· 调查报告与分析 ·

成都不同温度范围 PM_{10} 对老年人累积滞后死亡影响*

张克兴[1], 王强[1], 许宁[1], 吕锡芳[1], 张丽[2], 陈剑宇[2], 高绪芳[3]

【摘 要】**目的** 研究不同温度范围 PM_{10} 对成都市 ≥65 岁老年人过早死亡累积滞后效应的影响。**方法** 利用四分位间距对气温进行分层, 运用分布滞后非线性 Quasipoisson 回归模型, 分层分析 2013 — 2016 年不同温度范围 PM_{10} 对成都老年人过早死亡的累积滞后效应及其对死亡影响的持续作用时间。**结果** 调整温度后, PM_{10} 的短期波动对成都老年人过早死亡的影响向后延迟 2 ~ 5 d, 其累积滞后死亡影响持续 3 ~ 5 d, PM_{10} 每增加 10μg/m³ 可使老年人非意外全死因死亡累积滞后效应增加 0.2%(95 % *CI* = 0.0 % ~ 0.3 %)。在高温和中等温度范围 PM_{10} 对老年人的过早死亡存在显著的累积滞后影响, 但在低温范围 PM_{10} 对老年人的过早死亡影响无统计学意义($P > 0.05$); 在高温范围 PM_{10} 每增加 10μg/m³ 全死因(非意外)和心血管病累积滞后死亡风险分别增加 3.5 %(95 % *CI* = 0.1 % ~ 7.0 %)和 3.3 %(95 % *CI* = 0.2 % ~ 6.4 %); 在中温范围 PM_{10} 每增加 10μg/m³ 全死因(非意外)、心血管病和癌症累积滞后死亡风险分别增加 0.3 %(95 % *CI* = 0.1 % ~ 0.5 %)、0.3 %(95% *CI* = 0.1 % ~ 0.6 %)和 0.5 %(95% *CI* = 0.2 % ~ 0.9 %); 所有温度范围 PM_{10} 对呼吸疾病死亡的滞后累积效应均无统计学意义($P > 0.05$)。**结论** 成都 PM_{10} 对老年人过早死亡影响存在显著的温度差异。

【关键词】 PM_{10}; 温度; 分布滞后非线性模型; Quasipoisson; 累积滞后效应

中图分类号:R 195.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0580(2018)02-0268-05 **DOI:**10.11847/zgggws1116894

Short-term cumulative lag impacts of PM_{10} exposure on mortality at various air temperature among residents aged 65 years and over in Chengdu city

ZHANG Ke-xing*, WANG Qiang, XU Ning, et al (**National Institute of Environmental Health*, *Chinese Center for Disease Control and Prevention*, *Beijing* 100050, China)

【**Abstract**】 **Objective** To explore the difference in cumulative lag impacts of particulate matter less than 10 μm in aerodynamic diameter (PM_{10}) exposure on daily mortality in relation to various air temperature among residents aged 65 years and over in Chengdu city. **Methods** The scales of air temperature were defined by interquartile range (*IQR*) of annual mean temperature during 2013 – 2016. We estimated cumulative lag impacts of PM_{10} on mortality and the duration of the cumulative lag impacts with distributed lag nonlinear quasipoisson regression model by temperature scale stratum. **Results** After controlling for daily mean temperature, a significant cumulative lag impact of PM_{10} (excess mortality risk [*ER*] = 0.2 %, 95 % confidence interval [95 % *CI*]: 0.0 % – 0.3 %) for a 10 μg/m³ increase on non-accidental mortality was observed. The lag impacts were postponed two to five days and the lag impacts lasted for three to five days. Stratified by *IQR* of temperature, the associations between PM_{10} and cumulative lag impacts of PM_{10} on the mortality were quite different in different temperature ranges. The impacts were significant at high and medium temperature ranges. However, significant impacts were not observed at low temperature range. As for high temperature range, significant cumulative lag impacts of PM_{10} (for a 10 μg/m³ increase) on non-accidental mortality (*ER* = 3.5 %, 95 % *CI*: 0.1 % – 7.0 %) and cardiovascular mortality (*ER* = 3.3 %, 95 % *CI*: 0.2 % – 6.4 %) were observed. As for medium temperature range, significant cumulative lag impacts of PM_{10} (for a 10 μg/m³ increase) on non-accidental mortality (*ER* = 0.3 %, 95 % *CI*: 0.1 % – 0.5 %), cardiovascular mortality (*ER* = 0.3%, 95 % *CI*: 0.1 % – 0.6 %), and cancer mortality (*ER* = 0.5%, 95 % *CI*: 0.2 % – 0.9%) were observed. No significant cumulative lag impacts of PM_{10} (for a 10 μg/m³ increase) on respiratory mortality were observed on whole temperature range. **Conclusion** Cumulative lag impacts of PM_{10} on mortality of residents aged 65 years and over in Chengdu city are influenced significantly by ambient air temperature.

