文章编号：2095-9982(2017)03-0224-06　　**中图分类号：**R122　　**文献标志码：**A

【论著｜专栏：大气颗粒物的健康效应】

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

张永利[1]，莫哲[2]，易井萍[1]，王晓峰[2]，王芝芳[2]

摘要：

［目的］　了解舟山市大气细颗粒物（$PM_{2.5}$）对居民循环系统疾病日死亡人数的影响。

［方法］　收集2014年舟山市居民循环系统疾病死亡数据、大气污染物（$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2）资料以及气象数据（平均气温和相对湿度），采用广义相加模型分析$PM_{2.5}$与当地居民循环系统疾病日死亡人数之间的关系。

［结果］　2014年舟山市$PM_{2.5}$日均浓度为31.22 μg/m³，符合GB 3095—2012《环境空气质量标准》中污染物浓度限值的一级标准，空气质量总体较好。在寒冷季节（1—4月和11—12月）的3种大气污染物浓度均较高，且与总人群的循环系统疾病日死亡人数和≥65岁居民的循环系统疾病日死亡人数的高峰期重叠。全年死于循环系统疾病的人数共2 120人，85%以上为≥65岁居民（老年人）。模型拟合结果显示：$PM_{2.5}$浓度每升高10 μg/m³，总人群的循环系统疾病死亡风险增加2.46%（95%*CI*：0.36%~4.55%）。$PM_{2.5}$在滞后2天时对总人群尤其是≥65岁居民的循环系统疾病死亡的影响更大。与温暖季节（5—10月）相比，这一效应在寒冷季节较明显。

［结论］　舟山市$PM_{2.5}$对居民尤其是老年人循环系统疾病日死亡有一定的影响，该效应在寒冷季节强于温暖季节。

关键词：细颗粒物；大气污染；循环系统疾病；广义相加模型；死亡

引用：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. **DOI**: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.16433

Effect of $PM_{2.5}$ on daily mortality of circulatory diseases in Zhoushan City

ZHANG Yong-li[1], *MO Zhe*[2], *YI Jing-ping*[1], *WANG Xiao-feng*[2], *WANG Zhi-fang*[2] (1.*Zhejiang Zhoushan Center for Disease Control and Prevention*, *Zhoushan*, *Zhejiang* 316021, *China*; 2.*Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Hangzhou*, *Zhejiang* 310051, *China*). *Address correspondence to WANG Zhi-fang*, *E-mail*: *zfwang@cdc.zj.cn*　· *The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.*

Abstract:

［Objective］　To evaluate the effect of fine particulate matters ($PM_{2.5}$) on the daily mortality of circulatory diseases in Zhoushan City.

［Methods］　Data on daily mortality of circulatory diseases, daily air pollution ($PM_{2.5}$, SO_2, and NO_2), and meteorological factors (average temperature and relative humidity) during 2014 in Zhoushan were collected. Generalized additive model (GAM) was used to analyze the association between $PM_{2.5}$ concentration and circulatory disease daily mortality.

［Results］　The daily $PM_{2.5}$ level in selected city was 31.22 μg/m³ in 2014, which met the primary standard of *Ambient Air Quality Standard* (GB 3095-2012). During cold season (from January to April, and from November to December), the atmospheric pollutant concentrations were high and strongly linked with the daily mortality of circulatory diseases. The death toll for circulatory diseases was 2120 in 2014. The majority of them (>85%) were older than 65 years. Circulatory disease mortality increased by 2.46% (95%*CI*: 0.36%-4.55%) for per 10 μg/m³ increase in $PM_{2.5}$. The relationships between circulatory disease mortality and $PM_{2.5}$ concentrations in the total population and the residents ≥ 65 years were stronger on lag 2 days and in cold season compared with warm season (from May to October).

［Conclusion］　Short-term ambient $PM_{2.5}$ exposure is associated with higher circulatory mortality in Zhoushan City, especially for the elderly. The effect is stronger in cold season than in warm season.

