

石家庄市空气质量改善前后 PM_{2.5} 污染导致的疾病负担评估

曲玥^{1,2}, 曾芳婷^{1,2}, 陈风格^{1,2,3}, 关茗洋^{1,3}

1. 石家庄市疾病预防控制中心, 河北 石家庄 050011
2. 华北理工大学公共卫生学院, 河北 唐山 063210
3. 中国疾病预防控制中心环境与健康研究基地(石家庄), 河北 石家庄 050011

摘要:

[背景] 空气污染已逐渐成为世界各国面临的重大环境和公共卫生问题。雾霾天气不仅对人群健康产生影响, 也对社会公共安全构成威胁。我国陆续颁布“大气十条”、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等政策, 旨在改善环境空气质量。通过 2017 年环境监测数据可知, 京津冀地区完成既定目标, 空气质量得到改善。

[目的] 为评估空气质量改善效果, 以石家庄市为例, 评估石家庄市 2014—2021 年间空气质量改善前后细颗粒物(PM_{2.5})污染导致的疾病负担情况, 包括归因于 PM_{2.5} 污染导致的死亡人数和健康经济损失评估。

[方法] 收集 2014—2021 年石家庄市死因数据、市区 PM_{2.5} 浓度资料、市区年末常住人口数、市区国内生产总值(GDP)、市区人均可支配收入等数据。基于全球暴露死亡模型(GEMM)评估归因于 PM_{2.5} 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病以及呼吸系统疾病的死亡人数, 采用统计生命价值法(VOSL)评估其造成的不同类型疾病的健康经济损失。

[结果] 研究期间, 石家庄市 PM_{2.5} 年均浓度在 2014 年时最高, 于 2017 年开始呈逐年下降趋势, 空气质量开始有所改善, 但均超过我国现行环境空气质量标准二级浓度限值(35 μg·m⁻³)。2014—2021 年, 归因于 PM_{2.5} 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病以及呼吸系统疾病死亡人数分别共计 41 326、40 246、21 792、5 022 人; PM_{2.5} 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病以及呼吸系统疾病相应的健康经济损失分别共计 373.62、363.69、196.95、45.35 亿元; 从空气质量改善的角度来看, 归因死亡人数与健康经济损失均自 2017 年开始呈波动式降低, 2019 年有明显降低。若 PM_{2.5} 年均浓度达到我国环境空气质量标准二级浓度限值(35 μg·m⁻³), PM_{2.5} 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡人数相较未达标时分别减少约 1.7、1.6、0.9、0.2 万人, 相应的健康经济损失将分别减少 152.01、147.61、79.59、18.59 亿元; 若 PM_{2.5} 年均浓度达到世界卫生组织最新提出的 PM_{2.5} 空气质量指导值(5 μg·m⁻³), PM_{2.5} 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡人数相较未达标时分别减少约 3.6、3.5、1.9、0.4 万人, 相应的健康经济损失将分别减少 326.73、317.96、172.11、39.69 亿元。

[结论] PM_{2.5} 污染可导致严重的死亡负担和经济损失, 在国务院“大气十条”及《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的实施的, 石家庄市 PM_{2.5} 浓度显著降低, 相应减少了健康损失和经济损失, 且进一步控制 PM_{2.5} 污染能取得更大的健康效益和经济收益, 肯定了地方开展空气污染防治工作的积极成效。

关键词: 石家庄市; 市区; 空气质量; 改善; 细颗粒物; 超额死亡; 健康经济损失

Disease burden due to PM_{2.5} pollution before and after air quality improvement in Shijiazhuang
QU Yue^{1,2}, ZENG Fangting^{1,2}, CHEN Fengge^{1,2,3}, GUAN Mingyang^{1,3} (1. Shijiazhuang Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang, Hebei 050011, China; 2. School of Public Health, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 3. Research Base for Environment and Health in Shijiazhuang, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract:

[Background] Air pollution has gradually become a major environmental and public health



DOI 10.11836/JEOM23221

基金项目

河北省医学科学研究课题计划(20240228)

作者简介

曲玥(1995—), 女, 硕士生;
E-mail: 17862834035@163.com

通信作者

关茗洋, E-mail: gmyguan@126.com

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2023-07-06

录用日期 2024-01-11

文章编号 2095-9982(2024)03-0294-09

中图分类号 R12

文献标志码 A

引用

曲玥, 曾芳婷, 陈风格, 等. 石家庄市空气质量改善前后 PM_{2.5} 污染导致的疾病负担评估[J]. 环境与职业医学, 2024, 41(3): 294-302.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM23221

Funding

This study was funded.

Correspondence to

GUAN Mingyang, E-mail: gmyguan@126.com

Editorial Board Members' authorship No

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2023-07-06

Accepted 2024-01-11

To cite

QU Yue, ZENG Fangting, CHEN Fengge, et al. Disease burden due to PM_{2.5} pollution before and after air quality improvement in Shijiazhuang [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(3): 294-302.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM23221

problem faced by countries around the world. Hazy weather not only affects the health of the population, but also poses a threat to social and public safety. China has successively promulgated policies such as the "Ten Articles on Atmosphere" and the *Three-year action plan to fight air pollution*, aiming to improve ambient air quality. It is clear that the Beijing-Tianjin-Hebei region has accomplished the set targets and improved air quality according to the environmental monitoring data of 2017.

[Objective] To assess air quality improvements through the evaluation of the disease burden due to fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in Shijiazhuang City before and after the air quality improvement from 2014 to 2021, including fatalities and health economic losses attributed to PM_{2.5} pollution.

[Methods] Data on causes of death, PM_{2.5} concentrations, the number of permanent residents at the end of the year, gross regional product, and disposable income per capita in urban areas of Shijiazhuang were collected from 2014 to 2021. Total, non-accidental, circulatory, and respiratory deaths due to PM_{2.5} pollution were estimated by global exposure mortality models (GEMM). Health and economic losses due to selected diseases were calculated by value of statistical life (VOSL).

