

# 中国 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与传染病发病率的相关性分析

罗源<sup>1</sup>, 颀丽<sup>2</sup>, 陈思宇<sup>1</sup>, 臧洲<sup>3</sup>, 吴东佑<sup>1</sup>

1. 兰州大学 大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

2. 甘肃省人民医院, 兰州 730000

3. 北京师范大学, 北京 100875

**摘要:** 基于 2004—2016 年的全球地表 PM<sub>2.5</sub> 数据和中国 31 个省级行政区 (不含港澳台地区) 的传染病年发病率数据, 探究了 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与 9 种传染病 (百日咳、猩红热、流脑、麻疹、肺结核、风疹、流行性腮腺炎、急性出血性结膜炎以及流行性感冒) 发病率的相关关系。研究发现: PM<sub>2.5</sub> 质量浓度整体呈现东高西低、北高南低的空间分布特征。EOF 分析显示浓度变化有着北增南减、东增西减的趋势。同时, PM<sub>2.5</sub> 浓度在北方的变化程度要远大于南方, 在欠发达地区的变化程度要大于发达地区, 但年际变化特征并不明显。选择了三类地区分析 PM<sub>2.5</sub> 和传染病发病率的关系, 发现在华北和东北地区与 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著相关的传染病类型高达 5 种, 在所有传染病中, 百日咳与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的相关性最为显著。最后针对三类地区, 通过线性拟合得到了部分传染病发病率与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的关系式, 指出 PM<sub>2.5</sub> 浓度每上升 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 与 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著正相关的传染病发病率会出现不同程度的上升。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub> 浓度; 传染病发病率; Pearson 相关

## The correlation analysis of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations with infectious diseases in China

LUO Yuan<sup>1</sup>, XIE Li<sup>2</sup>, CHEN Siyu<sup>1</sup>, ZANG Zhou<sup>3</sup>, WU Dongyou<sup>1</sup>

1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China

2. Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, China

3. Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract: Background, aim, and scope** In the past two decades, voluminous epidemiological studies and clinical literature have documented the harm of air pollution to human health, among which PM<sub>2.5</sub> has been widely considered as the main pollutant in the air. PM<sub>2.5</sub> is closely related to various kinds of epidemics. The incidence rate, mortality rate, pollutant emission, and health care resources display significant spatial heterogeneity across China. The impact of PM<sub>2.5</sub> on human health shows large discrepancies among different regions. Therefore, in view of the spatial difference in disease incidence rate in China, high-resolution correlation analysis is conducted using data of PM<sub>2.5</sub> and infectious diseases in the sub-region scale. **Materials and methods** In this study, global

收稿日期: 2019-08-06; 录用日期: 2019-12-21; 网络出版: 2019-12-28

Received Date: 2019-08-06; Accepted Date: 2019-12-21; Online first: 2019-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41775003, 91837103)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41775003, 91837103)

通信作者: 颀丽, E-mail: Lixie\_lzu@163.com

Corresponding Author: XIE Li, E-mail: Lixie\_lzu@163.com

引用格式: 罗源, 颀丽, 陈思宇, 等. 2020. 中国 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与传染病发病率的相关性分析 [J]. 地球环境学报, 11(3): 235–244.

Citation: Luo Y, Xie L, Chen S Y, et al. 2020. The correlation analysis of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations with infectious diseases in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(3): 235–244.

surface  $PM_{2.5}$  data from 2004 to 2016 and the annual incidence of infectious diseases in 31 provincial-level administrative regions in China (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan) are used. The correlation between  $PM_{2.5}$  concentration and the incidence of 9 kinds of infectious diseases is explored by using Theil-Sen slope estimation and empirical orthogonal function (EOF) analysis. In this study, the correlation between the incidence of some infectious diseases and  $PM_{2.5}$  concentration was obtained by the linear fitting. **Results** In China, the  $PM_{2.5}$  mass concentration in the east is higher than the west, while the concentration in the north is higher compared with the concentration in the south. EOF analysis reveals that the concentration rises in northern and eastern China, whereas in southern and western China it shows a decreasing trend from 2004 to 2016. **Discussion** This study defines three areas with high incidence of infectious diseases and  $PM_{2.5}$  mass concentrations, and finds that up to 5 types of infectious diseases are significantly correlated with  $PM_{2.5}$  concentration in northern China and northeastern China. Of all the infectious diseases, the incidence of pertussis shows the strongest correlation with  $PM_{2.5}$  concentrations. It is pointed out that for every  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  increase in  $PM_{2.5}$  concentration, the incidence of infectious diseases that are significantly positively correlated with  $PM_{2.5}$  concentration will increase to varying degrees. **Conclusions** The areas with close correlation between the incidence of infectious diseases and  $PM_{2.5}$  concentration are mainly concentrated in the areas with high  $PM_{2.5}$  concentration, among which the incidence of pertussis has the most significant correlation with  $PM_{2.5}$ . The rise in  $PM_{2.5}$  concentration can potentially lead to an increase in the incidence of diseases, thus posing a certain impact on human health. **Recommendations and perspectives** In future research, the meteorological factors, economic development level, and population density can be taken into account to improve the reliability and accuracy of the study.

**Key words:** the concentration of  $PM_{2.5}$ ; the morbidity of infectious diseases; Pearson correlation

在过去的二十年中,越来越多的流行病学研究和临床文献记录了环境空气污染对人类健康的危害,其中  $PM_{2.5}$  已被广泛认为是空气中的主要污染物 (Pope and Dockery, 2006; Atkinson et al, 2015)。  $PM_{2.5}$  又称细颗粒物,是指空气动力学当量直径小于或等于  $2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物,可长期悬浮于空气中 (孙志豪和崔燕平, 2013)。与较粗糙的空气传播颗粒相比,  $PM_{2.5}$  具有较小的粒径,因此它可以通过支气管影响肺部的气体交换,导致身体缺氧,从而对人体健康产生很大的影响 (Ole et al, 2013)。环境污染物尤其是  $PM_{2.5}$  与各类流行病有着密切关系,流行病学研究发现,在  $PM_{2.5}$  环境中停留的时间周期与心脏病、中风、心血管疾病和肺癌等疾病引起的过早死亡之间存在强烈的因果关系,长期暴露于  $PM_{2.5}$  环境中会大大降低预期寿命,  $PM_{2.5}$  是全球过早死亡的第六大总体风险因素 (赵珂等, 2011; Breitner et al, 2011; Apte et al, 2015)。此外,重金属和微生物能够被  $PM_{2.5}$  吸附直接进入血液循环,从而对人体呼吸和心血管系统造成损害 (谢杨等, 2016)。环境中每增加  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$   $PM_{2.5}$ , 全因死亡率将会增加