Keywords: fine particulate matter; air pollution; circulatory disease; generalized additive model; mortality

Citation: ZHANG Yong-li, MO Zhe, YI Jing-ping, et al. Effect of $PM_{2.5}$ on daily mortality of circulatory diseases in Zhoushan City[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2017, 34(3): 224-229. **DOI**: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.16433

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

［基金项目］浙江省科技计划项目（编号：2014C03025）；舟山市科技计划项目（编号：2014C31074）

［作者简介］张永利（1963—），男，本科，主任药师；研究方向：公共卫生和药学；E-mail：zhangcdc@139.com

［通信作者］王芝芳，E-mail：zfwang@cdc.zj.cn

［作者单位］1.浙江省舟山市疾病预防控制中心，浙江 舟山 316021；2.浙江省疾病预防控制中心，浙江 杭州 310051

近年研究显示，全球近75%的人口住在大气细颗粒物（$PM_{2.5}$）年均质量浓度（以下简称“浓度”）大于10 μg/m³的地区[1]，严重者$PM_{2.5}$日均浓度甚至高达150~500 μg/m³。据估计，全球范围内每年因为$PM_{2.5}$超标而导致的过早死亡人数超过300万人[2]。在这些过早死亡者中，约80%生活在西太平洋和东南亚区域的低、中收入国家，且多数死于循环系统疾病[3-5]。

大气污染物的时空分布和浓度变化不仅与污染物排放源的位置、排放量有关，还与地形、地貌、气象等因素密切相关。在以往的研究中，国内研究主要关注大气污染较重的内陆城市和地区（重污染区）的大气污染物对居民健康的影响，如北京市[6]、南京市[7]、武汉市[8]，而对于大气质量较好的地区则研究较少。本研究选择近年一直被评价为我国大气质量较好的浙江省东部沿海港口城市——舟山市作为研究对象，对该市2014年的大气$PM_{2.5}$与居民循环系统疾病日死亡关系进行分析，定量评估$PM_{2.5}$对居民循环系统疾病日死亡的急性效应，为制定有效的环保措施和保护易感人群的政策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

逐日大气污染物$PM_{2.5}$、二氧化硫（SO_2）和二氧化氮（NO_2）的数据来自浙江省舟山海洋生态环境监测站；逐日地面气象数据（气温和相对湿度）来源于舟山市气象台；逐日死亡数据来源于舟山市疾病预防控制中心网络直报系统。数据包括死亡者性别、出生日期、死亡日期、死因等。死因采用《国际疾病分类》第10版（ICD-10）编码，本研究采用疾病变量为循环系统疾病分类法中的I00-I99。上述三类资料收集的时间段为2014年1月1日—12月31日。

1.2 研究方法

对总体人群来说，居民日死亡属于小概率事件，其统计学分布近似服从Poisson分布。在排除“星期几效应”（day of the week，DOW）后，用自然样条平滑函数排除人群循环系统疾病日死亡的长期趋势以及气温和相对湿度等混杂因素的影响，运用广义相加模型（generalized additive model，GAM）分析大气$PM_{2.5}$浓度与居民循环系统疾病日死亡人数的关系，并按照不同年龄分层建立模型。具体模型公式为：$\mathrm{Log}\left[E\left(Y_t\right)\right]=\alpha+\beta Z_t+\mathrm{ns}\left(time,\ df\right)+\mathrm{ns}\left(X_t,\ df\right)+DOW$。式中，$Y_t$：观察$t$日当天的死亡人数；$E\left(Y_t\right)$：观察日$t$日当天的死亡人数服从Poisson分布的数学期望值；α：截距；β：回归系数；Z_t：当日$PM_{2.5}$浓度；ns（$time$，df）表示自由度为df的日期的自然样条平滑函数，用于控制长期效应与周期效应；ns（X_t，df）表示自由度为df的外因（气温、相对湿度等混杂因素）的自然样条函数，用于控制气温、相对湿度等混杂因素；DOW：反映“星期几效应”的虚拟变量。

