

天津市大气气态污染物与居民每日死亡关系的时间序列分析

张衍棠 周脉耕 贾予平 胡以松 张金良 江国虹 潘小川

【摘要】 目的 研究天津市大气气态污染物二氧化硫(SO₂)和二氧化氮(NO₂)与城区居民每日死亡间的相关性。**方法** 收集天津市城区2005—2007年大气主要污染物[SO₂、NO₂和可吸入颗粒物(PM₁₀)]日平均浓度、日平均气温和相对湿度以及每日死因别死亡人数,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的影响,探讨SO₂和NO₂日平均浓度与每日死因别死亡间的相关性,分析PM₁₀及模型参数对其相对危险度估计的影响。**结果** 大气SO₂和NO₂与人群每日非意外死亡和循环系统疾病死亡间显著相关,与呼吸系统疾病间无显著关联。SO₂浓度每升高10 μg/m³,人群非意外死亡和循环系统疾病死亡分别增加0.56%(0.23%~0.89%)和0.49%(0.06%~0.93%);NO₂浓度每升高10 μg/m³,人群非意外死亡和循环系统疾病死亡分别增加0.94%(0.17%~1.70%)和1.29%(0.29%~2.30%)。**结论** 天津市大气SO₂和NO₂污染与城区居民每日非意外死亡和循环系统疾病死亡显著相关。

【关键词】 空气污染;时间序列分析;二氧化硫;二氧化氮

Time-series analysis on the association between gaseous air pollutants and daily mortality in 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 grants from the National Natural Science Foundation of China (No. 30972433) and the National Science and Technology Support Projects for the "Eleventh Five-Year Plan" of China (No. 2007BAC16B07).

【Abstract】 Objective To study the association between sulphur dioxide, nitrogen dioxide and daily mortality in urban population from Tianjin. **Methods** Data on daily concentration of inhalable particulate matter, sulphur dioxide and nitrogen dioxide, daily mean temperature and relative humidity, daily cause-specific death counts were collected. Generalized additive models was used to explore the relationship between sulphur dioxide, nitrogen dioxide and daily mortality, after adjusting the effects of long-term and seasonal trend, weather conditions, and to analyze the potential effect of particulate matter and model parameters on relative risk estimates. **Results** Results showed that the daily concentrations of SO₂ and NO₂ were significantly associated with daily non-accidental and cardiovascular mortality but not associated with daily respiratory mortality. An increase of 10 μg/m³ in SO₂ was associated with 0.56% (95% CI: 0.23%–0.89%) non-accidental mortality, 0.49% (0.06%–0.93%) cardiovascular mortality, respectively. An increase of 10 μg/m³ in NO₂ was associated with 0.94% (95% CI: 0.17%–1.70%) non-accidental mortality, 1.29% (0.29%–2.30%) cardiovascular mortality, respectively. **Conclusion** Our findings suggested that exposure to SO₂ and NO₂ was significantly associated with daily cardiovascular and respiratory mortality in urban population in Tianjin.

【Key words】 Air pollution; Time-series analysis; Sulphur dioxide; Nitrogen dioxide

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2010.10.019

基金项目:国家自然科学基金(30972433);“十一五”国家科技支撑计划(2007BAC16B07)

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(张衍棠、张金良);中国疾病预防控制中心公共卫生监测与信息服务中心(周脉耕、胡以松);北京市疾病预防控制中心环境卫生所(贾予平);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

自 20 世纪 90 年代以来,我国广泛采用时间序列分析方法于大气污染急性暴露对各种健康效应终点的研究。目前,国内仅上海^[1]、武汉^[2]、沈阳^[3]等城市开展过气态污染物对人体健康影响的时间序列分析。本研究采用时间序列分析方法,基于广义相加模型^[4](generalized additive models)分析 2005—2007 年天津市城区大气二氧化硫(SO₂)和二氧化氮(NO₂)与城区居民每日死亡之间的关系,为环境污染治理及人群健康促进策略和措施提供依据。

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。天津市按照《全国死因登记信息网络报告工作规范》规定的一整套规范的死因报告和管理程序,进行死因数据的收集和整理。由于并非所有死亡案例均发生在医院或相关卫生医疗机构,有相当比例的案例死在家中,因此,人群死因数据的可靠性是一个关键问题。对于死亡地点为非卫生医疗机构(包括有或无医疗记录)的案例,其死因根据死因推断量表进行推断,通过询问家庭成员获得的有关信息来推断死因,该量表的准确性已经得到研究证实。死亡人数按照死亡日期进行汇总。每日死亡人数按国际疾病分类(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: I00-199)、呼吸系统疾病死亡(ICD-10 编码: J00-J99)和非意外死亡(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可吸入颗粒物(PM₁₀)、SO₂和 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 回归模型已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^[5]。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。其基本形式:

$$\log E(Y_t) = \mu_0 + s(\text{time}, \text{df.time}) + \text{dow} \\ + \beta \text{pollutant}_{t-\delta} + \sum_{i=0}^l s(\text{temp}_{t-i}, \text{df.temp}) \\ + \sum_{i=0}^l s(\text{humid}_{t-i}, \text{df.humid})$$

