

# 2014—2018年重庆市主要城区大气PM<sub>2.5</sub>水平与居民非意外死亡的关系

吴芸芸, 王子豪, 李群英, 和晋渝, 张春华, 沈卓之

重庆市疾病预防控制中心, 重庆 400042

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20117

## 摘要:

**[背景]** 大气颗粒物污染严重威胁人类健康, 与居民死亡密切相关。

**[目的]** 探讨重庆市5个主要城区大气PM<sub>2.5</sub>质量浓度(下称浓度)与居民非意外死亡的关系。

**[方法]** 收集2014—2018年重庆市渝中、沙坪坝、南岸、九龙坡和江北五城区居民死因资料、大气污染和气象监测数据, 计算五城区每日非意外死亡总数和大气污染物日均浓度。利用广义相加模型, 控制长期趋势和季节效应、气象因素(平均温度、相对湿度)及“星期几效应”的影响, 建立单污染物模型及多污染物模型, 分析PM<sub>2.5</sub>单独暴露及其与SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO联合暴露时对居民非意外死亡的短期效应, 并按性别分层比较效应差异。

**[结果]** 2014—2018年重庆市五城区平均每日非意外死亡70人, 其中男性、女性分别为41、29人; 大气PM<sub>2.5</sub>日均浓度为51 μg·m<sup>-3</sup>, 超标共计299 d, 占15.35%。单污染物模型显示, PM<sub>2.5</sub>在当天及滞后1~3 d时对居民非意外死亡存在影响, 在滞后1 d时效应最大, PM<sub>2.5</sub>每升高10 μg·m<sup>-3</sup>时全人群非意外死亡率增加0.62% (95% CI: 0.27%~0.97%), 其中男性、女性非意外死亡率分别增加0.49% (95% CI: 0.09%~0.89%)、0.85% (95% CI: 0.39%~1.31%), 女性的效应值高于男性, 效应差为0.35% (95% CI: 0.13%~0.57%)。双污染物模型显示: 分别校正SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>时, PM<sub>2.5</sub>对居民非意外死亡的效应变弱, 甚至消失; 校正CO时, 效应增强, 非意外死亡率增加至0.69% (95% CI: 0.26%~1.13%)。在全污染物模型中, 仅女性的非意外死亡与PM<sub>2.5</sub>存在关联, 当PM<sub>2.5</sub>每升高10 μg·m<sup>-3</sup>时女性每日非意外死亡率上升0.77% (95% CI: 0.10%~1.44%)。在所有多污染物模型中, 女性效应值均高于男性, 效应差值范围为0.35%~0.54%。

**[结论]** 重庆市主要城区大气PM<sub>2.5</sub>浓度升高可导致居民非意外死亡风险增加, 女性更易感。

**关键词:** 细颗粒物; 非意外死亡; 广义相加模型; 时间序列分析

**Relationship between PM<sub>2.5</sub> and non-accidental deaths in main urban districts of Chongqing from 2014 to 2018** WU Yun-yun, WANG Zi-hao, LI Qun-ying, HE Jin-yu, ZHANG Chun-hua, SHEN Zhuo-zhi (Chongqing Center for Disease Control and Prevention, Chongqing 400042, China)

## Abstract:

**[Background]** Atmospheric particulate matter pollution is a serious threat to human health, and is closely related to the death of residents.

**[Objective]** This study aims to evaluate the relationship of PM<sub>2.5</sub> with non-accidental deaths of residents in five representative urban districts of Chongqing.

**[Methods]** The daily death, air pollution, and meteorological data of five representative urban districts of Chongqing, including Yuzhong, Shapingba, Nan'an, Jiulongpo, and Jiangbei, from 2014 to 2018 were collected. The total number of daily non-accidental deaths and average concentrations of air pollutants in the five districts were calculated. All data were analyzed using generalized additive models while adjusting selected confounding factors including long-term trend, seasonal effect, meteorological conditions (including mean temperature and relative humidity), and day-of-the-week effect. The acute effects of singular PM<sub>2.5</sub> exposure and its combination with SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO on the non-accidental death of residents were also evaluated. All the analyses were stratified by gender to compare the differences.