10%, 心血管疾病死亡率将增长 3%—76% (Brook et al, 2010)。

近年来,高速的城市化进程和经济快速发展使得中国地区的颗粒物污染十分严重,  $PM_{2.5}$  污染天数非常高,有 13 亿以上的居民接触超过世界卫生组织 (WHO) 空气质量指南 (AQG) 标准的  $PM_{2.5}$  (Song et al, 2017), 环境颗粒物污染也成为中国居民过早死亡的第四大风险因素 (Yang et al, 2013)。高浓度的  $PM_{2.5}$  暴露对心血管疾病死亡和中国易感人群均有负面影响,会造成比发达国家更为严重的心血管疾病和敏感人群负担 (Chen et al, 2018)。同时也会导致一些疾病 (如胰腺癌) 的死亡率上升 (Wang et al, 2018)。2013 年在中国 74 个主要城市中,  $PM_{2.5}$  带来大约 32% 的报告死亡率,死亡率为 1.9%, 其中心血管、呼吸和肺癌死亡占报告死亡人数的 20%, 死亡率为 1.2% (Fang et al, 2016)。

考虑到  $PM_{2.5}$  对人类健康评估、社会经济及生态环境发展 (谢杨等, 2016) 等带来的影响,各个国家尤其是  $PM_{2.5}$  污染严重的发展中国家开始高度重视  $PM_{2.5}$  的治理问题,积极展开对  $PM_{2.5}$  的观

测。卫星遥感观测与地面站点数据的结合为提供较长时间段的PM<sub>2.5</sub>再分析数据建立了良好基础,这些高分辨率的数据也被广泛用于研究PM<sub>2.5</sub>对疾病的作用和影响。Han et al (2017)利用了PM<sub>2.5</sub>再分析数据研究了中国肺癌发病率与PM<sub>2.5</sub>浓度之间的关系,认为它们之间存在着显著的正相关关系;Liang et al (2019)利用MODIS卫星反演的PM<sub>2.5</sub>数据,发现长期暴露于PM<sub>2.5</sub>环境中将会提高中国糖尿病的发病率。

过去关于PM<sub>2.5</sub>对健康影响的研究通常只关注于较大区域范围,而且使用的数据与全球模型也相对粗略,无法得到局地污染区域中更为准确的PM<sub>2.5</sub>浓度,从而导致与过早死亡相关的空气污染被低估(Conibear et al, 2018)。在中国,疾病的发病率、死亡率、各地区经济发展导致的污染物排放以及医疗水平存在显著的区域差异,导致PM<sub>2.5</sub>对疾病的影响与所研究地区紧密相关(Chen et al, 2017)。因此本文针对中国地区疾病发病率的空间差异,把PM<sub>2.5</sub>与多种传染病进一步细分至各省市地区来进行高分辨率的相关性分析。

## 1 数据与方法

### 1.1 PM<sub>2.5</sub>浓度数据

Atmospheric Composition Analysis Group提供的全球地表PM<sub>2.5</sub>数据采用了来自NASA MODIS, MISR和SeaWIFS仪器的气溶胶光学厚度(AOD)反演数据,进一步与GEOS-Chem化学传输模型相结合来估算地表PM<sub>2.5</sub>浓度,并使用地理加权回归(GWR)与全球地面观测PM<sub>2.5</sub>进行对比较正,具有较高的分辨率和精度。本次研究采用全球地表PM<sub>2.5</sub>的V4.GL.02.NoGWR产品([http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page\\_id=140/](http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140/)),该产品去除了海盐以及沙尘的影响,空间分辨率为0.1°,时间分辨率为1年;选用的时间范围为2004—2016年,合计共13年数据。

### 1.2 传染病发病数据

传染病发病率来自中国公共卫生科学数据中心(<http://www.phsciencedata.cn/Share/index.jsp/>)。该中心提供呼吸道传染病、丙类传染病等七大类主要传染性疾病的疾病数据。选择2004—2016年九类具有逐年完整数据的常见传染性疾病(百日咳、猩红热、流脑、麻疹、肺结核、风疹、流行性腮腺炎、急性出血性结膜炎以及流行性感冒)

作为研究对象,数据内容为所研究疾病在中国31个省级行政区(不含港澳台地区)的逐年发病率。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 经验正交函数分析(EOF)方法

EOF分析是一种分析矩阵中数据结构特征,提取主要数据特征量的方法。EOF分析将要素场矩阵(数据通常处理成距平形式)进行时空分解,其中矩阵的特征向量对应了空间模态(空间特征向量),能够在一定程度上反映所分析要素场的空间分布特点;矩阵的主成分为时间系数,反映了对应空间模态的时间变化趋势(Martinez et al, 2013; 李祥等, 2016)。具体算法为:

(1) 对于数据矩阵 $X_{m \times n}$ , 计算它与转置矩阵 $X^T$ 的叉乘, 即:  $C_{m \times n} = \frac{1}{n} X \times X^T$ , 称 $C$ 为协方差矩阵。

(2) 计算 $C$ 的特征值( $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ )与特征向量 $V_{m \times m}$ 。特征向量与特征值具有 $C_{m \times n} \times V_{m \times m} = V_{m \times m} \times E_{m \times m}$ 的关系, 其中:  $E_{m \times m}$ 为 $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ 的对角矩阵, 且 $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ 从大到小排列。每一个非零特征值 $\lambda_i$ 对应的特征向量值称为第 $i$ 个EOF模态。

(3) 投影EOF于原始资料矩阵上, 即得到空间特征向量所对应的时间系数 $PC_{m \times n} = V_{m \times m}^T \times X_{m \times n}$ ,  $PC$ 的每一行是每个空间模态所对应的时间系数。

