

DOI: 10.3724/EE.1672-9250.2025.53.025

CSTR: 32253.14.EE.1672-9250.2025.53.025

2016—2023年间中国典型城市大气污染健康损害 经济价值评估

崔立江¹, 周雪冬², 张 淼¹, 许益杭¹, 武 艳^{1,*}

(1. 山东大学(青岛) 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266237; 2. 山东大学(青岛) 资产与实验室管理处, 山东 青岛 266237)

摘 要: 大气污染物可对人体健康造成显著的负面效应。本研究基于泊松回归相对危险估算模型, 结合人力资本法与疾病成本法, 评估了2016—2023年间北京市、上海市、广州市和西安市因PM_{2.5}和NO₂污染导致的健康损害经济价值。研究发现, 4座城市的大气污染健康损害经济价值峰值均不相同, 其中北京市为4 785.89亿元、上海市为4 512.71亿元、广州市为1 914.42亿元、西安市为1 152.86亿元。目标城市的健康损害经济价值均经历了先升后降的变化, 这可能归因于NO₂浓度的变化与人力资本损失的增加。此外, 北京市和上海市的健康损害经济价值在当地的GDP中占比最高, 且在研究期内下降幅度最大。这表明我国不同地区污染控制措施已取得较好的健康和经济收益。研究结果为大气综合污染控制措施的制定和评估提供了重要的科学依据。

关键词: 大气污染; 健康损害经济价值; PM_{2.5}; NO₂

中图分类号: X51; X503.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2025)03-0377-14

大气污染仍是我国环境问题的主要挑战^[1]。大量研究已证实大气污染物(如细颗粒物)与人类健康之间存在显著关联^[2-3]。其中, 直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物(PM_{2.5})暴露可诱发呼吸道疾病、心血管疾病, 甚至导致死亡^[4-7]。据统计, 2021年全球因空气污染导致的死亡人数达810万^[8], 大气颗粒物在全球疾病与死亡风险因子中位列第4^[9]。除颗粒物外, 流行病学研究还发现长期接触二氧化氮可导致呼吸系统和心血管疾病^[10-11]。随着区域经济一体化的高速发展, 大气污染已呈现多种污染物交叉并存的特点, 复合型的大气污染带来的负面影响日益显著^[12-16]。例如, SO₂和NO₂进入人体血液后, 根据不同的机理分别对人体产生毒理效应^[17-21]。根据《中国生态环境状况公报》最新数据, 2023年我国PM_{2.5}年均浓度为30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 虽低于现行《环境空气质量标准》(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 但仍远高于世界卫生组织(WHO)2021年发布的《空气质量指南》的年均值目标(5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[22]。值得注意的是, 全国339个城市中仍有136个城市空间空气质量超标, 占比达40.1%, 其中, PM_{2.5}超标城市105个, 占比31.0%^[22]。大气污染现状严重阻碍了我国生态文明建设

的进程, 对我国的可持续发展和公众健康产生了严重影响^[23-27]。

近年来, 大气污染健康损害经济价值的核算评估研究日益增多。黄德生和张世秋^[28]研究发现, 京津冀地区的健康损害经济价值总和相当于该地区2009年地方生产总值的1.66%~6.94%; 谢元博等^[29]采用泊松回归评价了2013年北京市雾霾重污染事件的急性健康损害风险, 并采用环境价值评估方法估算了人群健康损害的经济损失高达4.89亿元; 魏国茹和史兴民^[30]对西安市冬季PM_{2.5}的健康效益进行了评估, 发现健康经济损失与冬季PM_{2.5}浓度均值呈正相关关系, 且对哮喘儿童患者的影响显著高于成人, 而慢性支气管炎对成人的影响更为显著; 关杨等^[31]评价了中国31个省(区、市)PM_{2.5}污染造成的人群健康损失经济价值, 并研究了第二产业发展、煤炭消费和公路货运等社会经济因素对其的综合影响, 发现此类因素对国内生产总值越高的地区驱动影响越大; 范凤岩等^[32]估计了2016年京津冀地区PM₁₀对居民健康的不利影响, 结果表明PM₁₀所引起的健康危害和经济影响不容忽视, 北京市、天津市、河北省空气污染

