

# 宁波市大气颗粒物与人群因心脑血管疾病死亡的时间序列研究

钱旭君 沈月平 贺天锋 许国章 谷少华

215123 苏州大学公共卫生学院流行病与卫生统计教研室(钱旭君、沈月平);

315010 宁波市疾病预防控制中心(贺天锋、许国章、谷少华)

通信作者:沈月平, Email:shenyueping@suda.edu.cn; 贺天锋, Email:hetf@nbcdc.org.cn

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2016.06.020

**【摘要】** 目的 探讨宁波市空气中粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )和 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )对人群因心脑血管疾病死亡的影响。方法 采用时间序列的广义相加模型,控制时间的长期趋势、季节效应、气象因素及“星期几效应”等混杂因素后,分析2011—2014年宁波市大气颗粒物日均浓度对人群心脑血管疾病死亡的短期效应。结果 单污染物模型分析显示,宁波市大气颗粒物浓度在滞后2 d对心脑血管疾病死亡的效应最强。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 的移动平均浓度(滞后2~3 d和滞后2~4 d)每升高 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 分别造成心脑血管疾病死亡增加0.55%(0.23%~0.87%)和0.53%(0.28%~0.78%)。多污染物模型分析显示,调整了其他污染物后, $\text{PM}_{10}$ 与人群心脑血管疾病死亡增加相关,纳入 $\text{PM}_{2.5}$ 后,心脑血管疾病死亡增加0.58%(0.09%~1.07%); $\text{PM}_{2.5}$ 与人群心脑血管疾病死亡增加无关。结论 大气颗粒物浓度升高与宁波市人群因心脑血管疾病死亡增加相关。

**【关键词】** 空气污染; 心脑血管疾病; 死亡; 时间序列研究

**基金项目:**浙江省医药卫生项目(2014KYA202); 宁波市科技计划项目(2014C50027); 宁波市科技局创新团队项目(2012B82018-10); 宁波市科技惠民项目(2015C50056)

**Relationship between particulate matters and cardio-cerebrovascular mortality in Ningbo: a time-series study** Qian Xujun, Shen Yueping, He Tianfeng, Xu Guozhang, Gu Shaohua

Department of Epidemiology and Health Statistics, School of Public Health, Soochow University, Suzhou 215123, China (Qian XJ, Shen YP); Ningbo Municipal Center for Disease Control and Prevention, Ningbo 315010, China (He TF, Xu GZ, Gu SH)

Corresponding authors: Shen Yueping, Email: shenyueping@suda.edu.cn; He Tianfeng, Email: hetf@nbcdc.org.cn

**【Abstract】 Objective** To explore the short-term effect of particulate matters with an aerodynamic diameter of less than or equal to  $10 \mu\text{g}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) and aerodynamic diameter of less than or equal to  $2.5 \mu\text{g}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) on cardio-cerebrovascular mortality in Ningbo city. **Methods** Daily cardio-cerebrovascular mortality data from 2011 to 2014 in Ningbo city were collected and the time series study using a semi-parametric generalized additive model were used to evaluate the relationship between the mortality of cardio-cerebrovascular disease and particulate matters after adjustment for the long-term trend of death, weather conditions, “days of the week” and other confounding factors. **Results** In single-pollutant model, the short-term effects of particulate matter on cardio-cerebrovascular mortality was strongest in lagged 2 days in Ningbo city, and an increase of  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in moving average concentrations (lagged 2-3 days and lagged 2-4 days) of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  could increase the cardio-cerebrovascular mortality by 0.55% (0.23%-0.87%) and 0.53% (0.28%-0.78%), respectively. In multi-pollutant models,  $\text{PM}_{10}$  did remain robust after being adjusted for  $\text{PM}_{2.5}$  with 0.58% (0.09%-1.07%) increase in cardio-cerebrovascular mortality. The effect of  $\text{PM}_{2.5}$  had no statistical significance after being adjusted for other co-pollutants. **Conclusion** These findings suggested that the concentrations of ambient particulate matters were associated with an increased risk of daily cardio-cerebrovascular mortality in Ningbo city.