(4) 矩阵 $X$ 的特征值大小同时也反映了其对应特征向量 $\lambda$ 的大小。 $\lambda$ 越大, 其对应模态对总方差的贡献越大。第 $i$ 个模态的方差贡献表示为:

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \times 100\%。$$

(5) 采用North检验进行显著性检验。95%置信度水平下, 特征值的误差如下:  $\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\frac{2}{N^*}}$ , 其中:  $N^*$ 为有效自由度。当前后相邻的两个特征值 $\lambda$ 之间的误差有重叠时, 将认为空间模态没有通过显著性检验。

### 1.3.2 Theil-Sen斜率估算

PM<sub>2.5</sub>浓度变化趋势的大小以Theil-Sen斜率估算(Theil, 1950; Sen, 1968)进行描述。对于某一时间序列 $X$ , 统计量被定义为:  $\beta = \text{median}(\frac{X_i - X_j}{i - j})$ ,  $\forall j < i$ , 其中:  $1 < j < i < n$ ,  $\beta$ 为整个样本所确定的斜率的中位数, 因而能够避免观测中出现的极端

值对结果的影响 (Xu et al, 2003)。

### 1.3.3 Pearson 相关分析

采用 SPSS 软件中的 Pearson 相关进行数据的相关性分析。该相关性分析用于测量  $X$  和  $Y$  之间的线性关系, 相关系数  $r$  介于  $-1$  和  $1$  之间。绝对值越大,  $X$  和  $Y$  之间的相关性越强。相关系数  $r$  定义

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

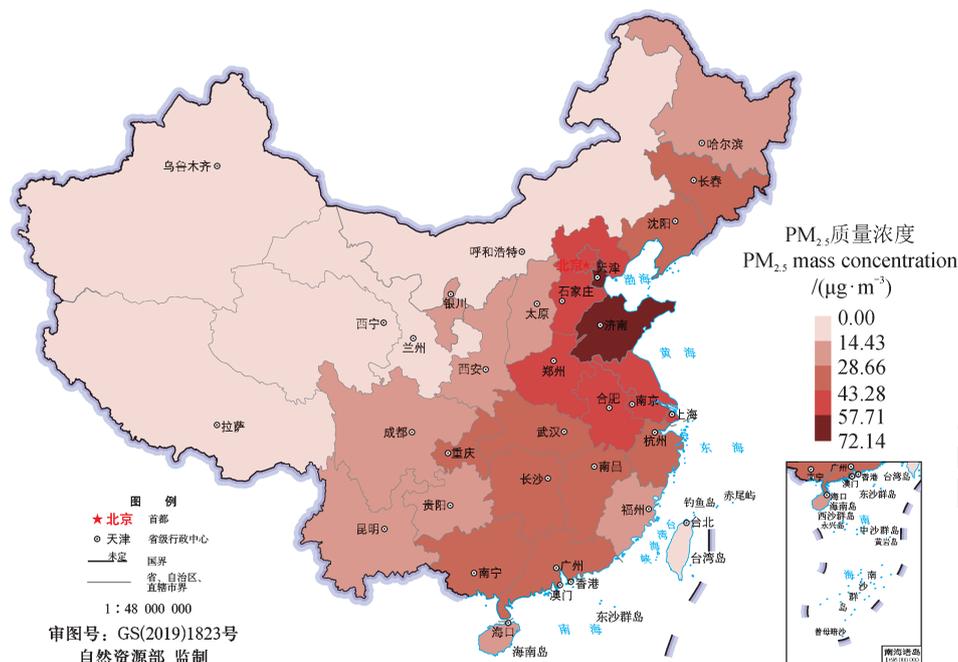
。当  $r > 0$  时,  $X$  与  $Y$  呈正相关; 当  $r < 0$  时,  $X$  与  $Y$  呈负相关; 当  $r = 0$  时,  $X$  与  $Y$  呈非线性相关。因而根据  $r$  值, 可以判断  $PM_{2.5}$  浓度与传染病发病率之间是否具有

统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 2004—2016 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度的分布特征

2004—2016 年  $PM_{2.5}$  质量浓度空间分布特征如图 1 所示。由图 1 可知:  $PM_{2.5}$  质量浓度的高值区主要集中在中国东部, 尤其是京津冀地区和华东地区, 最高浓度甚至可以达到  $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。相反, 西部的  $PM_{2.5}$  质量浓度则相对较低, 尤其是新疆、西藏、青海等地区,  $PM_{2.5}$  年浓度基本保持在  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下。 $PM_{2.5}$  质量浓度总体上呈东高西低、北高南低的分布特征。



本图基于自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载的审图号为 GS(2019)1823 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 各省 2004 年至 2016 年的  $PM_{2.5}$  年平均质量浓度

Fig.1 The annual average mass concentration of  $PM_{2.5}$  in each province from 2004 to 2016

### 2.2 2004—2016 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化趋势以及检验

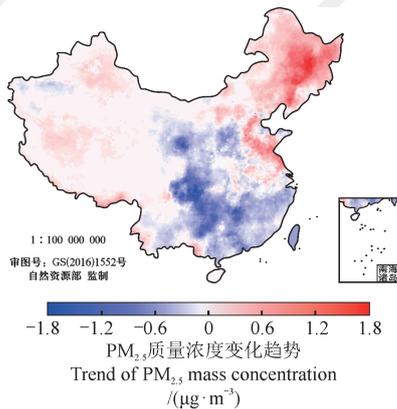
对 2004—2016 年的  $PM_{2.5}$  质量浓度进行 Theil-Sen 斜率估算, 反映了  $PM_{2.5}$  质量浓度的变化趋势 (图 2)。其中: 当区域的值大于 0 时, 序列呈显著的上升趋势, 而当区域的值小于 0 时, 序列呈显著的下降趋势。2004—2016 年,  $PM_{2.5}$  质量浓度在中国东北地区有着显著的上升趋势, 在华北地区也略有上升; 而川渝地区以及华南地区的  $PM_{2.5}$  浓度则出现了显著的下降趋势。总体而言,

