

2000年—2018年中国和印度的长期PM_{2.5}污染暴露的疾病负担研究

朱玥^{1,2}, 石玉胜¹, 李正强¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要: PM_{2.5}作为空气污染物, 对人体健康构成了潜在威胁。中国和印度是全球人口最多的两个发展中国家, PM_{2.5}污染造成的疾病负担问题尤为严重。因此, 本文基于长时间序列高分辨率(0.01°×0.01°)卫星反演的PM_{2.5}浓度数据, 分析了中国和印度19年(2000年—2018年)的PM_{2.5}时空格局变化和人口暴露情况; 基于综合暴露响应模型全面评估了两个国家因PM_{2.5}长期暴露导致的6种疾病(急性下呼吸道感染、慢性阻塞性肺病、二型糖尿病、缺血性心脏病、肺癌和中风)的过早死亡人数。结果表明, 中国PM_{2.5}浓度的高值区集中在新疆、四川盆地、华北平原以及长江经济带等地区, 年人口加权浓度总体呈减少趋势(2000年为50 μg·m⁻³, 2018年为40.8 μg·m⁻³); 印度PM_{2.5}浓度的高值区集中在北部地区, 年人口加权浓度一直呈上升趋势(2000年为51.5 μg·m⁻³, 2018年为76.4 μg·m⁻³)。对于中国而言, PM_{2.5}暴露造成的过早死亡人数从2000年的90.8万人增长至2018年的137.8万人, 增长了47万人; 中风是导致过早死亡的主要疾病终端, 占总死亡人数的45.9%(56.3万人)。印度PM_{2.5}暴露造成的过早死亡人数从2000年的34.3万人增长至2018年的75万人, 增长了40.7万人; 缺血性心脏病和中风是导致过早死亡的主要疾病终端, 分别占比39.9%(20.2万人)和25.5%(12.9万人)。研究结果有望为决策者和污染控制机构提供参考, 有助于制定空气污染治理政策。

关键词: 遥感, PM_{2.5}, 疾病负担, 过早死亡, 中国, 印度, 长时序

中图分类号: P2

引用格式: 朱玥, 石玉胜, 李正强. 2023. 2000年—2018年中国和印度的长期PM_{2.5}污染暴露的疾病负担研究. 遥感学报, 27(8): 1834-1843

Zhu Y, Shi Y S and Li Z Q. 2023. Disease burden assessment exposure to long-term PM_{2.5} pollution in China and India (2000—2018). National Remote Sensing Bulletin, 27(8): 1834-1843 [DOI:10.11834/jrs.20231758]

1 引言

随着世界经济的快速发展和城市化进程的加快, PM_{2.5}污染已经成为一个全球性的环境和公共健康问题。PM_{2.5}指的是空气动力学直径小于2.5 μm的颗粒物, 又称可吸入肺颗粒物。它体积小, 表面积大, 能在空气中长期停留, 并远距离传输, 携带的有毒物质, 能够随着呼吸深入人体肺部(向娟等, 2022; 王情等, 2021; Xue等, 2019; Liang等, 2019)。大量流行病学研究表明, 长期暴露在高浓度PM_{2.5}环境中会对人体健康有严重的负面影响。已证实, 长期接触PM_{2.5}与某些疾病导致

的过早死亡之间存在关联, 这些疾病包括急性下呼吸道感染ALRI (Acute Lower Respiratory Infection), 慢性阻塞性肺病COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease), 二型糖尿病DIA (Type 2 diabetes), 缺血性心脏病IHD (Ischemic Heart Disease), 肺癌LNC (Lung cancer) 和中风STR (Stroke) (Chowdhury 和 Dey, 2016; Wang等, 2021; Lu等, 2019)。

IQAir发布的《2019年世界空气质量报告》显示, 2019年, 印度和中国是世界排名第5和11位PM_{2.5}污染严重的国家。此外, 全球PM_{2.5}污染较严重的前30位城市有21个位于印度; 有1个位于中国 (<https://www.iqair.com/world-air-quality-report>

收稿日期: 2021-12-03; 预印本: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41701498, 42071398)

第一作者简介: 朱玥, 研究方向为大气遥感与环境健康。E-mail: zhuyue19@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 石玉胜, 研究方向为大气污染物遥感反演与环境健康、碳排放遥感反演与定量分析。E-mail: shiys@aircas.ac.cn

[2022-01-05])。可以看出, 中国和印度的PM_{2.5}污染问题十分严峻。美国健康效应研究所HEI (Health Effects Institute) 发布的《2020年全球空气状况特别报告》指出, 2019年, PM_{2.5}长期暴露导致了全球414万人过早死亡, 占全球总死亡人数的7%, 是危害全球公众健康的第六大因素。而其中, 仅中国和印度这两个国家, PM_{2.5}长期暴露便导致了142万和98万人过早死亡, 占全球总死亡人数的58% (Health Effects Institute等, 2020)。由此可见, 中国和印度PM_{2.5}污染造成的过早死亡疾病负担尤为严重。

目前, 已有多名学者对中国PM_{2.5}疾病负担进行了研究 (王情等, 2021; 李勇等, 2021; Yue等, 2020; Maji等, 2020)。Fang等 (2016) 分析了2013年中国74个主要城市的PM_{2.5}暴露导致的疾病负担, 研究表明中国74个主要城市的过早死亡人数占全国总死亡人数的32%, 心血管疾病为主要疾病终端。Yue等 (2020) 对中国实施《大气污染防治五年行动计划》政策后 (2013年—2017年), PM_{2.5}污染导致的年均过早死亡人数动态变化和 health 效益, 结果表明PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数2017年相比2013年减少了6.4万。Maji等 (2020) 评估了《大气污染防治五年行动计划》的实施对北京市2014年—2018年PM_{2.5}浓度和过早死亡人数的影响, 结果表明2018年因PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数相比2014年减少了5.6%。除此之外, 也有少数学者对印度PM_{2.5}疾病负担进行了分析 (Sahu等, 2020; Manojkumar和Srimuruganandam, 2021; Limaye等, 2019)。Sahu等 (2020) 估算了2015年印度PM_{2.5}暴露带来的健康负担, 总过早死亡人数达161万人。Limaye等 (2019) 模拟了2030年印度PM_{2.5}环境浓度, 并估算了由此导致特定疾病终端的过早死亡人数。Manojkumar和Srimuruganandam (2021) 模拟了2019年印度PM_{2.5}浓度降低带来的过早死亡健康效益, 结果显示北方邦、比哈尔邦等PM_{2.5}浓度较高且人口密集的地区, 因污染减缓而得到的健康效益最大。