**[Results]** Among the five representative urban districts of Chongqing from 2014 to 2018, there were an average of 70 non-accidental deaths per day, including 41 men and 29 women. The daily concentration of PM<sub>2.5</sub> was 51 μg·m<sup>-3</sup>, and there were a total of 299 days with an unqualified daily

## 基金项目

重庆市科卫联合医学科研重点项目 (2018DXM006)

## 作者简介

吴芸芸 (1991—), 女, 硕士, 医师;  
E-mail: 574487444@qq.com

## 通信作者

沈卓之, E-mail: zhuozhi1011@foxmail.com

## 伦理审批

已获取

## 利益冲突

无申报

## 收稿日期

2020-03-16

## 录用日期

2020-04-22

## 文章编号

2095-9982(2020)08-0735-06

## 中图分类号

R12

## 文献标志码

A

## ► 引用

吴芸芸, 王子豪, 李群英, 等. 2014—2018年重庆市主要城区大气PM<sub>2.5</sub>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.

## ► 本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20117

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

SHEN Zhuo-zhi, E-mail: zhuozhi1011@foxmail.com

## Ethics approval

Obtained

## Competing interests

None declared

## Received

2020-03-16

## Accepted

2020-04-22

## ► To cite

WU Yun-yun, WANG Zi-hao, LI Qun-ying, et al. Relationship between PM<sub>2.5</sub> and non-accidental deaths in main urban districts of Chongqing from 2014 to 2018 [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(8): 735-740.

## ► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20117

concentration of  $PM_{2.5}$ , accounting for 15.35%. The single-pollutant model revealed that the effect of  $PM_{2.5}$  on non-accidental death was significant between lag0-3 day, and was greatest at lag1 day: a  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  increase in  $PM_{2.5}$  concentration was associated with an increase in non-accidental mortality by 0.62% (95% CI: 0.27%-0.97%), the association was higher in females ( $ER=0.85\%$ , 95% CI: 0.39%-1.31%) than in males ( $ER=0.49\%$ , 95% CI: 0.09%-0.89%), and the difference of  $ER$  between males and females was 0.35% (95% CI: 0.13%-0.57%). The results of two-pollutant model indicated that the effect of  $PM_{2.5}$  on non-accidental death was reduced to null when  $SO_2$  or  $NO_2$  was included, and increased to 0.69% (95% CI: 0.26%-1.13%) when CO was included. In the all-pollutant model, only the effect of  $PM_{2.5}$  on non-accidental death for females was significant, and a  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  increase in  $PM_{2.5}$  concentration was associated with an increase in non-accidental mortality for females by 0.77% (95% CI: 0.10%-1.44%). In all multiple-pollutant models, the effects were higher in females than in males, and the interval of the differences was 0.35%-0.54%.

**[Conclusion]** The increase in  $PM_{2.5}$  concentration in the five urban districts of Chongqing would lead to an increase in non-accidental death, and its acute effects are more severe in female populations.

**Keywords:**  $PM_{2.5}$ ; non-accidental death; generalized additive model; time-series analysis

大气污染严重威胁人类健康。大气颗粒物为大气污染物的重要组成部分,在所有健康危险因素中排名第五<sup>[1]</sup>。多项研究证实大气颗粒物暴露会造成呼吸系统、心血管系统、内分泌系统等的健康损害<sup>[2-3]</sup>。中国归因于大气颗粒污染物的死亡人数约为85万<sup>[4]</sup>。大气颗粒物的短期暴露与居民死亡密切相关<sup>[5]</sup>。大气细颗粒物(fine particulate matter with median aerodynamic diameter  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ ,  $PM_{2.5}$ )由于粒径小、比表面积大、重力小,一方面容易吸附空气中重金属、细菌等人体有害成分,另一方面在空气中悬浮时间长,被吸入机体的可能性大、位置深,容易进入肺泡并随血液循环转移至其他部位,从而导致健康损害,死亡风险增加。大量流行病学研究表明,大气 $PM_{2.5}$ 与人群非意外总死亡率之间存在关联<sup>[6]</sup>,空气中 $PM_{2.5}$ 每升高 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,我国、北美和欧洲地区居民每日非意外总死亡率分别上升0.22%、0.94%和1.23%<sup>[7]</sup>。

