

天津市可吸入颗粒物与城区居民每日死亡关系的时间序列分析

张衍桑 周脉耕 贾予平 胡以松 张金良 江国虹 潘小川

【摘要】 目的 研究天津市大气可吸入颗粒物(PM₁₀)与城区居民每日死亡间的相关性。方法 通过收集天津市城区2005—2007年空气污染数据、日平均气温和相对湿度及每日死亡人数,采用广义相加模型,控制长期和季节趋势、气温和相对湿度等气象因素及二氧化硫(SO₂)和二氧化氮(NO₂)等气态污染物的影响,分析天津市PM₁₀与居民每日死亡之间的关系。结果 大气PM₁₀与人群每日非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间显著相关。PM₁₀浓度每升高10 μg/m³,人群每日非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡分别增加0.45% (0.21~0.69)、0.60% (0.29~0.91)和0.82% (0.04~1.61)。结论 天津市大气PM₁₀污染与城区居民每日死亡显著相关,尤其是循环系统疾病和呼吸系统疾病死亡。

【关键词】 空气污染; 死亡; 时间序列分析; 颗粒物

Time-series analysis of association between inhalable particulate matter and daily mortality among urban residents in Tianjin ZHANG Yan-shen¹, ZHOU Mai-geng², JIA Yu-ping³, HU Yi-song³, ZHANG Jin-liang¹, JIANG Guo-hong⁴, PAN Xiao-chuan⁵. 1 Department of Environmental Pollution and Health, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2 Center for Public Health Surveillance and Information Service, Chinese Center for Disease Control and Prevention; 3 Institute of Environmental Hygiene, Beijing Center for Disease Control and Prevention; 4 Institute of Noncommunicable Disease Control and Prevention, Tianjin Center for Disease Control and Prevention; 5 Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, Peking University

Corresponding author: PAN Xiao-chuan, Email: xcpan@hsc.pku.edu.cn

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (No. 30972433)

【Abstract】 **Objective** To study the association between particulate matter less than 10 micron in aerodynamic diameter (PM₁₀) and daily mortality among urban population in Tianjin. **Methods** We collected data of air quality, daily mean temperature and relative humidity, and daily cause-specific death counts, and used generalized additive models to explore the relationship between ambient particulate matter and daily mortality, after adjusting the effects of long-term and seasonal trend, weather conditions and other gaseous pollutants, such as sulfur dioxide and nitrogen dioxide. **Results** An increase of 10 μg/m³ in PM₁₀ was associated with 0.45% (95% CI: 0.21–0.69) non-accidental mortality, 0.60% (0.29–0.91) circulatory mortality and 0.82% (0.04–1.61) respiratory mortality, respectively. **Conclusion** Our findings indicated that the extent of exposure to PM₁₀ was significantly associated with daily mortality in urban population in Tianjin, especially with the mortality rates on circulatory and respiratory diseases.

【Key words】 Air pollution; Mortality; Time-series analysis; Particulate matter

随着时间序列分析和病例交叉设计在空气污染流行病学研究中的应用,国内外大量流行病学研究

发现,在控制长期和季节趋势以及气象条件等混杂因素的影响后,大气颗粒物浓度短期变化与人群每日死亡密切相关。国内空气污染健康效应方面的研究主要集中在大城市^[1-6],研究方法主要包括时间序列分析和病例交叉研究。国内开展的空气污染与居民每日死亡关系的时间序列分析研究因资料收集、空气污染指标、统计分析方法以及混杂因素控制等方面的差异,研究结果间缺乏可比性。本研究采用时间序列分析方法,基于广义相加模型分析

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2010.05.016

基金项目:国家自然科学基金(30972433)

作者单位:100012 北京,中国环境科学研究院环境污染与健康研究室(张衍桑、张金良);中国疾病预防控制中心公共卫生监测与信息服务所(周脉耕);北京市疾病预防控制中心环境卫生所(贾予平、胡以松);天津市疾病预防控制中心非传染病预防控制所(江国虹);北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系(潘小川)

通信作者:潘小川, Email: xcpan@hsc.pku.edu.cn

2005—2007 年天津市城区大气可吸入颗粒物 (PM₁₀) 与城区居民每日死亡间的关系^[7], 阐述空气污染影响健康的时间序列分析中可能的混杂因素及其控制, 并评价不同模型参数设置对相对危险度估计的影响。

资料与方法

1. 资料及来源:

