

沙尘天气颗粒物对呼吸与心血管系统疾病日入院人数的影响

孟紫强, 卢彬, 张剑

摘要: [目的] 研究沙尘天气及沙尘颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})与呼吸、心血管系统疾病日入院人数的关系。[方法] 采用时间序列的半参数广义相加模型(Semi-parametric generalized additive model, GAM), 在控制了长期趋势、星期几效应(day of the week, DOW)以及气象因子等混杂因素的影响后, 分析2004年春季沙尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 及其大气污染物(SO_2 和 NO_2)与呼吸、心血管系统疾病日入院人数的关系, 并将沙尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 按浓度分类探讨不同沙尘天气对人体健康的影响。[结果] ①沙尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在单污染模型中对居民呼吸和心血管系统疾病日入院人数的影响在滞后第2天和第3天有统计学意义。多污染模型分析表明, 引入 SO_2 或(和) NO_2 后, PM_{10} 对呼吸和心血管系统疾病日入院人数的影响有统计学意义, $PM_{2.5}$ 对心血管系统疾病日入院人数的影响有统计学意义。在模型中引入其他污染物后, SO_2 和 NO_2 对呼吸和心血管系统日入院人数的影响均无统计学意义。②颗粒物浓度分类模型分析表明, 沙尘天气 $PM_{2.5}$ 只有达到沙尘暴颗粒物水平($>167.5 \mu g/m^3$)对男性呼吸和心血管系统疾病日入院人数的影响才有意义, 而对女性的影响 $PM_{2.5}$ 在扬沙天气水平($95.4-167.5 \mu g/m^3$)就有意义。沙尘天气 PM_{10} 对男、女性呼吸和心血管系统健康的影响在扬沙天气水平($150-250 \mu g/m^3$)就有意义, 达到沙尘暴水平时, 其影响达到最大。[结论] ①在几乎没有工业污染的沙尘发生源区或近源区, 其沙尘 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 只有达到较高浓度(扬沙天气水平)时, 才会对居民呼吸和心血管系统疾病日入院人数有影响, 且为滞后效应, 并呈一定剂量效应关系, 即: 沙尘暴天>扬沙天>沙尘轻度污染天、清洁天; ②本研究根据大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 水平划分沙尘天气类型, 比以能见度划分更为科学且更易操作, 同时也为我国制定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 大气标准提出了科学依据。

关键词: PM_{10} ; $PM_{2.5}$; 呼吸系统; 心血管系统; 日入院人数; 沙尘暴; 扬沙; 浮尘; GAM 模型

Association of Particulate Matter Derived from Dust Events with Daily Respiratory and Cardiovascular Hospitalization MENG Zi-qiang, LU Bin, ZHANG Jian (Research Center of Environmental Science and Engineering, Institute of Environmental Medicine and Toxicology, Shanxi University, Shanxi, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] To explore the association of particulate matter ($PM_{2.5}/PM_{10}$) derived from spring-dust events with daily respiratory and cardiovascular hospitalization. [Methods] Using a semi-parametric generalized additive model and controlling for long-term temporal trends, day of the week and meteorological factors, counts of hospitalization for respiratory and cardiovascular disease were analyzed for $PM_{2.5}$, PM_{10} and gaseous pollutants (SO_2 and NO_2) in a Poisson regression. Then, Categorical model of particulate matter were processed to explore the health effect of particulate matter at different dust events levels. [Results] 1) PM_{10} and $PM_{2.5}$ derived from the dust events with lag of 2 days and 3 days were significantly associated with respiratory and cardiovascular hospitalization in simple-pollutant model. The multi-pollutants model showed that after adjusted the effect of SO_2 and/or NO_2 , PM_{10} was significantly associated with respiratory and cardiovascular disease hospitalization and $PM_{2.5}$ was significantly associated with cardiovascular diseases, while the effects of $PM_{2.5}$ on respiratory diseases became weaker. There were non-significantly association between SO_2 and NO_2 and respiratory and cardiovascular disease in multi-pollutants model. 2) $PM_{2.5}$ at the dust storm levels ($>167.5 \mu g/m^3$) had significant association with the male respiratory and cardiovascular disease hospitalization and PM_{10} at the blowing dust levels ($95.4-167.5 \mu g/m^3$) had a significant association with the females. PM_{10} at the blowing dust levels ($150-250 \mu g/m^3$) had the significant associations with the respiratory and cardiovascular hospitalization in males and females. In addition, stronger health damage effects of particulate matters at the dust storm level were found. [Conclusion] 1) Only at higher concentrations (blowing dust levels), the particulate matters derived from the source region and nearby of dust events, where there were not almost any industrial pollutant, had the increased lag-effects on respiratory and cardiovascular hospitalization in a dose-related manner: dust storm > blowing dust > low-dust pollution days and normal clear days. 2) In this paper, the categories of dust events were divided according to the levels of airborne PM_{10} and $PM_{2.5}$. This setting was more scientific and easily operated; meanwhile, it provided new scientific evidence to set down the environmental quality standard of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the atmosphere.

Key Words: PM_{10} ; $PM_{2.5}$; respiratory system; cardiovascular system; daily hospitalization; dust storm; blowing dust; floating dust; semi-parametric generalized additive model

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 30230310); 山西省自然科学基金项目(编号: 20031092)

作者简介: 孟紫强(1939-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 环境医学与毒理学, E-mail: zqmeng@sxu.edu.cn