收稿日期: 2024-12-12; 改回日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(22376122); 山东省重点研发计划(公益类科技攻关)项目(2019GSF107071); 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFC3710200)。

第一作者简介: 崔立江(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境科学与健康。email: cuilijiang@mail.sdu.edu.cn。

*通信作者: 武 艳(1985—), 女, 副教授, 研究方向为生物气溶胶。email: wuyan@sdu.edu.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

造成的健康经济损失分别为338.8亿元、173.4亿元和557.3亿元,占地方生产总值的1.32%、0.97%和1.74%。

尽管国内已经开展了一部分相关研究,但综合考虑多种污染物综合健康效应经济价值以及不同区域横向对比的研究仍然匮乏。目前,PM_{2.5}已经成为大气环境中最主要的污染物^[33],我国氮氧化物水平也远高于WHO指导值。而且,很多研究证明,NO₂本身也可导致多种健康效应。研究发现,在同等浓度下的长期暴露,PM_{2.5}和NO₂的全因死亡率分别为5%和4%^[34]。欧洲一项研究显示,PM_{2.5}和NO₂协同暴露导致的全因死亡率达7%^[35]。因此,本研究以中国人口密集的北京市、上海市、广州市和西安市为研究对象,基于现有的剂量(暴露)反应关系和国内已经建立的短期和长期污染物暴露浓度与人群健康终端的响应系数,以PM_{2.5}和NO₂作为大气污染因子的表征指标,评估近8年来(2016—2023年)4大典型城市大气污染物的健康影响,分析大气健康损害价值在经济发展中所占的比例,揭示其健康损失经济价值的特征与规律。与范凤岩等^[32]仅关注单一污染物在某一年的静态健康经济损失相比,本研究拓宽了污染物种类,综合评估PM_{2.5}和NO₂两种污染物的协同作用对健康的长期影响,分析其在经济发展中的比重变化。同时,本研究不仅通过纵向分析揭示单一城市在污染治理措施实施下健康效应和健康损害经济价值的趋势变化,还通过横向比较不同城市的特征,发现区域间污染物暴露对健康的异质性及经济损失的分布规律,弥补了国内研究在全国代表性城市和多城市对比分析方面存在的不足。通过将大气污染健康效应经济化,可直观展示大气污染对健康和经济的多重影响,为制定差异化的污染控制政策和评估其健康经济效益提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源和处理

本研究中PM_{2.5}和NO₂污染物浓度数据均为年均浓度,通过月均浓度计算获得。污染物月均浓度来自各地环保局国控站、中国环境监测总站(<https://www.cnemc.cn/>)。研究所需的各城市暴露人口数量、健康终端指标(包括死亡率、患病率、住院率和门诊率)以及医疗费用数据(门诊和住院费用)均来源于历年《中国居民健康统计年鉴》及各城市统计年鉴(《北京市统计年鉴》《上海市统计年鉴》《广州市统计年鉴》《西安市统计年鉴》)。同时,研究还参考了《上海市国民经济和社会发展统计公报》《广州市卫生资源和医疗服务简报》以及《西安市国民经济和社会发展公报》等相关

统计数据,所有统计数据均涵盖各地区全部医院机构,确保了数据的代表性和完整性。

1.2 评估方法

作为主要的大气污染物,PM_{2.5}和NO₂可通过呼吸系统进入人体,对健康造成负面健康效应。本研究采用广泛应用的泊松回归模型计算^[36],选取WHO发表的《全球空气质量指导值(2021)》手册作为目标污染物的参照标准,并采取暴露反应系数95%置信区间的估计系数进行核算。

