

北京市空气质量指数与结核病发病关系的时间序列研究

刘梦阳 张英杰 马圆 李琪欢 刘悦 冯巍 王肖南 李卫民 郭秀花

100069 北京,首都医科大学公共卫生学院流行病与卫生统计学系,北京市临床流行病学重点实验室(刘梦阳、马圆、李琪欢、刘悦、冯巍、王肖南、郭秀花); 102206 北京,中国疾病预防控制中心网络和信息安全办公室(张英杰); 101149 北京,首都医科大学附属北京胸科医院国家结核病临床实验室(李卫民)

通信作者:郭秀花, Email: statguo@ccmu.edu.cn

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.12.006

【摘要】 **目的** 分析北京市空气质量指数(AQI)对结核病发病的影响效应,为结核病的防控提供理论依据。**方法** 采用广义可加模型(GAM)对北京市2014年1月1日至2016年11月9日的AQI与结核病发病例数进行回归分析,同时控制气象因素、时间趋势等混杂因素的影响。**结果** 研究期间共收集北京市具有明确发病日期的结核病病例14 533例,排除儿童36例,共14 497例纳入研究。其中,男性9 513例,女性4 984例,成年人(15~59岁)11 290例,老年人(≥ 60 岁)3 207例。GAM最佳单日滞后效应结果显示,AQI每增加10,总体、男性、女性及成年人结核病发病例数增加百分比分别为0.85%(95%CI: 0.26%~1.44%)、0.83%(95%CI: 0.24%~1.42%)、0.93%(95%CI: 0.24%~1.62%)及0.88%(95%CI: 0.29%~1.46%)。单日效应的最佳滞后期除男性为16 d(lag16)以外其余均为15 d(lag15)。最佳累积滞后效应结果显示:AQI每增加10,总体、男性、女性及成年人结核病发病例数增加百分比分别为1.92%(95%CI: 0.23%~3.16%)、1.94%(95%CI: 0.15%~3.72%)、2.04%(95%CI: 0.10%~3.97%)及2.00%(95%CI: 0.30%~3.69%),累积效应的最佳滞后期分别为累积滞后17 d(lag0_17)、18 d(lag0_18)、16 d(lag0_16)和17 d(lag0_17)。AQI增加对老年人结核病发病例数影响无统计学意义。**结论** 北京市AQI对结核病发病例数的影响存在正相关关系,AQI对不同性别和不同年龄组的结核病发病例数的影响存在一定差别。

【关键词】 结核病; 空气质量指数; 广义可加模型

基金项目:北京市自然科学基金(Z160002)

Series study on the relationship between air quality index and tuberculosis incidence in Beijing

Liu Mengyang, Zhang Yingjie, Ma Yuan, Li Qihuan, Liu Yue, Feng Wei, Wang Xiaonan, Li Weimin, Guo Xiuhua

Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Capital Medical University, Beijing Municipal Key Laboratory of Clinical Epidemiology, Beijing 100069, China (Liu MY, Ma Y, Li QH, Liu Y, Feng W, Wang XN, Guo XH); Network and Information Security Office, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China (Zhang YJ); National Tuberculosis Clinical Laboratory of China, Beijing Chest Hospital, Capital Medical University, Beijing 101149, China (Li WM)
Corresponding author: Guo Xiuhua, Email: statguo@ccmu.edu.cn

【Abstract】 **Objective** To analyze the effect of air quality index (AQI) on the incidence of tuberculosis (TB) in Beijing, and to provide evidence for setting up a better program regarding prevention and control of tuberculosis. **Methods** Generalized additive model (GAM) was used to analyze the association between AQI and the incidence of tuberculosis in Beijing, from January 1, 2014 to November 9, 2016. Confounding factors as meteorological conditions and time trends were under control. **Results** In Beijing, a total of 14 533 TB cases with definite dates of onset were collected during the study period, with 36 children excluded from the study. Finally, 14 497 cases were included in the study, including 9 513 men and 4 984 women, with 11 290 adults (15–59 years old) and 3 207 elderly (≥ 60 years old). Data from the optimal single-day lag effect of GAM showed that, with every 10 increase of AQI, the percent of increase on the onsets of overall, male, female and adult;