由于考虑到$PM_{2.5}$对居民死亡影响的滞后效应，本研究滞后时间选取0~6个滞后日进行分析，其中lag0表示当日大气$PM_{2.5}$浓度，lag1表示前1日$PM_{2.5}$浓度，以此类推。同时，采用Akaike信息标准（Akaike information criterion，AIC）作为评判标准，对模型进行因子选择和优度检验。AIC值越小，模型拟合度越高。单污染模型拟合控制气象因素（气温和相对湿度）和其他大气污染因素（SO_2和NO_2）之后，用单日滞后模式进行分析。多污染模型拟合，由于考虑其他大气污染物（SO_2和NO_2）与$PM_{2.5}$的健康效应相互影响，可能存在着拮抗或协同作用，所以利用多污染模型分别控制SO_2、NO_2以及同时控制SO_2和NO_2后，分析$PM_{2.5}$对总人群循环系统疾病、<65岁及≥65岁居民循环系统疾病的日死亡的影响。

1.3 统计学分析

采用R 3.3软件进行统计学分析。以超额危险度（excess risk，ER）来表示$PM_{2.5}$浓度每增加或减少10 μg/m³，人群每日死亡人数增加或减少的百分比（%）。$ER=100\times(e^{\beta}-1)$，其95%$CI$若包含0，则表示无统计学意义。检验水准$\alpha$=0.05。

2 结果

2.1 一般状况

由表1显示，舟山市2014年居民死于循环系统疾病的总人数为2 120人，其中≥65岁1 894人（占89.3%）；总人群的循环系统疾病日均死亡数为5.82人，其中≥65岁者为5.15人（88.5%）。同期，舟山市大气污染物$PM_{2.5}$日均浓度为31.22 μg/m³，SO_2为5.83 μg/m³，NO_2为22.21 μg/m³。其中，$PM_{2.5}$、SO_2和NO_2日均浓度符合GB 3095—2012《环境空气质量标准》污染物浓度限值一级标准（$PM_{2.5}$：35 μg/m³；SO_2：50 μg/m³；NO_2：80 μg/m³）。舟山市2014年日均气温为17.01℃，日均相对湿度为80.13%。

2.2 相关分析

由表2显示，$PM_{2.5}$、SO_2与N0$_2$之间呈正相关；气温、

相对湿度分别与3种大气污染物之间呈负相关；循环系统疾病日均死亡人数与3种大气污染物之间均呈正相关，与2种气象因素之间呈负相关，与各年龄组居民死亡人数均呈正相关（$P<0.05$）。

表1　2014年舟山市居民循环系统疾病日死亡人数、大气污染物日均浓度和气象条件

指标	$\bar{x}$	s	最小值	P_{25}	M	P_{75}	最大值
死亡人数（人）	5.82	2.72	1.00	4.00	5.50	7.50	16.00
<65岁	0.62	0.83	0.00	0.00	0.00	1.00	6.00
≥65岁	5.15	2.58	0.00	3.00	5.00	7.00	14.00
$PM_{2.5}$（μg/m³）	31.22	20.68	3.00	17.00	26.00	40.50	139.00
SO_2（μg/m³）	5.84	4.57	2.00	3.00	4.00	6.00	42.00
NO_2（μg/m³）	22.21	12.80	3.00	13.00	20.00	28.00	84.00
气温（℃）	17.01	7.58	0.73	10.46	17.45	23.56	29.45
相对湿度（%）	80.13	11.68	39.00	74.00	82.00	88.00	98.00

表2　2014年舟山市大气污染物与气象因素、循环系统疾病日均死亡人数的相关分析（r）

指标	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_2	气温	相对湿度	日均死亡人数	<65岁	≥65岁
$PM_{2.5}$	1.00	—	—	—	—	—	—	—
SO_2	0.57**	1.00	—	—	—	—	—	—
NO_2	0.54**	0.63**	1.00	—	—	—	—	—
气温	-0.22**	-0.38**	-0.32**	1.00	—	—	—	—
相对湿度	-0.34**	-0.51**	-0.27**	0.41**	1.00	—	—	—
日均死亡人数	0.13*	0.20**	0.18**	-0.38**	-0.12*	1.00	—	—
<65岁	0.03	0.02	0.04	-0.11*	0.03	0.27**	1.00	—
≥65岁	0.13*	0.21**	0.17**	-0.36**	-0.15**	0.95**	-0.01	1.00