作者单位: 山西大学环境科学与工程研究中心, 山西大学环境医学与毒理学研究所, 山西 太原 030006

沙尘天气,特别是亚洲沙尘暴(Asian dust storms, ADS)由于发生频繁,近年来受到了越来越多的关注。ADS又名Kosa或黄沙暴,主要起源于亚洲蒙古国南部沙漠地区和我国北部干旱半干旱地区,影响区域主要包括我国东北地区和东南黄淮海平原及长江中下游地区、我国台湾及韩国和日本,甚至波及北美洲、北冰洋等。ADS期间,大气中总悬浮颗粒物(TSP)、颗粒物(PM_{10} , 动力学直径 $\leq 10 \mu m$)和细颗粒物($PM_{2.5}$, 动力学直径 $\leq 2.5 \mu m$)浓度较非沙尘天气均显著升高。尽管有文献报道了远离源区,经过长距离输送的ADS颗粒物对台北和首尔的人群死亡率和患病率的影响^[1,2],但ADS及其颗粒物对其发生源区附近居民的健康影响尚未见报道。本项目拟选择处于ADS源区附近的武威市进行居民呼吸和心血管系统疾病流行病学研究,探讨沙尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 以及气态污染物(SO_2 和 NO_2)与居民呼吸和心血管系统疾病日入院人数的关系。

1 对象与方法

1.1 地点选择

武威市地处西北地区ADS源区——甘肃省河西走廊的东端,海拔1020~4874m,属典型的大陆型气候,年均气温7.8℃,降水量60~610mm,蒸发量1400~3100mm,气候干旱。该市主要以农业为主,交通和工业污染很小,但沙尘天气频繁,每年的3~5月份为沙尘天气高发季节,沙尘天气则是造成该区域春季空气重度污染的主要原因。因此,本研究分析2004年春季(3月1日至5月31日)武威市沙尘颗粒物与人体健康的关系。

1.2 研究对象

研究期间呼吸、心血管系统疾病日入院病例资料来自武威市人民医院等7所大中型医院。呼吸、心血管系统疾病的统计根据国际疾病分类标准第10版(ICD-10),呼吸系统疾病编码为J00-J99,心血管系统疾病编码为I00-I55。研究期间逐日地面气象资料(如日均气压、日最低气温、日相对湿度、日最大风速等)来自武威市气象局,逐日大气污染物检测数据(PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2)来自武威市环境监测站。同时本研究采用 $PM_{2.5}$ 大流量大气采样器(Thermo Andersen)24h连续现场采样,并计算 $PM_{2.5}$ 日平均浓度。

1.3 统计方法

本研究采用半参数广义相加模型(GAM)^[3]来分析沙尘颗粒物和气态污染物对呼吸、心血管系统疾病日入院人数的影

响。日入院人数对于居民总体来说是小概率事件,其统计学分布近似于泊松分布,因此本研究采用泊松回归。在引入DOW排除星期几效应,用样条平滑函数(spline smoothing function)排除长期趋势、气象等混杂因素影响的基础上,将逐日 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 浓度作为线性变量引入模型。具体模型如下:

$$\log[E(Y_k)] = \alpha + DOW + \beta X_k + s(\text{time}) + s(Z_k),$$

式中: $E(Y_k)$ 为响应变量,在 k 日的呼吸或心血管系统疾病日入院人数预期值; α 为截距; DOW 表示每周天数(day of the week); βX_k 为GAM模型中的参数部分; β 为回归系数; βX_k 为在 k 日大气污染物浓度,包括 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 日平均浓度; s 为非参数样条平滑函数; time 指日期; Z_k 为在 k 日的气象因素变量,包括日最低气温、日均气压、日均相对湿度、日最大风速。

在模型建立的过程中,本研究考虑了污染物对不同性别人群健康影响的滞后效应。同时,在进行单污染模型分析的基础上也考虑了对各种污染物进行调整的多污染模型,由此确定分析研究期间主要影响呼吸和心血管系统健康的危险因子。此外,结合研究期间大气颗粒物主要来自于沙尘天气的特点,本研究根据空气质量标准以及当地发生沙尘天气时颗粒物浓度的平均水平,分别将 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分为4个浓度水平,将它们作为变量重新引入GAM模型拟合,由此可以确定不同天气水平的颗粒物对人群呼吸、心血管系统健康效应大小,在一定程度上反映出不同沙尘天气的健康危害。

本研究采用Akaike信息标准(AIC)进行模型拟合优度检验^[4],并采用S-Plus 6.2软件进行统计处理。

2 结果

2.1 气象因素、污染因子及日入院资料描述性分析

2.1.1 气象因素、污染因子的分布状况 表1为武威市大气压、最低气温、相对湿度、最大风速、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_2 浓度的频数分布。可见研究期间 $PM_{2.5}$ 日均值高于美国EPA的空气质量标准($\leq 65 \mu g/m^3$),而 PM_{10} 尽管没有超过国家空气质量二级标准($\leq 150 \mu g/m^3$),其日均值也较高。 SO_2 、 NO_2 的日均浓度均低于国家空气质量二级标准。表2为研究期间武威市 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_2 在沙尘和非沙尘天气下的对比分析。可见在发生扬沙和沙尘暴时 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度显著增加,且均超过国家空气质量二级标准,而浮尘、扬沙和沙尘暴天气下 SO_2 和 NO_2 浓度变化均不大且均远远低于国家空气质量二级标准。

表1 2004年春季武威市气象因素和大气污染物浓度的分布
Table 1 Description for meteorological factors and airborne pollutants in spring 2004, Wuwei

变量 Variables	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值 Maximum	天数 days	四分位间距 Interquartile Range (IQR)
大气压 Atmosphere Pressure (hPa)	845.59	4.80	834.30	842.03	845.35	848.58	856.30	92	6.55
最低气温 Minimum temperature (℃)	4.62	5.89	-11.40	-0.03	4.60	9.78	14.80	92	9.81
相对湿度 Relative humidity (%)	33.82	13.44	14.00	25.00	29.50	38.75	84.00	92	13.75
最大风速 Maximum wind speed (0.1 m/s)	16.86	21.03	0.00	6.70	12.80	23.20	191.00	91	16.50
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	120.79	66.13	39.00	71.25	95.50	149.50	294.00	92	78.25
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	84.67	35.67	38.80	60.53	72.33	99.02	192.80	90	38.49
SO_2 ($\mu g/m^3$)	30.73	17.92	8.00	15.75	28.00	41.38	104.00	86	25.63
NO_2 ($\mu g/m^3$)	12.75	4.74	3.52	9.61	12.72	16.73	26.28	87	7.12