【**Key words**】 particulate matter less than 10 μm in aerodynamic diameter; temperature; distributed lag nonlinear model; quasipoisson; cumulative lag impact

研究显示, particulate matter less than 10 μm in aerodynamic diameter (PM_{10})对人群过早死亡可能存在弱的滞后效应[1 – 2], 但不同地区因 PM_{10} 成分、浓度和构成差异[3], PM_{10} 急性死亡影响研究结果不一致。近年研究显示, 温度尤其是极端天气对急性死亡影响更显著, 甚至有研究认为气温变化才是导致

* **基金项目:**环保公益科研专项(201509063)
作者单位:1. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100050; 2. 四川省疾病预防控制中心; 3. 成都市疾病预防控制中心
作者简介:张克兴(1991 –), 男, 安徽六安人, 硕士在读, 研究方向: 公共卫生。
通信作者:王强, E-mail: wangqiang@nieh.chinacdc.cn; 许宁, E-mail: xn@nieh.chinacdc.cn
数字出版日期: 2018 - 02 - 12 16:33
数字出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1234.R.20180212.1633.030.html

死亡的真正原因，颗粒物可能对人群死亡并无显著影响[4]。温度是分析 PM_{10} 急性死亡影响常用的预测因子，但一般研究关注的重点是在回归模型中调整温度等变量后观察 PM_{10} 的过早死亡风险，目前专门研究 PM_{10} 急性死亡影响温度差异的文献较少[5－7]。为观察雾霾期间 PM_{10} 是否对人群急性死亡产生显著影响，本研究以 2013 — 2016 年成都市 ≥ 65 岁以上老年人（高危死亡人群）为研究对象，采用分布滞后非线性模型[8－9]（distributed lag nonlinear model, DLNM），分析雾霾典型城市成都[10]PM_{10} 短期波动在不同温度范围条件下对老年人死亡风险的差异，从而为雾霾污染防治提供基础科研数据。

1 资料与方法

1.1 资料来源　成都市 ≥ 65 岁老年人死亡统计数据来自四川省疾病预防控制中心 2013 年 1 月 1 日 — 2016 年 12 月 31 日居民死因登记数据，同期 PM_{10} 监测数据及气温等气象监测数据分别来源于成都市环境监测中心和成都市气象监测站。

1.2 方法

1.2.1 数据清理方法　本研究使用 R 软件（R3.4.1 版本）对数据进行整理。以“名字”“身份证号码”“性别”“出生日期”和“年龄”为关键词，查找并删除重复补报死亡案例，校对死因编码（International Classification of Diseases and Related Health Problems, Tenth Revision, ICD-10[11]）准确性，并将死亡原因分为非意外死亡、呼吸系统疾病、心血管疾病和癌症四类；PM_{10} 以成都市国家监测点日均 PM_{10} 几何均值代表成都地区 PM_{10} 的平均水平，并以成都全市范围气温、气湿代表成都地区的平均温湿度水平。

