调查研究
Investigation

西安市大气 $PM_{2.5}$ 短期暴露对人群心脑血管系统疾病死亡的影响

王鸿[1]，高俊宏[1]，方乐[1]，刘志永[1]，刘进仁[1]，范小琳[1]，李存治[1]，卢青[1]，孔庆博[1]，赵国栋[2]

1. 兵器工业卫生研究所生物效应技术研究室，陕西 西安 710065
2. 西安市疾病预防控制中心，陕西 西安 710054

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20213

摘要：

[背景] $PM_{2.5}$ 的健康效应是环境健康领域的研究热点，也是与我国居民身体健康密切相关的重大社会问题。

[目的] 分析西安市大气 $PM_{2.5}$ 短期暴露对人群心脑血管疾病死亡的影响。

[方法] 收集2014年1月1日—2018年12月31日西安市人群心脑血管疾病死亡资料、大气污染物（$PM_{2.5}$、PM_{10}、CO、SO_2、NO_2、O_3）和气象数据（温度、相对湿度），并作相关性分析。采用基于时间序列的广义线性模型，控制时间趋势和星期几效应等混杂因素，将日均气温和日均相对湿度作为协变量，分析 $PM_{2.5}$ 单滞后（lag0~lag7）的效应，研究 $PM_{2.5}$ 单污染和多污染物累积滞后2 d（lag02）对心脑血管系统疾病死亡的效应，同时对性别和年龄（0~44，45~59，60~74，75~89和90岁以上）进行分层分析。

[结果] 研究期内 $PM_{2.5}$ 日均浓度为（67.0±55.4）$\mu g \cdot m^{-3}$，每日心脑血管疾病平均死亡人数为（70.17±18.53）人。$PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2 和CO呈正相关（r=0.88、0.64、0.68、0.79，P<0.01），与 O_3、气温和湿度呈负相关（r=-0.42、-0.51和-0.05，P<0.05）。$PM_{2.5}$ 浓度每升高10 $\mu g \cdot m^{-3}$，在lag0~lag2的超额危险度（*ER*）分别为0.32%（95% *CI*：0.12%~0.52%）、0.28%（95% *CI*：0.07%~0.49%）和0.31%（95% *CI*：0.09%~0.52%），lag3~lag7的效应均无统计学意义。lag02时 $PM_{2.5}$ 单污染模型的 *ER* 为0.45%（95% *CI*：0.19%~0.70%），多污染物模型中 $PM_{2.5}$ 分别与 SO_2、NO_2、O_3 组合，*ER* 分别为0.38%（95% *CI*：0.10%~0.66%）、0.42%（95% *CI*：0.14%~0.70%）、0.45%（95% *CI*：0.20%~0.71%），经Z检验发现，多污染物模型与单污染物模型的累积滞后效应差异没有统计学意义（P>0.05）。$PM_{2.5}$ 对男性与女性lag02时的 *ER* 分别为0.47%（95% *CI*：0.17%~0.78%）和0.42%（95% *CI*：0.10%~0.74%），P<0.05；$PM_{2.5}$ 对60~74、75~89和90岁以上人群lag02时的 *ER* 分别为0.41%（95% *CI*：0.01%~0.82%）、0.43%（95% *CI*：0.11%~0.75%）和0.99%（95% *CI*：0.26%~1.74%），P<0.05；但 Z 检验显示不同性别、年龄组间差异无统计学意义（P>0.05）。

[结论] 2014—2018年西安市 $PM_{2.5}$ 污染可能会导致居民心脑血管疾病死亡风险的增加。

关键词：大气污染；细颗粒物；超额危险度；心脑血管疾病

Effects of short-term exposure to atmospheric $PM_{2.5}$ on deaths due to cardiovascular and cerebrovascular diseases in Xi'an

WANG Hong[1], GAO Jun-hong[1], FANG Le[1], LIU Zhi-yong[1], LIU Jin-ren[1], FAN Xiao-lin[1], LI Cun-zhi[1], LU Qing[1], KONG Qing-bo[1], ZHAO Guo-dong[2] (1.Biological Effects Technology Research Office, Institute for Hygiene of Ordnance Industry, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2.Xi'an Center for Disease Control and Prevention, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract:

[Background] The health effect of $PM_{2.5}$ is a research hotspot in the field of environmental health, as well as a major social issue closely related to the physical health of residents.