tuberculosis cases were 0.85% (95% CI: 0.26%–1.44%), 0.83% (95% CI: 0.24%–1.42%), 0.93% (95% CI: 0.24%–1.62%) and 0.88% (95% CI: 0.29%–1.46%), respectively. The optimal lag time of the single-day effects were 15 days (lag15), but 16 days (lag16) for male. The optimal cumulative lag effect showed that with every 10 AQI increase, the percent of increase on the onsets of overall, male, female and adult tuberculosis cases were 1.92% (95% CI: 0.23%–3.16%), 1.94% (95% CI: 0.15%–3.72%), 2.04% (95% CI: 0.10%–3.97%) and 2.00% (95% CI: 0.30%–3.69%), respectively, with the optimal lag time of cumulative delayed effects as 17 days (lag0_17), 18 days (lag0_18), 16 days (lag0_16) and 17 days (lag0_17), respectively. However, there were no statistical significances noticed in the elderly cases.

Conclusion There was a positive correlation between AQI and the number of TB cases in Beijing, and the effects of AQI on the number of TB cases in different genders and age groups were different.

【Key words】 Tuberculosis; Air quality index; Generalized additive model

Fund program: Beijing Municipal Natural Science Foundation (Z160002)

2015 年北京市结核病报告发病率为 31.97/10 万, 远低于我国结核病发病率平均水平 (63.42/10 万), 属于低疫情地区^[1]。但与美国纽约 (6.80/10 万)^[2]和日本东京 (16.10/10 万)^[3]等其他国际化都市相比, 北京市结核病发病率仍处于相对较高的水平。WHO 旨在 2035 年在全球范围内消灭结核病, 结核病患病率降低为 10/10 万^[4]。1990 年至今, 北京市因为北京谱系结核分枝杆菌为优势菌、外来人口大量涌入和结核菌耐药等问题, 患病率下降非常缓慢。已有研究证实, 结核病的发病与经济条件、个人行为生活方式及文化状况等多种传统影响因素密切相关^[5]。近年来, 随着空气污染的加重, 研究者开始把目光转向大气污染物对于结核病的影响上。来自美国、韩国及我国不同地区的研究分别显示: 一氧化碳 (CO)、二氧化硫 (SO₂)、二氧化氮 (NO₂)、细颗粒物 (PM_{2.5}) 等不同污染物均可增加结核病的发病风险^[6-9]。但是以上研究均侧重于探索污染物对结核病发病的长期效应和慢性效应, 研究的时间尺度多以年为单位, 较为粗糙。在更为细致的时间尺度内, 探索空气污染在较短时间内对于结核病发病影响的研究较为少见。空气质量指数 (air quality index, AQI) 为评价各污染物污染状况的综合指标, 北京市是我国大气污染相对严重的城市之一, 为探究空气污染对结核病发病更为细致的影响, 本研究采用基于广义可加模型 (generalized additive model, GAM) 的时间序列分析方法分析北京市 2014 年 1 月 1 日至 2016 年 11 月 9 日 AQI 与每日结核病发病例数的相关关系, 为环境污染治理和结核病防控策略提供依据。

资料与方法

1. 资料及来源:

(1) 结核病资料: 来源于中国 CDC 公共卫生科学数据库 (<http://www.phsciencedata.cn/>)。该数据

库收集了自 2005 年传染病网络直报以来的全部结核病报告数据, 主要包括按地区、年龄、性别、职业、病种分别统计的发病例数、发病率、死亡人数、死亡率等统计汇总数据及相关原始个案数据。本研究从北京市网络直报结核资料中收集了发病日期在 2014 年 1 月 1 日至 2016 年 11 月 9 日的所有原始个案数据, 分别统计每天的总发病例数以及按年龄、性别分层后的发病例数。