1.2.2 建模方法　因死亡数据存在过度离势，本研究采用 DLNM Quasipoisson 分布回归模型拟合 PM_{10} 暴露–反应关系和暴露–滞后效应[12–13]，将成都市日平均 PM_{10} 浓度和日平均温度以交叉基的形式纳入模型，以 quasi-AKaike Information Criterion（QAIC）准则选择模型的自由度，同时控制湿度、气压、长期趋势、星期几效应、节假日效应等混杂因素，探讨 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后效应。

$$Log[E(Y_t)] = \alpha + cb(PM) + cb(Temp) + ns(Time, df = 7\times4) + ns(RH, df = 3) + ns(P, df = 3) + Dow + Holiday \quad (1)$$

式中：*Yt* 为第 t 日死亡人数；*α* 为常数项；*cb* 为交叉基函数；*PM* 为第 t 日 PM_{10} 的日平均浓度，PM_{10} 基函数选择线性函数，PM_{10} 滞后项的基函数选择多项式函数；*Temp* 表示第 t 日的日平均温度，温度及其滞后项的基函数均选择自然立方样条函数；*ns* 代表自然立方样条函数；*df* 代表自由度；*Time* 表示长期趋势，自由度为 7/年，共 4 年；*RH* 为日均相对湿度，自由度为 3；*P* 为日均气压，自由度为 3；*Dow* 代表星期几效应；*Holiday* 为节假日效应。

1.2.3 参数选择方法　根据以往研究[14]，选择湿度和气压的自由度为 3；温度的交叉基中，选择温度及其滞后项的自由度为 5 和 4。根据本研究数据特征，调整 PM_{10} 的最大滞后天数为 7 ~ 30 d，并根据 QAIC 最小原则，选择最大滞后天数为 15；调整时间趋势的自由度为 5 ~ 9，并根据 QAIC 最小原则，自由度选择 7/年。

1.2.4 气温分层方法　本研究以 P_{25} 和 P_{75} 为百分位节点将日均气温分为低温[－ 1.9℃，10.1℃）、中温[10.1℃，23.0℃）和高温[23.0℃，29.8℃]3 层。

1.3 统计分析　采用 R 软件（R3.4.1 版本）进行数据的统计分析，采用广义线性模型和分布滞后模型，进行不同温度分层，探究不同温度条件下，PM_{10} 对老年人群死亡的影响。效应指标为相对危险度（*RR*），按照双侧检验 $P < 0.05$ 确定差异有统计学意义。

2 结　果

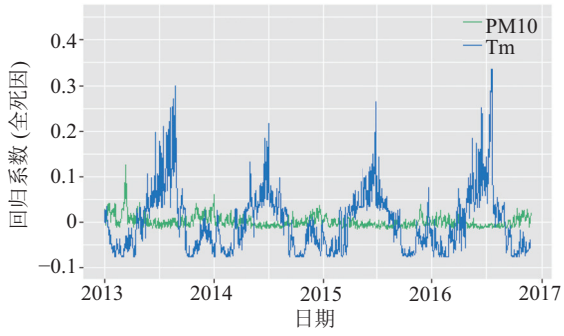
2.1 PM_{10} 和日均气温对老年人过早死亡趋势影响

2.1.1 2013 — 2016 年成都空气质量、气象条件及人群死亡情况（表 1）　2013 — 2016 年成都市 PM_{10} 日均浓度均值为 115 μg/m³，其中共有 355 d（24 %）PM_{10} 浓度超过国家二级标准（150 μg/m³），最高达 861 μg/m³；同期成都市日均气温为 16.8 ℃，其中低于 0 ℃ 的天数为 94 d，超过 30℃ 高温天数为 263 d。2013 — 2016 年成都日均 PM_{10} 浓度、气温及死亡人数详见表 1。