[Objective] This study evaluates the effects of short-term exposure to $PM_{2.5}$ on the mortality of cardio-cerebrovascular diseases in Xi'an.

[Methods] Population deaths due to cardiovascular and cerebrovascular diseases, atmospheric pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10}, CO, SO_2, NO_2, and O_3), and meteorological data (temperature and relative humidity) were collected in Xi'an from January 1, 2014 to December 31, 2018. Correlation analysis of the variables was conducted. Generalized additive model based on time series was

基金项目
陕西省自然科学基础研究计划（2019JQ-993）

作者简介
王鸿（1984—），男，博士，副主任医师；
E-mail：wanghong@mail.nwpu.edu.cn

通信作者
赵国栋，E-mail：93887810@qq.com

伦理审批 已获取
利益冲突 无申报
收稿日期 2020-05-06
录用日期 2020-08-20

文章编号 2095-9982(2020)10-0975-06
中图分类号 R122.7；R543
文献标志码 A

▸引用
王鸿，高俊宏，方乐，等.西安市大气 $PM_{2.5}$ 短期暴露对人群心脑血管系统疾病死亡的影响[J].环境与职业医学，2020，37（10）：975-980.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20213

Funding
This study was funded.

Correspondence to
ZHAO Guo-dong, E-mail: 93887810@qq.com

Ethics approval Obtained
Competing interests None declared
Received 2020-05-06
Accepted 2020-08-20

▸To cite
WANG Hong, GAO Jun-hong, FANG Le, et al. Effects of short-term exposure to atmospheric $PM_{2.5}$ on deaths due to cardiovascular and cerebrovascular diseases in Xi'an[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(10): 975-980.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20213

used to analyze the exposure-response relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and cardio-cerebrovascular disease deaths after controlling confounding factors such as time trend and day-of-the-week effect and having average daily temperature and relative humidity as covariates. On the basis of the single lag effect of $PM_{2.5}$ (lag0-lag7), the cumulative effect of $PM_{2.5}$ and other pollutants on the deaths due to cardio-cerebrovascular diseases at lag02 was estimated. Meanwhile, the effects of $PM_{2.5}$ were stratified by gender and age (0-44, 45-59, 60-74, 75-89, and ⩾90 years).

[Results] During the study period, the average daily concentration of $PM_{2.5}$ was (67.0±55.4) μg·m^{-3}, and the average number of daily deaths from cardio-cerebrovascular diseases was 70.17±18.53. $PM_{2.5}$ was positively correlated with PM_{10}, SO_2, NO_2, and CO (r=0.88, 0.64, 0.68, and 0.79, P<0.01), and negatively correlated with O_3, temperature, and humidity (r=–0.42, –0.51, and –0.05, P<0.05). For every 10 μg·m^{-3} increase in $PM_{2.5}$ concentration, the excess risks (*ER*) at lag0-lag2 were 0.32% (95% *CI*: 0.12%-0.52%), 0.28% (95% *CI*: 0.07%-0.49%), and 0.31% (95% *CI*: 0.09%-0.52%), respectively, while the effects at lag3-lag7 were not significant. At lag02, the *ER* of the $PM_{2.5}$ single pollutant model was 0.45% (95% *CI*: 0.19%-0.70%), and the *ERs* of $PM_{2.5}$ combined with SO_2, NO_2, and O_3 were 0.38% (95% *CI*: 0.10%-0.66%), 0.42% (95% *CI*: 0.14%-0.70%), 0.45% (95% *CI*: 0.20%-0.71%), respectively. The *Z* test results found that the cumulative lag effect of the multi-pollutant model was comparable to that of the single pollutant model, without significant differences (P>0.05). The *ERs* of $PM_{2.5}$ at lag02 were 0.47% (95% *CI*: 0.17%-0.78%) and 0.42% (95% *CI*: 0.10%-0.74%) for men and women (P<0.05), and 0.41% (95% *CI*: 0.01%-0.82%), 0.43% (95% *CI*: 0.11%-0.75%), and 0.99% (95% *CI*: 0.26%-1.74%) for the 60-74, 75-89, and ⩾90 years groups (P<0.05), respectively. However, the *Z* test results showed no differences between the sex groups or among the age groups (P>0.05).

[Conclusion] $PM_{2.5}$ may increase the risk of deaths from cardio-cerebrovascular diseases in Xi'an from 2014 to 2018.