[Results] During the study period, the average annual concentration of PM_{2.5} in Shijiazhuang was highest in 2014, and began to decline year by year in 2017, but all exceeded the current national limit of the second level of ambient air quality standards (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). The total deaths, non-accidental deaths, circulatory disease deaths, and respiratory disease deaths attributed to PM_{2.5} pollution from 2014 to 2021 were 41 326, 40 246, 21 792, and 5 022, respectively; the associated health economic losses were 37.362, 36.369, 19.695, and 4.535 billion yuan, respectively. From the perspective of improved air quality, both the number of attributed deaths and health economic losses had declined in a volatile manner since 2017, with a significant decrease in 2019. If the average annual concentration of PM_{2.5} reached the second-level limit of China's ambient air quality standard (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), the total deaths, non-accidental deaths, and deaths from circulatory diseases and respiratory diseases due to PM_{2.5} pollution would deducted by about 17 000, 16 000, 9 000, and 2 000, respectively; the corresponding health and economic losses would decreased by 15.201, 14.761, 7.959, and 1.859 billion yuan, respectively. If the average annual concentration of PM_{2.5} reached the latest PM_{2.5} air quality guidelines (5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) proposed by the World Health Organization, the total deaths, non-accidental deaths, circulatory disease deaths, and respiratory disease deaths due to PM_{2.5} pollution would deducted by 36 000, 35 000, 19 000, and 4 000, respectively, and the corresponding health and economic losses would reduced by 32.673, 31.796, 17.211, and 3.969 billion yuan, respectively.

[Conclusion] PM_{2.5} pollution can lead to severe mortality burden and economic loss. Under the implementation of the State Council's "Ten Articles on Atmosphere" and the *Three-year action plan to fight air pollution*, Shijiazhuang's PM_{2.5} concentration and health economic losses have been significantly reduced, and further control of PM_{2.5} pollution can achieve greater health benefits and economic gains, affirming the positive results of local air pollution prevention work.

Keywords: Shijiazhuang; urban area; air quality; improvement; fine particulate matter; excess death; health economic loss

大气污染对人群健康的影响一直是国内外研究热点之一^[1]。2019 年全球疾病负担(global burden of disease, GBD)研究结果表明,大气污染已成为排名第四位的死亡危险因素,造成全球约有 667 万人死亡^[2],引起了全社会对大气污染及其健康损害的空前关注。2013—2014 年京津冀地区相继爆发大范围的雾霾污染天气,颗粒物污染及其导致的健康问题随之成为了社会关注的焦点,已有大量流行病学研究证实,细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})污染会引起不同程度的呼吸困难、支气管炎甚至肺癌等呼吸系统疾病,同样易对人体心脑血管、神经和免疫系统造成损害,由此造成严重的健康危害^[3-4];另一方面,雾霾天气同样会对社会公共安全产生威胁,由于其成分中包含硫酸、硝酸和有机碳氢化合物等粒子,大面积聚集会使得空气浑浊,对交通、铁路网络、航空运输及农作物生长等方面带来负面影响,进而会对社会经济的发展产生持续的不良效应^[5]。为此,国务院在 2013 年发布的《大气污染防治行动计划》(大气十条)要求京津冀地

区在 2017 年 PM_{2.5} 质量浓度比 2012 年下降 25%^[6]。石家庄市作为河北省工业大市,由于经济不断发展导致人与自然的矛盾也日益凸显,主要在大气污染这一方面表现尤为突出。经治理,2017 年石家庄市 PM_{2.5} 质量浓度为 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{2.5} 污染状况整体上有所好转^[6]。为巩固加强已取得的成绩,2018 年 7 月,国务院公开发布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,计划目标指出“经过 3 年努力,大幅减少主要空气污染物排放总量,进一步明显降低 PM_{2.5} 浓度,明显减少重污染天数,明显改善环境空气质量”^[7]。石家庄市空气污染状况据历年《石家庄市环境质量公报》可知^[8],自 2017 年,石家庄市在环境空气质量治理方面取得一定成效且得到持续改善。但既往石家庄市关于 PM_{2.5} 污染的研究中,多通过时间序列分析、病例交叉法或固定群组研究等方法探讨其对不同类型的疾病造成的急慢性影响,而从经济学角度分析其引起的健康经济损失研究较少,加之市区相较农村地区,机动车使用量更多,人员更加密集,从而导致 PM_{2.5} 污染更为严重。

故本研究以石家庄市市区为例,从空气质量改善角度出发,应用全球暴露死亡模型(global exposure mortality model, GEMM)计算石家庄市市区归因于 $PM_{2.5}$ 污染导致的不同类型疾病的死亡人数,并定量分析和评价其所引起的健康经济损失,为未来空气质量改善所产生的相关健康效益评估提供更为准确的流行病学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 死因数据 2014年1月1日—2021年12月31日石家庄市死因数据来源于石家庄市疾病预防控制中心死因登记报告信息系统,根据国际疾病统计分类编码(international statistical classification of diseases, ICD-10),按照非意外总死亡(A00~R99)、循环系统疾病(I00~I99)、呼吸系统疾病(J00~J99)进行死因分类。

1.1.2 暴露人口数据 $PM_{2.5}$ 浓度资料来源于石家庄市环保监测中心7个国控站点(人民会堂、二十二中南校区、职工医院、高新区、西北水源、西南高教、世纪公园),这些国控监测点分布于石家庄市主城区且覆盖了石家庄市全部主城区,均建立在远离交通主干道、工厂、偏远地区和居民区,以避免燃油燃煤等的干扰,所获取的数据能反映石家庄市主城区的真实污染水平,故本研究以石家庄市市区年末常住人口数作为暴露人群。市区国内生产总值(gross domestic product, GDP)及人均可支配收入均来自2015—2022年《石家庄市统计年鉴》^[9-16];北京市市区人均可支配收入来源于2015—2022年《北京市统计年鉴》^[17-24]。