［注］Spearman分析，*：$P<0.05$；**：$P<0.001$。

2.3　时间序列分析

2.3.1　大气污染物及气象因素　由图1可见，3种大气污染物浓度和2种气象因素在2014年全年分布均无明显周期趋势。在2014年的寒冷季节（11—12月和1—4月期间），舟山市3种大气污染物浓度均较高，大气污染较重；温暖季节（5—10月）的3种大气污染物浓度较低，大气污染较轻；2014年8月份平均气温最高，2月最低；全年1—9月平均相对湿度较高，10—12月平均相对湿度较低。

2.3.2　居民循环系统疾病日死亡人数　由图2可见，2014年舟山市循环系统疾病日死亡人数无周期趋势，循环系统疾病日死亡总数的变动趋势与≥65岁居民的循环系统疾病日死亡人数的变化趋势相似，高峰期出现在11—12月和1—4月期间；<65岁居民的循环系统疾病日死亡人数的高峰期出现在2月。

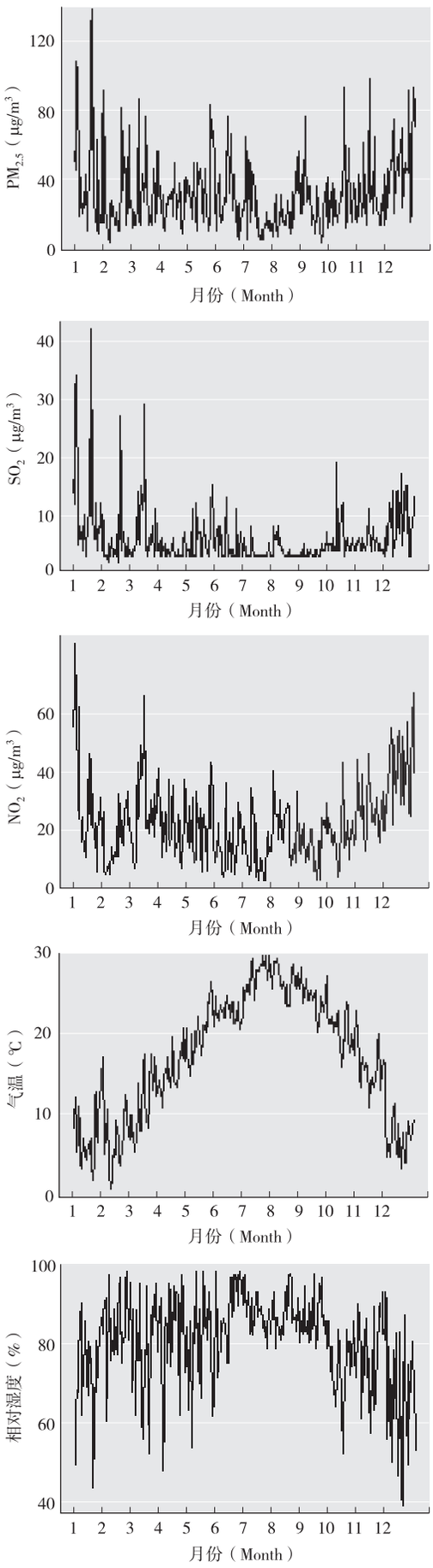

图1　2014年舟山市大气污染物及气象因素的时间序列分析

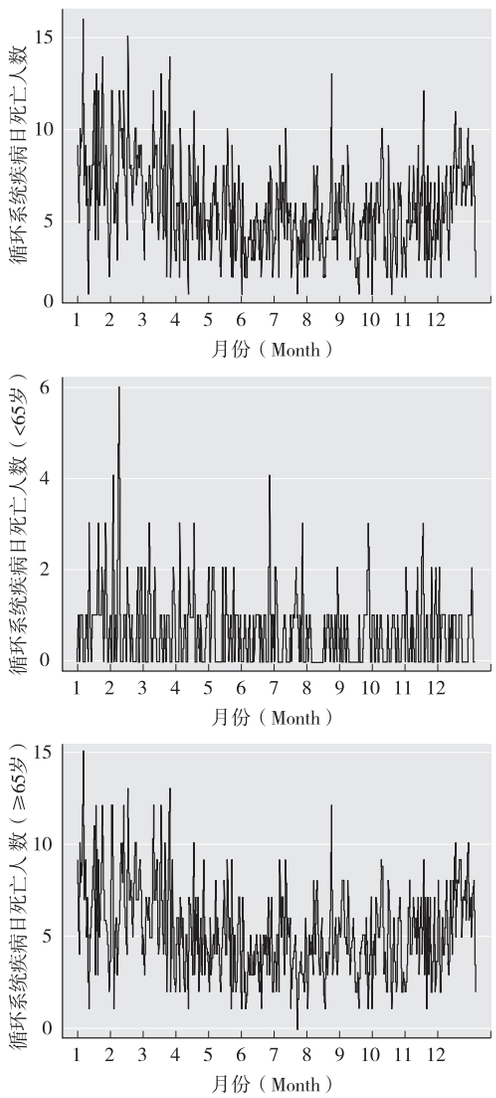

图2 2014年舟山市循环系统疾病日死亡人数的时间序列图

2.4 $PM_{2.5}$浓度与循环系统疾病日死亡的关系

2.4.1 单污染模型拟合 由表3可见，滞后2日时总人群及≥65岁人群循环系统疾病*ER*最大（$P<0.05$），其余滞后日的*ER*无统计学意义。滞后2日的$PM_{2.5}$浓度每升高10 μg/m³，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%）；$PM_{2.5}$浓度对<65岁人群循环系统疾病的日死亡影响在滞后0~6日均无明显急性健康效应。