13 年间  $PM_{2.5}$  质量浓度在中国东北、华北地区有显著增加, 在南方地区则有明显减少, 呈现北增南减的变化特征。

### 2.3 2004—2016 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 EOF 分析

图 3 是 2004—2016 年  $PM_{2.5}$  EOF 分析结果的空间模态, 表征了  $PM_{2.5}$  质量浓度变化的空间分布。EOF 分解的特征向量可以反映  $PM_{2.5}$  浓度的空间分布, 特征向量的数值大小反映了  $PM_{2.5}$  浓度变化的强度。第一特征向量的方差贡献率为 38.6%, 远高于其他模态, 表明它是中国  $PM_{2.5}$  浓度变化的

主要空间分布特征。该分布反映中国的东北和西北地区模态一的特征值均为正值,表明这两个区域PM<sub>2.5</sub>浓度变化具有高度的一致性,即:浓度变化趋势均增加或减少。正位相的高值中心位于东北地区,表明该区域的PM<sub>2.5</sub>浓度变化量较大;负位相的低值中心则位于西南地区。就全国而言,北方的PM<sub>2.5</sub>浓度变化程度要远大于南方。



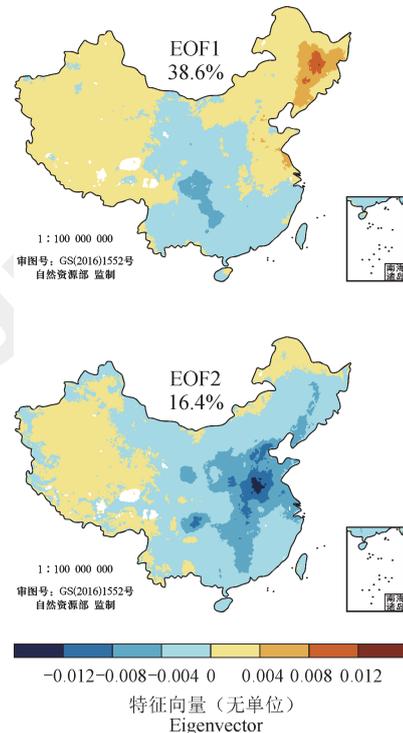
本图基于自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载的审图号为GS(2016)1552号的标准地图制作,底图无修改。

图2 2004—2016年中国地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化趋势  
Fig.2 Trend of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in China from 2004 to 2016

第二特征向量的方差贡献率为16.4%,也是一种较为典型的PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化的空间分布结构。该特征值的分布表现为在中国中东部如华北、华东和华中地区主要为负,而在中国西部如西藏、新疆、青海等地区主要为正,表现出东西反向分布的形式。这种分布形式表现为PM<sub>2.5</sub>东西变化的相反性,即东部PM<sub>2.5</sub>浓度增加,西部PM<sub>2.5</sub>浓度减小;或东部PM<sub>2.5</sub>浓度减小,西部PM<sub>2.5</sub>浓度增加。

图4为PM<sub>2.5</sub> EOF分析结果的时间序列,表示了EOF空间分布模态在时间上的变化特征,反应了PM<sub>2.5</sub>质量浓度在2004—2016年的时间变化规律。特征向量所对应的时间系数的变化,代表了该特征向量所表征的分布结构的变化特征。时间系数为正,表示分布结构与图3相同,且时间系数的绝对值越大,表明该时刻下此分布特征越明显。对于第一模态的时间序列,结合第一模态的空间模态,可以看到PM<sub>2.5</sub>在空间上的变化趋势。在2008—2009年和2012—2016年,西北和东北地区PM<sub>2.5</sub>浓度增加,南方地区浓度减小。在2004—2007年和2010—2012年,则表现为西北和东北地区PM<sub>2.5</sub>浓

度减少的趋势。近年来中国北方地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度呈增加趋势,南方地区PM<sub>2.5</sub>浓度呈减弱趋势。这与图2趋势分析结果较为一致。



本图基于自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载的审图号为GS(2016)1552号的标准地图制作,底图无修改。

图3 2004—2016年中国地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度 EOF分析,第一主分量(EOF1)与第二主分量(EOF2)(空白处为缺省值)

Fig.3 The first principal component (EOF1) and the second principal component (EOF2) in the EOF analysis of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in China from 2004 to 2016 (the blank space is the default value)

第二模态时间系数的变化幅度接近于第一模态时间系数的变化,变化范围是-1.7—-1.8。当第二模态时间系数的正值越大,对应年份的PM<sub>2.5</sub>浓度分布越接近于第二特征向量的分布情况。大多数年份的PM<sub>2.5</sub>浓度分布情况更接近于第二特征向量的反向分布情况,即体现为东部浓度增加、西部浓度减少的特征。在研究时段内,PM<sub>2.5</sub>浓度的逐年变化差异较大,并没有体现出明显的年际变化特征。

### 3 讨论

#### 3.1 中国(不含港澳台地区)传染病发病率情况

九类传染病2004—2016年的中国(不含港澳台地区)平均发病率变化如图5所示。不同的疾病

呈现出不同的发病率变化趋势,但总体而言,肺结核、流脑以及麻疹的发病率呈现出下降趋势,而流感和猩红热的发病率具有上升趋势。风疹、急性出血性结膜炎和流行性腮腺炎的发病率则表现为先增后减的特征;百日咳相反,呈现出先减后增的趋势。就发病率大小而言,百日咳以及流脑具有最低的发病率,流脑发病率最低值接近于 0‰,而肺结核的发病率相对最高,最大值可达 90‰。

### 3.2 不同地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与传染病发病率的相关性分析

由于中国不同地区的疾病发病率、污染物排放量、医疗水平之间存在较大差异,PM<sub>2.5</sub> 对传染病的影响与研究地区有很大关系。考虑到发病率以及 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的空间差异性,进一步将研究区域分为华北和东北地区、中国东部和 PM<sub>2.5</sub> 浓度高值区三类,来进行高分辨率的相关性分析。