Keywords: air pollution; fine particulate matter; excess risk; cardio-cerebrovascular diseases

随着工业化和城市化进程的加速推进，空气污染已成为影响居民生活环境的重要因素之一，由此带来的健康问题不断凸显。$PM_{2.5}$是造成空气污染的主要污染物之一[1-2]。据报道[3]，我国每年约有160万人的死因与空气污染有关。$PM_{2.5}$可对呼吸系统产生影响已被大家所认识[4-5]，近年来逐步认识到$PM_{2.5}$可增加心血管系统疾病的发生率和病死率[6-8]。超额危险度（excess risk，*ER*）已被广泛应用于评估$PM_{2.5}$引起人群疾病负担的效应[9-10]。文献报道，北京、南京、深圳市$PM_{2.5}$日均质量浓度（后称：浓度）每增加10 μg·m^{-3}，其心脑血管疾病*ER*值分别增加0.021%、0.293%和0.027%[11-13]。赵珂等[14]定量评价了西安市2004—2008年大气$PM_{2.5}$污染对城区居民每日疾病死亡率的影响，发现大气$PM_{2.5}$日均浓度每增加100 μg·m^{-3}，心血管疾病死亡风险增加6.18%。本研究拟收集西安市2014—2018年的死亡数据和空气污染数据，采用基于时间序列的广义线性模型研究$PM_{2.5}$暴露对居民心脑血管疾病死亡的影响，为当地制定大气污染和疾病防治的策略提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 资料来源

2014年1月1日—2018年12月31日西安市空气质量数据源于中国空气质量在线监测分析平台（https://www.aqistudy.cn），主要指标为$PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、CO和O_3的日均浓度。同期气象资料来自于中国气象科学数据共享网，气象因素主要包括气温、相对湿度。人口死亡数据来源于西安市疾病预防控制中心网络直报系统，通过《国际疾病分类》第10版编码，心脑血管系统疾病编码为I00~I99，数据包括死亡者性别、年龄、死亡日期、根本死因等。本研究已获兵器工业五二一医院伦理审查委员会的审查批准（批准号：202001）。

1.2 方法

本研究采用基于时间序列的广义相加模型，在排除了时间趋势和星期几效应等混杂因素的基础上，直接将$PM_{2.5}$放入模型得到滞后效应的估计值，考虑到气象因素对心脑血管系统疾病死亡的影响，将日均气温和相对湿度作为协变量与$PM_{2.5}$一起放入回归模型，分析$PM_{2.5}$对心脑血管系统疾病死亡的影响。具体模型如下：

$$\lg E(Y_t)=\alpha+\beta E_t+ns(T,\upsilon)+ns(H,\upsilon)。$$

其中，$E(Y_t)$是第t天的死亡人数期望值，E_t是第t天或者滞后t天的$PM_{2.5}$浓度，α为截距，β为E_t在模型中的参数，*ns*为平滑样条函数，T为气温，H为相对湿度，υ为自由度。模型通过分别纳入经自然样条函数平滑处理的3 d滑动平均气温和相对湿度来调整温度和相对湿度的混杂效应，自由度分别设置为6和3[15]。

单独滞后效应可能会降低$PM_{2.5}$与死亡率之间的关联性，所以通过检测$PM_{2.5}$不同滞后日及其与不同污染物（SO_2、NO_2、CO和O_3）之间的联系来进行敏感性分析，包括单滞后效应和累积滞后效应。单独滞后效应选择lag0~lag7进行分析，在单独滞后效应的基础上，选择lag02分析其累积效应。另外，基于性别（男

性和女性）和年龄（0~44、45~59、60~74、75~89和90岁以上）对$PM_{2.5}$致心脑血管疾病患者死亡的影响进行分层分析，效应差别检验使用Z检验，公式如下：

$$Z=(E_1-E_2)/\sqrt{SE(E_1)^2+SE(E_2)^2}$$

式中：E_1和E_2为各层（如男性和女性）的效应值，$SE(E_1)$和$SE(E_2)$为标准误。

1.3 统计学分析

采用R 3.6.2软件进行统计学分析。选择ER作为$PM_{2.5}$短期效应评价指标，计算方法如下：$ER=(RR-1)\times 100\%=[\exp(\beta)-1]\times 100\%$。其中$ER$表示$PM_{2.5}$每升高10 μg·m^{-3}，心脑血管疾病死亡人数增加的百分比，其95%CI若包含0时则表示无统计学意义。检验水准α=0.05。