1.2.1 健康终端的选取和计算

泊松回归的相对危险估算模型具有高度适应性和灵活性,能够有效量化污染物浓度变化对健康风险的影响,并在调整混杂因素、多污染物协同效应分析、动态变化捕捉等方面展现出独特的优势。因此,采用该模型计算不同污染物变化对人体健康效应的影响。某一大气污染物浓度下人群健康效应量是指污染物每升高单位浓度,对人群特定疾病发病率造成的变化,用于衡量污染物对健康的具体影响,计算公式如下:

$$\Delta E = E_i - E_0 = P \times M_0 \times \{\exp[\beta \times (C_i - C_0)] - 1\} \\ = P \times M_i \times \left(1 - \frac{1}{\exp[\beta \times (C_i - C_0)]}\right) \quad (1)$$

式中, β 为暴露反应关系系数; C_i 为大气污染物目标年限的实际浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C_0 为大气污染物的基准浓度,本研究选取WHO发表的《全球空气质量指导值(2021)》手册作为目标污染物的参照标准, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; E_i 为污染物实际浓度下的人群健康效应; E_0 为污染物基准浓度下的人群健康效应; P 为暴露人口数; M_0 为健康效应终端基准情形死亡率或患病率; M_i 为污染物健康效应终端实际死亡率或患病率。

考虑到部分数据难以获取,本研究选取以下3个方面作为健康效应终端:大气污染造成的全因死亡(k_1),呼吸系统疾病死亡(k_2);呼吸系统疾病住院(k_3),循环系统疾病住院(k_4),内科门诊和儿科门诊(k_5);慢性支气管炎患病(k_6)^[37]。上述各健康终端的暴露反应系数,取值见表1。

1.2.2 健康损失经济价值核算

在计算过程中,常采用支付意愿法、人力资本法和疾病成本法,与人力资本法和疾病成本法相比,支付意愿法依赖于个体对生命和健康的主观估值,可能引发伦理争议,并且该方法侧重于个体或微观层面的支付意愿,难以与宏观经济指标直接挂钩。因此,本研究基于人力资本法和疾病成本法对北京市、上海市、广州市和

表1 不同健康终端的暴露反应系数

Table 1 Exposure-response coefficients for different health end-points

项目	健康终端	暴露反应系数(β)(95%置信区间)	
		PM _{2.5}	NO ₂
早逝	全因死亡	0.002 96 ^[38] (0.000 76~0.005 04)	0.010 14 ^[39] (0.010 11~0.010 16)
	呼吸系统疾病	0.014 3 ^[40] (0.008 5~0.020 1)	0.013 9 ^[41] (0.009~0.017 8)
住院	呼吸系统疾病	0.001 09 ^[28, 42] (0~0.002 21)	0.010 09 ^[39] (0.010 04~0.010 13)
	循环系统疾病	0.000 68 ^[28] (0.000 43~0.000 93)	0.013 ^[39] (0.009~0.016)
患病	慢性支气管炎	0.010 09 ^[43-44] (0.003 66~0.015 59)	0.013 1 ^[43] (0.0103~0.016 6)
门诊	内科	0.000 49 ^[45] (0.000 27~0.000 7)	\
	儿科	0.000 56 ^[45] (0.000 2~0.000 9)	\

注:β表示当某一污染物浓度每提高一个单位时疾病发生率变化的比例,95%置信区间反映了结果的可靠性和不确定性。

西安市的大气健康损害经济价值进行评估,计算方法如下:

$$L=THCL+EC+X+MZ$$
 (2)

式中,L为由PM_{2.5}和NO₂引起的所有健康终端的损失总和,THCL为修正的总人力资本损失,EC为各疾病终端的疾病住院成本之和,X为慢性支气管炎疾病终端患病失能经济损失,MZ为门诊就诊成本之和。

修正的总人力资本损失(THCL)从全社会角度来考察人力资本从而评估生命消亡损失的价值,因此可以不考虑个体差异^[46]。计算公式如下:

$$THCL=(\Delta E)\times HCL=(\Delta E_{k1}+\Delta E_{k2})\times HCL$$
 (3)

$$HCL=\sum_{t=1}^m GDP_t=GDP_0\times\sum_{t=1}^m\frac{(1+a)^t}{(1+r)^t}$$
 (4)