上述研究仅仅是对单个年份或间隔年份的PM_{2.5}浓度和过早死亡人数进行分析, 而对这两个国家PM_{2.5}浓度及疾病负担的长期的时间趋势和空间格局变化仍不清楚。此外, 以往的研究大多考虑ALRI、COPD、IHD、LNC和STR这5种疾病终端, 没有考虑DIA引起的过早死亡人数, 这造成

了PM_{2.5}暴露疾病负担评估的不全面 (Maji, 2020; Jain等, 2017; Huang等, 2018; Guan等, 2019)。因此, 本研究基于卫星反演的长时间序列高分辨率的PM_{2.5}浓度数据, 分析了2000年—2018年中国和印度两个国家PM_{2.5}浓度的长期时间趋势和空间格局分布, 结合全球疾病负担研究GBD (Global Burden of Disease) 2019年发布的最新综合暴露响应IER (Integrated Exposure Response) 模型参数, 评估了PM_{2.5}长期暴露导致的6种疾病 (ALRI、COPD、DIA、IHD、LNC和STR) 的过早死亡人数。研究结果将有助于全面了解中国和印度PM_{2.5}浓度及其过早死亡人数的长期时空变化和趋势, 从而精准地对污染较重的区域开展空气污染工防治作。通过全面量化归因于6种疾病终端的过早死亡人数, 不仅提高了公众对PM_{2.5}暴露引起的疾病负担的认识, 还有助于两个国家结合实际, 尤其对于疾病负担重的地区, 进行针对性医疗防护来减缓疾病负担。

2 数据源与研究方法

2.1 数据源

本研究使用的主要数据源 (表1) 如下: (1) 选用的2000年—2018年0.01°×0.01°空间分辨率的全球地表PM_{2.5}有沙浓度遥感数据来自Hammer和Van Donkelaar团队。该PM_{2.5}浓度数据集是基于GEOS-Chem大气化学传输模型和气溶胶光学厚度反演产品 (MODIS、MISR和SeaWiFS), 并采用地理加权回归方法进行校正, 得到融合后的PM_{2.5}数据。且全球范围内, 该PM_{2.5}浓度数据集与地面监测点数据呈现高度一致, R²为0.90—0.92 (Hammer等, 2020)。对于中国地区, PM_{2.5}浓度也呈现了与地面监测站点数据也呈现较好一致性, 其中, R²为0.81 (Yang等, 2022), slope为0.9 (Zhang等, 2021), RMSE为7.05 (Yang和Jiang, 2021)。(2) 所用的人口栅格数据来源于美国橡树岭实验室开发的Landscan™数据集, 包含了2000年—2018年全球各个国家的人口年均总数网格分布, 空间分辨率为0.0083°×0.0083°。该数据集结合了人口普查、地理数据和遥感图像分析技术, 采用了多元建模框架, 依据每个国家和区域的数据条件和地理性质建立 (<https://landscan.ornl.gov/>[2021-03-02])。(3) 2000年—2018年中国和印度的年龄结构数据

来自美国华盛顿大学健康指标与评估机构 IHME (Institute for Health Metrics and Evaluation), 它包含国家层面的不同年龄段人口比例 (Global Burden of Disease Collaborative Network, 2018)。(4) 2000年—2018年中国和印度6种疾病终端 (ALRI、COPD、

DIA、IHD、LNC和STR)的国家层面基准死亡率数据来自GBD在线数据库。此外,本研究利用ArcGIS将人口网格数据分辨率重新采样至 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,与 $PM_{2.5}$ 浓度数据分辨率保持一致。

表1 数据源
Table 1 Data Sources

数据集	时间/年份	空间分辨率	数据来源
$PM_{2.5}$ 浓度	2000—2018	0.01°	Hammer和Van Donkelaar团队(https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm2-5/)
人口	2000—2018	0.0083°	LandScan™(https://landscan.ornl.gov/)
年龄结构	2000—2018	—	IHME(http://ghdx.healthdata.org/record/ihme-data/gbd-2019-population-estimates-1950-2019)
基准死亡率	2000—2018	—	GBD(http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool)

2.2 研究方法

本研究采用了2019年IER模型来定量评估长期暴露在 $PM_{2.5}$ 环境中造成的过早死亡人数。该模型于2010年GBD首次提出(Brauer等, 2012),并随着 $PM_{2.5}$ 健康效应队列研究的深入,不断地更新和优化,被广泛应用于 $PM_{2.5}$ 暴露造成的疾病负担研究。模型选取了6种疾病作为疾病终端:ALRI、COPD、DIA、IHD、LNC和STR。其中,ALRI是针对5岁以下的儿童,后5种疾病则是针对25岁以上的成年人。该模型通过相关危险度RR(Relative Risk)将 $PM_{2.5}$ 与过早死亡人数建立关系,RR计算公式如下:

$$RR(C_g) = \begin{cases} 1, C_g < C_0 \\ 1 + \alpha \left(1 - e^{-\beta(C_g - C_0)^\delta} \right), C_g \geq C_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_g 表示网格 g 的 $PM_{2.5}$ 真实浓度值; C_0 为 $PM_{2.5}$ 理论阈值,这里参考2019年GBD公布的最新结果($5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。当环境 $PM_{2.5}$ 浓度低于该阈值浓度时,RR值为1,即 $PM_{2.5}$ 暴露不会对人体造成危害。当环境 $PM_{2.5}$ 浓度高于该阈值浓度时,RR值大于1,即 $PM_{2.5}$ 暴露会对人体造成危害。 α 、 β 和 δ 是描述6种疾病终端的综合暴露响应曲线形状参数。这里将RR的平均值用于计算过早死亡人数,如下式所示:

$$PAF_{g,a,i} = \frac{RR_{g,a,i} - 1}{RR_{g,a,i}} \quad (2)$$

$$M_{g,a,i} = POP_{g,a,i} \times BMR_i \times PAF_{g,a,i} \quad (3)$$

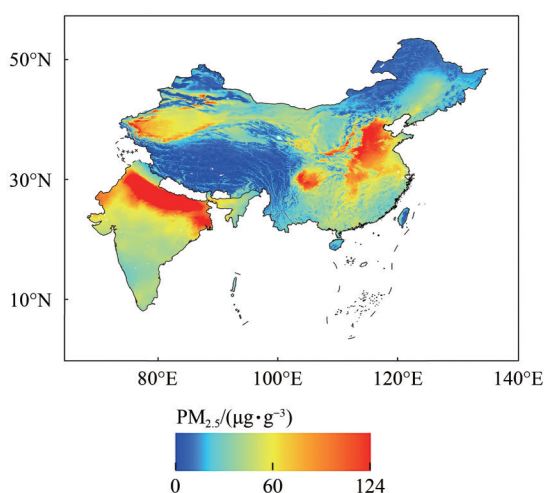
式中, $PAF_{g,a,i}$ 为网格 g 内年龄组 a 疾病终端 i 的归因系数; $RR_{g,a,i}$ 为网格 g 内年龄组 a 疾病终端 i 的相对危险度; $M_{g,a,i}$ 为网格 g 内年龄组 a 疾病终端 i 的