**【Key words】** Particulate matter; Cardio-cerebrovascular; Mortality; Time-series study

**Fund programs:** Medical Technology Program Foundation of Zhejiang (2014KYA202); Science and Technology Program of Ningbo (2014C50027); Program of Innovative Research Team of Ningbo Science and Technology Bureau (2012B82018-10); Science and Technology Program for Public Wellbeing of Ningbo (2015C50056)

大气污染物主要由固态颗粒物和气态污染物两大类组成,其中颗粒物污染对人群健康的危害尤为严重<sup>[1]</sup>,短期暴露于颗粒物污染对健康的不利影响包括增加死亡率和急诊门诊量、加重呼吸系统疾病症状及降低心肺功能等<sup>[2]</sup>。早期的研究多集中于颗粒物对呼吸系统的影响,但近年来关于颗粒物对心脑血管系统影响的研究也受到关注<sup>[3]</sup>。空气中粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )污染在我国的健康危险因素中排第四位,2010 年我国约有 124 万居民过早死亡与  $\text{PM}_{2.5}$  污染相关,其中 61 万为脑血管病,28 万为缺血性心脏病<sup>[4]</sup>。近 20 年来,心脑血管疾病已成为我国居民的首位死因<sup>[5]</sup>,因此有必要研究心脑血管疾病死亡与颗粒物污染之间的关系。目前国内空气污染对健康影响的相关研究主要集中在北京、天津、广州等大城市<sup>[6-9]</sup>,其中大部分研究的污染物为二氧化氮( $\text{NO}_2$ )及二氧化硫( $\text{SO}_2$ ),对颗粒物研究较少,尤其是  $\text{PM}_{2.5}$ ,但已有研究显示  $\text{PM}_{2.5}$  对人体健康的影响可能更大<sup>[10]</sup>。宁波市地处长江三角洲地带,由于临港重化工业和能源基地的特色定位,大气污染问题日益受到关注,但关于颗粒物的相关健康危害研究较少。因此,本研究采用基于半参数广义相加模型(Generalized Additive Model, GAM)的时间序列分析,定量评估宁波市大气颗粒物与居民每日心脑血管疾病死亡之间的关系,为进一步制定有效的环境法规、保护易感人群提供依据。

## 资料与方法

### 1. 资料来源:

(1)居民死亡资料:2011 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日宁波市居民死亡监测数据来源于中国 CDC 死因登记报告信息系统,具体信息包括性别、出生日期、死亡日期、根本死因等。根本死因分类按照《国际疾病分类》第十版(ICD-10)编码,疾病变量为心脑血管疾病死亡(I00~I99),主要包括冠心病、慢性心衰及脑血管病死亡等。

(2)环境监测资料:2011 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日环境监测资料来源于宁波市环境监测中心,包括  $\text{PM}_{2.5}$ 、粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )、 $\text{NO}_2$ 及  $\text{SO}_2$ 的日平均浓度。

(3)气象监测资料:2011 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日气象资料来源于宁波市气象局,包括日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、日平均相对湿度(%)、日平均气压(hpa)和日平均风速(km/h)。

### 2. 研究方法:

(1)模型原理:采用基于半参数的 GAM 对数据进行分析,该模型是对传统广义线性模型的拓展。对于总人口来说,居民每日心脑血管疾病死亡是小概率事件,其实际分布近似泊松(Poisson)分布,本研究回归模型采用 Poisson 分布,基本公式:

$$\log[E(Y_i)] = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{j=1}^m f_j(Z_j)$$

式中, $Y_i$ 为观察日  $t$  的当天心脑血管疾病死亡人数,对于每个  $t$ ,服从总体均数为  $E(Y_i)$  的 Poisson 分布; $E$  为观察日  $t$  的当天心脑血管疾病死亡人数期望值; $\alpha$  为截距; $X_i$  为对应变产生线性影响的自变量(颗粒物浓度指标); $\beta$  为回归模型估计的指示变量系数; $F_j(Z_j)$  为自然样条函数; $Z_j$  为对应变产生非线性影响的变量(时间、气象因素等)。