2 结果

2.1 基本情况

2.1.1 死亡人数 研究期内每日心脑血管疾病平均死亡人数为70.17人，其中男性为35.34人，女性为34.82人；0~44、45~59、60~74、75~89、90岁以上组日均死亡数分别为1.77、7.37、20.17、35.44、5.40人。见表1。

表1 2014—2018年西安市心脑血管疾病死亡基本情况

Table 1 The deaths due to cardio-cerebrovascular diseases in Xi'an from 2014 to 2018

指标	分组	人数	构成比/%	日均死亡数（$\bar{x}\pm s$）
性别	男性	64 523	50.37	35.34±10.96
	女性	63 586	49.63	34.82±14.42
年龄/岁	0~44	3 245	2.53	1.77±1.23
	45~59	13 461	10.51	7.37±3.05
	60~74	36 831	28.75	20.17±6.43
	75~89	64 717	50.52	35.44±10.89
	90~	9 855	7.69	5.40±3.12
合计		128 109	100.00	70.17±18.53

2.1.2 空气质量及气象资料 研究期内西安市大气污染物$PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、O_3、CO平均浓度分别为67.0、130.2、21.3、50.2、82.3 μg·m^{-3}和1.6 mg·m^{-3}，其中$PM_{2.5}$时间变化趋势见图1；西安市2014—2018年日平均气温为15.6℃，日平均相对湿度为59.8%，见表2。

2.1.3 大气污染物与气象因素之间的相关性分析 $PM_{2.5}$和所有变量的Pearson相关系数均有统计学意义（P<0.05）。其中，$PM_{2.5}$与PM_{10}、SO_2、NO_2和CO呈正相关，相关系数分别为0.88、0.64、0.68、0.79（P<0.01）；$PM_{2.5}$与O_3、气温和湿度呈负相关，相关系数分别为-0.42、-0.51和-0.05（P<0.05）。见表3。

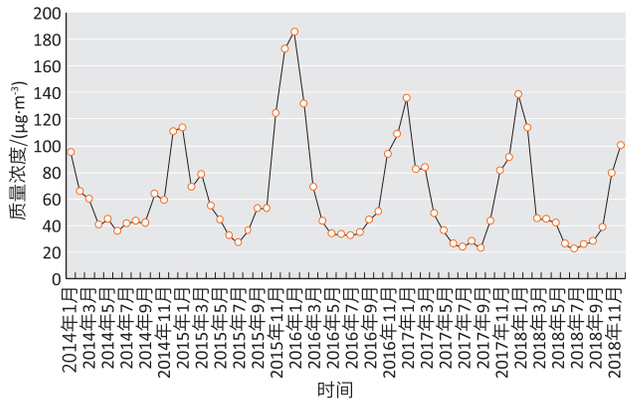


图1 2014—2018年$PM_{2.5}$浓度逐月变化曲线

Figure 1 Monthly change curve of $PM_{2.5}$ concentrations from 2014 to 2018 in Xi'an

表2 2014—2018年西安市大气污染物和气象因素水平

Table 2 The levels of atmospheric pollutants and meteorological factors in Xi'an from 2014 to 2018

指标	$\bar{x}\pm s$	P_{25}	M	P_{75}	最小值	最大值
$PM_{2.5}$浓度/（μg·m^{-3}）	67.0±55.4	32.0	49.0	80.0	9.0	493.0
PM_{10}浓度/（μg·m^{-3}）	130.2±82.1	74.0	107.0	163.0	16.0	589.0
SO_2浓度/（μg·m^{-3}）	21.3±17.4	10.0	15.0	27.0	3.0	147.0
NO_2浓度/（μg·m^{-3}）	50.2±19.2	35.0	47.0	62.0	13.0	127.0
O_3浓度/（μg·m^{-3}）	82.3±52.6	38.0	72.0	120.0	0.0	280.0
CO浓度/（mg·m^{-3}）	1.6±0.7	1.1	1.4	1.9	0.6	5.4
平均气温/℃	15.6±9.8	7.1	16.4	24.0	-6.7	36.0
相对湿度/%	59.8±16.9	47.3	58.9	72.3	18.5	97.9

表3 2014—2018年西安市主要污染物与气象因素的Pearson相关分析（r）

Table 3 Pearson correlation between major air pollutants and meteorological factors in Xi'an from 2014 to 2018 (r)