过早死亡人数; $POP_{g,a}$ 为网格 g 内年龄组 a 的人口数量;年龄组 a 包含0—5岁、25—30岁、30—35岁、35—40岁、40—45岁、…、90—95岁和>95岁在内的16组; BMR_i 为疾病终端 i 国家层面基准死亡率。

3 $PM_{2.5}$ 时空分布特征

中国和印度 $PM_{2.5}$ 浓度19年年均分布具有明显的空间格局(图1)。2005年,世界卫生组织WHO(World Health Organization)针对 $PM_{2.5}$ 年均浓度设立了4个指标值:准则值AQG(Air Quality Guidelines)为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,目标值1T-3(Interim target-3)为 $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,目标值1T-2(Interim target-2)为 $25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,目标值1T-1(Interim target-1)为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。2021年,WHO将AQG值下调至 $5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在中国,高浓度 $PM_{2.5}$ 浓度主要集中在东部(华北平原以及长江经济带等地区)、西南部(四川盆地)和西北部(新疆)。这些地区 $PM_{2.5}$ 浓度常年高于 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,远远高于1T-1值($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),但造成 $PM_{2.5}$ 浓度高的原因有所不同。其中,新疆主要是受来自塔克拉玛干沙漠的扬沙等自然源影响, $PM_{2.5}$ 浓度常年偏高;四川盆地主要受地形影响, $PM_{2.5}$ 不易扩散而常年偏高;华北平原和长江经济带等地区则是因为人口密集,工业发达,人为源 $PM_{2.5}$ 排放较高。中国的青海,西藏,黑龙江和内蒙古的北部 $PM_{2.5}$ 污染较轻, $PM_{2.5}$ 浓度常年低于 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,达到了2005年的AQG值($10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),但仍高于2021年的AQG值($5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。在印度, $PM_{2.5}$ 浓度高值区集中分布在北部恒河平原(如哈里亚纳邦、首都新德里、北方邦、比哈尔等地区),19年的年均 $PM_{2.5}$

浓度同样高于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这些地区人口密集, 工业发达, 且地处平原, 居民、电力和农业等部门 PM_{2.5} 排放浓度高。此外, 整个印度区域几乎都暴露在 PM_{2.5} 浓度高于 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (1T-2值) 环境中, 只有西南小部分地区 PM_{2.5} 浓度低于 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。



(审图号:GS京(2023)0738号)

图1 中国和印度2000年—2018年PM_{2.5}浓度年均空间分布
Fig. 1 Average spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in China and India over 2000—2018

图2 (a) 展示了2000年—2018年中国和印度PM_{2.5}浓度变化分布。中国东南部地区PM_{2.5}浓度19年

间都有所减少; 其中, 甘肃东南部、宁夏、四川东部和重庆西部等地区PM_{2.5}浓度呈现快速减少 ($<-6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 贵州南部、湖南西部、湖北西部和浙江中部等地区PM_{2.5}浓度呈现较快速减少 ($<-4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 江苏、山西、黑龙江和吉林等地区PM_{2.5}浓度呈现轻微增加 ($>1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 西藏自治区南部PM_{2.5}浓度呈现快速增加 ($>8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。与中国不同, 整个印度PM_{2.5}浓度都呈现不同程度的增加。除去最南部区域(卡纳塔克邦南部、泰米尔纳德邦南部和喀拉拉邦)和北部个别区域PM_{2.5}浓度呈现轻微增加 ($>1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 其余地区PM_{2.5}浓度都呈现快速增加, 尤其是印度北部地区 ($>8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。考虑到中国从2013年开始实施《大气污染防治五年行动计划》; 2018年开始实施《蓝天保卫行动计划》, 图2 (b) 分析了中国和印度2013年—2018年PM_{2.5}浓度的空间变化。由于一系列大气污染防治措施的实施(Wei等, 2021; Xiao等, 2022), 中国东部、京津冀、长三角、珠三角和川渝地区都呈现较快速减少 ($<-6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 中国西南部地区PM_{2.5}浓度变化不大; 西北部如塔里木盆地区域PM_{2.5}浓度较快速增加 ($>6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。而印度PM_{2.5}污染状况仍不断加重, 只有东北小部分地区PM_{2.5}浓度呈现轻微较少 ($<-1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其余地区尤其是西北和南部PM_{2.5}浓度都呈现快速增加。

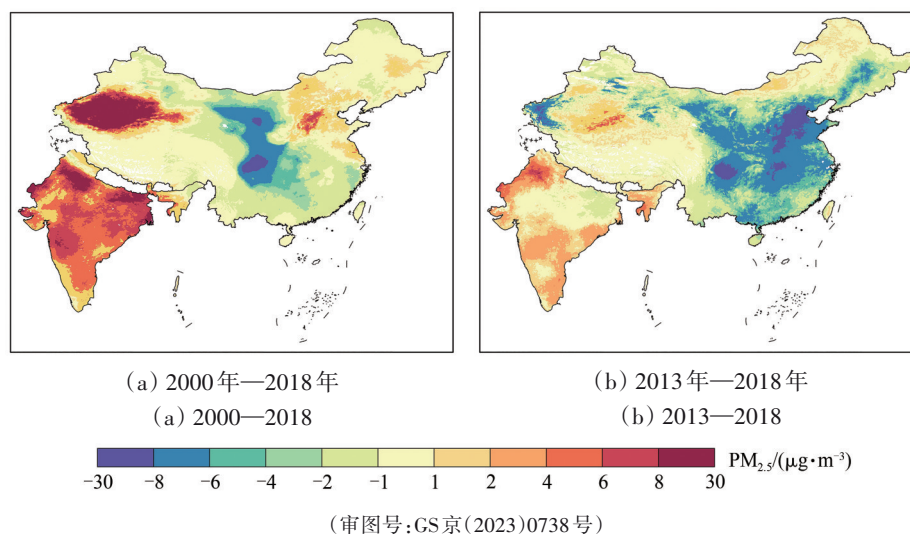


图2 中国和印度2000年—2018年和2013年—2018年PM_{2.5}浓度变化的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of change rates in PM_{2.5} concentrations during 2000—2018 and 2013—2018 in China and India