表 1 成都市 2013—2016 年日均 PM_{10} 浓度、气温及死亡人数

统计指标	$\bar{x} \pm s$	P_0	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{100}
PM_{10}（μg/m³）	115±76	14	63	93	147	861
气温（℃）	16.8±7.3	–1.9	10.1	17.9	23.0	29.8
气压（kPa）	951±7	933	945	950	957	977
相对湿度（%）	79±9	40	74	80	86	98
非意外死亡（人）	120±26	65	100	115	136	217
呼吸疾病死亡（人）	36±12	11	28	33	43	87
心血管病死亡（人）	40±11	15	32	38	46	88
癌症死亡（人）	26±6	10	22	26	30	47

2.1.2 日均 PM_{10} 和气温对老年人过早死亡影响时间趋势分析（图 1）　调整时间趋势、星期几效应、节假日效应、相对湿度和平均气压，经广义线性模型拟合，PM_{10} 每增加 1μg/m³，过早死亡风险增加 0.017 %（95 % *CI* = 0.009 % ~ 0.025 %）；日均 PM_{10} 和日均气温对成都市 ≥ 65 岁老人的过早死亡影响具有时间和季节趋势，春秋季 PM_{10} 和日均气温对过早死亡影响趋势相反，而在夏季高温时期，PM_{10} 和日均气温对过早死亡影响趋势一致。



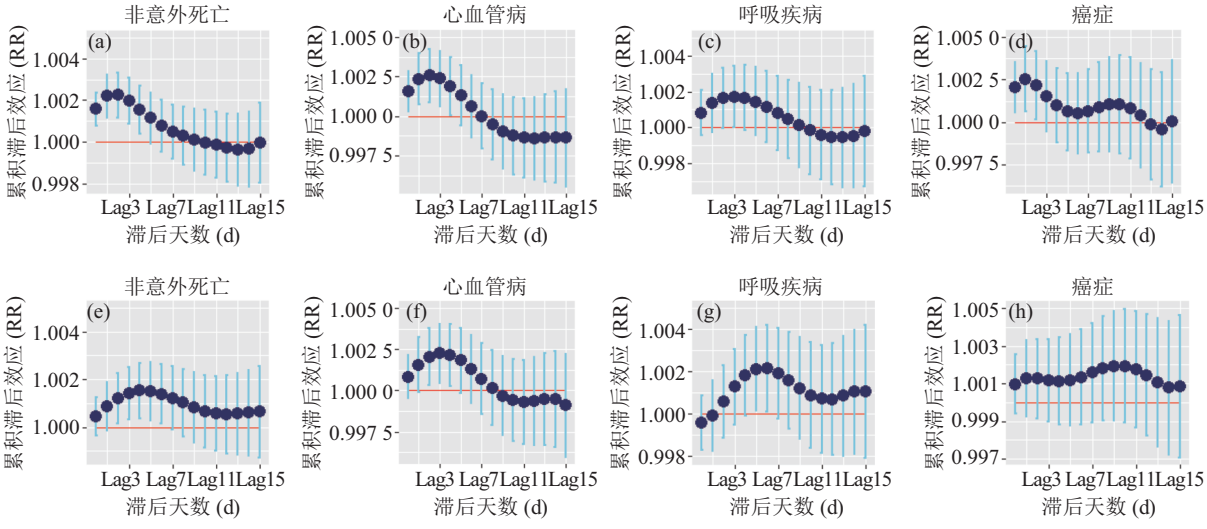
注：图中 Tm 代表日均温度对老年人死亡影响的回归系数；PM10 代表日均 PM_{10} 对老年人群死亡影响的回归系数。