模型以心脑血管疾病死亡为因变量,颗粒物浓度变量为线性自变量,时间、气象因素等为非线性自变量。对于非线性自变量,采用自然样条函数进行拟合,选择时间样条函数的自由度为 7/年<sup>[11]</sup>;气象因素中平均气温采用 6 为自由度,其他包括相对湿度、气压和风速均采用 3 为自由度<sup>[12-16]</sup>;用哑变量的形式控制“星期几”效应的影响。在基础模型中先引入当天的颗粒物浓度进入单污染物模型,之后再分别引入其他污染物进行多污染物模型分析,考虑到污染物对人体危害可能的滞后效应<sup>[17]</sup>,选取分析当天(滞后 0 d)至前 5 天(滞后 5 d)大气单污染物对心脑血管疾病死亡的影响,并用相对危险度( $RR$ )和超额危险度( $ER$ )评价危害的大小, $ER = (RR - 1) \times 100\%$ 。

(2)敏感性分析:为了检验模型的稳定性,本研究一次最多在模型中同时引入两种颗粒物浓度变量进行拟合,并比较单污染物模型和多污染物模型分析结果的差异。使用赤池信息量准则(Akaike's Information Criterion, AIC)选择最优模型,AIC 值越小,模型拟合优度越高<sup>[9]</sup>。建立模型后用偏自相关函数(PACF)的残差自相关考察残差序列是否呈随机平稳白噪声分布以检验模型的拟合优度<sup>[13,18]</sup>。

统计学分析采用 R3.1.0 软件的 GAM 模块,空气污染和气象指标之间的相关性分析采用 Spearman 相关,检验水准为 0.05。

## 结 果

1. 一般情况:2011—2014 年宁波市空气颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  的日平均浓度分别为  $58.31(7 \sim 457) \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $90.94(13 \sim 605) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,心脑血管疾病总死亡 46 362 例,平均每日心脑血管疾病死亡  $32(8 \sim 74)$  例。

平均气温为17.55(-1.60~34.40)℃,平均相对湿度为73.05%(28.00%~95.00%),平均气压为1 015.70(986.6~1 037.5)hpa、风速为11.05(1~40)km/h。

人群心脑血管疾病死亡数呈现明显的季节性波动,夏秋季较少,冬春季较多,总体变化不大。颗粒物PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度同样存在季节波动性,冬春季颗粒物浓度较高而夏秋季较低(图1)。

2. 心脑血管疾病死亡与颗粒物浓度及气象因素的相关分析:颗粒物PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度同心脑血管疾病死亡间均呈正相关( $r_s$ 值分别为0.307和0.278),气象要素中,日均气温、日均相对湿度、日均风速与心脑血管疾病每日死亡数呈负相关( $r_s$ 值分别为-0.547、-0.117和-0.081),日均气压与心脑血管疾病每日死亡数呈正相关( $r_s=0.495$ ),颗粒物PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>间呈正相关且关联性较强( $r_s=0.935$ ),大气颗粒物和气象因素之间呈现不同程度的相关关系, $r_s$ 值均有统计学意义( $P<0.05$ ),见表1。

3. 单污染物模型分析:调整日均气温、日均相对湿度、日均气压、日均风速、长期趋势和星期几效应后,大气颗粒物污染对心脑血管疾病死亡的影响分析显示,PM<sub>2.5</sub>日均浓度每增加10 μg/m<sup>3</sup>,对滞后2~3 d心脑血管疾病死亡影响有统计学意义,且滞后2 d效应最大( $ER=0.46%$ ,95% CI: 0.18%~0.74%);PM<sub>10</sub>日均浓度每增加10 μg/m<sup>3</sup>,对滞后2~4 d心脑