(1) 华北和东北地区包括北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江。该地区是风疹、麻疹、猩红热、流感以及手足口病的高发区域,也是 13 年间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度显著增加的区域。由 Pearson 相关结果(表 1)可以发现:在华北和东北地区,PM<sub>2.5</sub> 浓度与多数传染病(百日咳、风疹、流感、麻疹和腮腺炎)的发病率之间都有着显著的正相关性,当 PM<sub>2.5</sub> 浓度增加时,这些传染病的发病率也上升。在 0.01 级别上,百

日咳发病率与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的相关性最高,相关系数可达 0.582。其次为流行性腮腺炎和风疹,相关系数分别为 0.298 和 0.254。

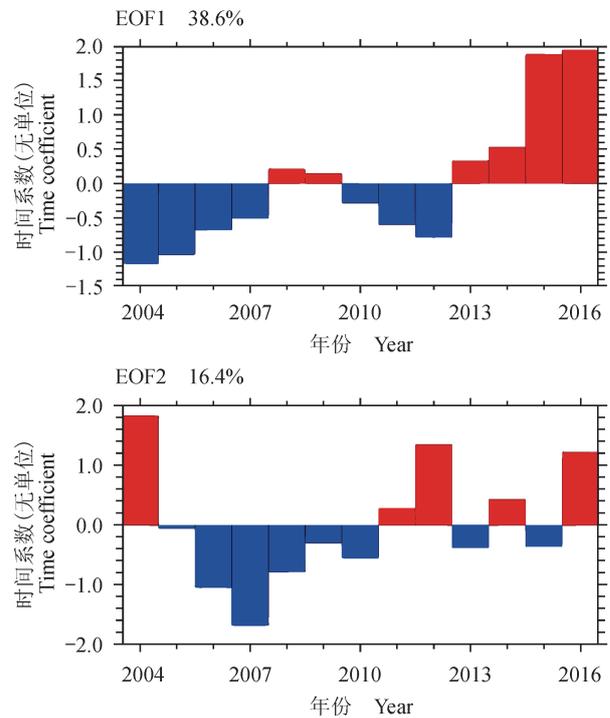


图 4 2004—2016 年中国地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度 EOF 分析的时间系数

Fig.4 Time coefficients of EOF analysis of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in China from 2004 to 2016

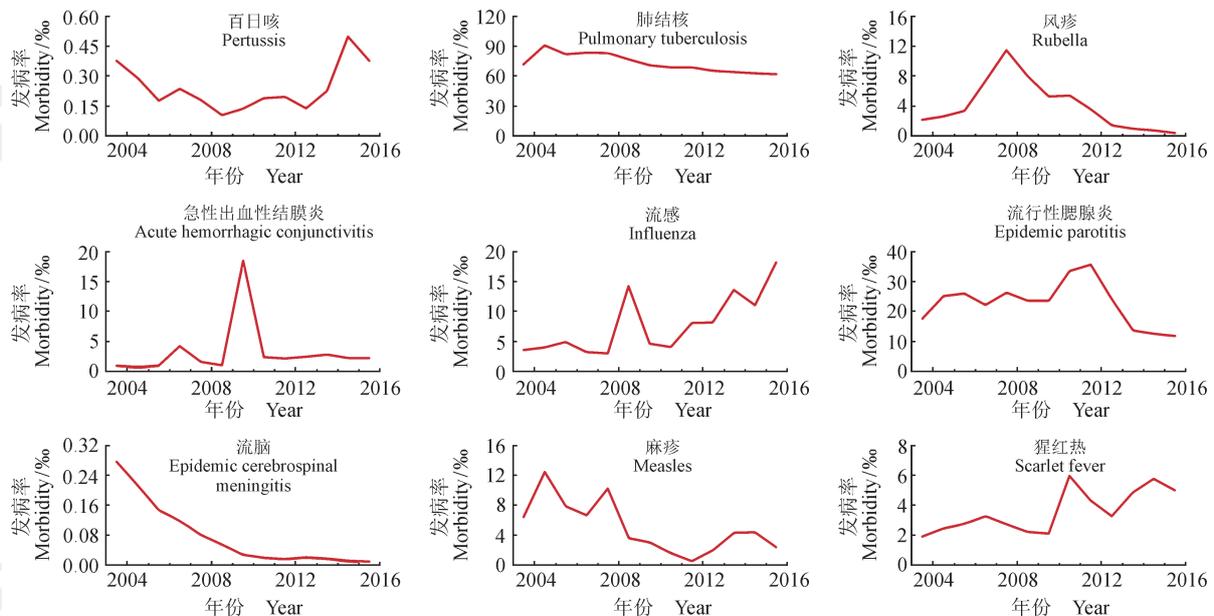


图 5 2004—2016 年中国 31 个省级行政区(不含港澳台地区)九类传染性疾病的全国平均发病率变化趋势  
Fig.5 The trend of the national average morbidity of 9 infectious diseases in 31 provincial-level administrative regions (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan) of China from 2004 to 2016

表1 华北和东北地区传染病发病率与PM<sub>2.5</sub>质量浓度的Pearson相关性  
Tab.1 Pearson correlation between the incidence of infectious diseases and PM<sub>2.5</sub> mass concentration in northern China and northeastern China

疾病 Disease	Pearson 相关性 Pearson correlation coefficient	显著性(双尾) Significance (two-tail)	个案数 Number
百日咳 Pertussis	0.582**	0	104
肺结核 Pulmonary tuberculosis	-0.732**	0	104
风疹 Rubella	0.254**	0.009	104
急性出血性结膜炎 Acute hemorrhagic conjunctivitis	-0.269**	0.006	104
流感 Influenza	0.236*	0.016	104
流脑 Epidemic cerebrospinal meningitis	0.075	0.446	104
麻疹 Measles	0.209*	0.033	104
流行性腮腺炎 Epidemic parotitis	0.298**	0.002	104
猩红热 Scarlet fever	0.010	0.917	104

\*\*：在0.01级别(双尾)相关性显著；\*：在0.05级别(双尾)相关性显著。

\*\*：indicates a significant correlation at the 0.01 level (two-tail); \*：indicates a significant correlation at the 0.05 level (two-tail).