图 1　日均 PM_{10} 和气温对老年人过早死亡影响的时间趋势

2.2　温度调整前后 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后效应

2.2.1　温度调整前 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后效应（图 2）　在 DLNM 中调整时间趋势、星期几效应、节假日效应、相对湿度和平均气压，结果显示，PM_{10} 的短期波动对过早死亡的影响可持续 3 ~ 5 d，PM_{10} 每增加 10 μg/m³ 可使老年人的累积滞后死亡风险增加 0.15 % ~ 0.26 %，其中全死因（不含意外死亡）累积滞后死亡风险可持续 5 d，并于滞后 2 d 时累积死亡风险最大（RR = 1.002，95 % CI = 1.001 ~ 1.003）；心血管病累积滞后死亡风险可持续 5 d，并于滞后 2 d 时累积死亡风险最大（RR = 1.003，95% CI = 1.001 ~ 1.004）；癌症累积滞后死亡风险持续 3 d，并于滞后 1 d 时累积死亡风险最大（RR = 1.003，95 % CI = 1.001 ~ 1.004）；但呼吸疾病的滞后累积效应无统计学意义（P > 0.05）。

2.2.2　温度调整后 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后效应（图 2）　调整时间趋势、星期几效应、节假日效应、相对湿度和平均气压，并将日均温度和 PM_{10} 同时带入模型。结果显示，同时调整温度后，PM_{10} 每增加 10 μg/m³，PM_{10} 对老年人的累积滞后效应延迟，其中全死因（不含意外死亡）累积滞后死亡影响延迟 2 d，持续作用 5 d，并于滞后 4 d 时其累积死亡风险最大（RR = 1.002，95 % CI = 1.000 ~ 1.003）；心血管病累积滞后死亡影响也延迟 2 d，持续作用 3 d，并于滞后 3 d 时其累积死亡风险最大（RR = 1.002，95 % CI = 1.001 ~ 1.004）；呼吸系统疾病累积滞后死亡影响延迟 5 d，持续作用 2 d，并于滞后 6 d 时其累积死亡风险最大（RR = 1.002，95 % CI = 1.000 ~ 1.004）；但癌症的累积滞后死亡风险无统计学意义（P > 0.05）。



注：图中累积滞后效应（RR）为累积滞后死亡风险的相对危险度及其 95 % 置信区间；Lag 为滞后天数；a ~ d 为调整温度前 PM_{10} 对非意外全死因、心血管病、呼吸疾病和癌症死亡的累积滞后风险，e ~ h 为调整温度后 PM_{10} 对非意外全死因、心血管病、呼吸疾病和癌症死亡的累积滞后风险。

图 2　调整日均气温前后 PM_{10} 对老年人过早死亡影响累积滞后效应

2.3　不同温度范围 PM_{10} 对老年人过早死亡累积滞后效应（表 2）

按四分位数对温度分层，调整时间趋势、星期几效应、节假日效应、温度、相对湿度和日均气压，结果显示，低温[– 1.9 ℃,10.1 ℃）时 PM_{10} 对老年人的过早死亡滞后累积影响无统计学意义（P > 0.05）；在中等温度[10.1 ℃, 23.0 ℃）时，PM_{10} 每增加 10 μg/m³，PM_{10} 对老年人的全死因（不含意外死亡）累积滞后死亡风险可持续 4 d，并于滞后 1 d 时累积死亡风险最大（RR = 1.003，95 % CI = 1.001 ~ 1.005）；心血管病累积滞后死亡风险可持续 3 d，并于滞后 1 d 时累积死亡风险最大（RR = 1.003，95 % CI = 1.001 ~ 1.006）；癌症累积滞后死亡风险持续 4 d，并于滞后 1 d 时累积死亡风险最大（RR = 1.005，95 % CI = 1.002 ~ 1.009）；呼吸系统疾病患者的滞后累积效应无统计学意义（P > 0.05）。在高温（23.0 ℃，29.8 ℃]时，PM_{10} 每增加 10 μg/m³，全死因（不含意外死亡）累积滞后死亡风险可持续 10 d，滞后 9 d 时累积死亡风险 RR 值为 1.035（95 % CI = 1.001 ~ 1.070）；心