血管疾病死亡影响有统计学意义,且滞后2 d的效应最大( $ER=0.41%$ ,95% CI: 0.21%~0.62%)。分别以滞后2~3 d的浓度均值估计PM<sub>2.5</sub>、以滞后2~4 d的浓度均值估计PM<sub>10</sub>与人群心脑血管疾病死亡间的关联,结果显示,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>日平均浓度每升高10 μg/m<sup>3</sup>,人群心脑血管疾病死亡的ER值分别为0.55%(0.23%~0.87%)和0.53%(0.28%~0.78%),见表2。两种颗粒物对心脑血管疾病死亡的滞后作用在达到高峰后随着时间的延长而逐渐减小。见图2,3。

4. 多污染物模型:在单污染物模型的基础上,分别纳入SO<sub>2</sub>及NO<sub>2</sub>,拟合多污染物模型显示,PM<sub>2.5</sub>纳入其他污染物后ER值无统计学意义。PM<sub>10</sub>纳入SO<sub>2</sub>后ER值无统计学意义,PM<sub>10</sub>纳入PM<sub>2.5</sub>及NO<sub>2</sub>后ER值有所变化,均有统计学意义。见表3。

讨 论

本研究是对2011年1月1日至2014年12月31日宁波市的大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度与居民心脑血管疾病死亡间的时间序列分析,结果显示,宁波市大气颗粒物浓度升高与人群因心脑血管疾病死亡增加相关。单污染物模型显示,PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>均对滞后第二天心脑血管疾病死亡影响的效应最大,多污染物模型中PM<sub>2.5</sub>调整其他污染物因素后与心脑血管

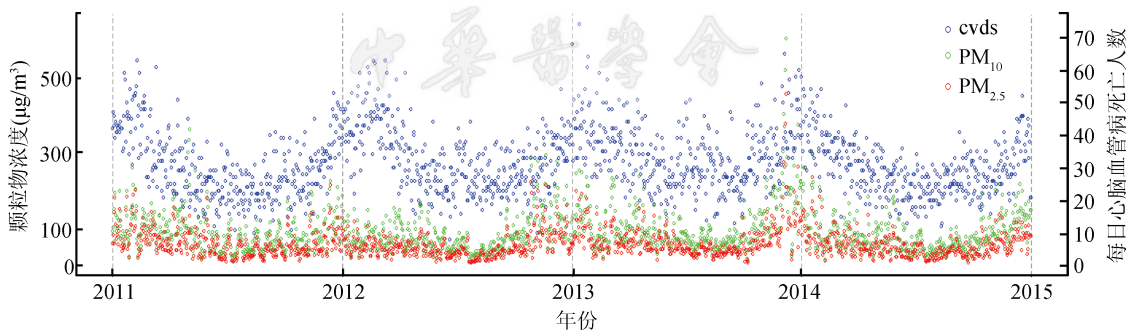


图1 2011—2014年宁波市心脑血管疾病每日死亡例数和颗粒物浓度变化趋势

表1 2011—2014年宁波市每日大气污染物及气象要素与心脑血管疾病死亡的相关分析

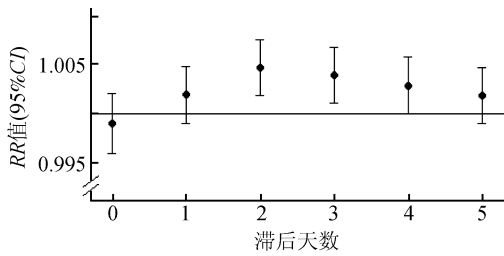
指 标	$r_s$ 值	大气颗粒物		气象因素			
		PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	平均气温(℃)	相对湿度(%)	气压(hpa)	风速(km/h)
大气颗粒物(μg/m <sup>3</sup> )							
PM <sub>2.5</sub>	0.307 <sup>a</sup>	1.000					
PM <sub>10</sub>	0.278 <sup>a</sup>	0.935 <sup>a</sup>	1.000				
气象因素							
平均气温(℃)	-0.547 <sup>a</sup>	-0.490 <sup>a</sup>	-0.442 <sup>a</sup>	1.000			
相对湿度(%)	-0.117 <sup>a</sup>	-0.240 <sup>a</sup>	-0.397 <sup>a</sup>	0.091 <sup>a</sup>	1.000		
气压(hpa)	0.495 <sup>a</sup>	0.448 <sup>a</sup>	0.456 <sup>a</sup>	-0.897 <sup>a</sup>	-0.219 <sup>a</sup>	1.000	
风速(km/h)	-0.081 <sup>a</sup>	-0.300 <sup>a</sup>	-0.312 <sup>a</sup>	0.117 <sup>a</sup>	-0.094 <sup>a</sup>	-0.132 <sup>a</sup>	1.000