结果表明在沙尘暴源区春季主要的大气污染物为沙尘颗粒物, 而 SO_2 、 NO_2 等气态污染物对大气污染的贡献不大。

表 2 2004 年春季武威市大气颗粒物与气态污染物在沙尘和非沙尘天气下的日均值对比分析

Table 2 Comparison for daily average of airborne particulate matter and gaseous pollutants on dust event days and non-dust event days in spring 2004, Wuwei

项目 Items	天数 days(d)	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	SO_2 ($\mu g/m^3$)	NO_2 ($\mu g/m^3$)
空气质量二级标准 Air quality secondary standards	150	65	150	120	
非沙尘天气 Non-dust event days	77	108±59	73±22	33.0±19.8	12.8±4.8
浮尘天气 Floating dusts	2	140±93	107±7	35.9±5.8	14.5±6.0
扬沙天气 Blowing dusts	11	205±41**	131±36**	47.5±20.5	11.5±4.6
沙尘暴天气 Dust storms	2	285±49**	170±16**	50.6±14.7	15.9±0.1

[注] 空气质量二级标准遵循国家环境空气质量标准(NAAQS), 因 $PM_{2.5}$ 浓度标准我国尚未制定, 该值借用美国环保局(EPA)1997 年颁布的日均值标准

*: 采用 t 检验, 与非沙尘天气相比, $P < 0.05$, **: $P < 0.01$

[Note] Air quality secondary standards follow NAAQS. There is no standards for $PM_{2.5}$ in China, the air quality standards of $PM_{2.5}$ follow the standards set down by EPA in 1997

*: Using t test, compared with non-dust event days, $P < 0.05$, **: $P < 0.01$

2.1.2 呼吸、心血管系统疾病日入院人数分布情况 表3为2004年3月1日至5月31日武威市7所医院呼吸与心血管系统疾病日入院人数频数分布。此期间呼吸系统疾病入院患者共计766人次, 男女比例1:0.64。其中肺炎患者最多, 占总呼吸系

统患病人数的40.60%, 其次为上呼吸道感染(URTI, 25.20%)和慢性阻塞性肺部疾病(COPD, 18.15%)。心血管系统疾病入院患者共计409人次, 男女比例1:0.68。其中高血压患者最多, 占总心血管系统患病人数的33.99%, 其次为缺血性心脏疾病(IHD, 30.56%)。

表 3 2004 年春季武威市呼吸、心血管系统疾病入院人数的分布

Table 3 Description of respiratory and cardiovascular hospitalization in spring 2004, Wuwei

变量 Variables	总和 Sum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值 Maximum	天数 Days
呼吸系统疾病(Respiratory)									
男 Males	466	5.07	3.31	0	3.00	5.00	7.00	22	92
女 Females	300	3.26	2.30	0	2.00	3.00	5.00	10	92
心血管系统疾病(Cardiovascular)									
男 Males	243	2.64	2.15	0	1.00	2.00	4.00	13	92
女 Females	166	1.80	1.76	0	0.00	1.00	3.00	8	92

2.2 单污染模型拟合结果

2.2.1 污染物对呼吸系统疾病日入院人数的影响 表4为2004年武威市大气污染物在不同滞后(lag)天数(0~6 d)与呼吸系统疾病日入院人数的相对危险度(RR), 可见各污染物浓度每增加1个IQR, 呼吸系统疾病日入院人数增加的RR变化情况。可以看出, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的增加对男女性日入院人数的影响均表现为滞后效应, 即 PM_{10} (lag3) 和 $PM_{2.5}$ (lag2) 对男性日入院人数的影响有统计学意义; PM_{10} (lag2) 和 $PM_{2.5}$ (lag2) 对女性影响有统计学意义。 SO_2 和 NO_2 对男性的影响无统计学意义, 而对女性的影响只有 SO_2 (lag5) 和 NO_2 (lag3) 有统计学意义。

表 4 2004 年春季污染物对呼吸系统疾病日入院 RR(95%CI) 的影响

Table 4 Single-pollutant model of the association between pollutants and RR(95%CI) of daily respiratory hospitalization in spring 2004

性别 Gender	污染物 Pollutant	滞后天数 (Lag-day)						
		lag0(当天)	lag1	lag2	lag3	lag4	lag5	lag6
男 Male	$PM_{2.5}$	0.916 (0.799-1.05)	1.011 (0.86-1.187)	1.172 (1.001-1.374)*	0.881 (0.763-1.018)	1.137 (0.98-1.32)	0.994 (0.861-1.147)	1.046 (0.892-1.228)
	PM_{10}	1.102 (0.914-1.329)	0.985 (0.822-1.18)	0.905 (0.763-1.073)	1.189 (1.012-1.397)*	0.892 (0.747-1.065)	1.029 (0.856-1.237)	0.939 (0.779-1.131)
	SO_2	0.932 (0.6-1.447)	1.221 (0.898-1.66)	0.87 (0.641-1.182)	1.109 (0.85-1.449)	1.156 (0.847-1.577)	1.248 (0.949-1.642)	1.023 (0.662-1.58)
	NO_2	0.878 (0.686-1.123)	1.149 (0.921-1.434)	0.884 (0.698-1.12)	1.016 (0.813-1.271)	0.974 (0.796-1.192)	1.185 (0.963-1.458)	0.917 (0.793-1.062)
	$PM_{2.5}$	1.175 (0.974-1.418)	0.873 (0.707-1.079)	1.209 (1.004-1.455)*	1.128 (0.955-1.331)	1.096 (0.902-1.332)	0.908 (0.751-1.097)	1.207 (0.989-1.474)
	PM_{10}	1.183 (0.987-1.417)	0.999 (0.804-1.242)	1.326 (1.107-1.59)*	0.858 (0.705-1.044)	1.127 (0.933-1.361)	1.048 (0.868-1.265)	1.097 (0.925-1.302)
	SO_2	1.298 (1.004-1.677)	1.029 (0.776-1.365)	1.055 (0.761-1.462)	1.249 (0.946-1.648)	0.905 (0.676-1.212)	1.335 (1.038-1.718)*	0.981 (0.728-1.322)
	NO_2	0.832 (0.688-1.008)	0.935 (0.777-1.125)	0.934 (0.765-1.14)	1.24 (1.024-1.502)*	1.044 (0.881-1.238)	0.907 (0.758-1.085)	1.041 (0.943-1.149)