指标	$PM_{2.5}$浓度	PM_{10}浓度	SO_2浓度	NO_2浓度	O_3浓度	CO浓度	平均气温	相对湿度
$PM_{2.5}$浓度	1.00	0.88**	0.64**	0.68**	-0.42**	0.79**	-0.51**	-0.05*
PM_{10}浓度		1.00	0.63**	0.64**	-0.39**	0.74**	-0.46**	-0.14**
SO_2浓度			1.00	0.50**	-0.49**	0.79**	-0.63**	-0.22**
NO_2浓度				1.00	-0.29**	0.57**	-0.42**	-0.18**
O_3浓度					1.00	-0.54**	0.81**	-0.26**
CO浓度						1.00	-0.62**	0.01
平均气温							1.00	0.02
相对湿度								1.00

[注] **：P<0.01；*：P<0.05。

2.2 $PM_{2.5}$浓度升高时人群心脑血管疾病死亡风险的单滞后效应

结果显示，$PM_{2.5}$在当天以及滞后1、2 d的效应是有统计学意义（P<0.05），在lag0~lag2时，$PM_{2.5}$浓度每升高10 μg·m^{-3}，其对应的ER及其95%CI分别为0.32%（0.12%~0.52%）、0.28%（0.07%~0.49%）和0.31%（0.09%~0.52%），当天效应达到最大。见表4。

表4 不同滞后日大气 $PM_{2.5}$ 每增加 10 μg·m^{-3} 时心脑血管疾病死亡率的超额危险度

Table 4 The excess risk of cardio-cerebrovascular mortality associated with 10 μg·m^{-3} of $PM_{2.5}$ concentration at different lag days

滞后时间	*ER*/%	95%*CI*/%
lag0	0.32[a]	0.12~0.52
lag1	0.28[a]	0.07~0.49
lag2	0.31[a]	0.09~0.52
lag3	0.05	−0.16~0.26
lag4	−0.07	−0.27~0.14
lag5	−0.08	−0.28~0.12
lag6	−0.06	−0.26~0.15
lag7	−0.12	−0.32~0.08

[注] a：*P*<0.05。

2.3 $PM_{2.5}$ 浓度升高时人群心脑血管疾病死亡风险的累积滞后效应

2.3.1 单污染模型 结果显示，单污染（仅为 $PM_{2.5}$）累积滞后 2 d（lag02），$PM_{2.5}$ 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，其 *ER* 值为 0.45%（95%*CI*：0.19%~0.70%）（*P*<0.05），见表 5。

2.3.2 多污染模型 在单污染模型的基础上，使用累积滞后 2 d（lag02）滑动平均浓度建立 $PM_{2.5}$ 与 SO_2、NO_2、CO、O_3 多污染模型。结果显示，$PM_{2.5}$ 与 SO_2、NO_2、O_3 联合暴露的效应有统计学意义（*P*<0.05），*ER* 及其 95%*CI* 分别为 0.38%（0.10%~0.66%）、0.42%（0.14%~0.70%）和 0.45%（0.20%~0.71%）；$PM_{2.5}$ 与 CO，$PM_{2.5}$ 与所有污染物联合暴露的效应无统计学意义（*P*>0.05）。但 *Z* 检验发现多污染物模型与单污染物模型的累积滞后效应估计值差异无统计学意义（*P*>0.05）。见表 5。

表5 2014—2018 年西安市 $PM_{2.5}$ 浓度升高 10 μg·m^{-3} 时人群心脑血管疾病死亡风险的多污染物模型（lag02）

Table 5 The multi-pollutant model of cardio-cerebrovascular disease mortality associated with 10 μg·m^{-3} of $PM_{2.5}$ concentration in Xi'an from 2014 to 2018 (lag02)

大气污染物	*ER*/%	95%*CI*/%
$PM_{2.5}$	0.45[ab]	0.19~0.70
$PM_{2.5}$+SO_2	0.38[a]	0.10~0.66
$PM_{2.5}$+NO_2	0.42[a]	0.14~0.70
$PM_{2.5}$+CO	0.32	−0.01~0.66
$PM_{2.5}$+O_3	0.45[a]	0.20~0.71
$PM_{2.5}$+CO+NO_2+SO_2+O_3	0.29[b]	−0.02~0.58

