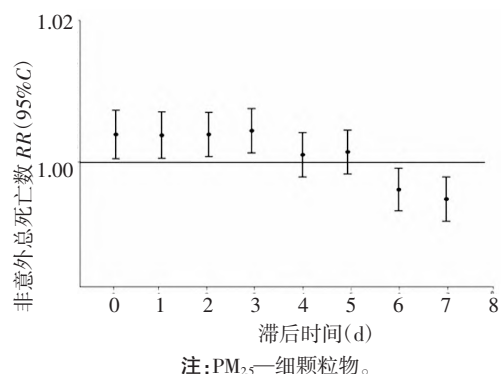
2.2.2 大气 $PM_{2.5}$ 对苏州市非意外死亡总人数的影响 $PM_{2.5}$ 对苏州市非意外死亡总人数滞后效应表现如下:对于单日死亡效应, $PM_{2.5}$ 滞后效应表现为先降低再缓慢升高的趋势, 单日滞后 3 天(lag3)的效应最大, 即滞后 3 天的 $PM_{2.5}$ 浓度每升高 10 $\mu g/m^3$ 引起非意外

死亡的 RR 值为 1.003 4 (95%CI:1.001 0~1.005 5); 对于平均死亡效应, 过去 5 天的效应最大, 即 lag0 至 lag5 的 $PM_{2.5}$ 浓度移动平均值每增加 10 $\mu g/m^3$, 非意外死亡的 RR 值为 1.007 (95%CI:1.003~1.011)。见表 2、图 3 和图 4。

表 2 2017—2019 年苏州市大气 $PM_{2.5}$ 浓度每增加 10 $\mu g/m^3$ 时日非意外死亡数的相对危险度

滞后(d)	非意外总死亡		呼吸系统疾病死亡		循环系统疾病死亡	
	RR	95%CI	RR	95%CI	RR	95%CI
Lag0	1.003 0	1.000 4~1.005 6	1.000	0.995~1.005	1.006	1.001~1.012
Lag1	1.003 1	1.000 6~1.005 6	1.002	0.997~1.007	1.000	0.995~1.005
Lag2	1.003 0	1.000 6~1.005 4	1.001	0.996~1.006	1.001	0.996~1.006
Lag3	1.003 4	1.001 0~1.005 8	1.001	0.996~1.006	1.004	0.999~1.009
Lag4	1.000 8	0.998 4~1.003 2	1.000	0.995~1.005	1.000	0.995~1.005
Lag5	1.001 1	0.998 7~1.003 5	0.999	0.994~1.004	1.000	0.995~1.005
Lag6	0.997 0	0.994 7~0.999 3	0.999	0.994~1.004	0.997	0.991~1.003
Lag7	0.996 0	0.993 6~0.998 4	0.994	0.989~0.999	0.998	0.993~1.003
Lag01	1.004	1.001~1.007	1.001	0.995~1.007	1.004	0.998~1.010
Lag02	1.005	1.002~1.008	1.002	0.995~1.009	1.004	0.997~1.011
Lag03	1.006	1.003~1.009	1.002	0.995~1.009	1.006	0.998~1.014
Lag04	1.006	1.002~1.010	1.002	0.994~1.010	1.006	0.998~1.014
Lag05	1.007	1.003~1.011	1.001	0.993~1.009	1.006	0.997~1.015
Lag06	1.005	1.000~1.010	1.001	0.992~1.010	1.004	0.994~1.014
Lag07	1.003	1.000~1.008	0.998	0.988~1.008	1.003	0.992~1.012

注: $PM_{2.5}$ —细颗粒物; lag0—当日效应, lag1—滞后 1 日效应, 以此类推; lag01—滞后 0~1 天的平均滞后效应, lag02—滞后 0~2 天的平均滞后效应, 以此类推。