血管病累积滞后死亡风险可持续 9 d，滞后 8 d 时累积死亡风险 *RR* 值为 1.033（95 % *CI* = 1.002 ~ 1.064）；但高温范围 PM_{10} 对呼吸系统和癌症未见显著的累积滞后死亡效应（$P > 0.05$）。

表 2　不同温度范围日均 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后效应

滞后	非意外死亡		心血管病		呼吸疾病		癌症	
	RR 值	95 % *CI*	*RR* 值	95 % *CI*	*RR* 值	95 % *CI*	*RR* 值	95 % *CI*
高温[23.0 ℃,29.8 ℃]								
Lag0	1.009	1.003 ~ 1.015	1.006	1.000 ~ 1.013	0.999	0.992 ~ 1.006	1.005	0.998 ~ 1.013
Lag0 ~ 1	1.016	1.007 ~ 1.026	1.012	1.002 ~ 1.022	1.001	0.990 ~ 1.012	1.008	0.996 ~ 1.020
Lag0 ~ 2	1.022	1.010 ~ 1.030	1.017	1.004 ~ 1.030	1.005	0.991 ~ 1.018	1.009	0.995 ~ 1.024
Lag0 ~ 8	1.034	1.004 ~ 1.066	1.033	1.002 ~ 1.064	1.014	0.981 ~ 1.048	1.011	0.975 ~ 1.047
Lag0 ~ 9	1.035	1.001 ~ 1.070	1.034	0.999 ~ 1.069	1.015	0.978 ~ 1.053	1.011	0.973 ~ 1.052
Lag0 ~ 15	1.042	0.995 ~ 1.092	1.044	0.997 ~ 1.094	1.021	0.971 ~ 1.074	1.023	0.968 ~ 1.080
中温[10.1 ℃,23.0 ℃）								
Lag0	1.002	1.001 ~ 1.003	1.002	1.001 ~ 1.004	1.001	0.999 ~ 1.003	1.004	1.002 ~ 1.006
Lag0 ~ 1	1.003	1.001 ~ 1.005	1.003	1.001 ~ 1.006	1.001	0.998 ~ 1.004	1.005	1.002 ~ 1.009
Lag0 ~ 2	1.003	1.001 ~ 1.005	1.003	1.000 ~ 1.006	1.001	0.997 ~ 1.004	1.005	1.002 ~ 1.009
Lag0 ~ 3	1.002	1.000 ~ 1.004	1.003	1.000 ~ 1.006	1.000	0.997 ~ 1.004	1.004	1.001 ~ 1.008
Lag0 ~ 7	1.000	0.997 ~ 1.002	1.000	0.996 ~ 1.004	0.998	0.994 ~ 1.003	1.003	0.998 ~ 1.008
Lag0 ~ 15	1.000	0.996 ~ 1.004	0.999	0.993 ~ 1.006	0.996	0.989 ~ 1.003	1.003	0.996 ~ 1.011
低温[1.9 ℃,10.1 ℃）								
Lag0	0.999	0.997 ~ 1.001	0.999	0.996 ~ 1.002	1.000	0.998 ~ 1.003	0.997	0.993 ~ 1.000
Lag0 ~ 7	0.994	0.987 ~ 1.001	1.001	0.990 ~ 1.012	0.995	0.985 ~ 1.005	0.987	0.973 ~ 1.001
Lag0 ~ 15	0.991	0.979 ~ 1.003	1.004	0.985 ~ 1.023	0.993	0.975 ~ 1.011	0.978	0.954 ~ 1.002

注：累积滞后效应为累积滞后死亡风险的相对危险度及其 95 % 置信区间；　Lag 为滞后天数，　Lag0 表示当天的死亡风险，　Lag0 ~ n 表示滞后累积到第 n 天的死亡风险。