4 PM_{2.5}人口暴露特征

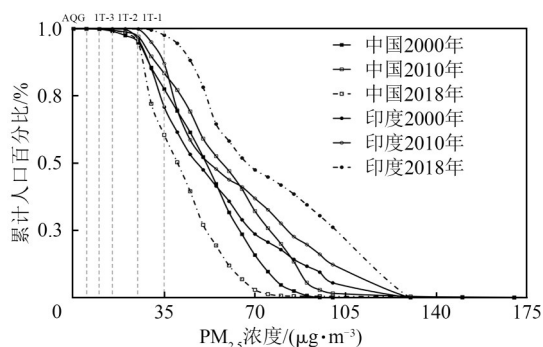
图3 (a) 显示了2000年、2010年和2018年中

国和印度在不同PM_{2.5}浓度下的人口累计比例变化情况。2000年时, 中国有80%的人口暴露在PM_{2.5}浓度高于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (1T-1值) 的环境下, 有24%的人

口暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境中。到了2010年,这一情况更为严重,分别有83%和47%的人口暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境下。2018年时, $\text{PM}_{2.5}$ 的人口暴露情况明显缓解,减少至61%和12%的人口暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境下。相比中国,印度在2000年时暴露在高值 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度环境下的人口比例更高,达36%。更糟糕的是,从2000年—2018年,印度有越来越多的人居住在高 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度环境中。2018年时,印度没有人居住在 $\text{PM}_{2.5}$ 低于 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (1T-2值)的环境中;只有2%的人居住在低于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (1T-1值)环境中;居住在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 环境中的人口比例达58%;甚至有

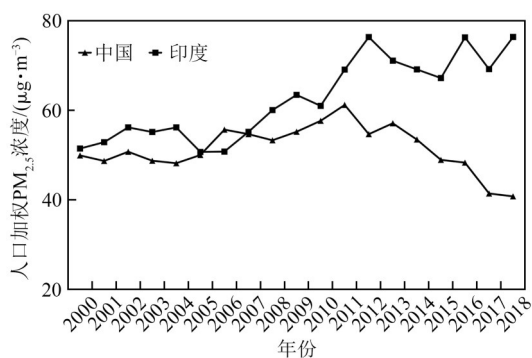
26%的人口居住在 $\text{PM}_{2.5}$ 高于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境中。

中国和印度的年均人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随时间变化趋势如图3(b)所示。中国的年均人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体以 $0.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度呈现减少趋势。2000年时中国年均人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2011年达到峰值($61.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),2018年缓慢下降到 $40.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。印度的年均人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度则以 $1.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 呈快速增加趋势。印度年均人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度2000年时为 $51.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,到了2018年则增加到 $76.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从19年均值来看,印度的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露情况相比中国更为严重,人口加权浓度达 $62.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远远高于中国 $51.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。



(a) 不同浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 的人口比例分布

(a) Proportion of the population exposed to different $\text{PM}_{2.5}$ concentrations



(b) $\text{PM}_{2.5}$ 年均人口加权浓度年际变化

(b) The inter-annual variation of population-weighted $\text{PM}_{2.5}$ concentrations

图3 2000年—2018年中国和印度暴露于不同浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 的人口比例分布及 $\text{PM}_{2.5}$ 年均人口加权浓度年际变化

Fig. 3 Proportion of the population exposed to different $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and the inter-annual variation of population-weighted $\text{PM}_{2.5}$ concentrations over China and India during 2000—2018

5 $\text{PM}_{2.5}$ 疾病负担评估

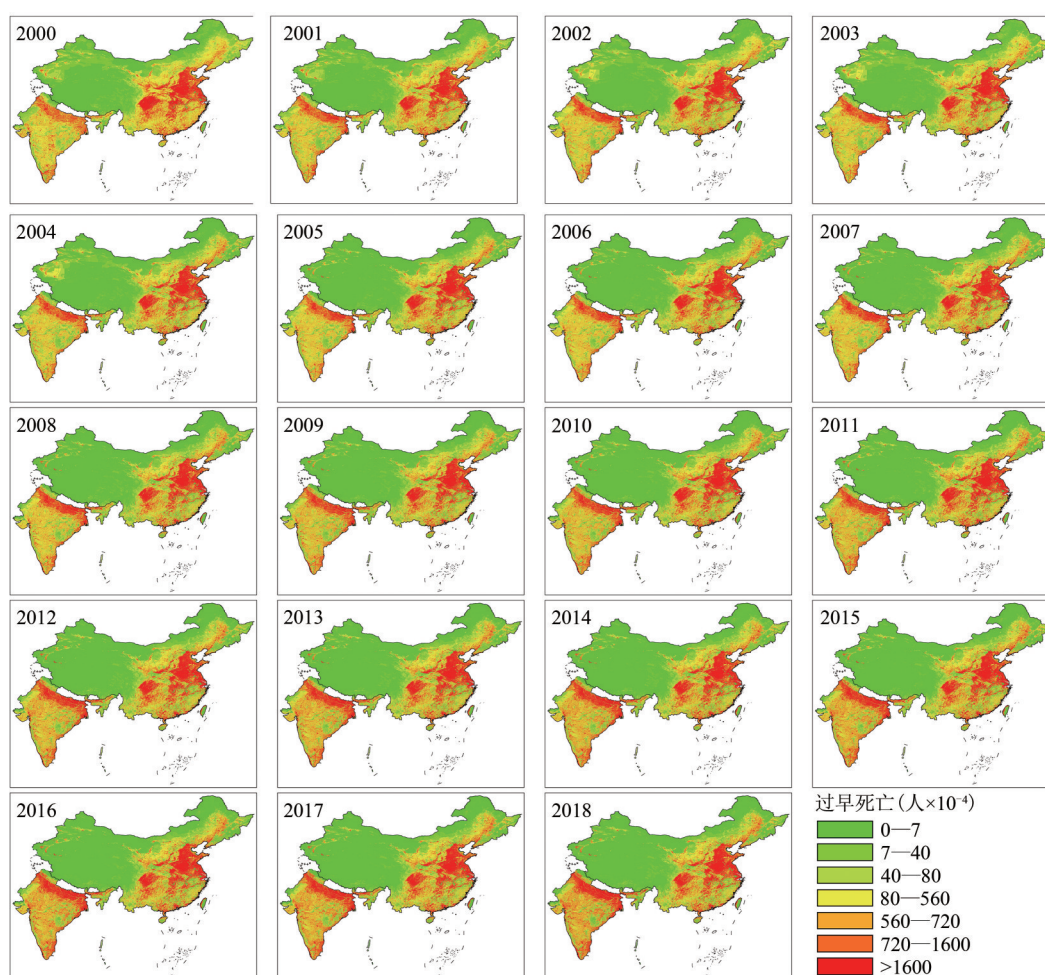
2000年—2018年,中国和印度因 $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露导致的过早死亡人数空间分布如图4所示。可以看出,中国过早死亡人数分布是极其不均匀的。中国 $\text{PM}_{2.5}$ 疾病负担较重的地区主要集中在华北地区(北京、天津、山西和河北),华中和华东地区北部(河南、山东、安徽、江苏和上海)以及川渝地区(四川东部和重庆)。这些地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度常年较高且人口密度大,因此 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡人数更多。而 $\text{PM}_{2.5}$ 疾病负担较轻的地区主要集中在西北地区(新疆和青海)、西南地区(西藏)、东北北部和内蒙古等地区,这些地区虽然 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高低不一,但人口密度相对较少,因而 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡人数较少。且19年间由于人口