重庆市是我国直辖市之一,人口密集、工业发达,位于四川盆地,以山地地形为主,不利于大气污染物排放。中国生态环境部发布的《2017年中国生态环境公报》指出, $PM_{2.5}$ 为重庆市首要污染物<sup>[8]</sup>。 $PM_{2.5}$ 的健康风险已成为民众关注的热点话题,然而目前重庆市大气 $PM_{2.5}$ 与居民健康相关的研究较为缺乏。渝中区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区和江北区为重庆市传统的主城区,覆盖人口约480万,人口密集、经济发达,城镇化率在90%以上<sup>[9]</sup>,与重庆市其他主要城区毗邻,在社会发展水平、气候地形等自然因素、大气污染水平和环境暴露状况等方面相当<sup>[10]</sup>,对重庆市主城区具有良好的代表性。本研究采用广义相加模型的时间序列分析方法,定量评估2014—2018年重庆市这5个主要城区 $PM_{2.5}$ 污染与人群非意外总死亡率之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料来源

**1.1.1 死因监测资料** 收集2014年1月1日—2018年12月31日重庆市渝中区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区和江北区常住居民死因资料,数据来源于重庆市疾病预防控制中心死因监测系统,其中根本死因按照国际疾病分类第十版(International Classification of Disease 10th Revision, ICD-10)进行编码。剔除故意伤害死亡的数据,纳入根本死因为非意外死亡(A00~R99)的个案。将非意外死亡个案按死亡时间汇总,计算五城区每日非意外死亡总数。分析前对死因资料进行严格质量控制,包括剔除重报、多报和误报资料,剔除死亡人数异常升高或者降低日期的数据。本研究经重庆市疾病预防控制中心医学伦理委员会审批通过(编号:2020005)。

**1.1.2 环境与气象监测资料** 2014—2018年逐日空气污染物监测数据来源于重庆市环保局,覆盖5个主要城区的17个国控环保监测站点,收集的资料包括 $PM_{2.5}$ 、二氧化硫(sulfur dioxide,  $SO_2$ )、二氧化氮(nitrogen dioxide,  $NO_2$ )、一氧化碳(carbon monoxide, CO)质量浓度(下称浓度),计算所有监测站点污染物浓度的日均值并纳入分析。气象监测数据来源于重庆市气象局,主要包括日平均温度、日平均相对湿度、日平均气压和日平均风速。各项空气污染物及气象指标缺失率均小于0.01%,缺失值以前后2d算数平均值填补。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 描述性分析和相关分析** 为了解研究地区非意外死亡、大气污染和气象条件的一般情况,对定量资料采用均数 $\pm$ 标准差、百分位数( $P_{25}$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{75}$ )、最大值和最小值进行描述性分析。采用Spearman秩相关

分析日死亡数与大气污染物、气象因素的相关性。

**1.2.2 广义相加模型** 本研究采用广义相加模型分析PM<sub>2.5</sub>对居民非意外死亡的急性效应。由于居民每日因非意外死亡为小概率事件，故采用类泊松分布作为连接函数。基本公式如下：

$$\lg [E(Y_t)] = \alpha + \beta X_t + s(t, u) + s(Z_t, u) + D_{\text{dow}}$$

其中： $E(Y_t)$ 为第 $t$ 日非意外死亡人数的期望值； $\alpha$ 为截距项； $\beta$ 为大气污染物的回归系数； $X_t$ 为第 $t$ 日大气污染物浓度； $s(t, u)$ 为时间的平滑样条函数，用于控制长期趋势和季节效应； $s(Z_t, u)$ 为气象变量的平滑样条函数，用以控制气象因素的短期效应； $u$ 为各变量对应的自由度； $D_{\text{dow}}$ 为控制星期几效应的哑变量。根据前期相关研究<sup>[11]</sup>，时间自由度选择为7年<sup>-1</sup>，气象变量纳入平均温度、相对湿度，自由度选择为3，由于相邻几天的气象因素存在强相关性，因此仅控制了死亡当天气象因素的混杂作用。