式中, Y_t 为观察日 t 当天的死亡人数, $E(Y_t)$ 为观察日 t 日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.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,用于控制短期波动的影响,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.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.humid 是非参数平滑函数 s 中控制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; $\text{pollutant}_{t-\delta}$ 表示第 $t-\delta$ 日污染物日平均浓度, δ 为污染物最大滞后天数; β 为模型估计的对应于污染物的回归系数: 污染物浓度每升高或降低 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 $\text{df.time}=8/\text{年}$, 共收集了 2005—2007 年 3 年的数据, 故 $\text{df.time}=24$; 根据日平均气温和相对湿度对人群死亡影响的特点选择 $\text{df.temp}=3$ 和 $\text{df.humid}=3$ 分别作为日平均气温和相对湿度的自由度^[6,7]。采用 R 2.10.1 软件中的 gam 软件包拟合广义相加模型估计模型参数, 并计算 RR 值及其 95% 可信区间(CI); 模型拟合时严格收敛标准($\text{epsilon}=1e-10$, $\text{bf.epsilon}=1e-10$, $\text{maxit}=1000$, $\text{bf.maxit}=1000$), 采用 gam.exact 函数估计回归模型系数及其标准误^[8]。

在单污染物模型的基础上, 同时纳入其他污染物拟合多污染物模型, 评价其他污染物对所关注污染物效应估计的影响; 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.time (取值为 3, 4, 5, ..., 15) 的取值, 评价不同自由度取值对 SO₂ 和 NO₂ 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 万人, 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 年间,大气 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 年平均浓度分别为 105、68 和 47 μg/m³,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)。

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}	<i>s</i>	百分位数(%)				
			最小值	P ₂₅	<i>M</i>	P ₇₅	最大值
空气质量							
PM ₁₀ (μg/m ³)	105	57	11	68	92	128	452
SO ₂ (μg/m ³)	68	54	5	33	49	88	339
NO ₂ (μg/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
每日死亡人数							
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

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的混杂因素或效应修饰因素。

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 相关系数

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. SO₂ 和 NO₂ 与疾病别每日死亡间关联的 *RR* 值估计:SO₂ 与非意外死亡和循环系统疾病死亡间的关联以 SO₂ 当日浓度(Lag0)最为显著,滞后 1 d(Lag1) 关联无统计学意义;SO₂ 与呼吸系统疾病死亡间的关联无统计学意义。本研究以当日浓度(Lag0)估计 SO₂ 与人群疾病别死亡间的 *RR* 值:SO₂ 浓度每升

高 10 μg/m³,人群每日因非意外死亡和循环系统疾病死亡的 *RR* 值分别为 1.0056 (95% *CI*: 1.0023 ~ 1.0089) 和 1.0049 (95% *CI*: 1.0006 ~ 1.0093)。见表 3。

NO₂ 与非意外死亡和循环系统疾病死亡间的关联以 NO₂ 当日浓度(Lag0)最为显著,滞后 1 d(Lag1) 关联无统计学意义。NO₂ 与呼吸系统疾病死亡间的关联无统计学意义。本研究以当日浓度(Lag0)估计 NO₂ 与人群非意外死亡和循环系统疾病死亡间的 *RR* 值:NO₂ 浓度每升高 10 μg/m³,人群每日因非意外死亡和循环系统疾病死亡的 *RR* 值分别为 1.0094 (95% *CI*: 1.0017 ~ 1.0170) 和 1.0129 (95% *CI*: 1.0029 ~ 1.0230)。见表 4。

4. 多污染物模型 SO₂ 和 NO₂ 与人群疾病别死亡关联的 *RR*:当模型中同时纳入 NO₂ 时,SO₂ 与非意外死亡间的关联强度减弱,但不改变关联的方向和统计学检验的结果;当模型中同时纳入 PM₁₀ 和 NO₂ 时,SO₂ 与非意外死亡间的关联无统计学意义。同时纳入 PM₁₀ 和(或)NO₂ 时,SO₂ 与循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间的关联无统计学意义。模型中同时纳入 SO₂ 或(和)PM₁₀ 时,NO₂ 与非意外死亡、循环系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间的关联均无统计学意义。