2.4.2 多污染模型拟合 由表4可见，$PM_{2.5}$单独引入SO_2或同时引入SO_2和NO_2时，其对总人群和≥65岁人群循环系统疾病日死亡的影响增加（$P<0.05$）。$PM_{2.5}$在单独引入NO_2时，其对总人群和≥65岁人群循环系统疾病日死亡风险有所降低（$P<0.05$）。对<65岁人群的循环系统疾病日死亡的影响尚未发现有统计学意义（$P>0.05$）。

表3 舟山市居民循环系统疾病死亡的超额危险度（单污染模型，%）

滞后天数	总人群		<65岁		≥65岁	
	ER	95%*CI*	*ER*	95%*CI*	*ER*	95%*CI*
0	1.92	-0.22~4.07	2.83	-3.71~9.4	1.81	-0.46~4.08
1	1.13	-1.02~3.29	-0.77	-7.44~5.94	1.34	-0.93~3.61
2	2.46	0.36~4.55*	-5.7	-12.75~1.4	3.32	1.13~5.52*
3	1.45	-0.66~3.57	-4.32	-11.22~2.63	2.09	-0.13~4.32
4	1.03	-1.1~3.18	-2.45	-9.27~4.42	1.42	-0.83~3.68
5	0.13	-2.04~2.3	-4.1	-10.97~2.82	0.62	-1.66~2.91
6	0.13	-2.08~2.34	0.56	-6.04~7.2	0.07	-2.27~2.42

［注］*：$P<0.05$。

表4 舟山市居民循环系统疾病死亡的超额危险度（多污染模型，%）

污染物	总人群		<65岁		≥65岁	
	ER	95%*CI*	*ER*	95%*CI*	*ER*	95%*CI*
$PM_{2.5}$+SO_2	2.62	0.47~4.77*	-4.94	-12.22~2.38	3.43	1.18~5.68*
$PM_{2.5}$+NO_2	2.30	0.18~4.42*	-5.35	-12.47~1.82	3.11	0.89~5.34*
$PM_{2.5}$+NO_2+SO_2	2.63	0.48~4.79*	-4.94	-12.21~2.38	3.43	1.18~5.70*