[注] 污染物每升高1个IQR, 日入院人数 $RR=EXP(estimate \times IQR)$; *: $P < 0.05$

[Note] Pollutants increase each IQR, the daily hospitalization $RR=EXP(estimate \times IQR)$; *: $P < 0.05$

2.2.2 污染物对心血管系统疾病日入院人数的影响 表5为2004年武威市大气污染物暴露在不同lag天数(0~6 d)与心血管系统疾病日入院人数的联系, 指出各污染物浓度增加IQR, 心血管系统疾病日入院人数增加的相对危险度变化情况。可以看出, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的增加对男女性心血管系统疾病日入院人

数的影响均表现为滞后效应, 即均在lag2对男、女性日入院人数的影响有统计学意义。表6也发现 SO_2 对男性(lag3)和对女性(lag4)的影响有统计学意义, 而 NO_2 对男性未见影响但对女性(lag4)的影响呈现负效应。

表5 2004年春季污染物对心血管系统疾病日入院RR(95%CI)的影响

Table 5 Single-pollutant model of the association between pollutants and RR(95%CI) of daily cardiovascular hospitalization in spring 2004

性别 Gender	污染物 Pollutant	滞后天数 (Lag-day)						
		lag0	lag1	lag2	lag3	lag4	lag5	
男 Male	PM _{2.5}	0.941 (0.787~1.125)	0.948 (0.778~1.155)	1.207 (1.009~1.444)*	0.854 (0.7~1.042)	0.969 (0.801~1.173)	1.126 (0.931~1.363)	0.888 (0.724~1.089)
	PM ₁₀	0.958 (0.751~1.221)	1.067 (0.842~1.351)	1.269 (1.022~1.576)*	1.06 (0.822~1.367)	1.067 (0.854~1.332)	1.24 (0.979~1.57)	1.21 (0.976~1.5)
	SO ₂	0.975 (0.702~1.353)	0.932 (0.703~1.235)	0.858 (0.62~1.186)	1.363 (1.002~1.856)*	1.228 (0.899~1.678)	0.786 (0.531~1.162)	0.872 (0.549~1.386)
	NO ₂	0.863 (0.677~1.1)	0.954 (0.729~1.248)	1.017 (0.777~1.331)	0.957 (0.753~1.216)	0.777 (0.611~0.989)	1.026 (0.806~1.306)	1.128 (0.979~1.3)
	PM _{2.5}	1.017 (0.832~1.243)	1.024 (0.829~1.266)	1.346 (1.114~1.627)*	0.912 (0.745~1.116)	0.914 (0.745~1.121)	1.033 (0.833~1.282)	1.041 (0.82~1.323)
	PM ₁₀	0.865 (0.668~1.119)	0.842 (0.635~1.116)	1.291 (1.016~1.641)*	0.84 (0.669~1.054)	0.964 (0.748~1.243)	1.034 (0.812~1.315)	1.037 (0.827~1.3)
女 Female	SO ₂	0.917 (0.705~1.195)	1.248 (0.961~1.621)	1.088 (0.818~1.448)	0.904 (0.674~1.214)	1.33 (1.055~1.679)*	0.833 (0.594~1.167)	1.097 (0.853~1.411)
	NO ₂	0.905 (0.775~1.056)	0.947 (0.726~1.235)	0.968 (0.578~1.62)	1.074 (0.869~1.327)	0.689 (0.53~0.897)*	1.057 (0.876~1.275)	1.042 (0.86~1.262)

[注]污染物每升高1个IQR, 日入院人数RR=EXP(estimate×IQR); *: P<0.05

[Note] Pollutants increase each IQR, the daily hospitalization RR=EXP(estimate×IQR); *: P<0.05

2.3 多污染模型拟合结果

2.3.1 呼吸系统 将单污染模型中有统计学意义滞后天的PM₁₀或PM_{2.5}和SO₂或(和)NO₂同时进行多污染模型分析, 研究在引入其他污染物后某污染物对呼吸系统疾病日入院人数的影响。从表6可知, 引入SO₂或(和)NO₂后, PM₁₀对男、女性呼

吸系统疾病日入院人数的影响有所降低, 但仍然均有统计学意义。而引入其他污染物后, SO₂或NO₂对呼吸系统的影响无统计学意义。从表7可知, 引入SO₂和(或)NO₂后, PM_{2.5}对男、女性的影响均无统计学意义; 引入其他污染物后, SO₂和NO₂对呼吸系统的影响也均无统计学意义。

表6 2004年春季PM₁₀、SO₂和NO₂对呼吸系统疾病日入院RR(95%CI)影响的多污染模型Table 6 Multi-pollutants model of the association between PM₁₀, SO₂, NO₂ and RR(95%CI) of daily respiratory hospitalization in spring 2004