(1) 居民死亡资料: 2005 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日天津市中心六区 (和平区、河东区、河西区、南开区、河北区和红桥区) 居民死因统计资料, 来源于中国疾病预防控制中心死因登记报告信息系统。每日死亡例数按国际疾病分类 (ICD-10) 根本死因编码进行分类, 其中纳入本研究的疾病分类包括循环系统疾病死亡 (ICD-10 编码: I00-I99)、呼吸系统疾病死亡 (ICD-10 编码: J00-J99), 非意外死亡 (ICD-10 编码: A00-R99)。

(2) 环境空气质量数据: 同期该地区每日空气质量监测资料, 来源于天津市环境监测中心空气质量日报数据, 根据我国空气污染指数定义及分级限值换算为污染物浓度, 大气污染物指标包括 PM₁₀、二氧化硫 (SO₂) 和二氧化氮 (NO₂) 日平均浓度。

(3) 气象监测数据: 同期该地区气象监测数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 中国地面国际交换站气候资料日值数据集。气象要素包括日平均气温和日平均相对湿度。

2. 统计学分析: 时间序列的广义相加 Poisson 回归模型由 Schwartz^[8] 于 20 世纪 90 年代引入空气污染流行病学研究, 主要用于研究空气污染或气象因素对人群健康事件 (如死亡、发病和住院) 的急性损害效应。对于总人口来说, 每日人群健康事件发生人数是小概率事件, 其实际分布近似服从 Poisson 分布。本研究中模型的基本形式如下:

$$\begin{aligned} \log E(Y_t) = & \mu_0 + s(\text{time}, df \cdot \text{time}) + \text{dow} + \beta PM_{10-t-\delta} \\ & + \sum_{i=0}^l s(\text{temp}_{t-i}, df \cdot \text{temp}) \\ & + \sum_{i=0}^l s(\text{humid}_{t-i}, df \cdot \text{humid}) \end{aligned}$$

其中, Y_t 为观察日 t 当天的死亡人数, $E(Y_t)$ 为观察日 t 死亡人数的数学期望; s 表示非参数平滑函数; time 是用于表示每日死亡人数先后发生次序的一列数, 如本研究中采用天津市 2005—2007 年数据进行分析, 故 time 取值为 1, 2, 3, ..., 1095; $df \cdot \text{time}$ 为非参数平滑函数中控制每日死亡序列长期和季节趋势的

自由度; dow 表示周日变量, 用于控制每日死亡序列的短期波动, 是指一周内不同日人群死亡率有所不同。 temp_{t-i} 为第 $t-i$ 日平均气温; $df \cdot \text{temp}$ 是非参数平滑函数 s 中控制日平均气温的自由度; humid_{t-i} 是第 $t-i$ 日平均相对湿度; $df \cdot \text{humid}$ 是非参数平滑函数 s 中控制日平均相对湿度的自由度; l 为气温和相对湿度最大滞后天数; $PM_{10-t-\delta}$ 表示第 $t-\delta$ 日 PM₁₀ 日平均浓度, δ 为 PM₁₀ 最大滞后天数; β 为模型估计的对应于 PM₁₀ 的回归系数, 其含义是指 PM₁₀ 日平均浓度每升高或降低 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 人群每日死亡率增加或减少的百分比。

本研究中选择 $df \cdot \text{time} = 8/\text{年}$, 共收集了 2005—2007 年 3 年的数据, 故 $df \cdot \text{time} = 24$; 根据日平均气温和相对湿度对人群死亡影响的特点选择 $df \cdot \text{temp} = 3$ 和 $df \cdot \text{humid} = 3$ 分别作为日平均气温和相对湿度的自由度^[9,10]。采用 R 2.10.1 软件中的 gam 软件拟合广义相加模型估计模型参数, 并计算相对危险度 (OR) 及其 95% 可信区间 (CI); 模型拟合时严格收敛标准^[11]: $\text{epsilon} = 1e-10$, $df \cdot \text{epsilon} = 1e-10$, $\text{maxit} = 1000$, $df \cdot \text{maxit} = 1000$ 。采用 gam.exact 函数估计回归模型系数及其标准误。