注:Spearman相关性检验,<sup>a</sup> $P<0.05$ (双侧)

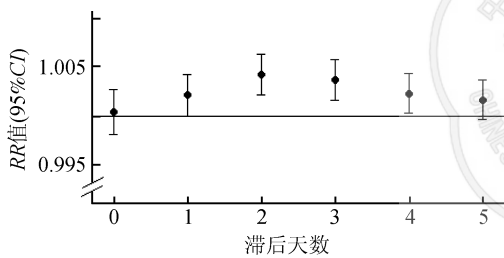
**表2** 不同滞后时间颗粒物浓度每升高 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  人群心脑血管疾病死亡影响的ER值(%)

滞后天数	ER值(95%CI)	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
0	-0.10(-0.41 ~ 0.20)	0.03(-0.19 ~ 0.26)
1	0.19(-0.10 ~ 0.47)	0.21(-0.02 ~ 0.41)
2	0.46(0.18 ~ 0.74)	0.41(0.21 ~ 0.62)
3	0.38(0.10 ~ 0.66)	0.36(0.16 ~ 0.56)
4	0.28(-0.02 ~ 0.56)	0.22(0.02 ~ 0.43)
5	0.18(-0.10 ~ 0.46)	0.16(-0.04 ~ 0.36)
移动平均值	0.55(0.23 ~ 0.87) <sup>a</sup>	0.53(0.28 ~ 0.78) <sup>b</sup>

注: <sup>a</sup> 滞后2~3 d污染物浓度均值, <sup>b</sup> 滞后2~4 d污染物浓度均值



**图2** 宁波市PM<sub>2.5</sub>浓度升高 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  对人群心脑血管疾病死亡的影响



**图3** 宁波市PM<sub>10</sub>浓度升高 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  对人群心脑血管疾病死亡的影响

**表3** 多污染物模型拟合后颗粒物浓度每升高 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  对人群心脑血管疾病死亡影响的ER值(%)

污染物	调整因素	ER值(95%CI)
PM <sub>2.5</sub> <sup>a</sup>	-	0.55(0.23 ~ 0.87)
	PM <sub>10</sub>	-0.07(-0.68 ~ 0.54)
	SO <sub>2</sub>	-0.22(-0.62 ~ 0.18)
PM <sub>10</sub> <sup>b</sup>	NO <sub>2</sub>	0.20(-0.19 ~ 0.60)
	-	0.53(0.28 ~ 0.78)
	PM <sub>2.5</sub>	0.58(0.09 ~ 1.07)
	SO <sub>2</sub>	-0.09(-0.42 ~ 0.24)
	NO <sub>2</sub>	0.42(0.10 ~ 0.73)