迁移和城市化,中国过早死亡人数的空间分布趋于集中。2000年—2018年,印度 $\text{PM}_{2.5}$ 过早死亡人数的空间格局也存在不均匀分布,主要表现在南部和北部的明显差异。长期暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 环境中引起的过早死亡人数在印度北部最多,如旁遮普、哈里亚纳邦、北方邦、比哈尔和首都新德里;在南部则相对较少。研究期间,印度的过早死亡人数分布与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布相似,呈现北部高南部低;趋势变化也具有一致性,北部逐年加重且高值区范围逐年向南部扩张。

2000年—2018年,中国和印度因 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露造成的总过早死亡人数(ALRI、COPD、DIA、IHD、LNC和STR)时间变化见图5。2000年,中国的总过早死亡人数为90.9万人,到了2018年上升至137.8万人,净增加了52%(46.9万人)。尽管中国

的过早死亡人数总体呈现增加趋势，但过早死亡人数的增加速度却逐渐放缓。2000年—2018年，印度总过早死亡人数净增加了118%（40.7万人）：2000年为34.3万人，2018年则增至75万人。虽然印度（50.6万人）年均总过早死亡人数明显低于中国（122.8万人），但印度的增加速度是惊人的。

尽管两个国家人口加权PM_{2.5}浓度在个别年份呈现下降趋势，但基准死亡率的变化和两个国家人口总数的不断增加，因PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数仍然呈现增加趋势。但对于中国，由于大气污染控制政策的实施，PM_{2.5}浓度有了明显改善，从而过早死亡人数的增速也相应放缓。



审图号:GS京(2023)0738号

图4 2000年—2018年中国和印度总过早死亡人数分布(ALRI、COPD、DIA、IHD、LNC和STR)

Fig. 4 Distribution of total premature deaths (ALRI, COPD, DIA, IHD, LNC, and STR) in China and India (2000—2018)

不同疾病造成的过早死亡人数占总死亡人数的比例在两个国家也是有差异的(图6)。在中国，STR的19年年均死亡人数是56.3万人，占总死亡人数的45.9%，是造成过早死亡的主要疾病终端。IHD、COPD、LNC和DIA的死亡人数次之，分别为30.5万(24.9%)、22.8万(18.6%)、10万(8.1%)和2.9万(2.3%)人。ALRI是造成过早死亡人数最少的疾病终端，仅0.3万(0.2%)人。印度占总过早死亡人数的比例最高的疾病终端是IHD，占比39.9%(20.2万人)，IHD、COPD、DIA、ALRI和

LNC依次占总死亡人数的25.5%(20.2万人)、24.2%(12.2万人)、6%(3万人)、2.7%(1.3万人)和1.7%(0.9万人)。从两国的疾病负担比例可以看出，DIA对死亡人数的贡献是不可忽略的，造成中国和印度共计5.9万人过早死亡，这也是将DIA考虑进本研究PM_{2.5}疾病终端的原因。而AILRI在印度19年年均过早死亡人数高为1.3万人，占比2.7%，是中国(0.3万)的4倍多，这也提醒印度应该增加对婴幼儿的空气污染防护。

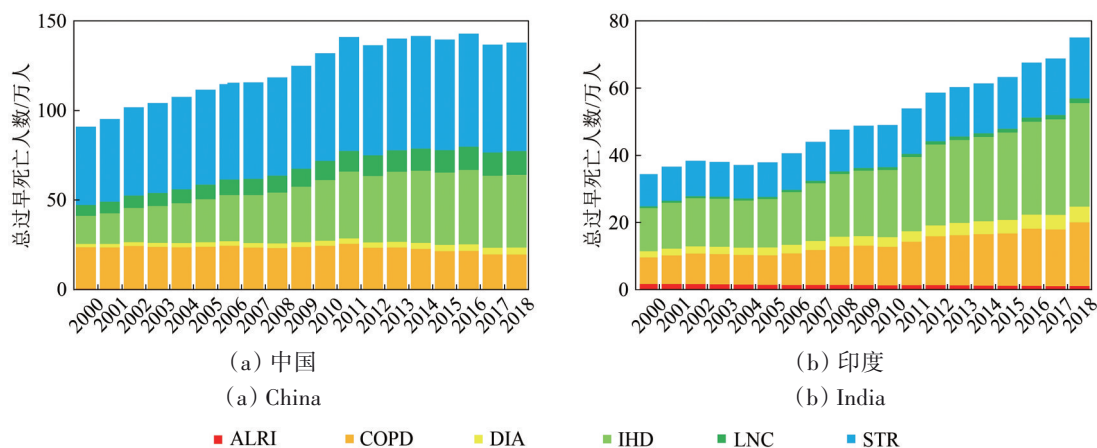


图5 2000年—2018年中国和印度总过早死亡(ALRI、COPD、DIA、IHD、LNC和STR)年际变化
 Fig. 5 Interannual changes in total premature deaths (ALRI, COPD, DIA, IHD, LNC, and STR) in China and India from 2000 to 2018