3 讨　论

相关研究显示，当温度适宜时，日均气温与人群过早死亡负相关，由于日均气温与过早死亡的关联为强关联（$RR > 3.0$）[15]，因此舒适的温度可能对 PM_{10} 的滞后死亡影响（弱效应）有一定的缓冲。为了观察雾霾典型区域 PM_{10} 对死亡的急性影响是否完全被温度效应修饰，本研究利用 DLNM 分析了 PM_{10} 在不同的温度范围对成都市 ≥ 65 岁老年人过早死亡的累积滞后效应。

本研究结果显示，日均气温对 PM_{10} 的累积滞后死亡影响有显著的修饰作用，当温度与死亡负相关时（$\beta < 0$），可能因气温的保护作用强于 PM_{10} 的滞后效应，在此温度范围本研究未观察到 PM_{10} 对老年人过早死亡存在显著的累积滞后影响；而当温度与死亡正相关时（$\beta > 0$），因温度的修饰作用 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后效应较小，虽然其效应较弱（$RR < 1.10$），但其效应可能与温度的死亡影响叠加。即虽然 PM_{10} 每增加 10 μg/m^3，老年人的累积过早死亡风险（*RR*）仅为 1.003 ~ 1.035，但不应因其为弱效应而不重视 PM_{10} 的防控，因为这一弱效应可能是基于同期温度的累积效应而产生的协同死亡影响。

有研究显示，冬季颗粒物对人群死亡的急性影响多高于夏季[16 – 18]，但本研究却发现随着气温升高 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后影响增强。Pascal M 研究法国 9 个城市颗粒物急性死亡影响时也曾发现，夏季及高温热浪时期 PM_{10} 的急性死亡影响高于 PM_{10} 在低温天气对死亡的影响[19]。其原因可能在于成都冬季没有极寒天气，其冬季温度对死亡的影响不突出；随着温度升高，老年人外出活动时间增多，PM_{10} 暴露机会也相对增多，此外虽然成都夏季 PM_{10} 浓度相对较低[20]，但因相对湿度大和特殊的盆地地形，空气易静稳并使得 PM_{10} 等污染物无法快速消散[21]，PM_{10} 对居民持续累积作用时间相对延长，再加上高温使血管扩张及呼吸加快，人群暴露量相对增加，因此成都夏季的 PM_{10} 对老年人的累积滞后死亡影响更为突出。

本研究结果还显示，调整日均气温后 PM_{10} 对死亡的累积影响出现滞后延迟的现象，这种现象在以往研究中较少关注。这种滞后效应延迟的现象是否为温度与 PM_{10} 对急性死亡协同影响的一般特征还有待进一步研究；但此现象提示，雾霾健康影响的预警可能需要结合未来几天的温度变化预测累积滞后死亡风险。PM_{10} 对死亡影响一般以心血

管病和呼吸疾病影响为主，但本研究却发现调整温度或对温度分层后，PM_{10} 对全死因（非意外）死亡的累积滞后影响持续时间最长，其可能原因为我们的观察对象为 ≥ 65 岁老年人，而老年人中癌症等免疫力低者居多，虽然 PM_{10} 不一定对免疫低下患者过早死亡产生直接影响，但 PM_{10} 可能会通过激发呼吸道的炎症而增加老年人的死亡风险[22]。

综上所述，本研究结果提示 PM_{10} 对老年人过早死亡的累积滞后影响不可忽略，尤其在高温天气时应预警 PM_{10} 对老年人的滞后死亡风险。

志谢 感谢环保部华南科学研究所、四川省疾病预防控制中心环境与学校卫生消毒所、成都市疾病预防控制中心和成都市青羊区疾病预防控制中心对本项目研究的支持

参考文献

[1] Shang Y, Sun Z, Cao J, et al. Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality[J]. Environment International, 2013, 54(4): 100 – 111.

[2] Tsai SS, Chang CC, Liou SH, et al. The effects of fine particulate air pollution on daily mortality: a case-crossover study in a subtropical city, Taipei, Taiwan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(5): 5081 – 5093.