单污染物模型只纳入PM<sub>2.5</sub>，考虑大气污染物的滞后效应，对单日滞后0~6 d分别进行分析。在单污染物模型的基础上，选择最大效应对应的滞后时间，分别纳入SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO及全部污染物，拟合多污染物模型，分析比较PM<sub>2.5</sub>单独暴露及与其他污染物联合暴露时对居民非意外死亡的急性效应。本研究以超额危险度(excess risk, ER)及其95%置信区间(confidence interval, CI)作为效应指标，表示日均PM<sub>2.5</sub>每升高10 μg·m<sup>-3</sup>时，日死亡数改变的百分比。为鉴别大气PM<sub>2.5</sub>污染的高危人群，按照性别进行分层分析，计算男女之间的效应差及其95%CI。

为验证模型的稳定性，本研究改变了各样条函数的自由度及类型，增加或减少其他气象因素，结果显示对模型最终结果无明显影响。上述数据整理及统计分析使用R3.6.0软件，通过“mgcv”软件包拟合广义相加模型。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 一般情况

重庆市五城区2014—2018年非意外死亡128364人，平均每日70人；男性共计死亡74928人，平均每日41人，女性共计死亡53436人，平均每日死亡29人。大气PM<sub>2.5</sub>日均浓度为51 μg·m<sup>-3</sup>，依据GB 3095—2012《环境空气质量标准》日均浓度二级限值(75 μg·m<sup>-3</sup>)，PM<sub>2.5</sub>超标共计299 d，占15.35%。2014—2018年重庆市五城区居民非意外死亡、大气污染物和气象因素

一般情况详见表1。2014—2018年重庆市五城区大气PM<sub>2.5</sub>浓度与非意外死亡人数均呈现季节波动，表现为冬季高夏季低；从长期趋势来看，PM<sub>2.5</sub>浓度逐年下降，非意外死亡人数逐年上升，详见图1。

表1 2014—2018年重庆市五城区居民非意外死亡、大气污染物和气象因素一般情况

Table 1 The distribution of daily non-accidental deaths, air pollutants, and meteorological factors in five urban districts of Chongqing from 2014 to 2018

变量 Variable	$\bar{x} \pm s$	最小值 Min	$P_{25}$	$P_{50}$	$P_{75}$	最大值 Max
死亡人数 (Mortality)						
全人群 (Total population)	70±17	31	59	67	78	179
男性 (Male)	41±11	15	34	40	46	102
女性 (Female)	29±9	7	23	28	34	77
大气污染物浓度 Air pollutant concentration						
PM <sub>2.5</sub> / (μg·m <sup>-3</sup> )	51±34	74	29	42	63	222
SO <sub>2</sub> / (μg·m <sup>-3</sup> )	15±10	4	9	12	17	93
NO <sub>2</sub> / (μg·m <sup>-3</sup> )	43±13	13	34	42	51	95
CO/ (mg·m <sup>-3</sup> )	1.0±0.3	0.4	0.8	1.0	1.2	2.5
气象因素 (Meteorological factor)						
平均气压/hpa Mean pressure/hpa	983.3±8.5	963.1	976.3	983.0	990.0	1012.3
平均温度/°C Mean temperature/°C	19.4±7.7	1.2	12.4	19.6	25.0	36.5
相对湿度/% Relative humidity/%	76±11	38	68	77	85	97
风速/ (m·s <sup>-1</sup> ) Wind speed/ (m·s <sup>-1</sup> )	1.3±0.4	0.3	1.1	1.3	1.5	3.7

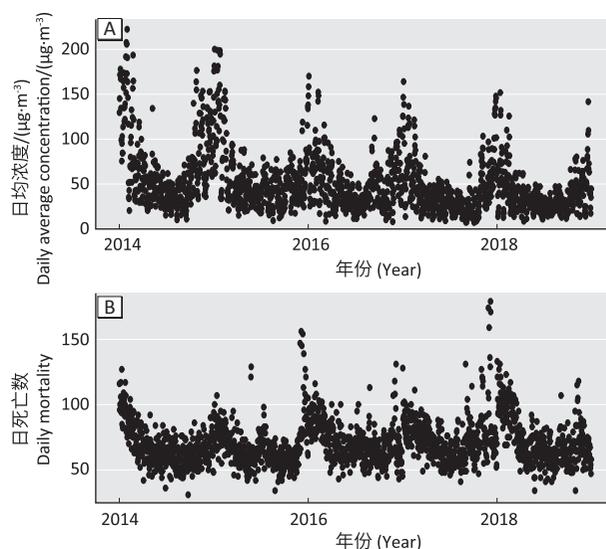


图1 2014—2018年重庆市五城区PM<sub>2.5</sub>浓度(A)与非意外死亡(B)时间序列图

Figure 1 Time-series of daily PM<sub>2.5</sub> concentration (A) and non-accidental deaths (B) in five urban districts of Chongqing from 2014 to 2018