在单污染物模型的基础上, 纳入气态污染物 SO₂ 和 NO₂ 拟合多污染物模型, 评价气态污染物对 PM₁₀ 效应估计的影响; 改变模型中控制长期和季节趋势的非参数平滑函数的自由度 $df \cdot \text{time}$ (取值为 3, 4, 5, ..., 15) 和控制日平均气温和相对湿度最大滞后天数 l (取值为 0, 1, 2, ..., 7) 的取值, 评价不同自由度和最大滞后天数取值对 PM₁₀ 回归系数估计的影响。

结 果

1. 空气质量、气象要素和居民每日死亡概况: 2005—2007 年天津市中心六区年平均人口 393.73 万, 每年因疾病死亡 (意外及伤害除外) 20 620 人, 年粗死亡率约为 523.71/10 万; 平均每日死亡 57 人, 其中循环系统疾病死亡 30 人, 呼吸系统疾病死亡 4 人。2005—2007 年大气 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 年平均浓度分别为 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 接近《环境空气质量标准》(GB 3095-1996) 规定的年平均浓度二级标准限值 (表 1)。

2. 大气污染物日平均浓度与气象要素间的 Spearman 相关分析: PM₁₀ 日平均浓度与气态污染物 SO₂ 和 NO₂ 浓度间存在正相关, 等级相关系数分别为 0.374 ($P < 0.01$) 和 0.570 ($P < 0.01$), 与气象要素气温、气湿及气压等无关; SO₂ 和 NO₂ 与气象要素气温

和气压之间存在较强的关联,与气温均呈负相关,而与气压呈正相关(表 2)。大气污染物与气象要素间较强的关联,反映了空气污染物与气象因素间存在的固有的理化特征,提示气象因素是研究大气污染物对人群健康影响的重要混杂因素或效应修饰因素。

表 1 2005—2007 年天津市中心六区空气质量、气象要素和居民每日死亡情况

指标	$\bar{x} \pm s$	百分位数				
		最小值	P25	中位数	P75	最大值
空气质量						
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	105 ± 57	11	68	92	128	452
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	68 ± 54	5	33	49	88	339
NO _x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	47 ± 18	18	35	43	56	136
气象要素						
平均气温(°C)	13.7 ± 11.2	-10.5	3.6	15.0	24.0	31.3
平均气湿(%)	59.5 ± 11.6	13.0	46.0	61.0	74.0	97.0
每日死亡例数						
非意外死亡	57 ± 13	20	47	56	65	101
循环系统疾病	30 ± 8	9	24	29	34	64
呼吸系统疾病	4 ± 2	0	3	4	6	15

表 2 天津市中心六区大气污染物日平均浓度与日气象要素的 Spearman 相关分析

变量	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	平均气温	平均气湿	平均气压
PM ₁₀	1.000					
SO ₂	0.374*	1.000				
NO ₂	0.570*	0.758*	1.000			
平均气温	-0.037	-0.730*	-0.498*	1.000		
平均气湿	0.028	-0.166*	-0.015	0.231*	1.000	
平均气压	-0.028	0.645*	0.435*	-0.873*	-0.189*	1.000

注: * P < 0.01

3. PM₁₀与疾病别每日死亡关联的相对危险度估计:在控制长期和季节趋势、日平均气温和相对湿度以及周日变量等因素后,天津市大气 PM₁₀日平均浓度与人群非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间显著相关,关联具有统计学意义(表 3)。其中,PM₁₀与每日疾病别死亡间的关联以当日平均浓度(Lag0)最为显著,滞后 1 日平均浓度(Lag1)次之。本研究以当日和滞后 1 日浓度均值(Lag01)估计 PM₁₀与人群疾病别死亡间的关联:PM₁₀日平均浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,人群非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的相对危险度分别为 1.0045、

1.0060 和 1.0082(表 3)。

在多污染物模型中控制气态污染物 SO₂和 NO₂的效应后,PM₁₀与人群非意外死亡和循环系统疾病死亡间的关联相对稳健,尽管关联强度有所变化,但未改变关联的方向和统计学检验的结果;PM₁₀与呼吸系统疾病死亡间的关联对气态污染物较为敏感,模型中纳入 SO₂时,PM₁₀与呼吸系统疾病间的关联无统计学意义;模型中纳入 NO₂或同时纳入 SO₂与 NO₂时,PM₁₀与呼吸系统疾病死亡间的关联估计增大,且关联具有统计学意义(表 3)。