[3] 徐甜, 王志远, 张兵, 等. 中国环境保护重点城市空气质量指数时空变化特征[J]. 中国公共卫生, 2016, 32(8): 1027 – 1031.

[4] Cox T, Popken D, Ricci PF. Temperature, not fine particulate matter ($PM_{2.5}$), is causally associated with short-term acute daily mortality rates: results from one hundred united states cities[J]. Dose-Response, 2013, 11(3): 319 – 343.

[5] Wang Y, Kloog I, Coull BA, et al. Estimating causal effects of long-term $PM_{2.5}$ exposure on mortality in New Jersey[J]. Environmental Health Perspectives, 2016, 124(8): 1182 – 1188.

[6] 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.

[7] Xia M, Zhang Y, Zhao Z, et al. Temperature modifies the acute effect of particulate air pollution on mortality in eight Chinese cities[J]. Science of the Total Environment, 2012, 435-436(7): 215 – 221.

[8] Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG, et al. Distributed lag non-linear models[J]. Statistics in Medicine, 2010, 29(21): 2224 – 2234.

[9] Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm[J]. Journal of Statistical Software, 2011, 43(8): 1 – 20.

[10] Qiao X, Jaffe D, Tang Y, et al. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: are China's air quality standards sufficient yet?[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(5): 250.

[11] Allanson E, Tuncalp O, Gardosi J, et al. The WHO application of ICD-10 to deaths during the perinatal period: ICD-PM: results from pilot database testing in South Africa and United Kingdom[J]. British Journal of Obstetrics and Gynaecology, 2016, 123(12): 2019 – 2028.

[12] Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models[J]. Statistics in Medicine, 2014, 33(5): 881 – 899.

[13] Solimini AG, Renzi M. Association between air pollution and emergency room visits for atrial fibrillation[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(6): 661.

[14] Guo Y, Punnasiri K, Tong S, et al. Effects of temperature on mortality in Chiang Mai city, Thailand: a time series study[J]. Environmental Health, 2012, 11(1): 36 – 36.

[15] Guo Y, Barnett AG, Pan X, et al. The impact of temperature on mortality in Tianjin, China: a case-crossover design with a distributed lag nonlinear model[J]. Environmental Health Perspectives, 2011, 119(12): 1719 – 1725.

[16] Chen R, Peng RD, Meng X, et al. Seasonal variation in the acute effect of particulate air pollution on mortality in the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES)[J]. Science of The Total Environment, 2013: 259 – 265.

[17] Tsai S, Chen C, Yang C, et al. Short-term effect of fine particulate air pollution on daily mortality: a case-crossover study in a tropical city, Kaohsiung, Taiwan[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 2014, 77(8): 467 – 477.

[18] Vardoulakis S, Dear K, Hajat S, et al. Comparative assessment of the effects of climate change on heat- and cold-related mortality in the United Kingdom and Australia[J]. Environmental Health Perspectives, 2014, 122(12): 1285 – 1292.

[19] Pascal M, Falq G, Wagner V, et al. Short-term impacts of particulate matter (PM_{10},$PM_{10-2.5}$, $PM_{2.5}$) on mortality in nine French cities[J]. Atmospheric Environment, 2014, 95(1): 175 – 184.

[20] Li Y, Chen Q, Zhao H, et al. Variations in PM_{10}, $PM_{2.5}$ and $PM_{0.1}$ in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors[J]. Atmosphere, 2015, 6(1): 150 – 163.

[21] Wang Y, Zhang X, Sun J Y, et al. Spatial and temporal variations of the concentrations of PM 10, PM 2.5 and PM 1 in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(23): 13585 – 13598.

[22] Guarnieri M, Balmes J R. Outdoor air pollution and asthma[J]. The Lancet, 2014, 383(9928): 1581 – 1592.

收稿日期: 2017 - 11 - 22 （张翠编校）