性别 Gender	污染物(滞后天) Pollutant(lag-day)	单污染模型 Single-pollutant model	双污染模型 Co-pollutant model			多污染模型 Multi-pollutant model
			PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	
男 Male	PM ₁₀ (3)	1.189(1.012~1.397)*	—	1.151(1.002~1.321)*	1.176(1.034~1.339)*	1.149(1.001~1.321)*
	SO ₂ (5)	1.248(0.949~1.642)	1.092(0.899~1.327)	—	1.169(0.976~1.399)	1.095(0.901~1.332)
	NO ₂ (3)	1.185(0.963~1.458)	1.000(0.945~1.058)	0.991(0.936~1.049)	—	0.998(0.943~1.056)
女 Female	PM ₁₀ (2)	1.326(1.107~1.59)*	—	1.221(1.019~1.461)*	1.203(1.005~1.441)*	1.218(1.004~1.478)*
	SO ₂ (5)	1.335(1.038~1.718)*	1.055(0.825~1.348)	—	1.107(0.868~1.411)	1.012(0.785~1.304)
	NO ₂ (3)	1.24(1.024~1.502)*	1.015(0.926~1.113)	1.034(0.944~1.133)	—	1.014(0.925~1.112)

[注]表中选用的各“污染物(滞后天)”, 为各污染物在单污染模型下有统计学意义或者效应最大的滞后天; *: 表示RR有统计学意义, P<0.05

[Note] The lag-day was selected that the day with a significant or stronger effect for the pollutant in single-pollutant model, *: Significant in expected direction for RR, P<0.05

表7 2004年春季PM_{2.5}、SO₂和NO₂对呼吸系统疾病日入院RR(95%CI)影响的多污染模型Table 7 Multi-pollutants model of the association between PM_{2.5}, SO₂, NO₂ and RR(95%CI) of daily respiratory hospitalization in spring 2004

性别 Gender	污染物(滞后天) Pollutant(lag-day)	单污染模型 Single-pollutant model	双污染模型 Co-pollutant model			多污染模型 Multi-pollutant model
			PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	
男 Male	PM _{2.5} (2)	1.172(1.001~1.374)*	—	1.079(0.924~1.26)	1.159(0.996~1.349)	1.133(0.957~1.341)
	SO ₂ (5)	1.248(0.949~1.642)	1.124(0.94~1.345)	—	1.119(0.929~1.346)	1.076(0.887~1.305)
	NO ₂ (3)	1.185(0.963~1.458)	0.938(0.863~1.02)	0.947(0.865~1.036)	—	0.938(0.855~1.028)
女 Female	PM _{2.5} (2)	1.209(1.004~1.455)*	—	1.175(0.949~1.456)	1.19(0.963~1.47)	1.167(0.934~1.46)
	SO ₂ (5)	1.335(1.038~1.718)*	1.143(0.975~1.339)	—	1.155(0.957~1.394)	1.133(0.959~1.339)
	NO ₂ (3)	1.24(1.024~1.502)*	1.028(0.957~1.104)	1.042(0.96~1.131)	—	1.009(0.934~1.09)

[注]表中选用的各“污染物(滞后天)”, 为各污染物在单污染模型下有统计学意义或者效应最大的滞后天; *: 表示RR有统计学意义, P<0.05

[Note] The lag-day was selected that the day with a significant or stronger effect for the pollutant in single-pollutant model, *: Significant in expected direction for RR, P<0.05

2.3.2 心血管系统 将单污染模型中有统计学意义滞后天的PM₁₀或PM_{2.5}与气态污染物SO₂或(和)NO₂同时引入GAM方程进行多污染模型分析, 研究在引入其他污染物后某污染物对心血管系统疾病日入院人数的影响。从表8可知, 引入SO₂

或(和)NO₂后, PM₁₀对男性心血管系统疾病日入院的影响与单污染模型相比无变化; 而在单独引入SO₂和同时引入SO₂和NO₂后, PM₁₀对女性的影响比单污染模型降低, 但亦有统计学意义。在分别引入其他污染物后, SO₂和NO₂的影响均无统计

学意义。从表 9 可知, 在单独引入 NO_2 以及同时引入 SO_2 和 NO_2 后, $\text{PM}_{2.5}$ 对男性的影响比单污染模型有所升高且均有统计学意义, 单独引入 SO_2 后 $\text{PM}_{2.5}$ 对男性的 RR 值影响不大, 引入 SO_2

或(和) NO_2 后, $\text{PM}_{2.5}$ 对女性的影响均仍有统计学意义。在引入其他污染物后, SO_2 和 NO_2 对心血管系统的影响均改变为无统计学意义。

表 8 2004 年春季 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 对心血管系统疾病日入院 RR (95%CI) 影响的多污染模型Table 8 Multi-pollutant model of the association between PM_{10} , SO_2 , NO_2 and RR (95%CI) of daily cardiovascular hospitalization in spring 2004

性别 Gender	污染物(滞后天) Pollutant (lag-day)	单污染模型 Single-pollutant model	双污染模型 Co-pollutant model			多污染模型 Multi-pollutant model
			PM_{10}	SO_2	NO_2	
男 Male	PM_{10} (2)	1.269(1.022~1.576)*	-	1.287(1.065~1.555)*	1.274(1.053~1.541)*	1.259(1.026~1.544)*
	SO_2 (3)	1.363(1.002~1.856)*	1.088(0.811~1.46)	-	1.108(0.884~1.389)	1.278(0.981~1.664)
	NO_2 (4)	0.777(0.611~0.989)	0.961(0.877~1.052)	0.948(0.872~1.031)	-	0.96(0.873~1.055)
女 Female	PM_{10} (2)	1.291(1.016~1.641)*	-	1.247(1.007~1.545)*	1.138(0.956~1.356)	1.24(1.001~1.536)*
	SO_2 (4)	1.33(1.055~1.679)*	0.923(0.702~1.212)	-	1.025(0.817~1.286)	0.91(0.691~1.197)
	NO_2 (4)	0.689(0.53~0.897)*	0.956(0.879~1.04)	0.95(0.873~1.035)	-	0.97(0.886~1.061)

[注]表中选用的各“污染物(滞后天)”, 为各污染物在单污染模型下有统计学意义或者效应最大的滞后天; *: 表示 RR 有统计学意义, $P < 0.05$

[Note] The lag-day was selected that the day with a significant or stronger effect for the pollutant in single-pollutant model, *: Significant in expected direction for RR , $P < 0.05$