4. 模型选择和参数设置对相对危险度估计的敏感性分析:不同非参数平滑函数自由度对大气 PM₁₀与每日疾病别死亡关联程度估计的影响见图 1。PM₁₀与非意外死亡和循环系统疾病死亡间的关联相对稳健。随非参数平滑函数自由度(df/年)的增大,PM₁₀每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,人群每日死亡的相对危险度估计逐渐减小,当 df/年 ≥ 8 时,相对危险度估计趋于平稳,且不会改变关联的方向及其统计学检验的结果(图 1a 和 1b);随非参数平滑函数自由度(df/年)的增大,如 df/年 ≥ 8 时,PM₁₀与呼吸系统疾病死亡间的关联无统计学意义(图 1c)。

广义相加模型中(长期和季节趋势自由度 df = 8/年时)纳入不同最大滞后天数的日平均气温和相对湿度对 PM₁₀与非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的影响见图 2。可以看出,模型中控制滞后 0 日和滞后 1 日的日平均气温和相对湿度后,PM₁₀与疾病别每日死亡间回归模型的系数估计相当稳健,且不会改变关联的方向和统计学检验的结果。

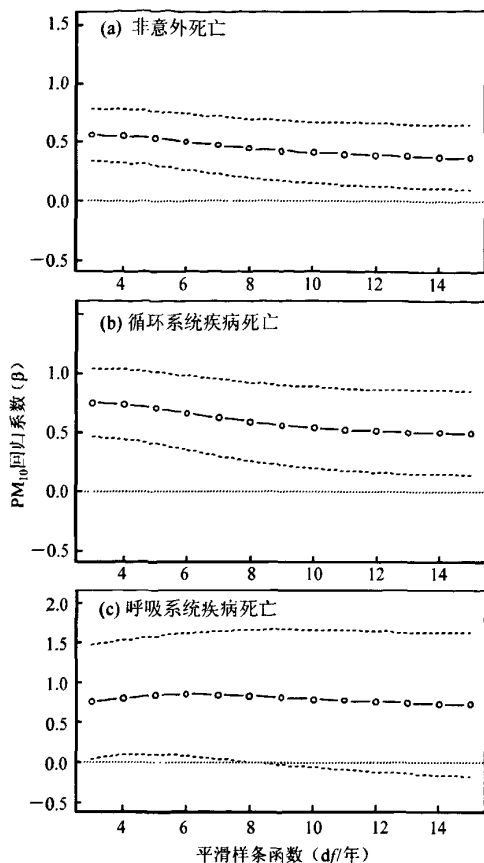
讨 论

本研究通过对天津市 2005—2007 年大气 PM₁₀浓度与城区居民每日死亡间的时间序列分析,发现

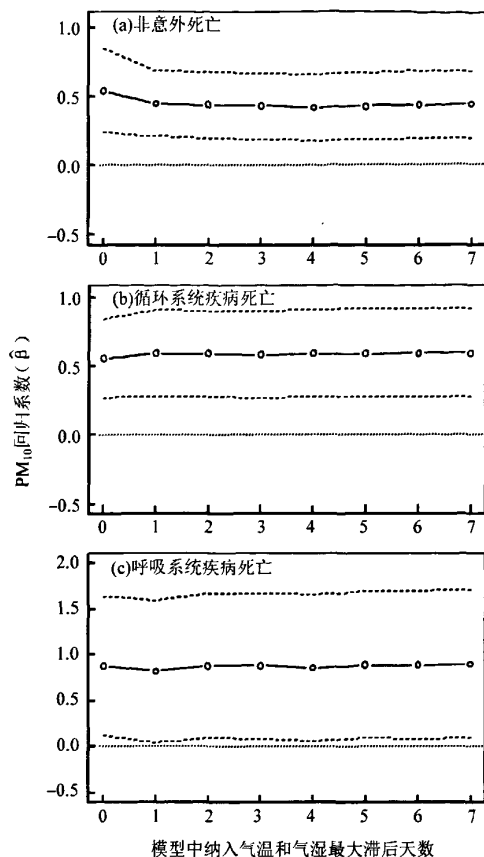
表 3 大气 PM₁₀日平均浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 人群疾病别死亡率相对危险度