(2) 气象资料: 来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 的中国地面气象站逐小时观测资料。中国气象数据网由国家气象信息中心负责建设与管理, 主要包括收集、处理、存储和检索全国和全球范围内的气象数据及其产品。中国地面气象站逐小时观测资料是我国气象资料的重要组成部分, 包括各气象站点的逐小时温度、气压、相对湿度、水气压、风速以及降水等气象数据。本研究选取研究期间内北京市各站点的逐小时温度和相对湿度数据, 经算数平均计算得到整个北京市的日平均温度和日平均相对湿度。

(3) AQI 数据: 来源于北京市环境保护监测中心 (<http://www.bjmemc.com.cn/>)。从 2012 年 10 月开始, 北京市环境保护局建立了 35 个空气污染监测站点, 分散于北京的各个区县, 并实时发布各个污染物的小时浓度数据和日均浓度数据。监测指标包括 PM_{2.5}、CO、NO₂、SO₂、可吸入颗粒物 (inhalable particulate matter, PM₁₀)、臭氧 (O₃) 及 AQI。本研究收集了研究期间内北京市各监测点的 AQI 日均数据, 经算数平均得到整个北京市的 AQI 日均值。

AQI 是基于其余 6 种污染物计算得到的数据, 其计算主要分为以下步骤^[10]:

① 对照国家环保部发布的《环境空气质量指数技术规定 (试行)》(HJ633-2012) (《规定》) 中列出的分级浓度限值分别计算各污染物 p 的空气质量分指数 (individual air quality index, IAQIp):

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo}$$

式中, C_p 指污染物项目 p 的质量浓度值; BP_{Hi} 指《规定》中与 C_p 相近的污染物浓度限值的高位值; BP_{Lo} 指与 C_p 相近的污染物浓度限值的低位值; $IAQI_{Hi}$ 指《规定》中与 BP_{Hi} 对应的空气质量分指数; $IAQI_{Lo}$ 指与 BP_{Lo} 对应的空气质量分指数。污染物项目 p 包括 $PM_{2.5}$ 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 、 PM_{10} 、 O_3 6种污染物。

②选择 $IAQI_p$ 的最大值确定为 AQI , 即:

$$AQI = \max \{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\}$$

式中, n 指污染物项目。

③PC为 AQI 每增加10, 引起的结核病发病例数的增加百分比。

2. 统计学分析: 采用Excel 2013和SAS 9.4软件进行数据存储与整理, 采用R 3.42软件中的“mgcv”软件包进行GAM统计分析。每日结核病发病例数近似服从Poisson分布, 且结核病发病例数与温度、湿度等的关系通常呈非线性^[11-12]。因此, 本研究采用GAM对北京市2014年1月1日至2016年11月9日的结核病发病例数与 AQI 进行回归分析, 同时控制气象因素、时间趋势、节假日效应和星期几效应等混杂因素的影响。为避免数据的过离散问题, 建模时将quasi-Poisson分布与GAM相连接^[13]。具体建模策略:

(1)为控制每日结核病发病例数的长期趋势和季节趋势, 将自由度 (degree of freedom, df) 为7的时间的立方样条函数纳入模型^[14-15], 以处理每日结核发病数据在时间轴上的非线性趋势和序列相关性。

(2)在模型中引入“星期几效应”(day of the week, DOW)的指示变量, 以排除每日结核病发病例数在一周内的波动趋势。

(3)在模型中引入“节假日”(Holiday)的指示变量, 以控制可能存在的“节假日效应”, 即由于节假日的出现, 导致结核病的波动。

(4)在模型中加入温度和相对湿度2个变量, 以控制气象因素对 AQI 与结核病关联性研究的混杂影响。据以往文献报道, 采用 df 均为3的立方样条平滑函数来控制温度、湿度非线性的混杂影响^[16]。

$$\log[E(Y_i)] = \alpha + \beta X_i + s_{(时间, df)} + s_{(温度, df)} + s_{(湿度, df)} + DOW_i + Holiday_i$$

式中, Y_i 指观察日 i 当天结核病发病例数; $E(Y_i)$ 指观察日 i 当天结核病期望发病例数; α 指残差; β 指回归系数; X_i 指观察日 i 的 AQI 值; $s_{(时间, df)}$ 指时间样条平滑函数; $s_{(温度, df)}$ 指温度样条平滑函数; $s_{(湿度, df)}$ 指湿度样条