注: $PM_{2.5}$ —细颗粒物。图3 2017—2019 年苏州市大气 $PM_{2.5}$ 对非意外总死亡数的

单日滞后效应分布

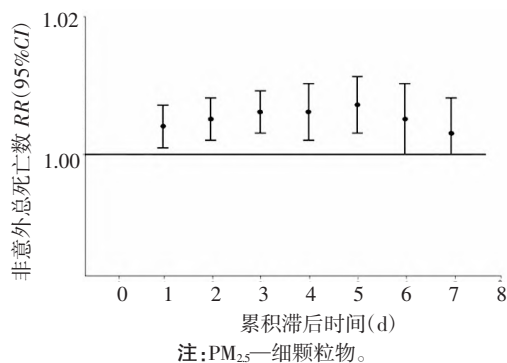


图4 2017—2019年苏州市大气PM_{2.5}对非意外总死亡数的累积滞后效应

2.2.3 大气PM_{2.5}对呼吸系统疾病死亡人数的影响
PM_{2.5}对呼吸系统疾病死亡人数滞后效应表现如下:对于单日死亡效应,PM_{2.5}滞后效应先升高后降低,滞后1天(lag1)的效应最大,即lag1的PM_{2.5}每升高10 μg/m³,呼吸系统疾病死亡RR值为1.002(95%CI:0.997~1.007),但差异无统计学意义;对于平均死亡效应,过去4天的效应最大,即当日lag0至lag4的PM_{2.5}浓度移动平均值每增加10 μg/m³,心脑血管疾病死亡的RR值为1.002(0.994~1.010),但差异无统计学意义($P>0.05$)。见表2、图5和图6。

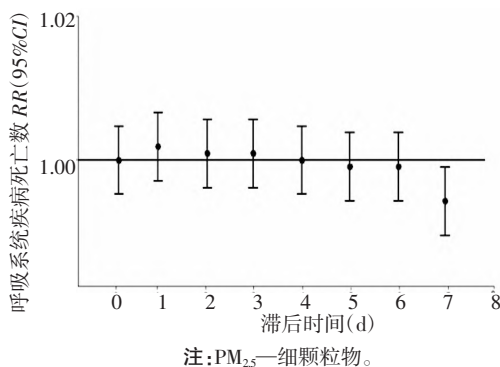


图5 2017—2019年苏州市大气PM_{2.5}对呼吸系统疾病死亡人数的单日滞后效应分布

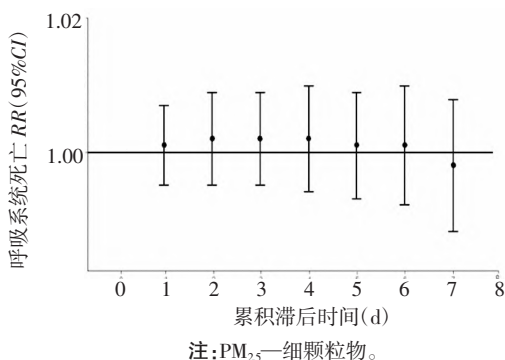


图6 2017—2019年苏州市大气PM_{2.5}对呼吸系统疾病死亡人数的累积滞后效应

2.2.4 大气PM_{2.5}对循环系统疾病死亡人数的影响
PM_{2.5}对循环系统疾病死亡人数滞后效应表现如下:对于单日死亡效应,当日(lag0)的死亡效应最大,即当日PM_{2.5}每升高10 μg/m³,循环系统疾病死亡RR(95%CI)1.006(1.001~1.012);对于平均死亡效应,过去5天的效应最大,即PM_{2.5}在过去5天的移动平均浓度每增加10 μg/m³,循环系统疾病的RR(95%CI)为1.006(0.997~1.015),但差异无统计学意义。见表2、图7和图8。