(2) 中国东部包括北京、天津、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、海南。从Pearson相关性检验结果(表2)可以看出：百日咳、麻疹以及猩红热的发病率与PM<sub>2.5</sub>浓度之间的相关通

过了显著性检验，且百日咳、猩红热的发病率与PM<sub>2.5</sub>浓度之间均有较好的相关性，相关系数分别为0.418和0.376。在中国东部地区的居民，要注意这两种疾病的预防工作。

表2 中国东部地区传染病发病率与PM<sub>2.5</sub>质量浓度的Pearson相关性  
Tab.2 Pearson correlation between the incidence of infectious diseases and PM<sub>2.5</sub> mass concentration in eastern China

疾病 Disease	Pearson 相关性 Pearson correlation coefficient	显著性(双尾) Significance (two-tail)	个案数 Number
百日咳 Pertussis	0.418**	0	130
肺结核 Pulmonary tuberculosis	-0.732**	0	130
风疹 Rubella	0.015	0.086	130
急性出血性结膜炎 Acute hemorrhagic conjunctivitis	-0.268**	0.002	130
流感 Influenza	-0.105	0.234	130
流脑 Epidemic cerebrospinal meningitis	-0.095	0.280	130
麻疹 Measles	0.188*	0.032	130
流行性腮腺炎 Epidemic parotitis	-0.265**	0.002	130
猩红热 Scarlet fever	0.376**	0	130

\*\*：在0.01级别(双尾)相关性显著；\*：在0.05级别(双尾)相关性显著。

\*\*：indicates a significant correlation at the 0.01 level (two-tail); \*：indicates a significant correlation at the 0.05 level (two-tail).

(3) PM<sub>2.5</sub>浓度高值区包括辽宁、吉林、黑龙江、北京、天津、河北、河南、山东、江苏、上海、安徽。针对涵盖京津冀、东北、长三角及部分华中地区的全国PM<sub>2.5</sub>高值区，Pearson相关性检验结果(表3)表明：百日咳和麻疹的发病率与PM<sub>2.5</sub>之间的相关均能够通过显著性检验，且百日咳仍为相关性最高的一类传染病，相关系数达到了0.416。作为一种典型的急性呼吸道传染病，百日咳发病率自全国实施儿童计划免疫后已显著下降，但在局部地区仍有短暂流行的现象(殷大鹏等，2007)，且近些年百日咳的发病又呈现出

增长趋势，成为了全球最为常见的感染致死性疾病之一(王宗润和米荣，2018)。

从以上研究结果可以发现：在华北和东北地区，PM<sub>2.5</sub>浓度与传染病发病率之间的相关性最高，并且与PM<sub>2.5</sub>之间存在显著相关关系的传染病类型也最多。针对这三类地区，进一步对PM<sub>2.5</sub>浓度以及与其相关性显著的传染病发病率进行了线性拟合(图6)，得到以下发病率与PM<sub>2.5</sub>浓度之间的关系(拟合均通过95%显著性检验)：

(1) 华北和东北地区，传染病发病率与PM<sub>2.5</sub>浓度之间的关系为(P为百日咳，R为风疹，I为

流感, MU 为流行性腮腺炎, ME 为麻疹):  $P=0.0126 \times PM_{2.5} - 0.2064$ ;  $R=0.1189 \times PM_{2.5} + 0.8067$ ;  $I=0.1634 \times PM_{2.5} + 2.1346$ ;  $MU=0.1633 \times PM_{2.5} + 11.83$ ;  $ME=0.0724 \times PM_{2.5} + 3.1336$ 。

表 3  $PM_{2.5}$  浓度高值区传染病发病率与  $PM_{2.5}$  质量浓度的 Pearson 相关性  
Tab.3 The Pearson correlation between the incidence of infectious diseases and  $PM_{2.5}$  mass concentration in the area with high  $PM_{2.5}$  concentration

疾病 Disease	Pearson 相关性 Pearson correlation coefficient	显著性 (双尾) Significance (two-tail)	个案数 Number
百日咳 Pertussis	0.416**	0	143
肺结核 Pulmonary tuberculosis	-0.651**	0	143
风疹 Rubella	0.056	0.508	143
急性出血性结膜炎 Acute hemorrhagic conjunctivitis	0.153	0.069	143
流感 Influenza	0.130	0.123	143
流脑 Epidemic cerebrospinal meningitis	-0.061	0.471	143
麻疹 Measles	0.165*	0.049	143
流行性腮腺炎 Epidemic parotitis	0.130	0.121	143
猩红热 Scarlet fever	-0.256**	0.002	143

\*\*：在 0.01 级别 (双尾) 相关性显著；\*：在 0.05 级别 (双尾) 相关性显著。

\*\*：indicates a significant correlation at the 0.01 level (two-tail); \*：indicates a significant correlation at the 0.05 level (two-tail).

根据拟合结果, 当  $PM_{2.5}$  浓度上升  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 百日咳、风疹、流感、流行性腮腺炎以及麻疹的发病率将分别上升 0.13%、11.89%、16.34%、16.33% 以及 7.24%。可见在华北和东北地区,  $PM_{2.5}$  质量浓度的变化对流感 and 流行性腮腺炎发病率的影响最大, 其次为风疹与麻疹, 对百日咳的影响则最小。该地区居民应注意预防流感和流行性腮腺炎。

(2) 中国东部地区, 发病率与  $PM_{2.5}$  浓度之间的关系为 (P 为百日咳, ME 为麻疹, S 为猩红热):  $P=0.0095 \times PM_{2.5} - 0.1634$ ;  $ME=0.0669 \times PM_{2.5} + 2.3865$ ;  $S=0.1079 \times PM_{2.5} - 0.4792$ 。

根据拟合结果, 当  $PM_{2.5}$  浓度上升  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 百日咳、麻疹以及猩红热的发病率将分别上升 0.10%、6.69% 以及 10.79%。可见  $PM_{2.5}$  浓度的变化在中国东部地区对猩红热发病率的影响最大, 其次为麻疹, 而对百日咳的影响最小。

(3)  $PM_{2.5}$  高值区, 发病率与  $PM_{2.5}$  浓度之间的关系为 (P 为百日咳, ME 为麻疹):  $P=0.0107 \times PM_{2.5} - 0.2796$ ;  $ME=0.0613 \times PM_{2.5} + 1.9869$ 。