平滑函数; DOW _{i} 指“星期几效应”指示变量; Holiday _{i} 指“节假日”指示变量。检验水准 $\alpha = 0.05$, 双侧检验。

结果

1. 北京市结核病发病例数、气象因素和空气污染的描述性统计分析: 共收集北京市发病日期在2014年1月1日至2016年11月9日的结核病病例14 533例, 排除儿童病例36例, 共14 497例纳入研究。其中男性9 513例, 女性4 984例, 性别比为1.9:1; 15~59岁成年人病例11 290例, ≥ 60 岁老年人病例3 207例。

结核病发病例数、日平均气温、日平均相对湿度和 AQI 的分布特征见表1。各变量经正态性检验均不服从正态分布。每日结核病发病例数为0~77例, 发病例数 $M = 12$ 。温度、湿度和 AQI 日均分布存在较明显的长期趋势和季节波动。

表1 各研究变量日均值分布特征

变量	最小值	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值	$P_{75} \sim P_{25}$
空气质量指数	20	58	90	142	440	83
结核病发病例数						
男性	0	5	8	11	50	6
女性	0	2	4	6	30	4
15~59岁	0	6	9	13	61	7
≥ 60 岁	0	1	2	4	20	3
气象因素						
温度($^{\circ}C$)	-16.82	1.73	14.75	22.64	30.45	20.91
湿度(%)	11.30	41.54	56.13	71.40	95.43	29.86

2. AQI 对结核病发病的影响效应分析:

(1)调整时间的长期趋势和季节效应以及气象变量等因素后, AQI 对总结核病发病例数的影响效应见表2。 AQI 对总结核病发病例数的影响在滞后天数为14~16 d ($lag14 \sim lag16$)以及累积滞后天数为16~18 d ($lag0_{16} \sim lag0_{18}$)时, 差异有统计学意义。根据效应最大值原则, AQI 的单日效应最佳滞后期为 $lag15$, 此时 $PC = 0.85\%$ ($95\% CI: 0.26\% \sim 1.44\%$); 而累积效应的最佳滞后期为 $lag0_{17}$, 此时 $PC = 1.92\%$ ($95\% CI: 0.23\% \sim 3.16\%$)。

表2 北京市空气质量指数对总结核病发病例数的影响

滞后天数/累积滞后天数	PC(%)	95%CI	Z值	P值
lag14	0.60	0.01~1.19	1.992	0.047
lag15	0.85	0.26~1.44	2.835	0.005
lag16	0.71	0.13~1.29	2.399	0.017
lag0 ₁₆	1.88	0.23~3.53	2.239	0.025
lag0 ₁₇	1.92	0.23~3.16	2.224	0.026
lag0 ₁₈	1.89	0.15~3.63	2.128	0.034

注: PC为 AQI 每增加10, 引起的结核病发病例数的增加百分比

(2)AQI 对不同性别结核病发病例数的影响效应见表 3。AQI 对男性结核病发病例数的影响效应与总结核病发病例数影响效应类似,均在 lag14 ~ lag16 以及 lag0_16 ~ lag0_18 时差异有统计学意义。但男性单日效应的最佳滞后期为 lag16,此时 PC=0.83%(95%CI:0.24%~1.42%),累积效应的最佳滞后期为 lag0_18,此时 PC=1.94%(95%CI:0.15%~3.72%),与结核病发病例数的最佳滞后期相比均增加 1 d。而 AQI 对女性的影响仅在 lag15 和 lag0_16 时差异有统计学意义,此时 PC 分别为 0.93%(95%CI:0.24%~1.62%)和 2.04%(95%CI:0.10%~3.97%)。