1.2 健康终点

本研究以石家庄市总死亡、非意外死亡、循环系统疾病、呼吸系统疾病死亡作为健康终点。基于市区年末常住人口数据计算研究期间各类健康终点粗死亡率。绘制研究期间 $PM_{2.5}$ 年均浓度随时间变化的趋势图,观察其变化趋势并基于此确定研究期间空气质量改善前后的分界点。

1.3 归因死亡人数计算

本研究基于 GEMM 模型,利用全球疾病负担研究中提出的 $PM_{2.5}$ 归因死亡负担评估方法,按下列公式计算归因于 $PM_{2.5}$ 污染导致的不同类型疾病的死亡人数。公式如下:

$$RR(\Delta Z_i) = \exp\left\{\beta \times \log(1 + Z_i - Z_{cf}/\alpha) / (1 + \exp[-((Z_i - Z_{cf}) - \mu)]/\nu)\right\} \quad (1)$$

$$MOR = Pop \times Mortality \times PAF \quad (2)$$

$$PAF = (RR(\Delta Z_i) - 1) / RR(\Delta Z_i) \quad (3)$$

式中, $RR(\Delta Z_i) - PM_{2.5}$ 处于 Z_i 水平时对应的超额死亡风险;

$Z_i - PM_{2.5}$ 年均浓度;

$\beta - PM_{2.5}$ 暴露反应回归系数;

Z_{cf} —“反事实最小浓度”,取 $2.4 \mu g \cdot m^{-3}$,即认为在此浓度下 $PM_{2.5}$ 对人体健康无损害^[25];

α 、 μ 、 ν —定义 $PM_{2.5}$ 与死亡率关系的曲线形式,参考 Burnett 等^[25]的研究结果, $PM_{2.5}$ 污染导致的死亡负担,符合模型中非传染性疾病、呼吸道疾病标准,故参数值分别取 0.1430、1.6、15.5、36.8;

MOR— $PM_{2.5}$ 归因死亡数;

Pop—石家庄市市区年末常住人口数;

Mortality—石家庄市市区各类健康终点粗死亡率;

PAF—归因于 $PM_{2.5}$ 长期暴露而死亡的人数所占的比例,即归因分数。

1.4 健康经济损失评估

由于 $PM_{2.5}$ 污染会加重健康负担,从而增加额外医疗支出,进而导致健康经济损失。本研究采用统计生命价值(value of statistical life, VOSL)进行货币化评估 $PM_{2.5}$ 污染导致的健康经济损失。由于目前我国尚无特定省份的 VOSL 预估值,故根据已有省份(北京)的 VOSL 通过效益转换法进行调整,从而推导出石家庄市的 VOSL。效益转换法即应用他人的研究成果,将某一地区的估值根据人均收入/人均 GDP 转化为另一地区的估值的方式,目前也被广泛应用。本研究参考谢旭轩^[26]对北京市 VOSL 的研究结果(168 万元),考虑到北京市和石家庄市两地居民的收入差异,以北京市研究结果中支付意愿随收入变化的边缘效应系数,评估不同年份石家庄市 VOSL 值。

$$VOSL_{sjz} = VOSL_{bj} \times \left(\frac{Income_{sjz}}{Income_{bj}} \right)^b \quad (4)$$

式中, $VOSL_{sjz}$ 、 $VOSL_{bj}$ —分别表示石家庄、北京市的统计生命价值;

$Income_{sjz}$ 、 $Income_{bj}$ —分别表示石家庄、北京市市区的人均可支配收入;

b —弹性系数,表示支付意愿对收入增长的反映程度,由于其取值目前尚无定论,故参考 Hoffmann 等^[27]的研究结果,取 1 进行估算。

最后, $PM_{2.5}$ 污染导致的健康经济损失如下列公式:

$$\Delta E = VOSL_{sjz} \times MOR \quad (5)$$

1.5 $\text{PM}_{2.5}$ 不同控制标准下的疾病死亡负担和健康经济损失评估

近年来,石家庄市空气质量逐渐改善,但 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度仍未达到世界卫生组织(World Health Organization, WHO)提出的第一阶段过渡目标值 $35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 为了评估 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降所带来的健康效益和经济收益,本研究根据 WHO《全球空气质量指南》(Air Quality Guidelines, AQG)^[28]中修订的全球空气质量指导值以及 $\text{PM}_{2.5}$ 多阶段空气质量过渡目标值(interim targets, IT)设立 5 种控制标准,即 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降到该目标浓度,分别为 IT-1: $35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、IT-2: $25\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、IT-3: $15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、IT-4: $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、AQG: $5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别评估在以上 5 种不同控制标准下的 2014—2021 年每年不同类型疾病归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 导致的死亡人数及健康经济损失。并以其对应年为基线时期,计算不同类型疾病在 $\text{PM}_{2.5}$ 不同控制标准下所带来的归因死亡人数和健康经济损失收益。

2 结果

2.1 基本情况描述

2014—2021 年石家庄市常住人口数量和经济水平差异较小。从人口数量角度来看,石家庄市常住人口从 2014 年的 243.36 万人增加到 2021 年的 391.72 万人,人口增加近 148 万。GDP 从 2014 年的 2734.74 亿元增加到 2021 年的 3986.56 亿元,增长近 46%,同样人均可支配收入增长近 65%。结果见表 1。

表 1 2014—2021 年石家庄市市区人口信息基本情况
Table 1 Basic demographic information of Shijiazhuang urban area, 2014—2021