［注］*：$P<0.05$。

2.4.3 不同季节的健康效应 由表5可见，调整季节（温暖季节与寒冷季节）的混杂因素后，在寒冷季节$PM_{2.5}$对≥65岁人群的循环系统疾病日死亡风险的负面效应降低（$P<0.05$）；单独控制SO_2或同时控制SO_2和NO_2后，这一效应增强（$P<0.05$）。控制SO_2、NO_2及同时控制SO_2和NO_2后，$PM_{2.5}$与总人群循环系统疾病日死亡率的关联无统计学意义（$P>0.05$）；控制NO_2后，$PM_{2.5}$与≥65岁人群的循环系统疾病日死亡风险的关联无统计学意义（$P>0.05$）。

表5 不同季节$PM_{2.5}$每增加10 μg/m³时居民循环系统疾病日死亡的超额风险度（%）

季节	调整因素	总人群		<65岁		≥65岁	
		*ER**	95%*CI*	*ER**	95%*CI*	*ER**	95%*CI*
寒冷季节	—	2.17	-0.26~4.61	-3.65	-11.84~4.62	2.77	0.22~5.32
	SO_2	2.34	-0.19~4.87	-2.80	-11.33~5.81	2.87	0.22~5.52
	NO_2	1.90	-0.59~4.39	-2.97	-11.3~5.44	2.41	-0.19~5.02
	NO_2+SO_2	2.30	-0.24~4.84	-2.72	-11.23~5.87	2.83	0.16~5.49
温暖季节	—	2.82	-1.74~7.40	-13.20	-27.98~1.81	4.66	-0.14~9.48
	SO_2	2.99	-1.6~7.61	-12.44	-27.35~2.69	4.77	-0.07~9.64
	NO_2	2.62	-1.97~7.23	-13.19	-28.04~1.88	4.43	-0.4~9.30
	NO_2+SO_2	2.87	-1.74~7.50	-12.48	-27.39~2.67	4.64	-0.21~9.52

［注］*：采用滞后2日数据进行分析。

3 讨论

本研究通过收集舟山市2014年$PM_{2.5}$、SO_2和NO_2日均浓度，气温和相对湿度资料以及居民循环系统疾病日死亡数据，利用广义相加模型分析了$PM_{2.5}$对居民循环系统疾病日死亡的影响。结果显示，2014年舟

山市大气中$PM_{2.5}$日均浓度为31.22 μg/m³, SO_2日均浓度为5.83 μg/m³, NO_2日均浓度为22.21 μg/m³, 按照《环境空气质量标准》中的24 h平均污染物限值评价, 该市$PM_{2.5}$、SO_2和NO_2日均浓度均符合国家一级标准。说明2014年舟山市大气质量较好, 与亚洲清洁空气中心在2013年调查报告结果相一致[9], 也与中国环境保护部于2014年对该市大气污染状况调查的结果相一致[10]。

研究还显示：即使在空气质量相对较好或已经达标的区域内, $PM_{2.5}$与居民循环系统疾病日死亡之间仍存在正相关关系；$PM_{2.5}$浓度每升高10 μg/m³时, 总人群的循环系统疾病日死亡风险增加2.46%(95%*CI*：0.36%~4.55%), 提示$PM_{2.5}$浓度对居民循环系统的健康效应并不存在一个安全阈值, 即使是在空气质量达标区域, $PM_{2.5}$仍可对居民循环系统健康造成负面影响。国内外研究显示, $PM_{2.5}$与人群的循环系统疾病死亡相关, 但$PM_{2.5}$每升高10 μg/m³, 其对循环系统疾病影响的研究结果并不完全一致。与本研究结果相近的研究有：在空气质量较好的美国东南部的卡罗莱纳州和乔治亚洲的农村地区人群$PM_{2.5}$暴露所关联的日死亡率增加2.32%[11], 欧洲地区则增加2.26%~2.42%[12-13]；低于本研究结果的有：在空气质量欠佳的城市研究中, 研究发现北京市$PM_{2.5}$日均浓度每升高10 μg/m³, 所关联的循环系统疾病的超额死亡风险增加0.78%[14], 上海为0.68%[15]。一项对中国73个城市的户外大气污染与心血管死亡的meta分析研究结果也显示, 在重污染城市, 如太原、济南、郑州等, $PM_{2.5}$日均浓度每升高10 μg/m³, 所关联的循环系统疾病的超额死亡风险增加0%~1%, 在大气质量较好的城市, 如深圳, 则增加2.1% (95%*CI*：1%~3%)[16]。上述研究结果的异质性可能与$PM_{2.5}$浓度和循环系统疾病死亡率之间呈对数曲线关系[17], 在浓度较低时, 每10 μg/m³浓度值变化即可引起死亡率的大幅度下降, 而在达到一定阈值后, 两者之间呈近乎水平线关系, 所以表现出来的是：每10 μg/m³浓度值变化引起的死亡率下降幅度不大。