## 2.2 指标相关性分析

居民非意外死亡数与PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO浓度及平均气压呈正相关，与平均温度、风速呈负相关；PM<sub>2.5</sub>浓度与其他大气污染物浓度、平均气压呈正相关，与平均温度、风速呈负相关，以上相关性均具有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表2。

表2 2014—2018年重庆市五城区居民非意外死亡数、大气污染物浓度和气象因素相关性分析( $r$ )

Table 2 Correlation analysis of daily non-accidental death, air pollutants, and meteorological factors in five urban districts of Chongqing from 2014 to 2018 ( $r$ )

指标 Indicator	大气污染物浓度 Air pollutant concentration				平均 气压 Mean pressure	平均 温度 Mean temperature	相对 湿度 Relative humidity	风速 Wind speed
	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO				
日死亡数 Daily death	0.25*	0.16*	0.19*	0.17*	0.27*	-0.41*	0.00	-0.05*
PM <sub>2.5</sub>	1.00	0.69*	0.65*	0.74*	0.38*	-0.40*	-0.04	-0.30*
SO <sub>2</sub>		1.00	0.45*	0.56*	0.24*	-0.22*	-0.32*	-0.18*
NO <sub>2</sub>			1.00	0.53*	0.32*	-0.28*	-0.12*	-0.35*
CO				1.00	0.36*	-0.42*	0.26*	-0.36*
平均气压 Mean pressure					1.00	-0.87*	0.32*	-0.26*
平均温度 Mean temperature						1.00	-0.41*	0.24*
相对湿度 Relative humidity							1.00	-0.22*
风速 Wind speed								1.00

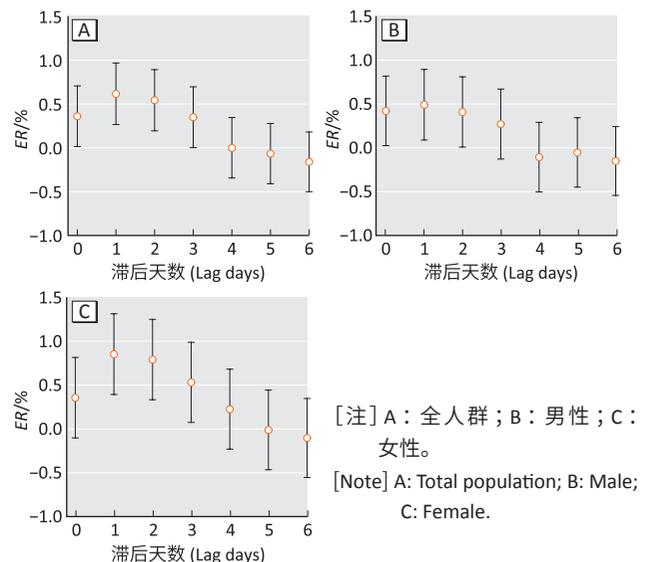
[注 (Note)] \* :  $P < 0.05$ 。

## 2.3 PM<sub>2.5</sub>对居民非意外死亡的急性效应

总体来看，PM<sub>2.5</sub>在当天及滞后1~3d时对居民非意外死亡存在影响，在滞后1d时效应最大，PM<sub>2.5</sub>每升高10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时，居民每日非意外死亡率上升0.62% (95% CI : 0.27%~0.97%)。男性在当天及滞后1~2d时存在效应，而女性滞后时间更长，在滞后1~3d时存

在效应，男性、女性均在滞后1d时效应最强，PM<sub>2.5</sub>每升高10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时，男、女非意外死亡率分别上升0.49% (95% CI : 0.09%~0.89%)、0.85% (95% CI : 0.39%~1.31%)，女性的效应值高于男性，效应差为0.35% (95% CI : 0.13%~0.57%)。见图2。