年份	年末常住人口/人	生产总值/亿元	人均可支配收入/元	粗死亡率/%			
				总死亡	非意外死亡	循环系统疾病	呼吸系统疾病
2014	2433555	2734.74	26071	5.11	4.85	2.66	0.58
2015	2876239	2909.81	28168	4.00	3.89	1.98	0.53
2016	2797333	3214.83	30459	4.39	4.28	2.28	0.54
2017	2943986	3396.27	32929	3.85	3.75	1.95	0.52
2018	2959569	3354.75	35563	5.06	4.95	2.75	0.61
2019	2973582	3569.15	38550	4.89	4.80	2.62	0.61
2020	2973582	3604.42	40247	4.76	4.69	2.63	0.56
2021	3917213	3986.56	43024	3.56	3.50	1.96	0.37

从空气质量改善的角度来看,研究期间, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在 2014 年时最高,于 2017 年开始呈逐年下降趋势。2017 年前后比较,2014—2016 年,81.6%的时间

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 $35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,其中质量浓度最高达 $388\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2017—2021 年,67.7%的时间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 $35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,其中质量浓度最高达 $381\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但均超过 GB 3095—2012《环境空气质量标准》规定的二级浓度限值($35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。结果见图 1。

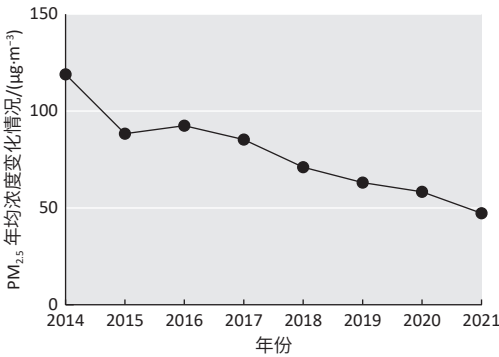


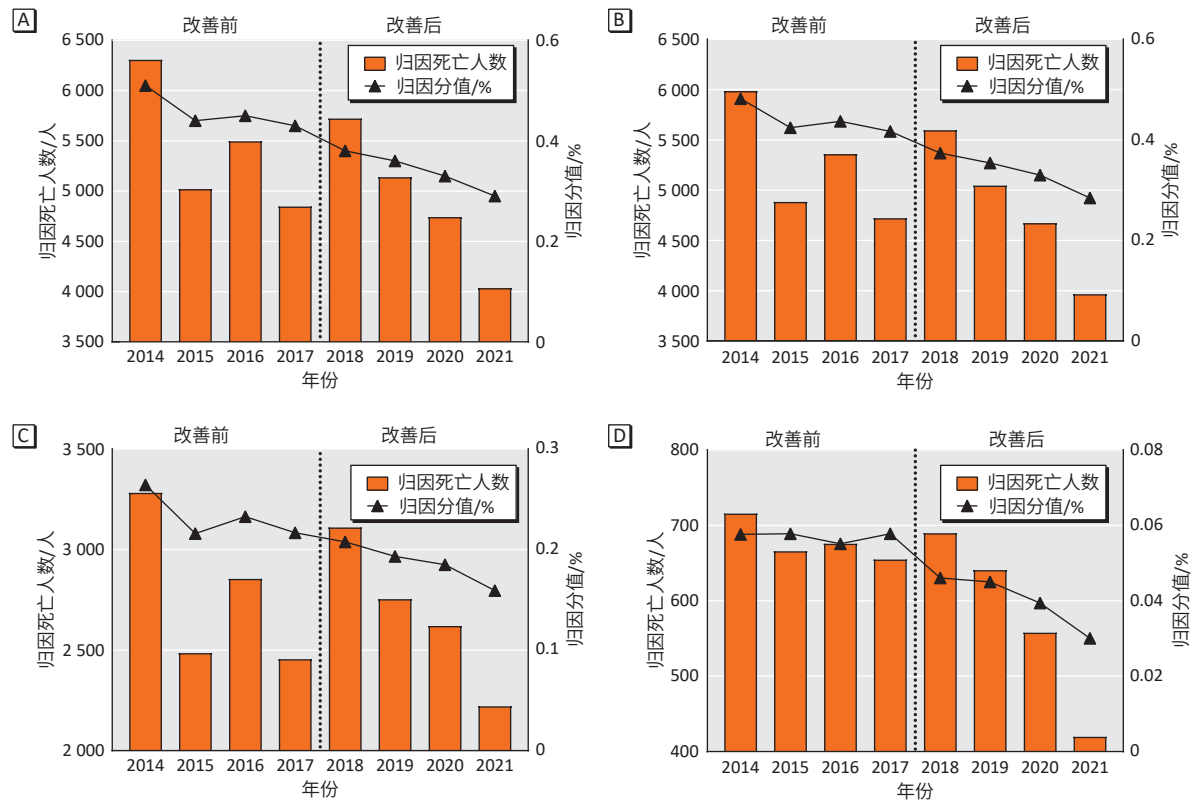
图 1 2014—2021 年石家庄市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度变化情况
Figure 1 Changes in annual average $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Shijiazhuang, 2014—2021

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的不同类型疾病的死亡人数和健康经济损失

据估算,研究期间,石家庄市市区归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病死亡、呼吸系统疾病死亡人数分别共计为 41326、40246、21792、5022 人。在 2014 年时 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的各类疾病的死亡人数最高,分别为 6309、5988、3284、716 人,归因分值分别为 50.78%、48.19%、26.43%、5.76%; 在 2021 年时 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的各类疾病的死亡人数最低,分别为 4037、3968、2222、420 人,归因分值分别为 28.92%、28.44%、15.92%、3.01%。

从 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的健康经济损失方面来看,研究期间,石家庄市市区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病死亡、呼吸系统疾病死亡健康经济损失分别共计 373.62、363.69、196.95、45.35 亿元。在 2014 年时 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的各类疾病的健康经济损失最大,分别为 62.93、59.73、32.76、7.14 亿元,分别占当年 GDP 的 1.23%、1.17%、0.64%、0.14%; 在 2021 年时 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的各类疾病的健康经济损失最低,分别为 35.79、35.19、19.71、3.72 亿元,分别占当年 GDP 的 0.55%、0.54%、0.30%、0.06%。