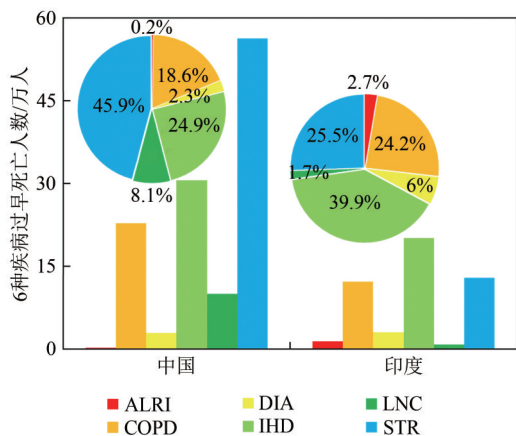


图6 中国和印度6种疾病过早死亡人数年均值和比例
 Fig. 6 Annual average number and proportion of premature deaths from six diseases in China and India

6 不确定性与局限性分析

本研究结合 IER 模型评估了 2000 年—2018 年中国和印度 PM_{2.5} 暴露导致的过早死亡人数。本研究的结果与其他学者的研究结果与所用数据及参数对比如图 7 和表 2 所示 (Ding 等, 2019; Li 等, 2020; Liu 等, 2016; Wang 等, 2018; Zou 等, 2019)。选用的前人结果未考虑 DIA 这一疾病终端造成的死亡人数, 因此, 图 7 在对比时本研究结果不包括 DIA 造成的过早死亡人数。Wang 等 (2018) 估计中国 2010 年的因 PM_{2.5} 导致的过早死亡人数达 127 万人, 与本研究同时期的结果 (129 万人) 接近。本研究估算 2013 年中国过早死亡人数为 137 万人, 与 Liu 等 (2016) (137 万人)、Ding 等 (2019) (139 万人) 同年份的结果相近, 但远远高于 Zou 等 (2019) (120 万人) 的结果。本研究估算过早

死亡人数 2016 年为 139 万人, 与 Li 等 (2020) 的同年结果 (136 万人) 接近。

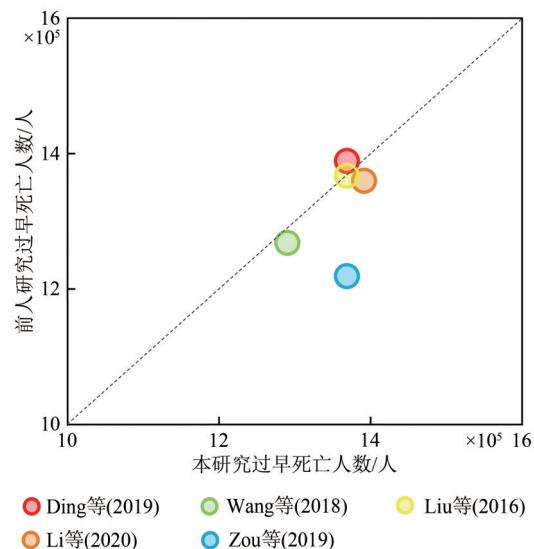


图7 因PM_{2.5}暴露导致过早死亡人数的研究结果对比
 Fig. 7 Comparison of results on the number of premature deaths caused by PM_{2.5} exposure

总体上, 过早死亡人数的结果存在一定不确定性和局限性。首先, 所用数据集具有一定不确定性。有些地区因没有足够的地面观测站点数据来支撑验证或常受到沙尘等极端气候严重影响, PM_{2.5} 浓度遥感数据集的估算将存在误差。由于缺少更为精细的城市级基准死亡率数据, 而使用国家级基准死亡率, 这忽略了城市与城市之间因医疗、经济水平等不同造成的基准死亡率的差异。其次, IER 模型中 C₀ 阈值的设置不一样也会有所影响, 例如, Zou 等 (2019) 选择的 C₀ 值为 GBD2010 年公布的 5.8—8.8 μg · m⁻³, 本研究则是采用的

GBD2019年最新公布的 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此外, IER模型本身会导致估算存在不确定性。尽管该模型已被广泛用于过早死亡人数的估算中, 但它主要是基于欧美国家的流行病学队列研究得出。不过在中国和印度现有流行病学队列研究相对稀缺的前提

下, IER模型依旧可以是评估中国和印度PM_{2.5}疾病负担的较好选择。最后, 仅仅考虑PM_{2.5}浓度来反映疾病负担存在一定局限性。事实上, PM_{2.5}是一种组分非常复杂的空气污染物, 成分因区域、气候等因素而不同, 对人体健康的影响也存在综合作用。

表2 PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数估算研究比较

Table 2 Comparison of studies for the estimation of premature deaths attributed to PM_{2.5} exposure

文献	对比年份	地区	PM _{2.5} 数据	人口数据	基准死亡率	$C_0/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	死亡人数/ $\times 10^4$
本研究	2000—2018	中国、印度	卫星反演数据集	LandScan TM 、World Bank、LandScan TM 、中国统计年鉴	GBD	5	129
Ding等(2019)	2013	中国	地面观测站、CMAQ模型		GBD	—	139
Li等(2020)	2016	中国	地面观测站、NAQPMS模型	GPWv4	GBD	—	136
Liu等(2016)	2013	中国	地面观测站、NAQPMS模型	中国统计年鉴、国家地球科学系统数据中心	GBD	5.8—8.8	137
Wang等(2018)	2010	中国	卫星反演数据集	中国统计年鉴	GBD	—	127
Zou等(2019)	2013	中国	地面观测站、TSAM模型	中国统计年鉴、资源环境科学与数据中心	GBD、中国统计年鉴	5.8—8.8	120

7 结论

本文研究了2000年—2018年中国和印度的PM_{2.5}浓度变化及其人口暴露情况, 分析了由于PM_{2.5}污染造成的过早死亡人数的时空分布特征和趋势。研究表明, 2000年—2018年, 中国和印度PM_{2.5}浓度分布有明显的空间分布格局。中国PM_{2.5}浓度高值区集中分布在新疆、四川盆地、华北平原以及长江经济带等地区; 印度PM_{2.5}高值区集中分布在北部地区。中国PM_{2.5}人口暴露情况总体呈减缓趋势, 且居住在高浓度PM_{2.5}环境的人口比例减少; 印度人口暴露情况呈加重趋势。19年来, 中国和印度PM_{2.5}过早死亡人数都呈现增加趋势以及空间不均匀分布。中国19年年均过早死亡人数达122.8万, 集中在华北地区和四川盆地。印度19年年均过早死亡人数到50.6万, 集中在北部地区。

总的来说, 本研究针对PM_{2.5}污染严重且人口众多的两个发展中国家, 基于卫星反演的PM_{2.5}浓度遥感数据, 建立了2000年—2018年的高分辨率的PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数数据集。并且, 本文所选取的研究年份并不是单独一年或间隔几年, 而是长时间序列的连续年份, 从而分析PM_{2.5}及其过早死亡人数的长期且连续的时空格局演变。在估算PM_{2.5}导致的过早死亡人数时, 考虑了6种