注: <sup>a</sup> 滞后2~3 d污染物浓度均值, <sup>b</sup> 滞后2~4 d污染物浓度均值

同污染物之间可能存在共线性,从而使污染物效应产生变化。

目前国际上开展的颗粒物污染与心脑血管疾病死亡的短期效应研究,主要采用时间序列和病例交叉分析方法,多个研究显示颗粒物浓度升高与心脑血管疾病死亡增加显著相关,如美国一项研究显示滞后2 d PM<sub>2.5</sub>日均浓度每增加 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  导致心脑血管疾病死亡增加 0.85%<sup>[20]</sup>;欧洲地区的研究显示,滞后0~1 d PM<sub>10</sub>日均浓度每升高 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,心血管死亡增加 0.76%<sup>[21]</sup>。国内北京、天津市的研究结果也显示,PM<sub>10</sub>日均浓度每增加 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  引起的心脑血管疾病死亡分别增加 0.4%和 0.6%<sup>[6, 8]</sup>;西安市的一项研究显示,滞后1~2 d PM<sub>2.5</sub>日均浓度每增加 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  引起的心脑血管疾病死亡增加 0.27%<sup>[22]</sup>。这些研究均提示短期颗粒物浓度升高与人群每日心血管死亡的上升相关。比较这些研究结果可以发现颗粒物与心脑血管疾病死亡的关联度总体相对较弱,且国内效应值低于国外欧美等发达国家,相关的Meta分析与这一结果一致<sup>[23]</sup>。本研究显示宁波市大气颗粒物日均浓度超过国家《环境空气质量标准》一级标准限值,对心脑血管疾病死亡的效应低于国外研究,而与国内研究基本一致,这可能与国内外人群年龄结构不同、统计模型参数不同、研究时间、污染源类型不同及研究方法和暴露-反应曲线的不一致等有关。

本研究结果可为宁波地区大气颗粒物污染治理相关政策的制定提供科学依据,同时为不同地区间研究结果的横向比较提供参考。但由于时间序列分析本质上属于生态学研究,而且颗粒物成分在地区间也存在差异等原因,结论外推时需谨慎。

参 考 文 献

- [1] Pope III CA, Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. J Air Waste Manage, 2006, 56 (6): 709-742. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
- [2] Brunekreef B, Holgate ST. Air pollution and health [J]. The Lancet, 2002, 360 (9341): 1233-1242. DOI: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8.
- [3] Chen R, Li Y, Ma Y, et al. Coarse particles and mortality in three Chinese cities: the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES) [J]. Sci Total Environ, 2011, 409 (23): 4934-4938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.08.058.
- [4] Yang G, Wang Y, Zeng Y, et al. Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. The Lancet, 2013, 381 (9882): 1987-2015. DOI: 10.1016/S0140-6736(13)61097-1.
- [5] He J, Gu D, Wu X, et al. Major causes of death among men and women in China [J]. N Engl J Med, 2005, 353 (11): 1124-1134.

疾病死亡间的关联无统计学意义,这一结果与杭州市的研究结果类似<sup>[19]</sup>,而PM<sub>10</sub>除调整SO<sub>2</sub>后与心脑血管疾病死亡间的关联无统计学意义,调整其他污染物后关联强度有所变化,但关联仍有统计学意义。这可能因为单污染物模型中,不考虑污染物之间的相互影响,因此,PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>效应相对稳定,但在多污染模型中,由于污染物间的相关系数较高,不