5. 敏感性分析:不同非参数平滑函数自由度对 SO₂ 和 NO₂ 与每日疾病别死亡关联程度估计的影响如图 1、2 所示。SO₂ 与非意外死亡和循环系统疾病间的关联相对稳健。随着非参数平滑函数自由度(自由度/年)的增大,SO₂ 和 NO₂ 每增加 10 μg/m³,*RR* 值估计逐渐减小,当自由度/年≥8 时,*RR* 值估计趋于平稳,且不会改变 *RR* 值估计方向及其统计学检验的结果(图 1a、b 和图 2a、b)。随非参数平滑函数自由度(自由度/年)的增大,SO₂ 和 NO₂ 与呼吸系统疾病死亡间的关联无统计学意义(图 1c 和图 2c)。

讨 论

本研究通过对天津市 2005—2007 年大气 SO₂ 和 NO₂ 与城区居民每日死亡之间的时间序列分析,发现 SO₂ 和 NO₂ 日平均浓度与人群每日非意外死亡和循环系统疾病死亡之间显著相关,具有统计学意义,与呼吸系统疾病死亡之间的关联无统计学意义。

宋桂香等^[9]研究了上海市大气气态污染物与居民每日死亡间的关系,研究表明大气 SO₂ 和 NO₂ 浓度与城区居民非意外死亡、心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间显著关联,SO₂ 浓度每增加 10 μg/m³,每日总死亡、心血管疾病死亡和呼吸道疾病死亡

表 3 大气 SO₂ 和 NO₂ 日平均浓度每升高 10 μg/m³ 人群疾病别死亡率的 RR 值

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
SO₂			
Lag0	1.0056(1.0023, 1.0089)	1.0049(1.0006, 1.0093)	1.0103(0.9994, 1.0214)
Lag1	1.0015(0.9984, 1.0047)	1.0002(0.9961, 1.0044)	1.0055(0.9951, 1.0160)
Lag01	1.0044(1.0005, 1.0083)	1.0031(0.9980, 1.0082)	1.0091(0.9962, 1.0222)
NO₂			
Lag0	1.0094(1.0017, 1.0170)	1.0129(1.0029, 1.0230)	1.0144(0.9896, 1.0398)
Lag1	1.0055(0.9981, 1.0130)	1.0068(0.9970, 1.0166)	1.0046(0.9805, 1.0294)
Lag01	1.0094(1.0003, 1.0186)	1.0134(1.0014, 1.0256)	1.0095(0.9797, 1.0401)

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

表 4 多污染物模型 SO₂ 和 NO₂ 日平均浓度每升高 10 μg/m³ 人群疾病别死亡率的 RR 值

模型中纳入污染物指标	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
SO₂ (Lag0)			
SO ₂ +NO ₂	1.0052(1.0007, 1.0097)	1.0022(0.9964, 1.0081)	1.0113(0.9965, 1.0264)
SO ₂ +PM ₁₀	1.0035(0.9998, 1.0071)	1.0019(0.9971, 1.0068)	1.0067(0.9945, 1.0191)
SO ₂ +NO ₂ +PM ₁₀	1.0045(1.0000, 1.0090)	1.0014(0.9955, 1.0074)	1.0107(0.9958, 1.0258)
NO₂ (Lag0)			
NO ₂ +SO ₂	1.0013(0.9911, 1.0115)	1.0094(0.9960, 1.0229)	0.9966(0.9635, 1.0307)
NO ₂ +PM ₁₀	1.0024(0.9933, 1.0115)	1.0043(0.9907, 1.0180)	0.9987(0.9689, 1.0295)
NO ₂ +SO ₂ +PM ₁₀	0.9957(0.9846, 1.0069)	1.0021(0.9873, 1.0170)	0.9829(0.9467, 1.0205)

注: 模型中 SO₂ 和 NO₂ 均为当日平均浓度, PM₁₀ 为当日和滞后 1 d 浓度均值

分别增加 1.25%、1.45% 和 1.71%; NO₂ 浓度每增加 10 μg/m³, 每日非意外死亡、心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡分别增加 1.04%、1.05% 和 1.43%。Qian 等^[2]对武汉市大气气态污染物与居民每日死亡的时间序列分析发现, NO₂ 与非意外死亡、心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡间显著相关, 而 SO₂ 与每日死亡间无显著关联。Samoli 等^[10]对欧洲 30 个城市大气 NO₂ 浓度与每日死亡间关系的时间序列分析发现, NO₂ 1 h 最高浓度每增加 10 μg/m³, 每日非意外、心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡分别增加 0.30%、0.40% 和 0.38%。Katsouyanni 等^[11]在欧洲 12 个城市开展的研究表明, SO₂ 浓度每增加 50 μg/m³, 每日非意外死亡、心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡分别增加 3.0%、4.0% 和 5.0%。