表 9 2004 年春季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 对心血管系统疾病日入院 RR (95%CI) 影响的多污染模型Table 9 Multi-pollutant model of the association between $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , NO_2 and daily RR (95%CI) of cardiovascular hospitalization in spring 2004

性别 Gender	污染物(滞后天) Pollutant (lag-day)	单污染模型 Single-pollutant model	双污染模型 Co-pollutant model			多污染模型 Multi-pollutant model
			$\text{PM}_{2.5}$	SO_2	NO_2	
男 Male	$\text{PM}_{2.5}$ (2)	1.207(1.009~1.444)*	-	1.204(0.998~1.453)	1.216(1.019~1.452)*	1.248(1.036~1.504)*
	SO_2 (3)	1.363(1.002~1.856)*	1.129(0.847~1.504)	-	1.212(0.933~1.574)	1.119(0.843~1.485)
	NO_2 (4)	0.777(0.611~0.989)	0.984(0.896~1.079)	0.975(0.891~1.067)	-	0.988(0.903~1.681)
女 Female	$\text{PM}_{2.5}$ (2)	1.346(1.114~1.627)*	-	1.317(1.054~1.646)*	1.384(1.104~1.736)*	1.347(1.079~1.681)*
	SO_2 (4)	1.33(1.055~1.679)*	1.153(0.877~1.517)	-	1.219(0.914~1.626)	1.045(0.78~1.401)
	NO_2 (4)	0.689(0.53~0.897)*	0.884(0.75~1.041)	0.909(0.785~1.053)	-	0.891(0.782~1.016)

[注]表中选用的各“污染物(滞后天)”, 为各污染物在单污染模型下有统计学意义或者效应最大的滞后天; *: 表示 RR 有统计学意义, $P < 0.05$

[Note] The lag-day was selected that the day with a significant or stronger effect for the pollutant in single-pollutant model, *: Significant in expected direction for RR , $P < 0.05$

2.4 颗粒物浓度分类模型拟合结果

上述分析可知, 研究期间武威市主要的大气污染物中对呼吸与心血管系统健康的主要危险因子是沙尘 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。因为研究期间正是该地沙尘天气高发季节, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度大小与沙尘天气的发生直接相关, 所以不同沙尘天气的颗粒物浓度对呼吸和心血管系统健康的影响在一定程度上可反映出不同沙尘天气的健康危害。

本研究根据空气质量标准以及当地发生不同强度的沙尘天气时颗粒物浓度的平均水平, 分别将 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 归为 4 个水平类别, 表述如下。

2.4.1 $\text{PM}_{2.5}$ 的水平类别 按照美国空气质量标准以及本研究期间武威市沙尘颗粒物浓度分布情况, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分为 4 个水平类别: ① $\leq 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (美国 EPA 空气质量标准, 本研究定义为清洁天); ② $65.1\sim95.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (高于 EPA 空气质量标准的非沙尘天气, 本研究定义为轻度污染天, 包括浮尘天); ③ $95.4\sim167.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (扬沙 $\text{PM}_{2.5}$ 水平, 本研究定义为扬沙天); ④ $>167.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (沙尘暴 $\text{PM}_{2.5}$ 水平, 本研究定义为沙尘暴天)。

在进行上述不同天气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度等级与居民日入院人数关系的分析中, 本研究选择在单污染模型中有统计意义的滞后天进行分析, 即男、女性均选用 lag2 进行分析。

图 1 描述的是研究期间随 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平增加呼吸与心血管系统疾病日入院 RR_L (在此, 用 RR_L 以区别于一般的 RR) 的变化趋势。从图 1 可知, 沙尘 $\text{PM}_{2.5}$ 对男、女性的影响呈现一定的浓度效应关系, 当沙尘 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到沙尘暴水平时, 其对男、女性呼吸和心血管系统健康的影响最大。另可见, 沙尘天气源区或近源区的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对男性呼吸和心血管系统疾病日入院人数达到显著影响的最低浓度水平为沙尘暴水平, 而对女性的最低浓度水平为扬沙水平。

2.4.2 PM_{10} 的水平类别 按照研究期间武威市在不同强度沙尘天气时 PM_{10} 浓度分布情况, 本研究将 PM_{10} 浓度分为 4 类: ① $\leq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (非沙尘天气 PM_{10} 水平, 本研究定义为清洁天); ② $101\sim150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (浮尘天气 PM_{10} 水平, 本研究定义为轻度污染天); ③ $>150\sim250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (扬沙天气 PM_{10} 水平, 本研究定义为扬沙天); ④ $>250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (沙尘暴 PM_{10} 水平, 本研究定义为沙尘暴天)。

在进行 PM_{10} 浓度等级与居民日入院人数关系的分析中, 本研究选择在单污染模型中有统计意义的滞后天进行分析, 即除男性呼吸系统疾病选用 lag3 外, 女性呼吸系统、男、女性心血管系统均选用 lag2 进行分析。

图 2 是研究期间随 PM_{10} 水平类别变化, 呼吸与心血管系统

疾病日入院 RR_L 的变化趋势。图2可见不同天气水平的 PM_{10} 浓度对男、女性呼吸和心血管系统疾病的影响与 $PM_{2.5}$ 的影响类似，并呈现了更好的浓度效应关系，且当 PM_{10} 浓度达到沙尘暴水平时，其影响达到最大。另可见沙尘天气源区或近源区的大气 PM_{10} 对男、女性呼吸和心血管系统疾病日入院人数达到显著影响的最低浓度水平均为扬沙天气 PM_{10} 水平。