- DOI: 10.1056/NEJMs050467.
- [6] 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[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(4): 294-297. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5914.2008.04.004.
- Yang MJ, Pan XC. Time-series Analysis of Air Pollution and Cardiovascular Mortality in Beijing, China[J]. J Environ Health, 2008, 25(4): 294-297. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5914.2008.04.004.
- [7] 殷文军, 彭晓武, 宋世震, 等. 广州市空气污染与城区居民心脑血管疾病死亡的时间序列分析[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(6): 521-525.
- Yin WJ, Peng XW, Song SZ, et al. Air Pollution and the Cerebro Cardio-vascular Diseases Mortality of Population in Guangzhou: a Time-series Analysis [J]. J Environ Health, 2012, 29(6): 521-525.
- [8] 张衍桑, 周脉耕, 贾予平, 等. 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[J]. 中华流行病学杂志, 2010, 31(5): 544-548. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2010.05.016.
- Zhang YS, Zhou MG, Jia YP, et al. Time-series analysis of association between inhalable particulate matter and daily mortality among urban residents in Tianjin[J]. Chin J Epidemiol, 2010, 31(5): 544-548. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2010.05.016.
- [9] 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[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(5): 390-393.
- 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]. J Environ Health, 2006, 23(5): 390-393.
- [10] Sun Q, Wang A, Jin X, et al. Long-term Air Pollution Exposure and Acceleration of Atherosclerosis and Vascular Inflammation in an Animal Model [J]. JAMA, 2005, 294(23): 3003-3010. DOI: 10.1109/JQE.2002.800994.
- [11] Peng RD, Dominici F, Louis TA. Model choice in time series studies of air pollution and mortality[J]. J Royal Statistical Society A (Statistics in Society), 2006, 169(2): 179-203. DOI: 10.1111/j.1467-985X.2006.00410.x.
- [12] Samet JM, Dominici F, Zeger SL, et al. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part I: Methods and methodologic issues [J]. Research report (Health Effects Institute), 2000 (94 Pt 1): 5-14; discussion 75-84.
- [13] Zhao A, Chen R, Kuang X, et al. Ambient Air Pollution and Daily Outpatient Visits for Cardiac Arrhythmia in Shanghai, China[J]. J Epidemiol, 2014, 24(4): 321-326. DOI: 10.2188/jea.JE20140030.
- [14] Yang C, Chen A, Chen R, et al. Acute effect of ambient air pollution on heart failure in Guangzhou, China[J]. Int J Cardiol, 2014, 177(2): 436-441. DOI: 10.1016/j.ijcard.2014.09.003.
- [15] Shah ASV, Langrish JP, Nair H, et al. Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis [J]. The Lancet, 2013, 382(9897): 1039-1048. DOI: 10.1016/S0140-6736(13)60898-3.
- [16] Mustafić H, Jabre P, Caussin C, et al. Main air pollutants and myocardial infarction: a systematic review and meta-analysis[J]. JAMA, 2012, 307(7): 713-721. DOI: 10.1001/jama.2012.126.
- [17] Pope CA, Renlund DG, Kfoury AG, et al. Relation of heart failure hospitalization to exposure to fine particulate air pollution [J]. Am J Cardiol, 2008, 102(9): 1230-1234. DOI: 10.1016/j.amjcard.2008.06.044.
- [18] 陈林利, 汤军克, 董英, 等. 广义相加模型在环境因素健康效应分析中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2006, 19(6): 569-570.
- Chen LL, Tang JK, Dong Y, et al. The Application of Generalized Additive Models Analysis on the Environmental Effect of Human Health[J]. J Math Med, 2006, 19(6): 569-570. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4337.2006.06.004.
- [19] 任艳军, 李秀央, 金明娟, 等. 大气颗粒物污染与心血管疾病死亡的病例交叉研究[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 657-660. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6923.2007.05.018.
- Ren YJ, Li XY, Jin MJ, et al. The case-crossover studies of air particulate matter pollution and cardiovascular disease death[J]. Chin Environ Sci, 2007, 27(5): 657-660. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6923.2007.05.018.
- [20] Zanobetti A, Schwartz J. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: a national analysis[J]. Environ Health Perspect, 2009, 117(6): 898-903. DOI: 10.1289/ehp.0800108.
- [21] Analitis A, Katsouyanni K, Dimakopoulou K, et al. Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality [J]. Epidemiology, 2006, 17(2): 230-233. DOI: 10.1097/01.ede.0000199439.57655.6b.
- [22] Huang W, Cao J, Tao Y, et al. Seasonal variation of chemical species associated with short-term mortality effects of PM<sub>2.5</sub> in Xi'an, a central city in China [J]. Am J Epidemiol, 2012, 175(6): 556-566. DOI: 10.1093/aje/kwr342.
- [23] 陈慧, 王建生, 尚琪. 大气颗粒物污染对人群心脑血管疾病死亡急性效应的Meta分析[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(5): 417-421.
- Chen H, Wang JS, Shang Q. Acute effect of particulate air pollution on cardio-cerebral-vascular mortality: a meta-analysis [J]. J Environ Health, 2013, 30(5): 417-421.

(收稿日期: 2015-12-03)

(本文编辑: 万玉立)