式中,HCL表示修正的人力资本损失,元;ΔE_{k1}和ΔE_{k2}分别代表因污染物导致的全因死亡和呼吸系统疾病死亡的健康效应量;t为大气污染引起早死平均损失寿命年数,18年;GDP_t表示未来第t年人均GDP(Gross Domestic Product,国内生产总值)贴现值;GDP₀表示城市基准年人均GDP,元/人;a表示城市人均GDP增长率;r表示社会贴现率,取8%^[30]。

疾病住院成本损失(EC)计算公式如下:

$$EC=(P_k+GDP_P\times T_k)\times(\Delta E_{k3}+\Delta E_{k4})$$
 (5)

式中,P_k为健康终端k的单位疾病住院成本,元;GDP_P为研究地区人均国内生产总值的日均值,元/(人·天);T_k为因健康终端k导致的误工时间,天;ΔE_{k3}和ΔE_{k4}分别代表呼吸系统疾病和循环系统疾病住院的健康效应量。

患病成本损失(X)计算公式如下:

$$X=\alpha\times HCL_2\times\Delta E_{k6}$$
 (6)

式中,X为慢性支气管炎患病经济损失,元;α为慢性支气管炎的失能权重,因该病患病时间难以确定,所以取α=40%,即慢性支气管炎造成的经济损失为修正的人力资本的40%^[47];HCL₂为平均损失寿命年数为23年的人均人力资本^[40],元;ΔE_{k6}为慢性支气管炎患病的健康效应量。

门诊成本损失(MZ)计算公式如下:

$$MZ=(ZZ_k+GDP_P\times Z_p)\times\Delta E_{k5}$$
 (7)

式中,ZZ_k为健康终端k的人均门诊费用,元;GDP_P为研究地区人均国内生产总值的日均值,元/(人·天);Z_k为因健康终端k的门诊就诊导致的误工时间,天;ΔE_{k5}为儿科门诊和内科门诊的健康效应量。

2 结果与讨论

2.1 不同城市污染物浓度变化特征

4座目标城市污染物的浓度变化情况如图1所示。整体上看,自2016年1月1日新修订的大气污染防治法实施以后,PM_{2.5}和NO₂作为大气污染防治的重要目标,在所研究的4个城市里均出现了整体下降趋势。北京市近8年来PM_{2.5}和NO₂浓度显著下降,而上海市和广州市的PM_{2.5}和NO₂浓度虽有下降趋势,但是幅度不大。不同于其他3座城市,西安的PM_{2.5}和NO₂浓度出现了波动变化的趋势,在2017年达到峰值。截止于2023年,北京市、上海市和广州市的PM_{2.5}年均浓度已经达到了国家环境空气质量年均Ⅱ级浓度标准,NO₂年均浓度达到了年均Ⅰ级浓度标准,西安市2023年PM_{2.5}年均浓度距离年均Ⅱ级浓度标准还有一定差距,但NO₂年均浓度已经达到了年均Ⅰ级浓度标准。

北京市作为中国首都,近年来随着各种大气污染防治政策的出台和实施,PM_{2.5}年均浓度下降了52.51%,NO₂年均浓度也下降了43.14%。显著的空气质量改善可能与北京严格的工业排放控制和机动车排放治理等相关政策有关,例如:“十三五”期间,北京市通过大力淘汰老旧车辆、推广新能源汽车等措施,显著减少了机动车尾气排放,国五及以上排放标准车辆占比超过60%,累计淘汰老旧车109.1万辆,推广新能源车40万余辆。