(3)AQI 对不同年龄分层结核病发病例数的影响效应见表 4。AQI 与成年结核病发病例数在 lag14 ~ lag16 以及 lag0_15 ~ lag0_19 时存在关联,且差异有统计学意义。单日效应的最佳滞后期为 lag15,此时 PC=0.88%(95%CI:0.29%~1.46%),累积效应的最佳滞后期为 lag0_17,此时 PC=2.00%(95%CI:0.30%~3.69%)。而 AQI 增加对老年结核病发病例数的影响无统计学意义。

讨 论

2014 年 1 月 1 日至 2016 年 11 月 9 日北京市日均 AQI 对结核病发病例数的影响存在正相关关系。单日效应的最佳滞后期为 lag15,此时 PC=0.85%(95%CI:0.26%~1.44%);累积效应的最佳滞后期为

lag0_17,此时 PC=1.92%(95%CI:0.23%~3.16%)。国内外类似研究也发现空气污染是结核病发病的危险因素。来自美国加利福尼亚州的一项巢式病例对照研究观察到 CO 和 NO₂ 与肺结核发病呈正相关关系^[6];韩国首尔的一项研究则发现长期暴露于 SO₂ 可增加男性结核病的发病风险,SO₂ 浓度每增加一个四分位数,男性结核病发病率可增加 7%(RR=1.07,95%CI:1.03~1.12)^[7];来自我国台湾地区的研究发现包括 CO、NO₂ 等在内的多种交通污染物可增加活动性肺结核的发病风险^[8];在武汉地区开展的相关研究也发现,PM_{2.5} 是结核病发病的危险因素^[9]。但以上研究多侧重于探讨长期暴露于大气污染物对结核病发病的慢性影响效应,而本研究运用 GAM 探讨了北京市 AQI 对日结核病发病例数的影响效应,发现北京市 AQI 与结核病发病存在正相关关系,从而为制定空气污染防控策略及结核病的防控措施提供了理论依据。

分层分析结果显示,AQI 对不同性别和不同年龄组结核病发病例数的影响存在差别。AQI 对男性影响的单日效应最佳滞后期为 lag16,累积效应最佳滞后期为 lag0_18。AQI 对女性的影响仅在 lag15 和 lag0_16 时差异有统计学意义,短于男性最佳滞后期,提示女性可能对空气污染更为敏感。AQI 对成年人结核病发病例数影响的单日效应最佳滞后期为 lag15,累积效应最佳滞后期为 lag0_17。而 AQI 增加与老年结核病发病未发现相关,这与

与呼吸系统疾病及心脑血管疾病等其他疾病的研究结果不一致^[17-18],可能与结核病这一疾病本身的特点有关。结核病多发于青壮年,且多为重体力劳动者^[19]。空气污染严重时,重体力劳动者不得不继续参加户外工作,而老年人可能会通过减少户外活动来降低空气污染物对自身的危害。此外,不同类型人群单日效应和累积效应的最佳滞后期都 > 2 周,超过呼吸系统疾病和心脑血管疾病等其他疾病的滞后时间,可能与结核病较长的潜伏期有关^[20]。

本研究存在不足。首先,AQI 是反映常规监测的 6 种空气污染物污染状况的综合指标,各个污染物具体对结核病发病有何影响有待进一步研究。其次,本研究分析结核病这一呼

表 3 北京市空气质量指数对不同性别结核病发病例数的影响

滞后天数/ 累积滞后 天数	男性				女性			
	PC(%)	95%CI	Z 值	P 值	PC(%)	95%CI	Z 值	P 值
lag14	0.61	0.01 ~ 1.22	1.981	0.048	0.58	-0.12 ~ 1.27	1.626	0.104
lag15	0.81	0.20 ~ 1.41	2.617	0.009	0.93	0.24 ~ 1.62	2.653	0.008
lag16	0.83	0.24 ~ 1.42	2.739	0.006	0.48	-0.21 ~ 1.17	1.372	0.171
lag0_16	1.81	0.11 ~ 3.50	2.092	0.037	2.04	0.10 ~ 3.97	2.059	0.040
lag0_17	1.91	0.17 ~ 3.65	2.155	0.031	1.95	-0.04 ~ 3.94	1.915	0.056
lag0_18	1.94	0.15 ~ 3.72	2.124	0.034	1.82	-0.24 ~ 3.87	1.731	0.084