根据拟合结果, 当  $PM_{2.5}$  浓度上升  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 百日咳和麻疹的发病率将分别上升 0.11% 和 6.13%。可见在  $PM_{2.5}$  高值区,  $PM_{2.5}$  浓度的变化对麻疹发病率的影响最大, 而对百日咳的影响最小。

在三类地区中, 尽管百日咳发病率与  $PM_{2.5}$  浓度有最高的正相关性, 但由于本身发病率较低, 故在  $PM_{2.5}$  浓度变化时百日咳发病率的变化较小。而麻疹的发病率随着  $PM_{2.5}$  浓度的变化在华北和东

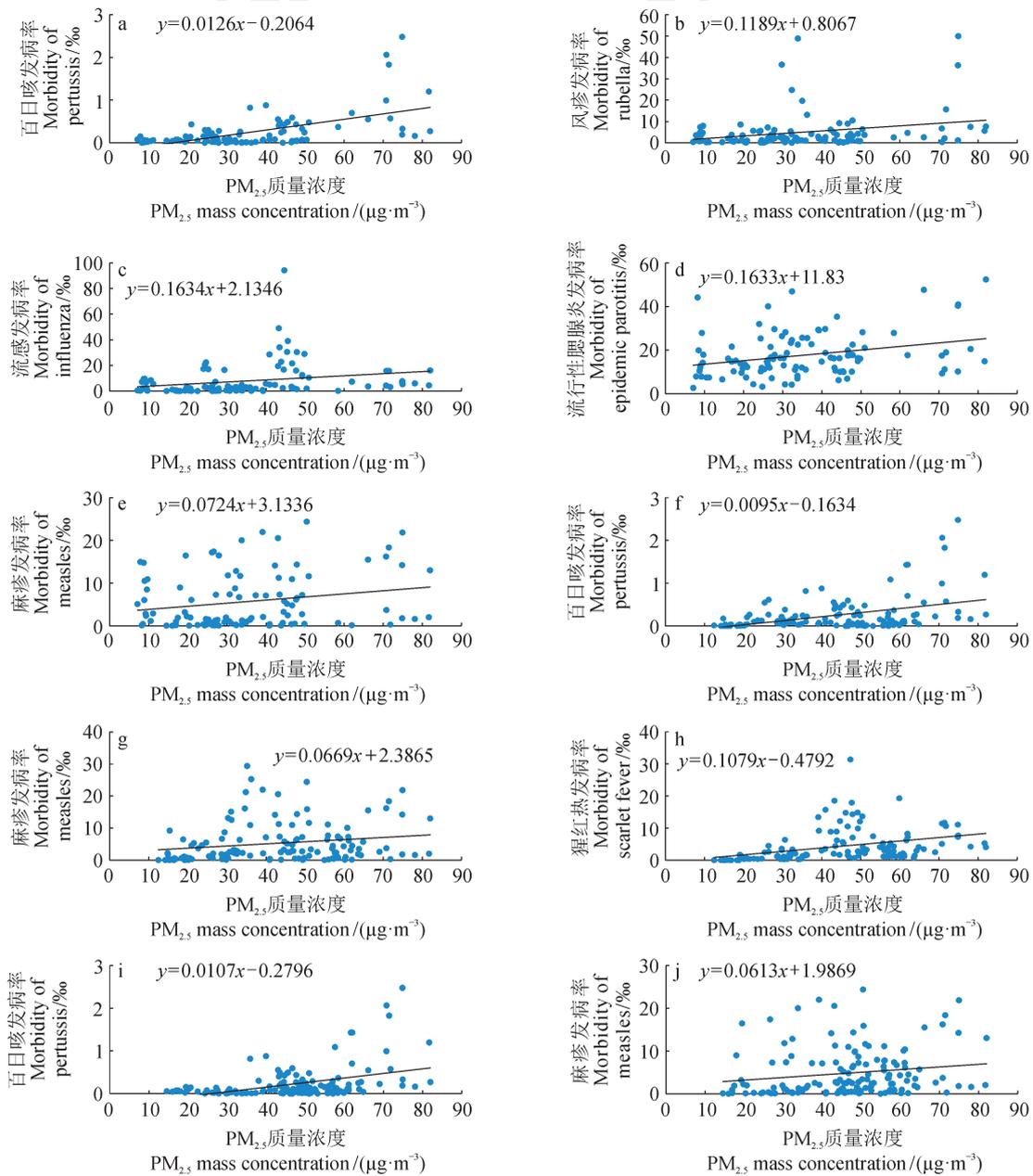
北地区最大, 中国东部地区次之, 在  $PM_{2.5}$  高值区最低。不同地区  $PM_{2.5}$  浓度变化对传染病发病率的影响各不相同, 在华北和东北地区, 对流感以及流行性腮腺炎的影响程度最高, 在中国东部地区则为猩红热, 在  $PM_{2.5}$  高值区则为麻疹。因此, 对于不同地区  $PM_{2.5}$  的污染状况, 应该进行不同侧重程度的传染病防治。

#### 4 结论

(1) 2004—2016 年, 中国地区  $PM_{2.5}$  质量浓度总体上呈东高西低、北高南低的分布特征, 浓度变化趋势呈现北增南减的变化特征。EOF 分析显示近年来中国  $PM_{2.5}$  质量浓度主要表现为北方增加、南方减弱, 且东部浓度增加、西部浓度减少的特征。

(2) 九类传染病中, 流感和猩红热的发病率具有上升趋势, 肺结核、流脑和麻疹的发病率呈现下降趋势。就发病率大小而言, 百日咳以及流脑具有最低的发病率, 肺结核的发病率相对最高。

(3) 在东北和华北地区, 传染病发病率与  $PM_{2.5}$  浓度的相关性最高, 与百日咳、风疹、流感、麻疹以及流行性腮腺炎共五种传染病有着显著的正相关关系。传染病发病率与  $PM_{2.5}$  相关性较好的区域主要集中于  $PM_{2.5}$  浓度较高的区域, 其中百日咳的发病率与  $PM_{2.5}$  之间具有最显著的相关性。因此对  $PM_{2.5}$  浓度的控制也是对百日咳这样的疾病发病率的控制。



a、b、c、d、e: 华北和东北; f、g、h: 中国东部; i、j: 高值区。

a, b, c, d, e: northern China and northeastern China; f, g, h: eastern China; i, j: the area with high PM<sub>2.5</sub> concentration.