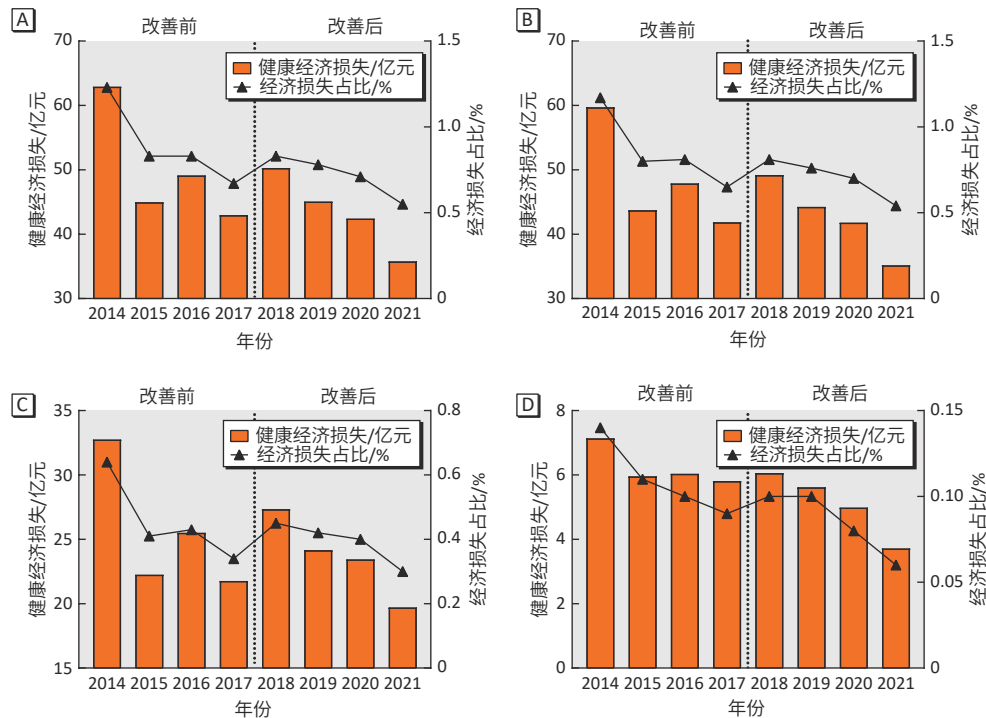
从空气质量改善的角度来看,2017 年石家庄市市区空气质量开始有所改善, $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的各类疾病的归因死亡人数与健康经济损失也均自 2017 年之后呈波动式降低,2019 年有明显降低。结果见图 2 和图 3。



[注] 图中 A、B、C、D 分别为总死亡、非意外死亡、循环系统死亡、呼吸系统死亡的死亡人数。

图 2 2014—2021 年石家庄市 PM_{2.5} 污染导致的不同类型疾病的死亡人数

Figure 2 Deaths due to selected diseases attributable to PM_{2.5} pollution in Shijiazhuang, 2014-2021



[注] 图中 A、B、C、D 分别为因总死亡、非意外死亡、循环系统死亡、呼吸系统死亡的健康经济损失。

图 3 2014—2021 年石家庄市 PM_{2.5} 污染导致的不同类型疾病的健康经济损失

Figure 3 Health economic losses due to selected diseases attributable to PM_{2.5} pollution in Shijiazhuang, 2014-2021

2.3 不同控制标准下的不同类型疾病的死亡负担和健康经济损失

研究期间,若 $PM_{2.5}$ 年均浓度下降, $PM_{2.5}$ 污染导致的死亡人数和健康经济损失均会得到明显的收益。若 $PM_{2.5}$ 年均浓度达标(IT-1: $35 \mu g \cdot m^{-3}$), $PM_{2.5}$ 污染导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡人数相较未达标时分别减少约 1.7、

1.6、0.9、0.2 万人,健康经济损失可分别避免 152.01、147.61、79.59、18.59 亿元;当 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到 AQG($5 \mu g \cdot m^{-3}$) 水平时, $PM_{2.5}$ 导致的总死亡、非意外死亡、循环系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡人数相较未达标时分别减少约 3.6、3.5、1.9、0.4 万人,健康经济损失可分别避免 326.73、317.96、172.11、39.69 亿元。结果见表 2。

表 2 2014—2021 年石家庄市市区不同 $PM_{2.5}$ 控制情景下的归因死亡人数和经济损失情况
Table 2 Attributable deaths and economic losses by different $PM_{2.5}$ control scenarios in Shijiazhuang, 2014-2021

死亡原因	IT-1		IT-2		IT-3		IT-4		AQG	
	归因死亡 人数	经济损失/ 亿元	归因死亡 人数	经济损失/ 亿元	归因死亡 人数	经济损失/ 亿元	归因死亡 人数	经济损失/ 亿元	归因死亡 人数	经济损失/ 亿元
总死亡	16 704	152.01	21 850	198.33	27 618	250.24	31 119	281.75	36 116	326.73
非意外死亡	16 230	147.61	21 250	192.77	26 876	243.39	30 290	274.11	35 164	317.96
循环系统疾病死亡	8 748	79.59	11 474	104.12	14 530	131.61	16 384	148.30	19 031	172.11
呼吸系统疾病死亡	2 046	18.59	2 668	24.18	3 365	30.45	3 788	34.26	4 392	39.69

3 讨论

随着石家庄市经济的高速发展及城镇化进程的加快,给城市大气污染控制带来了巨大的挑战。根据中科院陈松溪院士最新空气质量评估报告^[29]可知,全国整体空气质量持续改善,虽然石家庄市始终践行建设生态石家庄的要求,大力改善城市的环境空气质量,所带来的人群健康收益和经济收益有一定成效,但石家庄市 $PM_{2.5}$ 年均浓度相较于大多数城市一直排名靠前,空气质量改善效果并不显著^[30],要达到我国空气质量二级标准($35 \mu g \cdot m^{-3}$)还有很大挑战。