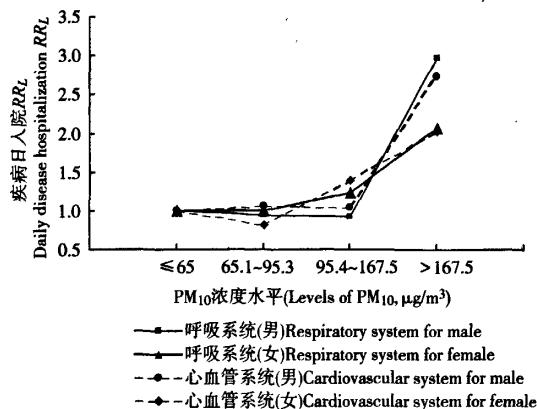


图1 2004年春季不同PM_{2.5}浓度水平对呼吸、心血管系统疾病日入院 RR_L 的影响

Figure 1 Association between level of PM_{2.5} and daily RR_L of respiratory and cardiovascular hospitalization in spring 2004

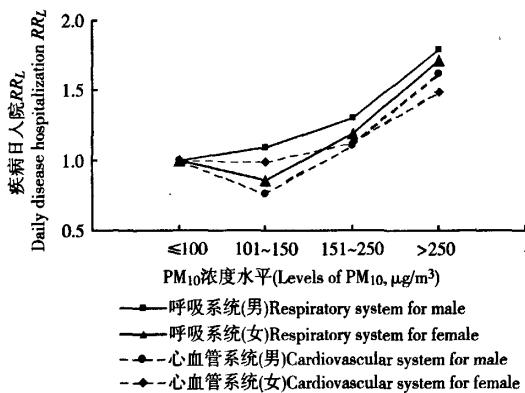


图2 2004年春季不同PM₁₀浓度等级对呼吸、心血管系统疾病日入院 RR_L 的影响

Figure 2 Association between level of PM₁₀ and daily RR_L of respiratory and cardiovascular hospitalization in spring 2004

3 讨论

本研究应用GAM模型分析甘肃省武威市2004年春季大气污染物对呼吸和心血管日入院人数的影响，并在空气质量标准和沙尘天气期间大气颗粒物的平均浓度的基础上建立PM_{2.5}和PM₁₀浓度水平分类模型，以此分析在沙尘暴源区（以下简称“源区”）不同沙尘天气对呼吸和心血管系统健康的影响。

表1和表2可见，研究期间PM_{2.5}与PM₁₀日浓度较高，与非沙尘天气下的颗粒物浓度相比，扬沙和沙尘暴天气下的颗粒物浓度显著增大。而气态污染物在各种天气下均保持较低的浓

度。结果显示，PM_{2.5}与PM₁₀之间有显著的相关性，而颗粒物与气态污染物的相关性较弱（数据未列出）。这说明在源区沙尘暴高发季节，沙尘颗粒物是主要的污染源且保持较高的浓度，而气态污染物浓度较低。文献报道2000年春季（4月6日和25日）北京发生沙尘天气，其PM₁₀浓度为非沙尘天气时大气中PM₁₀浓度的5~10倍，最高达到1500 μg/m³，与此同时，大气中PM_{2.5}浓度也高达230 μg/m³且大气能见度急速降低^[5]。

本研究单污染模型分析表明，PM₁₀和PM_{2.5}均对源区居民呼吸和心血管系统疾病日入院人数有影响，且为滞后效应。多污染模型分析发现，引入SO₂或（和）NO₂后，PM₁₀对居民呼吸与心血管系统疾病的健康效应变化不大且仍然有统计学意义，表明PM₁₀是主要的危险因子。引入SO₂或（和）NO₂后，PM_{2.5}对居民心血管健康的效应仍有统计学意义，但对呼吸系统健康效应变弱。表明PM_{2.5}也是主要的居民呼吸和心血管疾病危险因子，但SO₂和NO₂对呼吸系统健康效应有一定的贡献。尽管单污染模型也发现SO₂和NO₂对女性呼吸和心血管健康有影响，但是多污染模型分析表明，引入其他污染物后，SO₂和NO₂的健康效应均无统计学意义。这意味着研究期间SO₂和NO₂对居民呼吸与心血管系统疾病的日入院人数影响不大，说明在几乎没有工业污染的沙尘暴源区的春季，SO₂和NO₂并不是主要的健康危险因子。

颗粒物浓度水平分类模型显示了在不同的沙尘天气水平下对居民呼吸和心血管系统疾病日入院人数的影响。从图1~2可以看出，沙尘PM_{2.5}和PM₁₀对男、女性呼吸和心血管系统疾病日入院人数随浓度的增高而增大，当浓度达到沙尘暴水平时其影响最大。同时本研究也发现，沙尘PM₁₀对男、女性呼吸和心血管系统疾病日入院达到显著影响的最低浓度水平为扬沙天气水平（>150~250 μg/m³），沙尘PM_{2.5}对男性该疾病日入院达到显著影响的最低浓度水平为沙尘暴水平（>167.5 μg/m³），而对女性为扬沙天气水平（95.4~167.5 μg/m³）。由此可见，沙尘天气源区或近源区的大气沙尘颗粒物只有达到较高浓度时，才会对呼吸和心血管系统疾病日入院人数造成显著影响。

有文献报道，韩国首尔沙尘天气[PM₁₀为(101.1 ± 29.5) μg/m³]和我国台北沙尘天气[PM₁₀为(125.9 ± 33.6) μg/m³]与居民呼吸系统和心血管系统疾病死亡率的增加有联系，但是其影响均无统计学意义^[1, 2]。其原因可能是颗粒物浓度较低，只相当于本研究的武威非沙尘天气和浮尘天气的PM₁₀水平。首尔和台北沙尘天气尽管颗粒物浓度较低，但是仍然与居民呼吸系统和心血管系统疾病死亡率的增加有联系，这可能是由于这些大型城市远离沙尘暴源区，沙尘颗粒物在长距离传输过程中路经大量污染地区，可以不断吸附人为污染物（如Pb、As、SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺等）^[6, 7]，增加了颗粒物的毒性。而在沙尘暴源区，只有高浓度的颗粒物才能导致居民呼吸和心血管系统疾病入院率增加。这可能与源区工业污染极少，颗粒物吸附的有害污染物少有关。