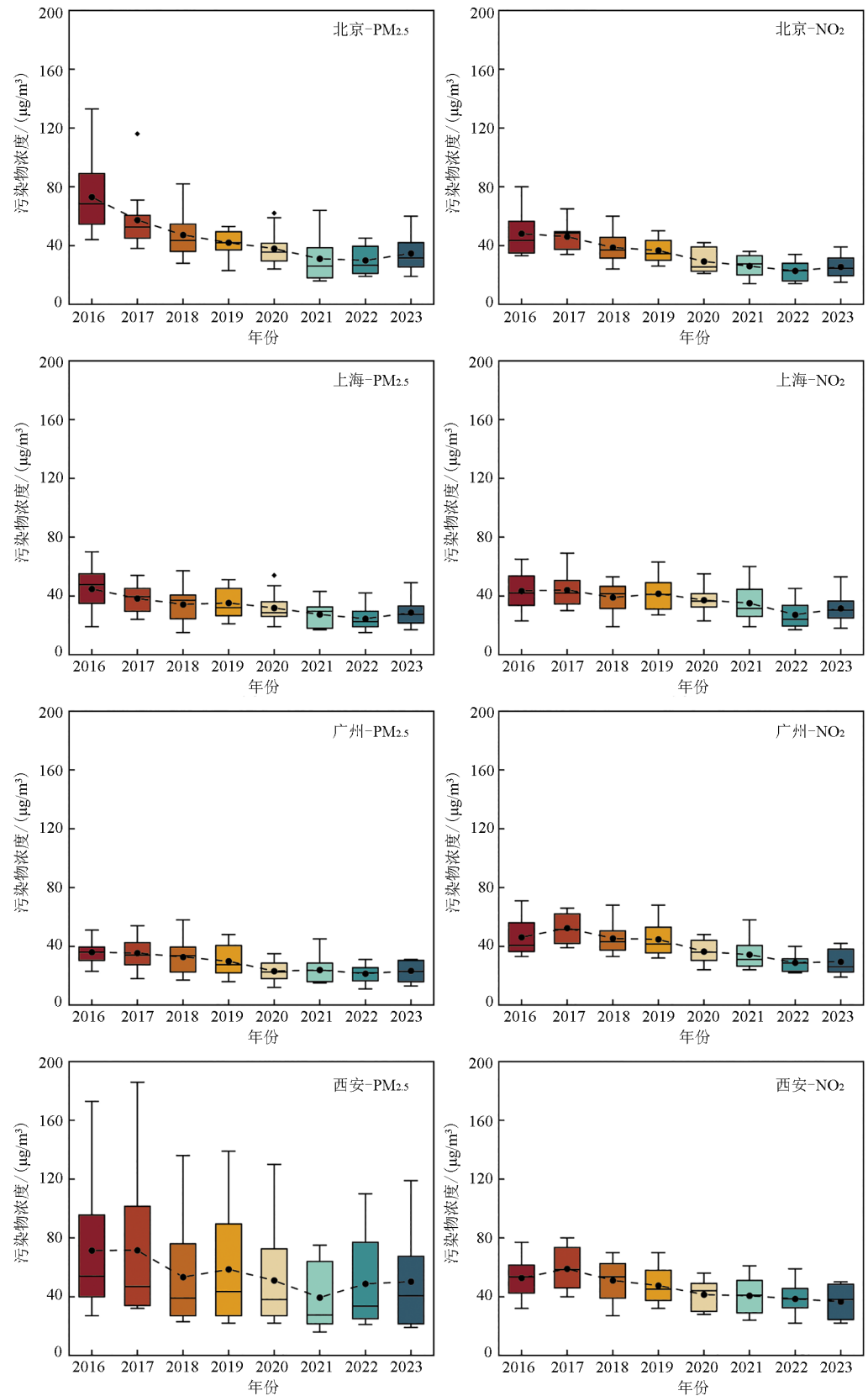


图1 2016—2023年各城市主要大气污染物的浓度变化特征

Fig.1 Concentrations of major air pollutants in four cities from 2016 to 2023

这些措施对PM_{2.5}和NO₂浓度的下降起到了积极作用。不同于北京市,西安市的大气污染治理仍面临较大挑战。西安市的大气污染在很大程度上与以煤炭为主的能源消费结构和高污染产业布局密切相关。西安市新能源在能源消费中的占比偏低,限制了清洁能源替代的效果。部分重工业和“散乱污”企业仍集中分布,其排放不仅直接增加污染物浓度,还通过二次转化加重细颗粒物污染,使空气质量改善面临更大挑战。此外,西安市地处渭河盆地中心地域,北有高原,南有山岭,华北地区的污染物也会被东北风带入,污染物难以扩散^[48-49]。而上海市和广州市,由于经济高速发展,机动车数量快速增加,使得NO₂的控制难度加大。尽管4个城市的空气治理均取得了一定的成效,但距离全面达到WHO指导值仍有一定的差距。因此,采取有效措施继续降低PM_{2.5}和NO₂浓度,仍是4个城市亟须解决的问题。