图6 三类地区与PM<sub>2.5</sub>显著正相关的传染病发病率和PM<sub>2.5</sub>质量浓度的线性拟合结果

Fig.6 Linear fitting results of the incidence of infectious diseases and PM<sub>2.5</sub> mass concentration in three regions with significant positive correlation with PM<sub>2.5</sub>

(4) 根据部分传染病发病率与PM<sub>2.5</sub>浓度的拟合结果, PM<sub>2.5</sub>浓度上升也会带来疾病发病率上升, 从而对人体健康产生一定影响。其中流感以及流行性腮腺炎发病率受PM<sub>2.5</sub>浓度变化的影响最大, 在PM<sub>2.5</sub>污染严重的时期, 应该更加注意对流感和流行性腮腺炎的防治。

此次研究尚未考虑气象因素、经济发展水平、产业结构、人口密度以及年龄结构等其他因子对

PM<sub>2.5</sub>与传染病发病率相关性的影响, 后续若能纳入更多的影响因子, 结果将会更加准确, 也会更具参考价值。

#### 参考文献

- 李祥, 彭玲, 池天河, 等. 2016. 北京市空气质量时空特征分析[J]. 测绘通报, (9): 47-51. [Li X, Peng L, Chi T H, et al. 2016. Spatial-temporal features of air quality in Beijing City [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (9): 47-51.]

- 孙志豪, 崔燕平. 2013. PM<sub>2.5</sub> 对人体健康影响研究概述 [J]. *环境科技*, 26(4): 75–78. [Sun Z H, Cui Y P. 2013. An overview of PM<sub>2.5</sub> impacts on human health [J]. *Environmental Science and Technology*, 26(4): 75–78.]
- 王宗润, 米 荣. 2018. 百日咳研究现状 [J]. *当代医学*, 24(6): 174–177. [Wang Z R, Mi R. 2018. Research status of pertussis [J]. *Contemporary Medicine*, 24(6): 174–177.]
- 谢 杨, 戴瀚程, 花岡達也, 等. 2016. PM<sub>2.5</sub> 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 26(11): 19–27. [Xie Y, Dai H C, Hanaoka T, et al. 2016. Health and economic impacts of PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *China Population, Resources and Environment*, 26(11): 19–27.]
- 殷大鹏, 王华庆, 曹玲生, 等. 2007. 中国 2004—2006 年百日咳流行病学分析 [J]. *中国计划免疫*, 13(3): 245–247. [Yin D P, Wang H Q, Cao L S, et al. 2007. Epidemiological analysis on pertussis in China during 2004—2006 [J]. *Chinese Journal of Vaccines and Immunization*, 13(3): 245–247.]
- 赵 珂, 曹军骥, 文湘润. 2011. 西安市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染与城区居民死亡率的关系 [J]. *预防医学情报杂志*, 27(4): 257–262. [Zhao K, Cao J J, Wen X M. 2011. Correlation between PM<sub>2.5</sub> pollution in air and mortality of residents in urban area, Xi'an [J]. *Journal of Preventive Medicine Information*, 27(4): 257–262.]
- Apte J S, Marshall J D, Cohen A J, et al. 2015. Addressing global mortality from ambient PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Science & Technology*, 49(13): 8057–8066.
- Atkinson R W, Mills I C, Walton H A, et al. 2015. Fine particle components and health— a systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 25(2): 208–214.
- Breitner S, Liu L Q, Cyrus J, et al. 2011. Sub-micrometer particulate air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 409(24): 5196–5204.
- Brook R D, Rajagopalan S, Pope C A, et al. 2010. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American heart association [J]. *Circulation*, 121(21): 2331–2378.
- Chen C, Zhu P F, Lan L, et al. 2018. Short-term exposures to PM<sub>2.5</sub> and cause-specific mortality of cardiovascular health in China [J]. *Environmental Research*, 161: 188–194.
- Chen R J, Yin P, Meng X, et al. 2017. Fine particulate air pollution and daily mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 196(1): 73–81.
- Conibear L, Butt E W, Knotte C, et al. 2018. Residential energy use emissions dominate health impacts from exposure to ambient particulate matter in India [J]. *Nature Communications*, 9. DOI: 10.1038/s41467-018-02986-7.
- Fang D, Wang Q G, Li H M, et al. 2016. Mortality effects assessment of ambient PM<sub>2.5</sub> pollution in the 74 leading cities of China [J]. *Science of the Total Environment*, 569/570: 1545–1552.
- Han X, Liu Y Q, Gao H, et al. 2017. Forecasting PM<sub>2.5</sub> induced male lung cancer morbidity in China using satellite retrieved PM<sub>2.5</sub> and spatial analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 607/608: 1009–1017.
- Liang F C, Yang X L, Liu F C, et al. 2019. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of diabetes in China: a cohort study [J]. *Environment International*, 126: 568–575.
- Martinez Y, Yu W, Lin H. 2013. A new statistical-dynamical downscaling procedure based on EOF analysis for regional time series generation [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(4): 935–952.
- Ole R N, Zorana J A, Rob B, et al. 2013. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE) [J]. *The Lancet Oncology*, 14(9): 813–822.
- Pope C A, Dockery D W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6): 709–742.
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379–1389.
- Song C B, He J J, Wu L, et al. 2017. Health burden attributable to ambient PM<sub>2.5</sub> in China [J]. *Environmental Pollution*, 223: 575–586.
- Theil H. 1950. A rank invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3 [C]// Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen, Series A Mathematical Sciences, 53: 1397–1412.
- Wang Y H, Li M M, Wan X, et al. 2018. Spatiotemporal analysis of PM<sub>2.5</sub> and pancreatic cancer mortality in China [J]. *Environmental Research*, 164: 132–139.
- Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. 2003. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation [J]. *Journal of Hydrology*, 279(1/2/3/4): 144–150.
- Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, et al. 2013. Rapid health transition in China, 1990—2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *The Lancet*, 381(9882): 1987–2015.