[注] a：*P*<0.05；b：二者比较，*P*>0.05。

2.3.3 性别、年龄分层分析 结果显示，lag02 时 $PM_{2.5}$ 对男性和女性 *ER* 影响的差异无统计学意义（*P*>0.05）；从年龄层次看，60~74、75~89 和 90 岁以上人群的 *ER* 有统计学意义，随年龄的增大，$PM_{2.5}$ 升高时，心脑血管疾病死亡风险呈增大趋势。但年龄分层 *Z* 检验分析显示，各组间差异无统计学意义（*P*>0.05）。见表 6。

表6 2014—2018 年西安市 $PM_{2.5}$ 浓度升高 10 μg·m^{-3} 时性别和年龄分层人群心脑血管疾病死亡风险（lag02）

Table 6 The excess risk of cardio-cerebrovascular mortality by different genders and ages associated with 10 μg·m^{-3} of $PM_{2.5}$ concentration in Xi'an from 2014 to 2018 (lag02)

指标	分组	*ER* (95%*CI*) /%	*Z*	*P*
性别	男性	0.47[a] (0.17~0.78)	0.23	0.822
	女性	0.42[a] (0.10~0.74)	—	—
年龄 / 岁	0~44	−0.35 (−1.58~0.90)	−1.81	0.070
	45~59	0.43 (−0.15~1.01)	−1.18	0.239
	60~74	0.41[a] (0.01~0.82)	−1.35	0.177
	75~89	0.43[a] (0.11~0.75)	−1.38	0.168
	90~	0.99[a] (0.26~1.74)	—	—

[注] a：*P*<0.05。以女性、90 岁以上为参照组。

3 讨论

心脑血管系统疾病是严重威胁人类健康的重大疾病。流行病学调查和毒理学实验已证实大气污染物与人群心脑血管死亡密切相关，尤其是 $PM_{2.5}$ 与人群死亡风险的关联更高，这已成为倍受关注的环境问题和社会问题。

本研究通过收集西安市 2014—2018 年日大气污染物浓度、气象指标及居民心脑血管疾病死亡数据，利用基于时间序列的广义相加模型分析了 $PM_{2.5}$ 暴露与居民心脑血管疾病日死亡风险的关联。结果显示，2014—2018 年西安市 $PM_{2.5}$ 的日均浓度为 67.0 μg·m^{-3}，按照 GB 3095—2012《环境空气质量标准》中的 24 h 平均污染物限值标准，该市 $PM_{2.5}$ 浓度高于国家一级标准（35 μg·m^{-3}）[16]。研究发现，西安市 $PM_{2.5}$ 与心脑血管死亡数呈正相关。在单污染模型中，死亡当日 $PM_{2.5}$ 浓度对心脑血管疾病死亡影响的 *ER* 值最大，$PM_{2.5}$ 日均浓度每增加 10 μg·m^{-3}，西安市人群心脑血管疾病死亡的风险增加 0.32%，提示 $PM_{2.5}$ 的短期暴露可能引起心脑血管疾病死亡风险增加，与 Huang 等[17] 对西安的研究结果相近，该研究中 $PM_{2.5}$ 日均浓度每上升 10 μg·m^{-3}，心脑血管疾病死亡风险增加 0.27%（95%*CI*：0.08%~0.46%）。不同城市的研究结果不尽相同。李静等[11] 报道了北京昌平地区 $PM_{2.5}$ 浓度对心血管系统疾病死亡的影响，发现 $PM_{2.5}$ 分别在滞后 7 d 和 9 d 时才显现出危害效应，滞后 14 d 时效应达到最大，累积滞后 21 d 时，$PM_{2.5}$ 每增加 10 μg·m^{-3}，人群心血管系统疾病死亡的累积超额死亡率为 0.021%（95%*CI*：0.004%~0.038%）。刘晓剑等[12] 报道了深圳市空气 $PM_{2.5}$ 浓度在滞后 7 d 对心脑血管疾病死亡的影响最强，日均浓度每上升 10 μg·m^{-3}，人群心脑血管疾病死亡风险增加 0.27%（95%*CI*：0.06%~0.48%）。张永

利等[18]报道了舟山市$PM_{2.5}$浓度每升高10 μg·m^{-3}，滞后2 d时总人群和≥65岁人群循环系统疾病日死亡风险分别增加2.46%（95%*CI*：0.36%~4.55%）和3.32%（95%*CI*：1.13%~5.52%）。不同城市之间$PM_{2.5}$浓度升高时，人群心血管系统疾病死亡风险变化值存在差异，主要影响因素可能有大气污染水平、污染物来源及成分、人群易感性、研究周期等[19-20]。