2.2 大气污染物健康效应量评估

2016—2023年间,4个城市的大气污染物导致的健康效应呈现出显著的变化趋势。如表2~4所示,北京市、上海市和广州市的大气污染物健康效应量总体呈波动下降趋势,其中北京市的改善幅度最大。2023年,北京市PM_{2.5}和NO₂导致的健康效应总人数分别为66.47万人和19.86万人,较2016年分别下降了62.17%和53.54%,2种污染物带来的总健康效应总量减少超过60%。这一结果与Li等^[50]的研究结果相近,表明北京市在大气污染控制方面取得了显著成效,有效降低了当地居民的健康风险和相应的经济损失。与北京相比,上海市和广州市的改善幅度略小,2种污染物的综合健康效应量分别下降了35.43%和23.84%。和其他3个城市不同,表5显示出西安市的健康效应量近8年来呈现波动上升趋势。PM_{2.5}和NO₂带来的综合健康效应量从2016年的49.16万人上升至2022年的55.99万人,增幅达13.89%。这可能与渭河盆地独特的地形、冬季逆温现象以及季节性采暖需求有关。Ainur等^[51]的研究也强调了西安市冬季污染控制对健康效应的改善的重要性。同时,与北京市等大城市相比,西安市在污染治理政策的执行力度上存在明显差距,特别是在清洁能源替代和工业减排方面,基础设施和资金投入不足导致治理措施难以完全落实。尽管近几年出台了若干区域性污染治理政策,但西安市的PM_{2.5}治理效果仍不理想,导致当地居民的慢性支气管炎和全因死亡人数呈现了上升趋势。基于此,政府应加快清洁能源替代和产业优化升级,严格执行工业减排政策,加强企业整治,同时完善基础设施建设,优化城市风道规划,强化区域联防联控,并推动公众参与,共同应

对污染治理挑战。

如表2~5所示,从健康终端来看,4个城市的变化趋势具有一定的一致性。PM_{2.5}对门诊和慢性支气管炎发病率的影响最为显著,而NO₂主要导致呼吸系统和循环系统疾病住院率的增加。这一差异表明2种污染物对健康的危害机制存在本质区别:PM_{2.5}更多与长期暴露相关的慢性健康问题有关,这一结论与Majumder等^[52]和Meo等^[53]的研究结果一致;而NO₂则对急性健康事件的影响更为显著,JagieHo等^[54]和Mebrahtu等^[55]等的研究也证明了这一点。

综合来看,北京市、上海市和广州市通过有效的污染控制措施显著降低了其大气污染导致的健康效应量,而西安市的治理成效仍面临诸多挑战。建议西安市重点优化能源结构,针对采暖期污染控制实施专项治理,同时加强区域联防联控,以降低大气污染对居民健康造成的损害。

2.3 大气健康损害经济价值核算

由PM_{2.5}和NO₂造成的北京市、上海市、广州市以及西安市健康损害经济价值评估结果(图2)。4个城市的健康损害经济价值呈现出与污染物浓度变化不完全一致的波动特征,这可能与各年度的污染物浓度、居民医疗费用以及用工成本等变量的动态变化不同。2016—2018年期间,污染物的浓度相对随后几年较高,各城市的健康损害的经济价值均维持在较高水平。随着国家空气污染治理政策的逐步强化,尤其是《大气污染防治法》的二次修订实施,使得全国范围内的健康损害经济价值呈现下降趋势。