疾病终端, 使过早死亡人数的估算更加全面。研究结果有望为两个国家的大气污染政策的制定提供依据和参考。

但是, 本文针对PM_{2.5}导致的过早死亡人数估算中, 基准死亡率的选取并未考虑国家内部发展水平、医疗水平等造成的差异, 使用次国家级基准死亡率进行评估将是下一步工作的重点。

参考文献(References)

- Brauer M, Amann M, Burnett R T, Cohen A, Dentener F, Ezzati M, Henderson S B, Krzyzanowski M, Martin R V, Van Dingenen R, van Donkelaar A and Thurston G D. 2012. Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution. *Environmental Science and Technology*, 46(2): 652-660 [DOI: 10.1021/es2025752]
- Chowdhury S and Dey S. 2016. Cause-specific premature death from ambient PM_{2.5} exposure in India: estimate adjusted for baseline mortality. *Environment International*, 91: 283-290 [DOI: 10.1016/j.envint.2016.03.004]
- Ding D, Xing J, Wang S X, Liu K Y and Hao J M. 2019. Estimated contributions of emissions controls, meteorological factors, population growth, and changes in baseline mortality to reductions in ambient PM_{2.5} and PM_{2.5}-related mortality in China, 2013—2017. *Environmental Health Perspectives*, 127(6): 067009 [DOI: 10.1289/EHP4157]
- Fang D, Wang Q G, Li H M, Yu Y Y, Lu Y and Qian X. 2016. Mortality effects assessment of ambient PM_{2.5} pollution in the 74 leading

- cities of China. *Science of the Total Environment*, 569-570: 1545-1552 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.248]
- Global Burden of Disease Collaborative Network. 2018. Global Burden of Disease Study 2017 (GBD 2017) Population Estimates 1950—2017. Seattle, United States of America: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME)
- Guan Y, Kang L, Wang Y, Zhang N N and Ju M T. 2019. Health loss attributed to PM_{2.5} pollution in China's cities: economic impact, annual change and reduction potential. *Journal of Cleaner Production*, 217: 284-294 [DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.284]
- Hammer M S, van Donkelaar A, Li C, Lyapustin A, Sayer A M, Hsu N C, Levy R C, Garay M J, Kalashnikova O V, Kahn R A, Brauer M, Apte J S, Henze D K, Zhang L, Zhang Q, Ford B, Pierce J R and Martin R V. 2020. Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998—2018). *Environmental Science and Technology*, 54(13): 7879-7890 [DOI: 10.1021/acs.est.0c01764]
- Huang J, Pan X C, Guo X B and Li G X. 2018. Health impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan: an analysis of national air quality monitoring and mortality data. *The Lancet Planetary Health*, 2(7): e313-e323 [DOI: 10.1016/S2542-5196(18)30141-4]
- Jain V, Dey S and Chowdhury S. 2017. Ambient PM_{2.5} exposure and premature mortality burden in the holy city Varanasi, India. *Environmental Pollution*, 226: 182-189 [DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.028]
- Li Y, Zhao X G, Liao Q, Tao Y and Bai Y. 2020. Specific differences and responses to reductions for premature mortality attributable to ambient PM_{2.5} in China. *Science of the Total Environment*, 742: 140643 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140643]
- Li Y, Liao Q, Zhao X G, Bai Y and Tao Y. 2021. Influence of PM_{2.5} pollution on health burden and economic loss in China. *Environmental Science*, 42(4): 1688-1695 (李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕. 2021. PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响. *环境科学*, 42(4): 1688-1695) [DOI: 10.13227/j.hjlx.202008313]
- Liang F C, Yang X L, Liu F C, Li J X, Xiao Q Y, Chen J C, Liu X Q, Cao J, Shen C, Yu L, Lu F H, Wu X P, Zhao L C, Wu X G, Li Y, Hu D S, Huang J F, Liu Y, Lu X F and Gu D F. 2019. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of diabetes in China: a cohort study. *Environment International*, 126: 568-575 [DOI: 10.1016/j.envint.2019.02.069]
- Limaye V S, Schöpp W and Amann M. 2019. Applying integrated exposure-response functions to PM_{2.5} pollution in India. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1): 60 [DOI: 10.3390/ijerph16010060]
- Liu J, Han Y Q, Tang X, Zhu J and Zhu T. 2016. Estimating adult mortality attributable to PM_{2.5} exposure in China with assimilated PM_{2.5} concentrations based on a ground monitoring network. *Science of the Total Environment*, 568: 1253-1262 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.165]
- Lu X C, Lin C Q, Li W K, Chen Y A, Huang Y Q, Fung J C H and Lau A K H. 2019. Analysis of the adverse health effects of PM_{2.5} from 2001 to 2017 in China and the role of urbanization in aggravating the health burden. *Science of the Total Environment*, 652: 683-695 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.140]
- Maji K J. 2020. Substantial changes in PM_{2.5} pollution and corresponding premature deaths across China during 2015—2019: a model prospective. *Science of the Total Environment*, 729: 138838 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138838]
- Maji K J, Li V O K and Lam J C K. 2020. Effects of China's current Air Pollution Prevention and Control Action Plan on air pollution patterns, health risks and mortalities in Beijing 2014—2018. *Chemosphere*, 260: 127572 [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127572]
- Manojkumar N and Srimuruganandam B. 2021. Health benefits of achieving fine particulate matter standards in India-A nationwide assessment. *Science of the Total Environment*, 763: 142999 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142999]
- Sahu S K, Sharma S, Zhang H L, Chejarla V, Guo H, Hu J L, Ying Q, Xing J and Kota S H. 2020. Estimating ground level PM_{2.5} concentrations and associated health risk in India using satellite based AOD and WRF predicted meteorological parameters. *Chemosphere*, 255: 126969 [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126969]
- Wang H, Yin P, Fan W H, Wang Y, Dong Z M, Deng Q H and Zhou M G. 2021. Mortality risk associated with short-term exposure to particulate matter in China: estimating error and implication. *Environmental Science and Technology*, 55(2): 1110-1121 [DOI: 10.1021/acs.est.0c05095]
- Wang Q, Wang J N, He M Z, Kinney P L and Li T T. 2018. A county-level estimate of PM_{2.5} related chronic mortality risk in China based on multi-model exposure data. *Environment International*, 110: 105-112 [DOI: 10.1016/j.envint.2017.10.015]
- Wang Q, Zhu H H, Du P, Zhao L and Li T T. 2021. Health benefit of '14th Five-Year' and medium and long-term PM_{2.5} control targets in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas. *Research of Environmental Sciences*, 34(1): 220-228 (王情, 朱欢欢, 杜鹃, 赵靓, 李涪涪. 2021. 京津冀及周边地区“十四五”及中长期PM_{2.5}污染控制目标的健康效益预估研究. *环境科学研究*, 34(1): 220-228) [DOI: 1.13198/j.issn.1001-6929.2020.11.21]
- Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, Sun L, Peng Y R, Xue W H, Su T N and Cribb M. 2021. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM_{2.5} data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications. *Remote Sensing of Environment*, 252: 112136 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112136]
- Xiang J, Tao M H, Guo L, Chen L F, Tao J H and Gui L. 2022. Progress of near-surface PM_{2.5} concentration retrieve based on satellite remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(9): 1757-1776 (向娟, 陶明辉, 郭玲, 陈良富, 陶金花, 桂露. 2022. 基于卫星遥感的近地面PM_{2.5}浓度反演进展. *遥感学报*, 26(9): 1757-1776) [DOI: 10.11834/jrs.20210438]
- Xiao Q Y, Geng G N, Xue T, Liu S G, Cai C L, He K B and Zhang Q. 2022. Tracking PM_{2.5} and O₃ pollution and the related health burden in China 2013—2020. *Environmental Science and Technology*, 56(11): 6922-6932 [DOI: 10.1021/acs.est.1c04548]
- Xue T, Zhu T, Zheng Y X, Liu J, Li X and Zhang Q. 2019. Change in