注:PC 为 AQI 每增加 10,引起的结核病发病例数增加的百分比

表 4 北京市空气质量指数对不同年龄结核病发病例数的影响

滞后天数/ 累积滞后 天数	成年人(15 ~ 59 岁)				老年人(≥60 岁)			
	PC(%)	95%CI	Z 值	P 值	PC(%)	95%CI	Z 值	P 值
lag14	0.61	0.02 ~ 1.20	2.011	0.045	0.58	-0.19 ~ 1.36	1.471	0.141
lag15	0.88	0.29 ~ 1.46	2.933	0.003	0.74	-0.04 ~ 1.52	1.857	0.064
lag16	0.76	0.18 ~ 1.34	2.584	0.010	0.52	-0.25 ~ 1.29	1.331	0.184
lag0_15	1.64	0.02 ~ 3.26	1.986	0.047	1.65	-0.43 ~ 3.72	1.555	0.120
lag0_16	1.95	0.30 ~ 3.60	2.312	0.021	1.84	-0.28 ~ 3.95	1.701	0.089
lag0_17	2.00	0.30 ~ 3.69	2.308	0.021	1.81	-0.37 ~ 3.98	1.630	0.103
lag0_18	1.99	0.24 ~ 3.73	2.227	0.026	1.71	-0.54 ~ 3.95	1.491	0.136
lag0_19	1.91	0.11 ~ 3.71	2.077	0.038	1.40	-0.91 ~ 3.72	1.186	0.236

注:PC 为 AQI 每增加 10,引起的结核病发病例数增加的百分比

吸系统传染病,但在模型建立时并未排除流感流行以及暴发等混杂因素的影响。并且,监测的结核数据存在一定的漏报率以及发病日期的缺失值,均在一定程度上影响研究结果的准确性。此外,北京市不同区域空气污染情况存在较大差别,如位于南部的城市发展新城区因聚集大量工业基地,比位于北部的生态涵养区污染严重^[21]。不同程度的污染状况对人群的健康影响效应也会存在差别,因而将所有区域综合在一起分析会对研究结果产生较大的影响。提示后续研究可通过控制更多的混杂因素、收集更加完善的监测数据以及进行更加细致的分区来提高研究结果的准确性。