本研究采用 GEMM 模型来评估 $PM_{2.5}$ 的风险,不仅量化了 $PM_{2.5}$ 与死亡的暴露反应关系的不确定性,还在综合暴露反应关系(integrated exposure-response, IER)模型的基础上纳入了中国队列的研究信息,拓展了对高浓度段 $PM_{2.5}$ 风险的评估能力^[25]; IER 是世界卫生组织对可归因于 $PM_{2.5}$ 污染的疾病负担估计的基础,但是该模型纳入的 $PM_{2.5}$ 污染与疾病死亡率关系的队列研究多在美国等暴露浓度较低的地区开展,而对于较高浓度时两者之间的关系缺乏直接证据^[31];且有研究显示,相比 IER 模型, GEMM 模型更适用于中国等高暴露地区使用^[32-33]。本研究结果显示, $PM_{2.5}$ 污染可造成严重的健康损失,董莹等^[34]基于泊松回归的比例风险模型,估算 $PM_{2.5}$ 污染可引起 6 105 名居民过早死亡;李勇等^[35]通过采用 GBD 建立的 IER 模型,开展全国范围的归因于 $PM_{2.5}$ 污染的疾病负担,结果提示 $PM_{2.5}$ 污染造成约 106.04 万人过早死亡,约占总死亡人数的 10.9%;崔永学等^[36]同样采用 IER 模型得出 2013 年和

2017 年济南市 $PM_{2.5}$ 所致的归因死亡人数中,冠心病死亡人数最高。河北省一项关于 $PM_{2.5}$ 长期暴露的肺癌死亡负担研究中,发现 2017 年肺癌超额死亡人数约为 7 071 人,其中石家庄市排名第一位^[31]。本研究结果同样显示, $PM_{2.5}$ 污染改善能够带来一定的人群健康收益。从短期改善的角度来看,北京一项研究表明,“奥运蓝”期间,180 名成人的最大呼气流量相比“奥运蓝”之后下降了 $35.2 L \cdot min^{-1}$ ^[37];同样广州一项关于空气质量改善的研究表明,亚运会期间预计在广州可避免 106 例过早死亡、1869 例住院病例、20 026 例门诊病例的发生^[38];从长期改善的角度来看,若 $PM_{2.5}$ 质量浓度达到“奥运蓝”时期的水平,在 2017—2030 年每年将增加 24 万年的人均寿命年^[39]。总体来看,本研究与各研究结果基本相似,考虑到在健康效应终点的选择、健康经济损失的计算方法以及研究人群的选择不同等原因,结果可能会存在一定的差异。

空气污染影响居民健康可导致劳动能力下降或丧失,进而造成收入下降,也会导致医疗成本和预防成本的增加^[40]。本研究采用目前广泛使用的统计生命价值法,它表示人们为了降低或规避死亡风险而愿意付出的代价,评估由于居民早逝而带来的健康经济损失。本研究表明, $PM_{2.5}$ 污染不仅直接对健康产生危害,也造成了巨额健康经济损失。国内外相关研究也得出类似结论,刘玉杰^[41]评估成都市四种空气污染物导致的健康经济损失,其中 $PM_{2.5}$ 可造成健康经济损失 92 900.67 万元;李勇等^[35]估计 2016 年 $PM_{2.5}$ 污染造成的健康经济损失中,河北省处于较高水平,约为

451.42 亿元; 印度一项关于评估大气污染的经济损失影响的研究中, 估算出大气污染导致早逝所致的健康经济损失达 8.0 亿美元^[42]。由于石家庄市继 2017 年空气质量开始改善, 随着 $PM_{2.5}$ 浓度下降不仅能带来健康效益, 还能带来潜在的经济收益。陈莎等^[6]对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的健康经济损失进行估算, 随着 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度的大幅下降, 各不良健康结局的经济损失也随之呈下降趋势。这与韩士杰、周璐、么艳鑫等^[3, 43-44]研究结果一致, 且国外同样有类似研究, Yu 等^[45]收集巴西 5 个地区 5565 个城市的死亡记录探究若 $PM_{2.5}$ 浓度降到 AQG 水平与预期寿命损失的关联, 结果表明, 若 $PM_{2.5}$ 浓度降至 AQG ($5 \mu g \cdot m^{-3}$) 水平时, 预期寿命可延长 0.78 (0.66~0.90) 年。Evangelopoulos 等^[46]为探索全球 $PM_{2.5}$ 污染导致的疾病负担减少情况, 基于 WHO2016 年发布的数据, 结果表明, 如果所有国家均达到 AQG ($10 \mu g \cdot m^{-3}$) 水平, 全球归因于 $PM_{2.5}$ 污染导致的总死亡人数将减少一半。Benaissa 等^[47]分析空气污染短期暴露对特定人群的影响, 结果显示, 通过降低 PM_{10} 的年均浓度可实现较大的健康收益。表明加强大气污染的治理以改善居民的生活环境, 提高公众的健康水平是很有必要的, 且随着空气质量的逐步改善, 单位 $PM_{2.5}$ 降低带来的边际效益会越来越大^[48]。然而低水平空气污染的研究表明, 污染物即使在较低浓度下仍对人群健康产生影响^[46, 49]。