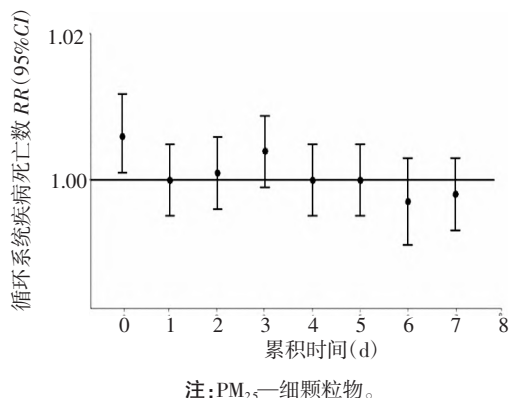


图7 2017—2019年苏州市大气PM_{2.5}对循环系统疾病死亡人数的单日滞后效应分布

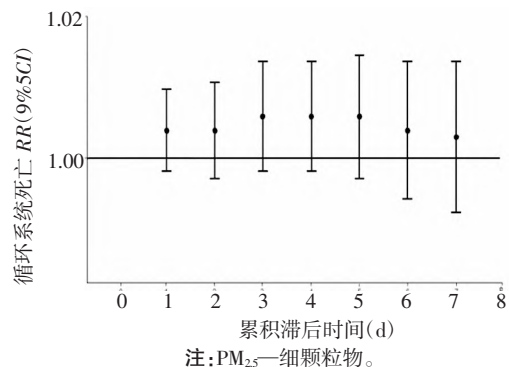
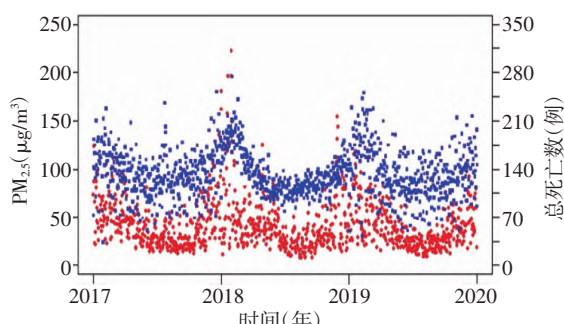


图8 2017—2019年苏州市大气PM_{2.5}对循环系统疾病死亡人数的累积滞后效应

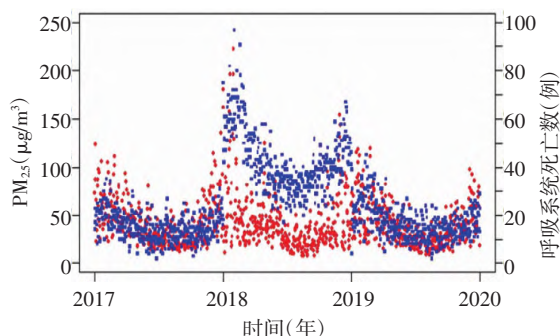
2.2.5 2017—2019苏州市日非意外死亡人数与大气污染物浓度变化趋势分析
PM_{2.5}呈现明显季节性,表现为冬季高,夏季低,且年间的总体变化趋势一致。每日非意外死亡人数、呼吸系统疾病死亡人数、循环系统疾病死亡门诊数同样呈现季节波动,即冬高夏低,与PM_{2.5}趋势一致。见图9~11。

2.3 暴露评估
由于本次评估是对苏州市全市范围内大气污染物PM_{2.5}对全人群死亡急性影响的风险评估,故使用2017—2019年连续3年环境空气质量监测站每日PM_{2.5}的浓度作为暴露浓度,暴露频率为持续暴露,暴露人口数据与大气污染物暴露的范围以及处于健康风险的人群范围相一致。



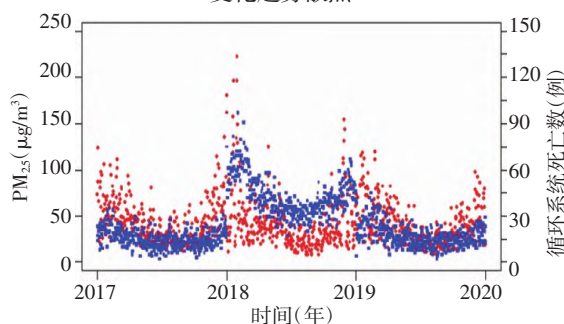
注:PM_{2.5}—细颗粒物。

图9 苏州市每日非意外死亡人数与大气污染物浓度变化趋势散点



注:PM_{2.5}—细颗粒物。

图10 苏州市每日呼吸系统疾病死亡人数与大气污染物浓度变化趋势散点



注:PM_{2.5}—细颗粒物。

图11 苏州市每日循环系统疾病死亡人数与大气污染物浓度变化趋势散点

2.4 健康风险表征

2.4.1 健康风险评估模型 在短期暴露的急性健康风险评估中,应用时间序列分析所获得的暴露-反应关系系数值,利用下列公式可估算大气 PM_{2.5} 污染造成的超额死亡人数。

$$\Delta X = X \times \left\{ 1 - \frac{1}{\exp[\beta \times (C - C_0)]} \right\}$$