$PM_{2.5}$浓度每升高10 μg/m³时, ≥65岁人群的负面健康效应则会更高(*ER*为3.32%, 95%*CI*：1.13~5.52)。该结果证实了≥65岁人群对$PM_{2.5}$更敏感, 这与Kan等[18]对上海地区大气污染物与年龄别死亡关系的分析结果一致, 也与Xie等[19]发现的北京大气细颗粒物对居民缺血性心脏病死亡的影响一致。这说明, $PM_{2.5}$的短期暴露可引起暴露人群循环系统疾病死亡率的升高, 并且≥65岁老年人较<65岁人群更敏感, 应是重点保护人群。因此, 对于循环系统疾病患者尤其老年患者来说, 控制环境$PM_{2.5}$的污染更具有公共卫生学意义。

本研究结果显示, 在多污染模型中单独控制SO_2以及同时控制SO_2与NO_2后, $PM_{2.5}$的健康损伤效应高于单污染模型。这与董凤鸣等[14]的研究结果一致, 但与Yang等[20]在广州市的研究结果不同, 可能由于不同区域内大气污染物$PM_{2.5}$与SO_2以及NO_2之间的共线性不同, $PM_{2.5}$与气态污染物对循环系统疾病的影响存在着联合作用。但是在多污染模型中单独控制NO_2后, $PM_{2.5}$的健康效应却低于单污染模型, 说明SO_2对居民循环系统疾病的健康影响高于NO_2, 可能与SO_2和颗粒物之间存在着较强的联合效应有关, SO_2可与细颗粒物一起进入呼吸道深部, 从而进入循环系统, 造成机体的损伤。

有关不同季节大气细颗粒物健康效应, 本研究显示, 在调整潜在混杂因素之后, 与温暖季节相比, 大气$PM_{2.5}$的负面健康效应在寒冷季节增加, 这可能与在大气质量达标区域, 寒冷季节的大气污染物平均浓度较温暖季节高, 从而导致气温与$PM_{2.5}$产生联合作用。这一研究结果与Neuberger等[21]在冬季寒冷, 夏季凉爽地区的研究结果不一致, 而与Rodopoulou等[22]在冬季温暖, 夏季炎热地区研究结果一致。也可能与暴露人群在不同季节的出行模式不同相关, 温暖带全年气候温和, 但在温暖季节多台风, 人们可能更多喜欢进行室内活动, 这样明显降低了大气污染物的暴露机会；寒冷季节体感温暖, 人们可能更喜欢在室外活动, 则增加了大气污染物的暴露机会。但是, 季节对细颗粒物的健康效应仍需进一步研究。

由于本研究为生态学研究, 且只分析了一年的数据, 不可避免可能存在生态学谬误, 研究结果仅限于暴露与效应之间的关联性, 不能外推于其他城市和地区。

参考文献

[1] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, et al. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter [J]. Environ Health Perspect, 2015, 123 (2)：135-143.

[2] 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.

[3] Balakrishnan K, Ramaswamy P, Sambandam S, et al. Air pollution from household solid fuel combustion in India: an overview of exposure and health related information to inform health research priorities [J/OL]. Glob Health Action, 2011 [2016-10-18]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3188887/.

[4] Clancy L, Goodman P, Sinclair H, et al. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study [J]. Lancet, 2002, 360 (9341): 1210-1214.