整体来看, 本研究在一定程度上反映了石家庄市 $PM_{2.5}$ 污染导致的人群健康危害和健康经济损失, 从空气质量改善效益构成来看, 在国务院“大气十条”及《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的实施下, 石家庄市 $PM_{2.5}$ 浓度显著降低, 取得了较好的环境效益, 也减少了人体健康损失和经济损失, 且进一步控制 $PM_{2.5}$ 污染能取得更大的健康效益和经济收益, 表明了石家庄市采取的空气污染防治政策的有效性和必要性。然而本研究同样存在一定的局限性: 首先, 由于空气污染对人群健康的影响是多种污染物共同作用的结果, 人群健康还会受到其他因素的影响。其次, 本研究仅探讨 $PM_{2.5}$ 污染对人群健康的影响, 未考虑其他污染物污染对人群健康的影响以及预防疾病带来的经济损失、受教育程度、城市绿化情况、新冠疫情、医疗卫生事业改革等因素, 可能会使本研究的评估结果与其他研究有一定差异。最后, 本研究通过 GEMM 方法评估 $PM_{2.5}$ 暴露的相对风险, 由于不同地区 $PM_{2.5}$ 浓度水平、组成成分、人口特征等差异, 可能会造成较大的 $PM_{2.5}$ 健康效应评估的不确定性。提示今后应重视控

制 $PM_{2.5}$ 污染工作, 需认识到造成其污染的根本原因在于经济快速发展导致社会经济活动对环境的破坏程度超过了环境生态承载能力, 必须从根源进行有效治理, 采取针对性的措施“扬长避短”, 坚持从源头治理, 如通过加强燃煤控制, 推进能源结构调整, 开发清洁能源以替代能源以减少 $PM_{2.5}$ 排放量; 加强公共交通建设、控制生活污染, 借助洒水作业等方式防止建筑和道路扬尘等, 国家在制定相应的治理政策时, 重视相应的成本-收益分析, 虽然这些政策会在一定程度上对经济造成短期的负面影响, 但从长远角度来看, 有效的治理政策带来的健康效益和经济收益可能远超过相关减排政策带来的影响^[50]。

参考文献

- [1] WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide[R]. Geneva: WHO, 2006.
- [2] GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019[J]. *Lancet*, 2020, 396(10258): 1223-1249.
- [3] 韩士杰, 王佳, 燕启社, 等. 2014~2016年间郑州市控制 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康效益评估[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2565-2571.
HAN SJ, WANG J, YAN QS, et al. Health benefit evaluation for PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution control in Zhengzhou, China, 2014-2016[J]. *Environ Sci*, 2019, 40(6): 2565-2571.
- [4] LI L, LEI Y, WU S, et al. The health economic loss of fine particulate matter $PM_{2.5}$ in Beijing[J]. *J Clean Prod*, 2017, 161: 1153-1161.
- [5] 汪然. 雾霾污染导致的居民健康损害成本估算研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
WANG R. Study on cost estimation of residents' health costs caused by smog pollution[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [6] 陈莎, 刘影影, 李素梅, 等. 京津冀典型城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险及经济损失研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(3): 1146-1153.
CHEN S, LIU YY, LI SM, et al. Health risks and economic losses caused by $PM_{2.5}$ pollution in the typical urban regions of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *J Saf Environ*, 2020, 20(3): 1146-1153.
- [7] 于浩, 冯利红, 侯常春, 等. 中国空气颗粒物污染改善背景下的人群健康收益研究进展[J]. *公共卫生与预防医学*, 2018, 29(5): 81-84.
YU H, FENG LH, HOU CC, et al. Advances in research on population health benefits under the background of air particulate pollution improvement in China[J]. *J Public Health Prev Med*, 2018, 29(5): 81-84.
- [8] 石家庄市生态环境局. 2018年石家庄市环境质量公报[EB/OL]. [2019-04-30]. <https://sthjj.sjz.gov.cn/eportal3.4/cms/jsp/site001/article.jsp?fchannelidentity=402882663fe4de03013fe4e9defe025e&articleId=8afaa1616a58b0c2016a6d31eca000df&a1b2dd=7xaac>.
Shijiazhuang Ecological Environment Bureau. 2018 Shijiazhuang environmental quality bulletin[EB/OL]. [2019-04-30]. <https://sthjj.sjz.gov.cn/eportal3.4/cms/jsp/site001/article.jsp?fchannelidentity=402882663fe4de03013fe4e9defe025e&articleId=8afaa1616a58b0c2016a6d31eca000df&a1b2dd=7xaac>.
- [9] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [10] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [11] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [12] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [13] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [14] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [15] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [16] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄统计年鉴2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- Shijiazhuang Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shijiazhuang. Shijiazhuang statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [17] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [18] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [19] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [20] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [21] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [22] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [23] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [24] 北京市统计局, 国家统计局北京调查队. 北京统计年鉴2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [25] BURNETT R, CHEN H, SZYSZKOWICZ M, et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115(38): 9592-9597.
- [26] 谢旭轩. 健康的价值: 环境效益评估方法与城市空气污染控制策略[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- XIE X X. The value of health: applications of choice experiment approach and urban air pollution control strategy[D]. Beijing: Peking University, 2011.
- [27] HOFFMANN S, KRUPNICK A, QIN P. Building a set of internationally comparable value of statistical life studies: estimates of Chinese willingness to pay to reduce mortality risk[J]. *J Benefit Cost Anal*, 2017, 8(2): 251-289.
- [28] WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide[R]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [29] 北京大学统计科学中心环境统计组. 空气质量评估报告(八): “3+95”城市2013-2020年区域污染状况评估[EB/OL]. [2021-05-20]. <https://www.stat-center.pku.edu.cn/kxyj/kydt/1342733.htm>.
- Center for statistical science, Peking University. Air quality assessment report (VIII): regional pollution assessment of the “3+95” cities for 2013-2020[EB/OL]. [2021-05-20]. <https://www.stat-center.pku.edu.cn/kxyj/kydt/1342733.htm>.
- [30] 李金洁. 石家庄市PM_{2.5}浓度的影响因素及预测研究[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2022.
- LI J J. Study on the influencing factors and prediction of PM_{2.5} concentration in Shijiazhuang City[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2022.
- [31] 任萌, 刘言玉, 李道娟, 等. 河北省PM_{2.5}长期暴露的肺癌死亡负担及经济损失[J]. *环境卫生学杂志*, 2022, 12(5): 345-350.
- REN M, LIU Y Y, LI D J, et al. Lung cancer mortality burden and economic losses caused by long-term exposure to PM_{2.5} in Hebei Province, China[J]. *J Environ Hyg*, 2022, 12(5): 345-350.
- [32] XUE T, ZHU T, ZHENG Y, et al. 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[J]. *Environ Int*, 2019, 129: 430-437.