式中: ΔX —每日超额死亡人数, X —拟评估地区每日死亡人口数, β —通过时间序列分析获得的暴露-反应关系系数, C —拟评估地区每日的污染物浓度, C_0 —污染物参考浓度。

本次评估已经收集到 2017—2019 年苏州市大气 PM_{2.5} 每日浓度及常住人口每日非意外总死亡数、循环系统疾病死亡数,根据 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[9],PM_{2.5} 在二类区的年均浓度限值为 35 μg/m³,故

选择参考浓度 $C_0=35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。应用上述公式计算 2017—2019 年苏州市各年度由于 PM_{2.5} 污染造成常住居民非意外总死亡的超额死亡人数。见表 3。

表3 苏州市归因于大气 PM_{2.5} 暴露的非意外死亡人数

时间 (年)	归因百分比		归因死亡人数		每 10 万人归因 死亡数(1/10 万)	
	结果	95%CI	结果	95%CI	结果	95%CI
2017	0.95	0.4~1.49	460	197~725	4.31	1.84~6.79
2018	0.96	0.41~1.52	469	200~741	4.37	1.86~6.91
2019	0.72	0.31~1.14	353	151~556	3.29	1.41~5.17

注:PM_{2.5}—细颗粒物。

2.4.2 评估结果 对于非意外总死亡来说,当参照浓度为 35 μg/m³ 时,2017—2019 年期间 PM_{2.5} 急性效应造成的死亡人数分别为 460 例(95%CI:197~725)、469 例(95%CI:200~741)和 353 例(95%CI:151~556)。

3 讨论

苏州市地处长三角经济带核心,是中国乃至全球的加工厂,随之而来的工业污染不可小觑,越来越多的研究表明大气颗粒物污染与人体健康息息相关^[10]。本次评估结果显示,2017—2019 年苏州市 PM_{2.5} 年均浓度值接近国家二级标准限值。所以开展苏州市大气颗粒物与人群非意外死亡的关联性研究迫在眉睫。

数据表明,当参照浓度为 35 μg/m³ 时,苏州市 2017—2019 年期间 PM_{2.5} 急性效应造成的死亡人数分别为 460 例(95%CI:197~725)、469 例(95%CI:200~741)和 353 例(95%CI:151~556);PM_{2.5} 对全人群非意外死亡率、呼吸系统死亡率和循环系统死亡率有明显的暴露反应关系。对于单日死亡效应,PM_{2.5} 滞后效应表现为先降低再缓慢升高的趋势,单日滞后 3 天(lag3)的效应最大,即滞后 3 天的 PM_{2.5} 浓度每升高 10 μg/m³,引起非意外死亡的 RR(95%CI)为 1.003 4(1.001 0~1.005 5);对于平均死亡效应,过去 5 天的效应最大,即 lag0 至 lag5 的 PM_{2.5} 浓度移动平均值每增加 10 μg/m³,非意外死亡的 RR(95%CI)为 1.007(1.003~1.011)。

研究显示,滞后 3 天,循环系统疾病的死亡效应最大;滞后 5 天,PM_{2.5} 浓度对心血管系统疾病的影响最大^[11-14];王志强等^[15]发现当日 lag(0)PM_{2.5} 浓度与循环系统疾病死亡的效应最大^[15]。综合国内外最新研究,大气污染物的特征、气候特征、数学模型差异可能是造成最佳滞后时间不同的主要原因^[16]。所以进一步开展大气颗粒物的成分分析,可以更加科学的指导苏州市环境防控政策的制定。