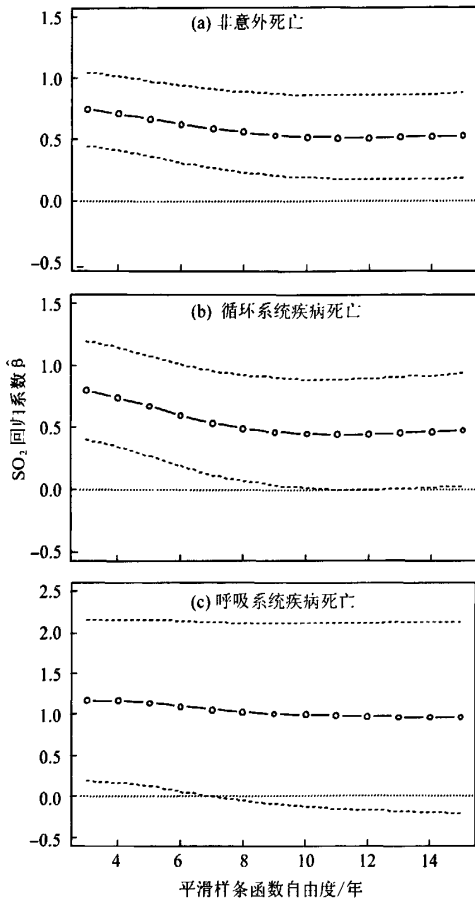
本研究未发现 SO₂ 和 NO₂ 与呼吸系统疾病间的关联; SO₂ 与非意外死亡和心血管疾病死亡间的相对危险度估计小于中国上海和欧洲研究的结果; NO₂ 与非意外死亡和心血管疾病死亡间的相对危险度估计大于欧洲研究的结果, 但小于中国上海和武汉研究的结果。不同地区大气污染水平、不同人群对大气污染的敏感性等因素可能显著影响大气污染物与

人群健康影响间相对危险度的估计, 例如, 上海市 NO₂ 污染水平明显高于天津市, 而天津市 SO₂ 污染水平略高于上海市; 我国人群年龄构成和疾病谱等与发达国家相比存在较大的差异等。不同的统计分析模型及其参数设置以及暴露指标的选择等因素也会影响相对危险度的估计。

由于大气污染物之间存在较强的相关性, 当模型中同时纳入其他污染物, 尤其是 PM₁₀ 时, SO₂ 或 NO₂ 与人群每日疾病别死亡间的关联无统计学意义。Sarnat 等^[12, 13]研究发现, 在研究 PM_{2.5} 人群健康效应的流行病学研究中, 固定监测点 PM_{2.5} 浓度与个体暴露水平间存在较强的关联, 气态污染物 SO₂ 和 NO₂ 浓度与个体暴露水平间关联程度低, 而 PM_{2.5} 与气态污染物间存在较强的相关, 因此气态污染物可能是 PM_{2.5} 对人群健康效应的替代指标, 而非其混杂因素。因此应

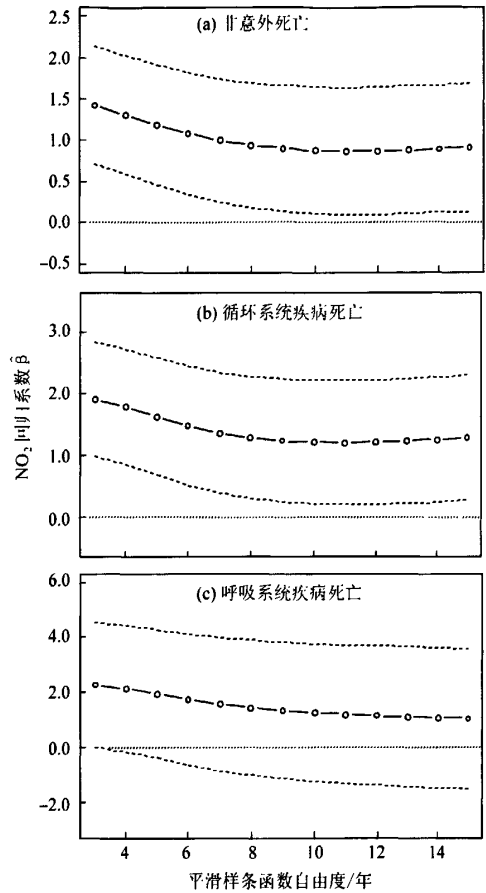
谨慎分析和解释多污染物模型中颗粒物和气态污染物的健康效应。Seaton 和 Dennekamp^[14]也认为 NO₂ 可能是颗粒物粒子数的替代指标。我们认为, 尽管现有的多污染物分析方法难以区分各污染物独立的健康效应, 尚不能完全排除气态污染物是颗粒物健康效应替代指标的可能, 但目前天津市 SO₂ 和 NO₂ 污染对人群死亡确实存在影响, 应进一步开展相关研究, 识别不同污染物的独立效应及其交互作用。