综上所述,2014年1月1日至2016年11月9日,北京市AQI对结核病发病例数的影响存在正相关关系,AQI对不同性别和不同年龄组的结核病发病例数的影响存在一定差别。因此,在防治策略和控制措施基础上,可尝试通过降低大气污染进而在一定程度上控制结核病。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] 公共卫生科学数据中心. 肺结核分地区数据[EB/OL]. (2017-06-30) [2018-06-10]. <http://www.phsciencedata.cn/Share/>.
- [2] Centers for Disease Control and Prevention. Reported tuberculosis in the United States, 2016[R]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention, 2016.
- [3] Izumi K, Ohkado A, Uchimura K, et al. Detection of tuberculosis infection hotspots using activity spaces based spatial approach in an urban Tokyo, from 2003 to 2011[J]. PLoS One, 2015, 10(9): e0138831. DOI: 10.1371/journal.pone.0138831.
- [4] World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2017[R]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [5] 王晓兰, 张小霞, 丁佩佩, 等. 结核病传播影响因素综述[J]. 中国药物依赖性杂志, 2015, 24(2): 98-103. DOI: 10.13936/j.cnki.cjdd1992.2015.02.005.
Wang XL, Zhang XX, Ding PP, et al. Review of factors affecting the spread of tuberculosis[J]. Chin J Drug Depend, 2015, 24(2): 98-103. DOI: 10.13936/j.cnki.cjdd1992.2015.02.005.
- [6] Smith GS, van den Eeden SK, Garcia C, et al. Air pollution and pulmonary tuberculosis: a nested case-control study among members of a northern California health plan[J]. Environ Health Perspect, 2016, 124(6): 761-768. DOI: 10.1289/ehp.1408166.
- [7] Hwang SS, Kang S, Lee JY, et al. Impact of outdoor air pollution on the incidence of tuberculosis in the Seoul metropolitan area, South Korea[J]. Korean J Intern Med, 2014, 29(2): 183-190. DOI: 10.3904/kjim.2014.29.2.183.
- [8] Lai TC, Chiang CY, Wu CF, et al. Ambient air pollution and risk of tuberculosis: a cohort study[J]. Occup Environ Med, 2016, 73(1): 56-61. DOI: 10.1136/oemed-2015-102995.
- [9] Yang XB, Duan QH, Wang JJ, et al. Seasonal variation of newly notified pulmonary tuberculosis cases from 2004 to 2013 in Wuhan, China[J]. PLoS One, 2014, 9(10): e108369. DOI: 10.1371/journal.pone.0108369.
- [10] 高庆先, 刘俊蓉, 李文涛, 等. 中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1141-1147. DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.04.001.
Gao QX, Liu JR, Li WT, et al. Comparative analysis and inspiration of air quality index between China and America[J]. Environ Sci, 2015, 36(4): 1141-1147. DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.04.001.
- [11] 赵飞, 王黎霞, 成诗明, 等. 中国2008—2010年结核病空间分布特征分析[J]. 中华流行病学杂志, 2013, 34(2): 168-172. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2013.02.015.
Zhao F, Wang LX, Cheng SM, et al. Analysis on the spatial clustering of tuberculosis based on provincial level in China from 2008 to 2010[J]. Chin J Epidemiol, 2013, 34(2): 168-172. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2013.02.015.
- [12] 李娟. 基于GAM模型大气污染及气象因素的健康效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
Li J. Research on the effects of meteorological factors and air pollutants on health based on the GAM model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [13] Peng RD, Dominici F, Louis TA. Model choice in time series studies of air pollution and mortality[J]. J Royal Stat Soc, 2005, 169(2): 179-203. DOI: 10.1111/j.1467-985X.2006.00410.x.
- [14] Samet JM, Zeger SL, Dominici F, et al. The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part II: morbidity and mortality from air pollution in the United States[R]. Cambridge MA: Health Effects Institute, 2000.
- [15] Dominici F, Sheppard L, Clyde M. Health effects of air pollution: a statistical review[J]. Int Stat Rev, 2003, 71(2): 243-276. DOI: 10.1111/j.1751-5823.2003.tb00195.x.
- [16] Tian LW, Ho KF, Wang T, et al. Ambient carbon monoxide and the risk of hospitalization due to chronic obstructive pulmonary disease[J]. Am J Epidemiol, 2014, 180(12): 1159-1167. DOI: 10.1093/aje/kwu248.
- [17] Xu Q, Li X, Wang S, et al. Fine particulate air pollution and hospital emergency room visits for respiratory disease in urban areas in Beijing, China, in 2013[J]. PLoS One, 2016, 11(4): e0153099. DOI: 10.1371/journal.pone.0153099.
- [18] Xu Q, Wang S, Guo YM, et al. Acute exposure to fine particulate matter and cardiovascular hospital emergency room visits in Beijing, China[J]. Environ Pollut, 2017, 220: 317-327. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.09.065.
- [19] 王宇, 王文杰, 刘霞, 等. 全国第五次结核病流行病学抽样调查资料汇编[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2011.
Wang Y, Wang WJ, Liu X, et al. The fifth compilation of data on sampling survey of tuberculosis epidemiology in China[M]. Beijing: Military Medical Science Press, 2011.
- [20] Ge EJ, Fan M, Qiu H, et al. Ambient sulfur dioxide levels associated with reduced risk of initial outpatient visits for tuberculosis: a population based time series analysis[J]. Environ Pollut, 2017, 228: 408-415. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.05.051.
- [21] Huang FF, Li X, Wang C, et al. PM_{2.5} Spatiotemporal variations and the relationship with meteorological factors during 2013-2014 in Beijing, China[J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0141642. DOI: 10.1371/journal.pone.0141642.

(收稿日期: 2018-01-15)

(本文编辑: 斗智)