本研究结果还显示，在大气$PM_{2.5}$分别与NO_2、SO_2和O_3构建的双污染物模型中，居民心脑血管疾病死亡的效应是有统计学意义；但在多污染物模型中，$PM_{2.5}$浓度对心脑血管疾病死亡影响的*ER*值与单污染物模型的*ER*值的差异无统计学意义，提示$PM_{2.5}$的效应是稳健的，这与陈志永等[21]在常州市的研究结果一致，可能由于存在其他混杂因素导致多污染物对心脑血管疾病死亡之间的关系变弱，同时也提示不同污染物的健康效应并不是简单的叠加。在性别分层方面，$PM_{2.5}$对男性和女性心脑血管系统疾病的影响无明显差异；在年龄层面，$PM_{2.5}$使≥60岁人群心脑血管疾病*ER*增加，可能是由于人群随着年龄的增大，较多患有基础性疾病，并且抵抗力下降，更容易受$PM_{2.5}$的影响，但各年龄组无差异。这与李静等[11]关于北京市昌平区$PM_{2.5}$对心脑血管死亡的影响是一致的。

综上所述，本研究采用了基于时间序列的广义相加模型，通过对收集资料的分析表明，2014—2018年西安市的心脑血管疾病死亡率增加与$PM_{2.5}$浓度升高有关，后期加强大气污染的防治，对降低人群心脑血管疾病死亡具有重要的意义。

参考文献

[1] ZHANG L，YANG G，LI X. Mining sequential patterns of $PM_{2.5}$ pollution between 338 cities in China [J]. J Environ Manag，2020，262：110341.

[2] LI J，HAN X，LI X，et al. Spatiotemporal patterns of ground monitored $PM_{2.5}$ concentrations in China in recent years [J]. Int J Environ Res Public Health，2018，15 (1)：114.

[3] ROHDE R A，MULLER R A. Air pollution in China：mapping of concentrations and sources [J]. PLoS One，2015，10 (8)：e0135749.

[4] AL-HAMDAN A Z，ALBASHAIREH R N，AL-HAMDAN M Z，et al. The association of remotely sensed outdoor fine particulate matter with cancer incidence of respiratory system in the USA [J]. J Environ Sci Health，Part A，2017，52 (6)：547-554.

[5] HUANG B F，CHANG Y C，HAN A L，et al. Metal composition of ambient $PM_{2.5}$ influences the pulmonary function of schoolchildren：a case study of school located nearby of an electric arc furnace factory [J]. Toxicol Ind Health，2018，34 (4)：253-261.

[6] TAPIA V，STEENLAND K，VU B，et al. $PM_{2.5}$ exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima，Peru，from 2010 to 2016 [J]. Environ Health，2020，doi：10.21203/rs.2.23559/v2.

[7] 齐爱，张亚娟，杨惠芳. 大气$PM_{2.5}$对心血管系统影响及其作用机制研究进展 [J]. 环境与健康杂志，2016，33 (5)：465-469.

[8] BARRETT J R. Subtle but potentially serious：long-term ambient $PM_{2.5}$ exposure and risk of cardiopulmonary mortality [J]. Environ Health Perspect，2020，128 (2)：024001.

[9] 张献伟，徐美华，王玉雯，等. 2016—2018年天津市大气$PM_{2.5}$对儿童呼吸系统门诊量的时间序列分析 [J]. 公共卫生与预防医学，2019，30 (5)：29-32.

[10] 曾婕，陈剑宇，周亮，等. 成都市大气$PM_{2.5}$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.

[11] 李静，王焕新，屈龙，等. $PM_{2.5}$对北京市昌平区居民心血管系统疾病死亡的短期影响 [J]. 中华流行病学杂志，2019，40 (3)：331-334.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 赵珂，曹军骥，文湘闽. 西安市大气$PM_{2.5}$污染与城区居民死亡率的关系 [J]. 预防医学情报杂志，2011，27 (4)：257-262.

[15] 贺天锋，黄婧，李国星，等. 宁波市大气可吸入颗粒物对人群死亡短期影响的归因风险评估 [J]. 上海预防医学，2017，29 (11)：857-862.