在单污染物模型的基础上，选取滞后1d，分别纳入SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO以及全部污染物建立多污染物模型。结果显示在双污染物模型中：单独校正CO时，PM<sub>2.5</sub>对居民非意外死亡的效应上升0.69% (95% CI : 0.26%~1.13%)；分别校正SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>时，PM<sub>2.5</sub>的效应变弱，甚至消失。在全污染物模型中，PM<sub>2.5</sub>的效应变弱，仅女性的非意外死亡与PM<sub>2.5</sub>存在关联，PM<sub>2.5</sub>每升高10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时女性非意外死亡率上升0.77% (95% CI : 0.10%~1.44%)。在所有多污染物模型中，女性效应值均高于男性，效应差值范围为0.35%~0.54%。见表3。



[注] A : 全人群 ; B : 男性 ; C : 女性。  
[Note] A : Total population ; B : Male ; C : Female.

图2 单污染模型中PM<sub>2.5</sub>每升高10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时不同人群非意外死亡的ER值

Figure 2 ERs of non-accidental deaths by gender groups for a 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  increase of PM<sub>2.5</sub> in single-pollutant models

表3 多污染模型中PM<sub>2.5</sub>浓度每升高10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时不同人群非意外死亡的ER值

Table 3 ERs of non-accidental deaths by gender groups for a 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  increase of PM<sub>2.5</sub> in multi-pollutant models 单位 (Unit) : %

模型 Model	校正污染物 Adjusted pollutant	全人群 Total population		男性 Male		女性 Female		效应差 Difference between male and female	
		ER	95%CI	ER	95%CI	ER	95%CI	ER	95%CI
单污染物模型 (Single-pollutant model)	PM <sub>2.5</sub>	0.62	0.27~0.97	0.49	0.09~0.89	0.85	0.39~1.31	0.35	0.13~0.57
双污染物模型 1 (Double-pollutant model 1)	PM <sub>2.5</sub> +SO <sub>2</sub>	0.43	0.02~0.85	0.31	-0.16~0.79	0.67	0.13~1.21	0.35	0.09~0.61
双污染物模型 2 (Double-pollutant model 2)	PM <sub>2.5</sub> +NO <sub>2</sub>	0.49	0.05~0.93	0.29	-0.21~0.80	0.83	0.26~1.41	0.54	0.26~0.81
双污染物模型 3 (Double-pollutant model 3)	PM <sub>2.5</sub> +CO	0.69	0.26~1.13	0.52	0.03~1.02	0.94	0.36~1.51	0.41	0.13~0.69
全污染物模型 (All-pollutant model)	PM <sub>2.5</sub> +SO <sub>2</sub> +NO <sub>2</sub> +CO	0.44	-0.07~0.95	0.25	-0.34~0.84	0.77	0.10~1.44	0.52	0.19~0.85

[注] 以上模型中均调整了气象因素(平均温度、相对湿度)、星期几效应及时间趋势。

[Note] Meteorological factors (including mean temperature and relative humidity), day-of-the-week effect, and time trend are adjusted in all models.

### 3 讨论

本研究利用广义相加模型,分析2014—2018年重庆市五城区大气PM<sub>2.5</sub>与居民非意外死亡之间的关系。结果显示,大气PM<sub>2.5</sub>浓度升高造成居民非意外死亡率增加,且效应具有滞后性。在当天及滞后1~3 d时,PM<sub>2.5</sub>对居民非意外死亡存在影响,且在滞后1 d时效应最大,滞后时间与成都<sup>[12]</sup>、广州<sup>[13]</sup>、石家庄<sup>[14]</sup>等地研究结果一致。当大气PM<sub>2.5</sub>每升高10 μg·m<sup>-3</sup>时,重庆地区居民每日非意外死亡率上升0.62% (95% CI : 0.27%~0.97%),该结果接近西南地区平均效应<sup>[7]</sup>,与广州 (0.55%, 95% CI : 0.24%~0.86%)<sup>[15]</sup>较为一致,但是高于北京 (0.25%, 95% CI : 0.11%~0.38%)<sup>[16]</sup>、上海 (0.31%, 95% CI : 0.26%~0.35%)<sup>[17]</sup>和全国272个城市的平均效应 (0.22%, 95% CI : 0.15%~0.28%)<sup>[7]</sup>。比较各地区相关研究发现,PM<sub>2.5</sub>对人群健康影响存在地区差异,可能与不同地区PM<sub>2.5</sub>的来源及成分、浓度、人群结构及生活习惯等因素有关。这提示为制定符合本地区实际情况的健康策略,开展本地区大气污染物浓度与居民健康关系的研究尤为必要。