PM_{2.5} 对呼吸系统疾病死亡人数滞后效应表现如下:对于单日死亡效应,PM_{2.5} 滞后效应先升高后降低。滞后 1

天(lag1)的效应最大,即 lag1 的 $PM_{2.5}$ 每升高 $10 \mu g/m^3$, 呼吸系统疾病死亡 $RR(95\%CI)$ 为 1.002 (0.997~1.007), 但差异无统计学意义。对于平均死亡效应,过去 4 天的效应最大,即当日 lag0 至 lag4 的 $PM_{2.5}$ 浓度移动平均值每增加 $10 \mu g/m^3$, 心脑血管疾病死亡的 $RR(95\%CI)$ 为 1.002(0.994~1.010),但差异无统计学意义。

$PM_{2.5}$ 对循环系统疾病死亡人数滞后效应表现如下:对于单日死亡效应,当日(lag0)的死亡效应最大,即当日 $PM_{2.5}$ 每升高 $10 \mu g/m^3$, 循环系统疾病死亡 $RR(95\%CI)$ 1.006 (1.001~1.012); 对于平均死亡效应,过去 5 天的效应最大,即 $PM_{2.5}$ 在过去 5 天的移动平均浓度每增加 $10 \mu g/m^3$, 循环系统疾病的 $RR(95\%CI)$ 为 1.006(0.997~1.015),但差异无统计学意义。对于呼吸和循环系统疾病死亡的研究和国内其他学者有差异^[16-17]:

MEI 等^[18]对北京市 $PM_{2.5}$ 研究显示, $PM_{2.5}$ 浓度每升高 $10 \mu g/m^3$, 心血管疾病死亡率提高 2.46% (95%CI: 0.36%~4.55%)。造成差异的原因可能和城市的人口构成有联系。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] 朱紫红. 广东省惠州市惠东县空气污染对居民死亡率的影响研究[J]. 中国医药科学, 2017, 7(18): 197-199.
- [2] 石同幸, 董航, 杨轶骞, 等. 广州市中心城区冬季大气 $PM_{2.5}$ 污染状况与居民每日死亡的关系[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(6): 477-481.
- [3] 曹若明, 崔亮亮, 姜超, 等. 济南市大气污染物 O_3 与居民呼吸系统疾病死亡风险的时间序列分析[J]. 山东大学学报(医学版), 2018, 56(11): 91-97.
- [4] 常倩, 叶云杰, 汪庆庆, 等. 南京市大气污染物与居民心脑血管疾病死亡的相关性[J]. 环境与职业医学, 2017, 34(12): 1041-1045.
- [5] 陈浪, 赵川, 关茗洋, 等. 石家庄市大气颗粒污染物浓度与居民死亡率的时间序列分析[J]. 中华疾病控制杂志, 2018, 22(3): 272-277.
- [6] 张燕萍, 张志琴, 刘旭辉, 等. 太原市颗粒物空气污染与人群每日死亡率的关系[J]. 北京大学学报(医学版), 2007, 39(2): 153-157.
- [7] 张旭辉, 周伟杰, 张熙. 无锡市大气污染物对人群日死亡数和日就诊数影响的时间序列分析研究[J]. 环境卫生学杂志, 2016, 6(6): 407-411.
- [8] 朱耀辉, 李存禄, 冯仁杰, 等. 武汉市大气污染短期暴露对人群死亡率影响的季节差异[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(8): 670-673.
- [9] 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: 中国标准出版社, 2012.
- [10] 张开月, 金武, 姚庆兵, 等. 扬州市大气臭氧与居民死亡关系的时间序列分析[J]. 现代医药卫生, 2019, 35(21): 3265-3266+3271.
- [11] 夏钟, 王欣童, 郁莎燕, 等. 应用 meta 分析研究中国不同区域 $PM_{2.5}$ 污染与人群非意外总死亡率的关系[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(8): 891-895.
- [12] 陈宇, 姜方平, 蒋兆峰. 镇江市大气颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$) 对居民每日死亡率影响的时间序列分析[J]. 现代预防医学, 2020, 47(14): 2550-2554.
- [13] MENG X, MA Y, CHEN R, et al. 中国城市中大气分粒级的粒子数浓度与每日死亡率[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(4): 324-328.
- [14] 吴敏敏, 陈仁杰, 阚海东, 等. 中国三城市臭氧对大气颗粒物与日死亡率关系的效应修饰作用[J]. 卫生研究, 2015, 44(5): 788-792+812.
- [15] 王志强, 徐艳龙, 肖长春, 等. 合肥市 2014—2016 年大气污染物 $PM_{2.5}$ 对居民循环系统疾病死亡效应的时间序列分析[J]. 山东大学学报(医学版), 2018, 56(11): 48-52+75.
- [16] 刘晓剑, 吴永胜, 付英斌, 等. 深圳市空气 $PM_{2.5}$ 与心脑血管疾病死亡的广义相加模型分析[J]. 中华疾病控制杂志, 2016, 20(2): 207-209.
- [17] BONYADI Z, EHRAPOUSH MH, GHANEIAN MT, et al. Cardiovascular, respiratory, and total mortality attributed to $PM_{2.5}$ in Mashhad, Iran[J]. Environ Monit Assess, 2016, 188(10): 570.
- [18] MEI MX, YU PJ, GUO XL, et al. Relationship between ambient fine particles and ventricular repolarization changes and heart rate variability of elderly people with heart disease in Beijing, China[J]. Biomed Environ Sci, 2013, 26(8): 629-637.
- [19] 高南筠. 2015—2018 年高安市生活饮用水水质卫生状况检测分析[J]. 中国卫生监督杂志, 2019, 24(3): 14-16.
- [20] 雷佩玉, 张同军, 孟昭伟, 等. 2008—2018 年陕西省农村生活饮用水氟化物含量[J]. 卫生研究, 2019, 48(5): 733-738.
- [21] 袁翰卿, 李巧, 陶洪飞, 等. 新疆奎屯河流域地下氟化物富集因素[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 524-530.
- [22] 符刚, 曾强, 赵亮, 等. 基于 GIS 的天津市饮用水水质健康风险评估[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4553-4560.
- [23] TURDI M, YANG L. Trace elements contamination and human health risk assessment in drinking water from the agricultural and pastoral areas of Bay County, Xinjiang, China[J]. Int J Environ Res Public Health, 2016, 13(10): 938.
- [24] 孙言凤, 刘俊玲, 王怀记, 等. 2015—2018 年武汉市农村饮水硝酸盐和氟化物浓度水平及健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(10): 1888-1891.
- [25] 郭占景, 苏振军, 范尉尉, 等. 石家庄市农村饮用水中氟化物健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2013, 29(3): 72-73.