毒理学研究发现，沙尘暴颗粒物能引起大鼠肺部炎症的发生，沙尘暴PM_{2.5}能引起大鼠肺巨噬细胞氧化损伤，增大质膜通透性和膜脂流动性，使细胞内Ca²⁺浓度升高，甚至导致DNA损伤，是一种细胞毒性物质^[8-11]。LIAO等研究认为PM_{2.5}浓度

的增加与心率调节的降低有联系，并提出了颗粒物与心血管疾病死亡率的可能的联系机制^[12]。上述流行病学、毒理学研究表明，沙尘天气引起呼吸和心血管系统健康损害的主要危险因子是沙尘颗粒物。

本研究得出以下结论：①沙尘天气，即使在几乎没有工业污染的源区或近源区，也对当地居民呼吸、心血管系统疾病日入院人数有影响且为滞后效应。②沙尘天气在源区或近源区对居民呼吸、心血管系统疾病日入院人数影响的主要危险因子是沙尘PM₁₀和PM_{2.5}，其影响也为滞后效应；SO₂和NO₂虽然对颗粒物的健康影响有贡献，但统计学无意义。③沙尘天气在没有工业污染的源区或近源区其沙尘颗粒物只有达到较高浓度（扬沙水平）时，才会对居民呼吸、心血管系统疾病日入院人数有影响，且呈一定剂量效应关系，即：沙尘暴天>扬沙天>沙尘轻度污染天、清洁天。④本研究根据大气PM₁₀和PM_{2.5}水平划分沙尘天气的类型与流行病调查结果一致，比根据能见度划分沙尘天气类型更为科学且更易操作，同时也为我国制定PM₁₀、PM_{2.5}大气标准提供了新的科学依据和方法。

参考文献：

- [1] KWON HJ, CHO SH, CHUN Y, et al. Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea [J]. Environ Res, 2002, 90 (1): 1-5.
- [2] CHEN YS, SHEEN PC, CHEN ER, et al. Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan [J]. Environ Res, 2004, 95 (2), 151-155.
- [3] DOMINICI F, MCDERMOTT A, ZEGER SL, et al. On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health [J]. Am J Epidemiol, 2002, 156 (3): 193-203.
- [4] AKAIKE H. Factor Analysis and AIC [J]. Psychometric, 1987, 52 (3): 317-332.
- [5] XIE S, YU T, ZHANG Y, et al. Characteristics of PM₁₀, SO₂, NO_x and O₃ in ambient air during the dust storm period in Beijing [J]. Sci Total Environ, 2005, 345 (1-3): 153-164.
- [6] CHEN SJ, HSIEH LT, KAO MJ, et al. Characteristics of particles sampled in southern Taiwan during the Asian dust storm periods in 2000 and 2001 [J]. Atmos Environ, 2004, 38: 5925-5934.
- [7] PARK MH, KIM YP, KANG CH. Aerosol composition change due to dust storm: measurements between 1992 and 1999 at Sosan, Korea [J]. Water, Air, Soil Pollut, 2003, Focus 3: 117-128.
- [8] GENG H, MENG ZQ, Zhang QX. Effects of blowing sand fine particles on plasma membrane permeability and fluidity, and intracellular calcium levels of rat alveolar macrophages [J]. Toxicol Lett, 2005, 157 (2): 129-137.
- [9] MENG ZQ, ZHANG QX. Oxidative damage of dust storm fine particles on lungs, hearts and livers of rats [J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2006, 22 (3): 277-282.
- [10] GENG H, MENG ZQ. In vitro responses of rat alveolar macrophages to particle suspensions and water-soluble components of dust storm PM2.5 [J]. Toxicol in Vitro, 2006, 20 (4): 575-584.
- [11] WEI AL, MENG ZQ. Evaluation of micronucleus induction of sand dust storm fine particles (PM_{2.5}) in human blood lymphocytes [J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2006, 22 (3): 292-297.
- [12] LIAO D, CREASON J, SHY C, et al. Daily variation of particulate air pollution and poor cardiac autonomic control in the elderly [J]. Environ Health Perspect, 1999, 107 (7): 521-525.

（收稿日期：2007-07-19）

（校对：徐新春）

【告知栏】

欢迎订阅 2008 年《环境与职业医学》杂志

《环境与职业医学》杂志为中华预防医学会系列杂志优秀期刊（ISSN 1006-3617, CN 31-1879/R, CODEN: HYZYAZ），系由上海市疾病预防控制中心、中华预防医学会、上海市预防医学研究院主办的专业性学术期刊，已连续三次被评为中国预防医学、卫生学类中文核心期刊，2001年被评为中国生物医学核心期刊，2004年被评为中国科技论文源期刊和中国科技核心期刊，也是美国化学文摘（CA）、美国《乌利希国际期刊指南》（Ulrich's International Periodicals Directory）、英国《国际农业与生物科学研究中心》（CABI）、波兰《哥白尼索引》（IC）及国内六大科技数据库的源期刊。

本刊内容主要介绍国内外劳动卫生与职业病防治工作、环境危害因素及其治理研究以及有关环境卫生学研究的学术动态、科研成果和实践经验。可供广大劳动安全卫生与职业病防治、环境保护、卫生监督、卫生防疫及疾病控制相关单位及医学院校教学科研等专业人员参考。

本刊为双月刊，大16开，80页，每双月25日出版，全年定价60.00元（含包装及邮资）。由邮局及自办结合发行，本刊也接受广告刊载业务。邮发代号：4-568，邮局办理征订。欢迎就近邮局办理订阅。同时，编辑部亦随时接受征订，并可补购已出各期杂志。

1. 银行汇款：上海市疾病预防控制中心；帐号：086803-82600054171；开户：中信银行上海北京西路支行。
2. 邮局汇款：上海市中山西路1380号，《环境与职业医学》杂志编辑部，邮编：200336。

联系人：忻霞萍；电话：(021)62758710-1326分机；传真：(021)62084529；E-mail：zazhi2@scdc.sh.cn