2014—2018年重庆市五城区大气PM<sub>2.5</sub>日均浓度为51 μg·m<sup>-3</sup>。在全国74个城市中,2017年重庆市空气质量综合指数排名第39位<sup>[18]</sup>,空气质量处于全国平均水平。有研究指出,在重庆城区大气PM<sub>2.5</sub>组分中,Zn、As、Pb、Cd等有害物质累积程度高,燃煤、交通、工业污染严重,燃煤为主要污染源,大气二次污染明显<sup>[19-20]</sup>。相关部门应针对主要污染源,协调控制一次污染物的排放,一方面降低大气PM<sub>2.5</sub>浓度,另一方面减少其他污染物排放,降低PM<sub>2.5</sub>吸附的二次转化组分浓度,减轻对居民健康的影响。

本研究显示,校正共存污染物SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO之后,与单污染物模型相比,PM<sub>2.5</sub>对居民非意外死亡的效应出现变化,具体表现为校正SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>时PM<sub>2.5</sub>的效应变弱,甚至消失,校正CO时效应增强。这可能是由于PM<sub>2.5</sub>与其他污染物之间相关系数均在0.65以上,相关性较高,污染物之间存在共线性,因此影响模型中效应值的估计。此外,PM<sub>2.5</sub>与其他污染物之间可能存在交互作用。大气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>等污染物易发生二次转化,生成硫酸盐、硝酸盐、铵盐等水溶性离子吸附在PM<sub>2.5</sub>表面<sup>[19]</sup>,这些离子对人群健康具有明显影响<sup>[21]</sup>,因此PM<sub>2.5</sub>与其他大气污染物对居民健康的影响可能存在协同效应,提示在研究PM<sub>2.5</sub>健康效应时应考虑其他污染物的影响。

本研究结果显示,PM<sub>2.5</sub>对女性非意外死亡的影响大于男性,与合肥<sup>[22]</sup>、珠三角<sup>[23-24]</sup>以及一项基于中国17个城市研究<sup>[25]</sup>的结果一致。推测其原因:一方面,重庆市女性吸烟率较男性低<sup>[26]</sup>,研究显示空气污染对非吸烟者的效应高于吸烟者<sup>[27]</sup>,因而女性更为敏感;另一方面,由于激素状态差异等因素,女性气道反应性强于男性,导致女性更易感<sup>[28]</sup>。

本研究存在一定局限性。首先,用固定监测点的空气污染物浓度代替个体暴露水平,存在一定的暴露测量误差;其次,由于缺乏室内空气污染物监测的相关数据,所以未考虑室内空气污染对人群健康的影响。下一步研究中,应考虑室内污染物情况并对暴露水平进行校正,结合个体暴露研究进展,进一步深入探讨PM<sub>2.5</sub>对人群非意外死亡的影响。

综上,本研究对2014—2018年重庆市五城区非意外死亡及环境数据进行分析,提示PM<sub>2.5</sub>浓度升高可导致居民非意外死亡风险增加,对女性的影响更为明显。建议相关部门继续加强大气污染治理工作,制定健康干预策略,重点保护高危人群,降低大气PM<sub>2.5</sub>对居民健康的影响,提高居民生活质量。

### 参考文献

- [1] COHEN AJ, 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] TALBOTT EO, RAGER JR, BENSON S, et al. A case-crossover analysis of the impact of PM<sub>2.5</sub> on cardiovascular disease hospitalizations for selected CDC tracking states [J]. *Environ Res*, 2014, 134: 455-465.
- [3] LU F, XU D, CHENG Y, et al. Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollution in the Chinese population [J]. *Environ Res*, 2015, 136: 196-204.
- [4] Institute of Health and Metrics (IHME). GBD 2017, ambient particulate matter pollution, both sexes, all ages, 2017, deaths [EB/OL]. [2020-03-04]. <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>.
- [5] 李林, 周启星. 不同粒径大气颗粒物与死亡终点关系的流行病学研究回顾 [J]. *环境与职业医学*, 2015, 32 (2): 168-174, 180.