[5] Bind M A, Peters A, Koutrakis P, et al. Quantile regression analysis of the distributional effects of air pollution on blood pressure, heart rate variability, blood lipids, and biomarkers of inflammation in elderly American men: the normative aging study [J]. Environ Health Perspect, 2016, 124 (8): 1189-1198.

[6] Su C, Hampel R, Franck U, et al. Assessing responses of cardiovascular mortality to particulate matter air pollution for pre-, during- and post-2008 Olympics periods [J]. Environ Res, 2015, 142: 112-122.

[7] 张开月, 陈晓东, 周连, 等. 南京市大气 PM_{10} 与居民死亡关系的时间序列分析 [J]. 环境与健康杂志, 2015, 32 (6): 485-488.

[8] 张云权, 吴凯, 朱慈华, 等. 武汉大气污染与缺血性心脏病死亡关系季节差异 [J]. 中国公共卫生, 2015, 31 (7): 926-929.

[9] 付璐, 万薇, 张伟豪. 大气中国 2015——中国大气污染防治进程 [R/OL]. [2016-10-18]. https://g.inspire-energy.com.cn/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjFzfmMrOnPAhVoh1QKHajHDJQQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.allaboutair.cn%2Fuploads%2Fsoft%2F151116%2F1-151116142627.pdf&usg=AFQjCNERB-hcES9lIvci63YiXpWzhLLboQ.

[10] 中华人民共和国环境保护部. 2014 年中国环境状况公报 [R/OL]. [2016-10-18]. http://www.mep.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526564730573906.pdf.

[11] Lee M, Koutrakis P, Coull B, et al. Acute effect of fine particulate matter on mortality in three Southeastern states from 2007-2011 [J]. J Expo Sci Epidemiol, 2016, 26 (2): 173-179.

[12] Atkinson R W, Kang S, Anderson H R, et al. Epidemiological time series studies of $PM_{2.5}$ and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis [J]. Thorax, 2014, 69 (7): 660-665.

[13] 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.

[14] 董凤鸣, 莫运政, 李国星, 等. 大气颗粒物 (PM_{10}/$PM_{2.5}$) 与人群循环系统疾病死亡关系的病例交叉研究 [J]. 北京大学学报 (医学版), 2013, 45 (3): 398-404.

[15] Dai J, Chen R, Meng X, et al. Ambient air pollution, temperature and out-of-hospital coronary deaths in Shanghai, China [J]. Environ Pollut, 2015, 203: 116-121.

[16] Madaniyazi L, Guo Y, Chen R, et al. Predicting exposure-response associations of ambient particulate matter with mortality in 73 Chinese cities [J]. Environ Pollut, 2016, 208: 40-47.

[17] Apte J S, Marshall J D, Cohen A J, et al. Addressing global mortality from ambient PM2.5 [J]. Environ Sci Technol, 2015, 49 (13): 8057-8066.

[18] Kan H, London S J, Chen G, et al. Season, sex, age, and education as modifiers of the effects of outdoor air pollution on daily mortality in Shanghai, China: the public health and air pollution in Asia (PAPA) study [J]. Environ Health Perspect, 2008, 116 (9): 1183-1188.

[19] Xie W, Li G, Zhao D, et al. Relationship between fine particulate air pollution and ischaemic heart disease morbidity and mortality [J]. Heart, 2015, 101 (4): 257-263.

[20] 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.

[21] Neuberger M, Moshammer H, Rabczenko D. Acute and subacute effects of urban air pollution on cardiopulmonary emergencies and mortality: time series studies in Austrian cities [J]. Int J Environ Res Public Health, 2013, 10 (10): 4728-4751.

[22] Rodopoulou S, Samoli E, Chalbot M C, et al. Air pollution and cardiovascular and respiratory emergency visits in Central Arkansas: a time-series analysis [J]. Sci Total Environ, 2015, 536: 872-879.

(**收稿日期**: 2016-06-08; **录用日期**: 2016-11-10)

(英文编辑: 汪源; 编辑: 洪琪; 校对: 陈姣)