污染物指标	RR 值(95%CI)		
	非意外死亡	循环系统疾病死亡	呼吸系统疾病死亡
PM ₁₀			
Lag0	1.0038(1.0019 ~ 1.0057)	1.0054(1.0029 ~ 1.0079)	1.0080(1.0018 ~ 1.0143)
Lag1	1.0022(1.0003 ~ 1.0041)	1.0024(0.9999 ~ 1.0049)	1.0033(0.9971 ~ 1.0096)
Lag01	1.0045(1.0021 ~ 1.0069)	1.0060(1.0029 ~ 1.0091)	1.0082(1.0004 ~ 1.0161)
PM ₁₀ (Lag01)			
PM ₁₀ + SO ₂	1.0039(1.0022 ~ 1.0055)	1.0064(1.0027 ~ 1.0101)	1.0067(0.9973 ~ 1.0161)
PM ₁₀ + NO ₂	1.0023(1.0006 ~ 1.0040)	1.0060(1.0018 ~ 1.0102)	1.0112(1.0005 ~ 1.0220)
PM ₁₀ + SO ₂ + NO ₂	1.0047(1.0027 ~ 1.0066)	1.0061(1.0019 ~ 1.0103)	1.0105(1.0000 ~ 1.0210)

注: Lag0: 当天污染物浓度; Lag1: 滞后 1 d 污染物浓度; Lag01: 当天和滞后 1 d 污染物浓度均值



注:图中曲线表示 PM_{10} 效应估计的95%CI
图1 不同非参数平滑函数 df 对 PM_{10} 效应估计的影响



注:图中曲线表示 PM_{10} 效应估计的95%CI
图2 日平均气温和相对湿度不同最大滞后天数取值对 PM_{10} 效应估计的影响

PM_{10} 日平均浓度与人群每日非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间存在显著关联。 PM_{10} 日平均浓度每升高 $10 \mu g/m^3$, 人群每日上述三类疾病死亡分别增加 0.45%、0.60%和 0.82%, 与国内外研究结果基本相同。Dominici 等^[12]对美国 90 个城市 PM_{10} 与人群每日死亡间的相关性研究结果显示, PM_{10} 与每日非意外死亡、心血管和呼吸系统疾病死亡间的关联有统计学意义, PM_{10} 日平均浓度每升高 $10 \mu g/m^3$, 非意外死亡和心肺疾病死亡分别增加 0.27%和 0.31%。Samoli 等^[13]对加拿大 12 个城市、欧洲 32 个城市和美国 90 个城市的多城市时间序列分析结果表明, PM_{10} 日平均浓度每升高 $10 \mu g/m^3$, 每日非意外死亡分别增加 0.84%、0.33%和 0.29%。Kan 和 Chen^[3]在上海地区开展的时间序列研究分析显示, PM_{10} 日平均浓度每升高 $10 \mu g/m^3$, 非意外死亡增加 0.30%, PM_{10} 与心血管疾病死亡之间的关联无统计学意义。

大气 PM_{10} 与人群每日死亡间的关联相对稳健, 不因非参数平滑函数自由度和日平均气温及相对湿

度最大滞后天数等参数设置和 气态污染物 SO_2 和 NO_2 等的影响而改变。国外研究结果表明^[14-16]: 对于长期和季节变化趋势以及气象条件等可能的混杂因素, 选择不同的非参数或参数平滑样条函数及其平滑参数 (df) 不影响对 PM_{10} 与每日死亡之间关联的估计, 与本研究的结果相同。提示开展空气污染对人群健康影响的时间序列分析中, 控制长期和季节趋势的混杂效应时, 无论采用非参数还是参数平滑函数, 平滑函数 df 应不小于 8/年; 同时控制日平均气温和相对湿度的影响, 至少应纳入当日和滞后 1 日气温和相对湿度等指示变量, 并对平滑函数自由度和最大滞后天数等进行敏感性分析, 便于不同研究结果间的比较, 使读者能够全面评价研究结果的真实性和可靠性。

研究表明, 空气污染与人群每日死亡间关系的时间序列分析中, 传统的流行病学混杂因素如吸烟、饮酒、膳食等因素并不会夸大或掩盖大气污染物浓度与人群每日死亡间的关联^[17, 18]; 因此, 控制长期和

季节趋势以及气象因素等随时间变化因素的混杂效应显得尤为重要。按照混杂因素是否可以直接测量分为直接测量混杂因素(如日平均气温和相对湿度等)和间接测量混杂因素(如健康事件发生先后次序的时间序列)。人群每日死亡人数可能受人口规模、医疗服务改善、社会 and 经济发展等长期趋势以及传染病流行等季节趋势的影响,而在生态学趋势研究中,研究者无法直接测量这些因素在不同时间维度(如日、周、月等)上的变化情况。基于长期和季节趋势随时间平稳缓慢变化的假设,研究者采用每日健康事件发生先后次序的时间序列作为替代变量,控制长期和季节趋势对空气污染与每日死亡之间关联的混杂效应。