- [6] 夏钟, 王欣童, 郁莎燕, 等. 应用 Meta 分析研究中国不同区域 PM<sub>2.5</sub> 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.
- [7] CHEN R, YIN P, MENG X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality. A nationwide analysis in 272 Chinese cities [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196 (1) : 73-81.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. [2020-03-04]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201805/P020180531534645032372.pdf>.
- [9] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 2019 [EB/OL]. [2020-06-21]. <http://tjj.cq.gov.cn/tjnj/2019/indexch.htm>.
- [10] 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 等. 重庆市主城区 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征 [J]. 环境科学, 2016, 37 (4) : 1219-1229.
- [11] 樊琳, 顾清, 曾强. 广义相加模型在大气污染流行病学研究中的应用进展 [J]. 环境与职业医学, 2019, 36 (7) : 676-681.
- [12] 曾婕, 陈剑宇, 周亮, 等. 成都市大气 PM<sub>2.5</sub> 相关的老年人超额死亡风险评估 [J]. 江苏预防医学, 2019, 30 (2) : 147-149, 162.
- [13] 石同幸, 董航, 杨轶骥, 等. 广州市中心城区冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 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.
- [14] 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.
- [15] WU R, ZHONG L, HUANG X, et al. Temporal variations in ambient particulate matter reduction associated short-term mortality risks in Guangzhou, China : a time-series analysis (2006-2016) [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 645 : 491-498.
- [16] LI T, YAN M, SUN Q, et al. Mortality risks from a spectrum of causes associated with wide-ranging exposure to fine particulate matter : a case-crossover study in Beijing, China [J]. *Environ Int*, 2018, 111 : 52-59.
- [17] FANG X, FANG B, WANG C, et al. Relationship between fine particulate matter, weather condition and daily non-accidental mortality in Shanghai, China : a Bayesian approach [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (11) : e0187933.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 2014—2018 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. [2020-03-04]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/>.
- [19] 余家燕, 王军, 许丽萍, 等. 重庆城区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及季节变化 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (12) : 6372-6378.
- [20] 焦姣, 姬亚芹, 白志鹏, 等. 重庆市颗粒物 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 中元素污染特征和来源 [J]. 南开大学学报 (自然科学版), 2013, 46 (6) : 8-13, 19.
- [21] 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*, 2015, 22 (1) : 358-368.
- [22] LEI R, ZHU F, CHENG H, et al. Short-term effect of PM<sub>2.5</sub>/O<sub>3</sub> on non-accidental and respiratory deaths in highly polluted area of China [J]. *Atmos Pollut Res*, 2019, 10 (5) : 1412-1419.
- [23] YANG C, PENG X, HUANG W, et al. A time-stratified case-crossover study of fine particulate matter air pollution and mortality in Guangzhou, China [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2012, 85 (5) : 579-585.
- [24] LIN H, LIU T, XIAO J. Mortality burden of ambient fine particulate air pollution in six Chinese cities : results from the Pearl River Delta study [J]. *Environ Int*, 2016, 96 : 91-97.
- [25] 陈仁杰. 复合型大气污染对我国 17 城市居民健康效应研究 [D]. 上海 : 复旦大学, 2013.
- [26] 沈卓之, 丁贤彬, 毛德强, 等. 重庆市 2014 年成年人吸烟、戒烟行为及认知现状调查 [J]. 中华流行病学杂志, 2015, 36 (11) : 1236-1243.
- [27] POPE III CA, BURNETT RT, TURNER MC, et al. Lung cancer and cardiovascular disease mortality associated with ambient air pollution and cigarette smoke : shape of the exposure-response relationships [J]. *Environ Health Persp*, 2011, 119 (11) : 1616-1621.
- [28] CLOUGHERTY JE. A growing role for gender analysis in air pollution epidemiology [J]. *Environ Health Persp*, 2010, 118 (2) : 167-176.

(英文编辑 : 汪源 ; 责任编辑 : 王晓宇)