收稿日期: 2020-10-09 修回日期: 2021-04-19 责任编辑: 张文洁

(上接第 2802 页)

- Washington D.C.: US EPA, 1986.
- [12] 张荣, 李洪兴, 武先锋, 等. 我国农村饮用水水质现状[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(1): 3-5.
- [13] 钟格梅, 唐振柱, 黎勇, 等. 2008—2012 年广西农村生活饮用水氟化物含量调查[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(4): 330-331.
- [14] 王德东, 孙丽丽, 钟巍, 等. 2008—2018 年广州市生活饮用水中氟化物检测结果分析[J]. 医学动物防制, 2020, 36(8): 769-771.
- [15] 张思聪, 吴雄伯, 侯晶. 上海市饮用水氟化物检测与分析[J]. 地理教学, 2012, 54(4): 59-60.
- [16] 周晓明. 2010—2014 年昆山市生活饮用水监测结果分析及氟化物健康风险评估[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [17] 赵峰, 曹宝平, 张铁钢, 等. 甲城、乙城铁路地区生活饮用水中氟化物含量分析[J]. 临床医学研究与实践, 2016, 1(18): 87-88.
- [18] 李杰, 夏荣香, 蒲丹, 等. 2016—2018 年新疆农村饮用水水质监测结果分析[J]. 职业与健康, 2020, 36(21): 2974-2977.
- [19] 高南筠. 2015—2018 年高安市生活饮用水水质卫生状况检测分

收稿日期: 2020-10-09 修回日期: 2021-05-17 责任编辑: 张文洁