本研究采用天津市2005—2007年的空气污染、气象及死因监测数据进行分析,且时间序列分析本质上属于生态学研究方法,不能完全排除生态学谬误的可能。基于敏感性分析和国内外研究结果比较,笔者认为天津市当前空气污染水平下,PM₁₀短期暴露与人群每日死亡,尤其是循环系统疾病和呼吸系统疾病死亡密切相关。

参 考 文 献

- [1] Xu X, Gao J, Dockery DW, et al. Air pollution and daily mortality in residential areas of Beijing, China. *Arch Environ Health*, 1994, 49(4):216-222.
- [2] Yang MJ, Pan XC. Time-series analysis of air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China. *J Environ Health*, 2008, 25(4):294-297. (in Chinese)
杨敏娟,潘小川.北京市大气污染与居民心脑血管疾病死亡的时间序列分析. *环境与健康杂志*, 2008, 25(4):294-297.
- [3] Kan H, Chen B. Air pollution and daily mortality in Shanghai: a time-series study. *Arch Environ Health*, 2003, 58(6):360-367.
- [4] Xu Z, Yu D, Jing L, et al. Air pollution and daily mortality in Shenyang, China. *Arch Environ Health*, 2000, 55(2):115-120.
- [5] Zhang YP, Zhang ZQ, Zhang XP, et al. Acute effect of air pollution on cardiovascular mortality in Taiyuan. *J Environ Health*, 2008, 25(1):11-15. (in Chinese)
张燕萍,张志琴,张晓萍,等.太原市空气污染对心脑血管疾病死亡率急性影响的Poisson广义可加模型分析. *环境与健康杂志*, 2008, 25(1):11-15.
- [6] Zhang YP, Zhang ZQ, Liu XH, et al. Concentration-response relationship between particulate air pollution and daily mortality in Taiyuan. *J Peking University (Health Sciences)*, 2007, 39(2):153-157. (in Chinese)
张燕萍,张志琴,刘旭辉,等.太原市颗粒物空气污染与人群每日死亡率的关系. *北京大学学报(医学版)*, 2007, 39(2):153-157.
- [7] Hastie TJ, Tibshirani RJ. *Generalized Additive Models*. 1ed. London: CHAPMAN & HALL/CRC, 1990.
- [8] Schwartz J. Nonparametric smoothing in the analysis of air pollution and respiratory illness. *Can J Stat*, 1994, 22(4):471-487.
- [9] Basu R, Feng WY, Ostro BD. Characterizing temperature and mortality in nine California counties. *Epidemiology*, 2008, 19(1):138-145.
- [10] Zanobetti A, Schwartz J. Temperature and mortality in nine US cities. *Epidemiology*, 2008, 19(4):563-570.
- [11] Dominici F, McDermott A, Zeger SL, et al. On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *Am J Epidemiol*, 2002, 156(3):193-203.
- [12] Dominici F, McDermott A, Daniels M, et al. Revised analyses of the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study: mortality among residents of 90 cities. *J Toxicol Environ Health A*, 2005, 68(13-14):1071-1092.
- [13] Samoli E, Peng R, Ramsay T, et al. Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHENA study. *Environ Health Perspect*, 2008, 116(11):1480-1486.
- [14] Touloumi G, Samoli E, Pipikou M, et al. Seasonal confounding in air pollution and health time-series studies: effect on air pollution effect estimates. *Stat Med*, 2006, 25(24):4164-4178.
- [15] Welty LJ, Zeger SL. Are the acute effects of particulate matter on mortality in the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study the result of inadequate control for weather and season? A sensitivity analysis using flexible distributed lag models. *Am J Epidemiol*, 2005, 162(1):80-88.
- [16] Dominici F, Wang C, Crainiceanu C, et al. Model selection and health effect estimation in environmental epidemiology. *Epidemiology*, 2008, 19(4):558-560.
- [17] Bukowski J. Do time-series studies contain residual confounding by risk factors for acute health events. *Epidemiology*, 2007, 18(6):839.
- [18] 3rd PCA, Burnett RT. Confounding in air pollution epidemiology: the broader context. *Epidemiology*, 2007, 18(4):424-426.

(收稿日期:2010-01-11)

(本文编辑:尹廉)