[16] 环境空气质量标准：GB 3095—2012 [S]. 北京：中国环境科学出版社，2016.

[17] HUANG W，CAO J，TAO Y，et al. Seasonal variation of chemical species associated with short-term mortality effects of $PM_{2.5}$ in Xi'an，a central city in China [J]. Am J

Epidemiol，2012，175（6）：556-566.

[18] 张永利，莫哲，易井萍，等. 舟山市大气$PM_{2.5}$对居民循环系统疾病日死亡人数的影响[J]. 环境与职业医学，2017，34（3）：224-229.

[19] BEELEN R，STAFOGGIA M，RAASCHOU-NIELSEN O，et al. Long-term exposure to air pollution and cardiovascular mortality：an analysis of 22 European cohorts [J]. Epidemiology，2014，25（3）：368-378.

[20] 臧希文，齐向前. $PM_{2.5}$对心血管系统的影响[J]. 中国循环杂志，2018，33（3）：305-307.

[21] 陈志永，陈小岳，董慧斌，等. 常州市大气细颗粒物对老年人死亡影响的时间序列研究[J]. 现代预防医学，2019，46（7）：1181-1185.

（英文编辑：汪源；责任编辑：陈姣）

（上接第974页）

conjunctivitis：a retrospective registry study [J]. Sci Rep，2016，6：23858.

[5] MALERBI F K，MARTINS L C，SALDIVA P H，et al. Ambient levels of air pollution induce clinical worsening of blepharitis [J]. Environ Res，2012，112：199-203.

[6] KIM H，LEE J T. On inferences about lag effects using lag models in air pollution time-series studies [J]. Environ Res，2019，171：134-144.

[7] ITO K，THURSTON G D，SILVERMAN R A. Characterization of $PM_{2.5}$，gaseous pollutants，and meteorological interactions in the context of time-series health effects models [J]. J Expo Sci Environ Epidemiol，2007，17（Suppl 2）：S45-S60.

[8] GALOR A，KUMAR N，FEUER W，et al. Environmental factors affect the risk of dry eye syndrome in a United States veteran population [J]. Ophthalmology，2014，121（4）：972-973.e1.

[9] HWANG S H，CHOI Y H，PAIK H J，et al. Potential importance of ozone in the association between outdoor air pollution and dry eye disease in South Korea [J]. JAMA Ophthalmol，2016，134（5）：503-510.

[10] UM S B，KIM N H，LEE H K，et al. Spatial epidemiology of dry eye disease：findings from South Korea [J]. Int J Health Geogr，2014，13：31.

[11] WANG C，ZHU G，ZHANG L，et al. Particulate matter pollution and hospital outpatient visits for endocrine，digestive，urological，and dermatological diseases in Nanjing，China [J]. Environ Pollut，2020，261：114205.

[12] TAN F，WANG W，QI S，et al. Air pollutants and outpatient visits for cardiovascular disease in a severe haze-fog city：Shijiazhuang，China [J]. BMC Public Health，2019，19（1）：1366.

[13] 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.

[14] BRON A J，DE PAIVA C S，CHAUHAN S K，et al. Corrigendum to “TFOS DEWS II pathophysiology report” [Ocul. Surf. 15（3）（2017）438-510] [J]. Ocul Surf，2019，17（4）：842.

[15] MATSUDA M，BONATTI R，MARQUEZINI M V，et al. Lacrimal cytokines assessment in subjects exposed to different levels of ambient air pollution in a large metropolitan area [J]. PLoS One，2015，10（11）：e0143131.

[16] TAN G，LI J，YANG Q，et al. Air pollutant particulate matter 2.5 induces dry eye syndrome in mice [J]. Sci Rep，2018，8：17828.

[17] LI J，TAN G，DING X，et al. A mouse dry eye model induced by topical administration of the air pollutant particulate matter 10 [J]. Biomed Pharmacother，2017，96：524-534.

[18] GAO Z X，SONG X L，LI S S，et al. Assessment of DNA Damage and Cell Senescence in Corneal Epithelial Cells Exposed to Airborne Particulate Matter（$PM_{2.5}$）Collected in Guangzhou，China [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci，2016，57（7）：3093-3102.

[19] UCHINO Y，KAWAKITA T，MIYAZAWA M，et al. Oxidative stress induced inflammation initiates functional decline of tear production [J]. PLoS One，2012，7（10）：e45805.

（英文编辑：汪源；责任编辑：陈姣）