- the number of PM_{2.5}-attributed deaths in China from 2000 to 2010: comparison between estimations from census-based epidemiology and pre-established exposure-response functions. *Environment International*, 129: 430-437 [DOI: 10.1016/j.envint.2019.05.067]
- Yang W and Jiang X L. 2021. Evaluating the influence of land use and land cover change on fine particulate matter. *Scientific Reports*, 11: 17612 [DOI: 10.1038/s41598-021-97088-8]
- Yang X C, Wang Y, Zhao C F, Fan H, Yang Y K, Chi Y L, Shen L X and Yan X. 2022. Health risk and disease burden attributable to long-term global fine-mode particles. *Chemosphere*, 287: 132435 [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132435]
- Yue H B, He C Y, Huang Q X, Yin D and Bryan B A. 2020. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM_{2.5} pollution in China. *Nature Communications*. 1462. [DOI: 10.1038/s41467-020-15319-4]
- Zhang Y Q. 2021. All-Cause Mortality Risk and Attributable Deaths Associated with Long-Term Exposure to Ambient PM_{2.5} in Chinese Adults. *Environmental Science & Technology*, 55(9): 6116-6127. [DOI: 10.1021/acs.est.0c08527]
- Zhou M G, Wang H D, Zhu J, Chen W Q, Wang L H, Liu S W, and Li Y C. 2016. Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990—2013: a systematic subnational analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet*, 387 (10015): 251-272. [DOI: 10.1016/S0140-6736(15)00551-6]
- Zou B, You J W, Lin Y, Duan X L, Zhao X G, Fang X, Matthew J C, and Li S X. 2019. Air pollution intervention and life-saving effect in China. *Environment International*, 125: 529-541. [DOI: 10.1016/j.envint.2018.10.045]

Disease burden assessment exposure to long-term PM_{2.5} pollution in China and India (2000—2018)

ZHU Yue^{1,2}, SHI Yusheng¹, LI Zhengqiang¹

1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

2. *School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract: With the increasing frequency of air pollution incidents worldwide, many studies have focused on the disease burden from long-term exposure to PM_{2.5} pollution. In China and India, the two most populous developing countries in the world, the disease burden attributable to PM_{2.5} exposure are particularly serious. Therefore, these countries need to develop a multi-year and comprehensive dataset of PM_{2.5}-related premature deaths to support their future air pollution prevention policies. However, only few studies have explored this topic over the past years. To fill this gap, this study analyzed the spatial and temporal patterns of PM_{2.5} concentrations and changes of population exposure to PM_{2.5} in China and India over the past 19 years (2000—2018) using high-resolution (0.01°×0.01°) satellite data. Combined with the Integrated Exposure Response (IER) model, this study comprehensively assessed the premature deaths from six diseases due to long-term PM_{2.5} exposure, including acute lower respiratory infection, (ALRI), Chronic Obstructive Pulmonary Disease, (COPD), type 2 diabetes (DIA), Ischemic Heart Disease (IHD), lung cancer (LNC), and stroke (STR).

Results show that those areas with high levels of PM_{2.5} concentrations in China were concentrated in Xinjiang, Sichuan Basin, North China Plain, and the Yangtze River Economic Belt. The annual population-weighted PM_{2.5} concentrations showed a decreasing trend (50 μg·m⁻³ in 2000 and 40.8 μg·m⁻³ in 2018). In India, high levels of PM_{2.5} concentrations were concentrated in the north, including Punjab, Haryana, and Uttar Pradesh. The annual population-weighted PM_{2.5} concentrations increased from 51.5 μg·m⁻³ in 2000 to 76.4 μg·m⁻³ in 2018. The number of premature deaths caused by PM_{2.5} exposure in China increased by 34.1% from 908000 in 2000 to 1378000 in 2018, with the annual average premature deaths totaling 1228000. STR was the major contributor to total premature deaths in the country, accounting for 45.9% (563000) of all fatalities. In India, the number of premature deaths attributable to PM_{2.5} increased rapidly from 343000 in 2000 to 750000 in 2018, with a net increase of 407000. The annual average premature deaths were 506000, the majority of which were attributed to IHD and STR, which accounted for 39.9% (202000) and 25.5% (129000) of all deaths, respectively. Moreover, DIA was responsible for 29000 (2.3%) and 30000 (6%) premature deaths in China and India, respectively, and therefore should not be ignored.

Overall, this study established a long-term series of high-resolution datasets on premature deaths due to PM_{2.5} exposure in China and India. The number of premature deaths caused by air pollution remain high in China and India, both of which have high PM_{2.5} concentrations and population density, thus necessitating stricter air pollution control policies. These results provide a reference for the formulation of air pollution policies in these countries. However, in estimating premature deaths due to PM_{2.5}, the baseline mortality rate did not consider the differences caused by the level of development and medical treatment within a country. Therefore, in a future study, the researchers will incorporate the sub-national baseline mortality rate when assessing premature deaths.

Key words: remote sensing, PM_{2.5}, disease burden, premature deaths, China, India, long time series

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41701498, 42071398)