- [33] YIN P, BRAUER M, COHEN A, et al. Long-term fine particulate matter exposure and nonaccidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men [J]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125(11): 117002.
- [34] 董莹, 许国章, 王爱红, 等. 2014-2016年某市城区PM_{2.5}污染对居民健康危害及经济损失评估[J]. 中国预防医学杂志, 2018, 19(8): 579-582.
- DONG Y, XU G Z, WANG A H, et al. Evaluation of PM_{2.5} air pollution impacts on the public health and related economic loss in a city from 2014 to 2016 [J]. *Chin Prev Med*, 2018, 19(8): 579-582.
- [35] 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 等. PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1688-1695.
- LI Y, LIAO Q, ZHAO X G, et al. Influence of PM_{2.5} pollution on health burden and economic loss in China [J]. *Environ Sci*, 2021, 42(4): 1688-1695.
- [36] 崔永学, 张扬, 王丽珩, 等. 2013年和2017年济南市大气PM_{2.5}污染导致的疾病负担研究[J]. 环境卫生学杂志, 2020, 10(6): 559-563, 568.
- CUI Y X, ZHANG Y, WANG L H, et al. Burden of disease caused by atmospheric PM_{2.5} pollution in Jinan, China, in 2013 and 2017 [J]. *J Environ Hyg*, 2020, 10(6): 559-563, 568.
- [37] MU L, DENG F, TIAN L, et al. Peak expiratory flow, breath rate and blood pressure in adults with changes in particulate matter air pollution during the Beijing Olympics: a panel study [J]. *Environ Res*, 2014, 133: 4-11.
- [38] DING D, ZHU Y, JANG C, et al. Evaluation of health benefit using BenMAP-CE with an integrated scheme of model and monitor data during Guangzhou Asian games [J]. *J Environ Sci (China)*, 2016, 42: 9-18.
- [39] HUANG C, MORAN A E, COXSON P G, et al. Potential cardiovascular and total mortality benefits of air pollution control in urban China [J]. *Circulation*, 2017, 136(17): 1575-1584.
- [40] 范凤岩, 王洪飞, 樊礼军. 京津冀地区空气污染的健康经济损失评估[J]. 生态经济, 2019, 35(9): 157-163.
- FAN F Y, WANG H F, FAN L J. Health damage and economic loss assessment of air pollution in Jing-Jin-Ji region [J]. *Ecol Econ*, 2019, 35(9): 157-163.
- [41] 刘玉杰. 成都市大气污染相关癌症患者死亡风险及其健康经济损失评估[D]. 成都: 成都医学院, 2022.
- LIU Y J. Air pollution-related excess mortality and health economic losses assessment of cancer patients in Chengdu [D]. Chengdu: Chengdu Medical College, 2022.
- [42] India State-Level Disease Burden Initiative Air Pollution Collaborators. Health and economic impact of air pollution in the states of India: the global burden of disease study 2019 [J]. *Lancet Planet Health*, 2021, 5(1): e25-e38.
- [43] 周璐, 牛越, 陈仁杰, 等. 上海市PM_{2.5}污染相关的死亡负担和经济健康损失评估[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3741-3747.
- ZHOU L, NIU Y, CHEN R J, et al. Assessment of PM_{2.5}-related mortality burden and health economic loss in Shanghai [J]. *China Environ Sci*, 2023, 43(7): 3741-3747.
- [44] 么艳鑫, 王颖, 佟俊旺. 唐山市大气PM_{2.5}引起居民健康危害的经济学评价[J]. 现代预防医学, 2021, 48(4): 623-627.
- YAO Y X, WANG Y, TONG J W. Economic evaluation of health hazard caused by PM_{2.5} pollution in Tangshan [J]. *Mod Prev Med*, 2021, 48(4): 623-627.
- [45] YU P, XU R, LI S, et al. Loss of life expectancy from PM_{2.5} in Brazil: a national study from 2010 to 2018 [J]. *Environ Int*, 2022, 166: 107350.
- [46] EVANGELOPOULOS D, PEREZ-VELASCO R, WALTON H, et al. The role of burden of disease assessment in tracking progress towards achieving WHO global air quality guidelines [J]. *Int J Public Health*, 2020, 65(8): 1455-1465.
- [47] BENAÏSSA F, MAESANO C N, ALKAMA R, et al. Short-term health impact assessment of urban PM₁₀ in Bejaia City (Algeria) [J]. *Can Respir J*, 2016, 2016: 8209485.
- [48] APTE J S, MARSHALL J D, COHEN A J, et al. Addressing global mortality from ambient PM_{2.5} [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 49(13): 8057-8066.
- [49] 林在生, 林少凯, 王恺, 等. 低浓度PM_{2.5}对老年人群死亡的影响: 基于2015-2018年福州市数据的时间序列研究[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(2): 157-161.
- LIN Z S, LIN S K, WANG K, et al. Time-series study on effects of low-concentration PM_{2.5} on mortality in elderly people in Fuzhou from 2015 to 2018 [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2020, 37(2): 157-161.
- [50] 庞闰枝. 中国雾霾污染健康经济损失与治理路径研究[D]. 广州: 暨南大学, 2018.
- PANG R Z. The study on economic burden of PM_{2.5} and its treatment path in China [D]. Guangzhou: Jinan University, 2018.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 张晨晨、王晓宇)