本研究存在局限性。首先, 本研究所关注的是大气气态污染物 SO₂ 和 NO₂ 浓度与每日死亡之间是否存在关联及其关联的强度, 未同时考虑气态污染物对每日死亡影响的滞后效应的结构和分布; 其次, 本研究假定气态污染物与每日死亡之间呈线性关系, 未考虑气态污染物与每日死亡之间的浓度-反应关系曲线的形状; 最后, 本研究基于天津市 2005—2007 年的常规监测数据进行分析, 不同城市空气污染类型、污染程度、人群易感性及医疗卫生服务等因素存在较大的差异, 因此研究结果不宜直接外推用于其他城市大气气态污染物对人群死亡急性影响的健康效应评价。



注:虚线表示PM₁₀效应估计的95%CI

图1 不同非参数平滑函数自由度对SO₂效应估计的影响



注:虚线表示PM₁₀效应估计的95%CI

图2 不同非参数平滑函数自由度对NO₂效应估计的影响

参 考 文 献

[1] Chen G, Song G, Jiang L, et al. Short-term effects of ambient gaseous pollutants and particulate matter on daily mortality in Shanghai, China. *J Occup Health*, 2008, 50(1):41-47.

[2] Qian Z, He Q, Lin H, et al. Short-term effects of gaseous pollutants on cause-specific mortality in Wuhan, China. *J Air Waste Manag Assoc*, 2007, 57(7):785-793.

[3] Wang HW, Pan XD. Effect of ambient air SO₂ on mortality of respiratory diseases in Shenyang. *J Environ Health*, 2006, 24(10):762-765. (in Chinese)
王慧文, 潘秀丹. 沈阳市大气二氧化硫污染对呼吸系统疾病死亡率的影响. *环境与健康杂志*, 2006, 24(10):762-765.

[4] Hastie TJ, Tibshirani RJ. *Generalized additive models*. London: CHAPMAN & HALL/CRC, 1990.

[5] Schwartz J. Nonparametric smoothing in the analysis of air pollution and respiratory illness. *Can J Stat*, 1994, 22(4):471-487.

[6] Basu R, Feng WY, Ostro BD. Characterizing temperature and mortality in nine California counties. *Epidemiology*, 2008, 19(1):138-145.

[7] Zanobetti A, Schwartz J. Temperature and mortality in nine US cities. *Epidemiology*, 2008, 19(4):563-570.

[8] 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.

[9] Song GX, Jiang LL, Chen GH, et al. A time-series study on the relationship between gaseous air pollutants and daily mortality in Shanghai. *J Environ Health*, 2006, 23(5):390-392. (in Chinese)
宋桂香, 江莉莉, 陈国海, 等. 上海市大气气态污染物与居民每日死亡关系的时间序列研究. *环境与健康杂志*, 2006, 23(5):390-392.

[10] Samoli E, Aga E, Touloumi G, et al. Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality: an analysis within the APHEA project. *Eur Respir J*, 2006, 27(6):1129-1138.

[11] Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C, et al. Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Air Pollution and Health: a European Approach*. *BMJ*, 1997, 314(7095):1658-1663.

[12] Sarnat JA, Schwartz J, Catalano PJ, et al. Gaseous pollutants in particulate matter epidemiology: confounders or surrogates. *Environ Health Perspect*, 2001, 109(10):1053-1061.

[13] Sarnat JA, Brown KW, Schwartz J, et al. Ambient gas concentrations and personal particulate matter exposures: implications for studying the health effects of particles. *Epidemiology*, 2005, 16(3):385-395.

[14] Seaton A, Dennekamp M. Hypothesis: ill health associated with low concentrations of nitrogen dioxide—an effect of ultrafine particles? *Thorax*, 2003, 58(12):1012-1015.

(收稿日期:2010-02-08)

(本文编辑:张林东)