在北京市的健康损害经济价值在2017年达到峰值4 785.89亿元(3 226.18~5 970.03亿元),随后显著下降。至2022年,该值降至1590.98亿元(1 002.27~2 087.08亿元),降幅超过65%。这一显著改善得益于北京市实施的综合性治理措施,包括机动车限行政策、清洁能源推广(如“煤改气”和“煤改电”工程)以及严格的工业排放控制^[56-57]。这些措施不仅有效降低了污染物的年均浓度,还显著减少了健康效应相关的死亡率和住院率,与伦敦在实施低排放区后的空气质量改善趋势类似^[58]。上海市的健康损害经济价值也呈现出稳步下降趋势。2016年由PM_{2.5}和NO₂导致的健康损害经济价值分别为1 892.48亿元(778.76~2 710.85亿元)和2 620.23亿元(2 305.64~2 941.86亿元),至2023年分别下降了61.32%和56.39%。这一成效主要归功于上海市在机动车尾气排放控制方面的成效优于国内其他城市^[57]。其治理路径与国际大都市如纽约和东京的初期污染控制

表2 北京市2种污染物健康效应量评估结果
Table 2 Health effects of two pollutants in Beijing

污染物	健康终端	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	万人
PM _{2.5}	全因死亡	2.07 (0.57~3.29)	1.65 (0.45~2.67)	1.42 (0.38~2.31)	1.23 (0.33~2.01)	0.93 (0.25~1.54)	0.87 (0.23~1.45)	0.89 (0.23~1.47)	1.05 (0.28~1.74)	
	呼吸系统疾病死亡	0.89 (0.63~1.06)	0.77 (0.53~0.96)	0.69 (0.46~0.87)	0.59 (0.39~0.76)	0.41 (0.27~0.53)	0.33 (0.21~0.43)	0.36 (0.23~0.47)	0.60 (0.39~0.78)	
	呼吸系统疾病住院	2.32 (0~4.53)	1.80 (0~3.55)	1.46 (0~2.89)	1.28 (0~2.54)	1.14 (0~2.27)	0.91 (0~1.81)	0.86 (0~1.73)	1.03 (0~2.05)	
	循环系统疾病住院	2.30 (1.47~3.12)	1.78 (1.13~2.42)	1.44 (0.92~1.96)	1.26 (0.80~1.72)	1.12 (0.71~1.53)	0.89 (0.56~1.21)	0.85 (0.54~1.16)	1.01 (0.64~1.38)	
	慢性支气管炎	10.46 (4.64~13.77)	8.64 (3.67~11.75)	7.30 (3.01~10.15)	6.55 (2.66~9.22)	5.94 (2.39~8.44)	4.85 (1.91~7.00)	4.65 (1.82~6.73)	5.43 (2.16~7.77)	
	内科门诊	112.87 (62.66~160.11)	81.7 (45.28~116.08)	68.15 (37.72~96.92)	62.58 (34.62~89.05)	38.07 (21.05~54.19)	37.13 (20.52~52.9)	35.4 (19.56~50.44)	42.28 (23.37~60.21)	
	儿科门诊	44.80 (16.19~71.17)	34.03 (12.27~54.22)	26.10 (9.39~41.65)	23.19 (8.34~37.04)	10.67 (3.83~17.06)	13.23 (4.75~21.18)	12.62 (4.53~20.19)	15.07 (5.41~24.09)	
	合计	175.71 (86.16~257.06)	130.38 (63.33~191.63)	106.55 (51.88~156.75)	96.68 (47.14~142.34)	58.29 (28.5~85.56)	58.21 (28.18~85.97)	55.63 (26.91~82.19)	66.47 (32.25~98.02)	
	全因死亡	3.63 (3.62~3.63)	3.52 (3.51~3.53)	3.04 (3.03~3.05)	2.80 (2.79~2.81)	1.77 (1.77~1.78)	1.78 (1.77~1.78)	1.52 (1.51~1.52)	1.81 (1.8~1.81)	
	呼吸系统疾病死亡	0.59 (0.41~0.70)	0.58 (0.41~0.7)	0.50 (0.34~0.6)	0.45 (0.31~0.55)	0.26 (0.17~0.32)	0.21 (0.14~0.26)	0.20 (0.13~0.24)	0.34 (0.23~0.42)	
NO ₂	呼吸系统疾病住院	10.37 (10.32~10.40)	9.91 (9.87~9.94)	8.15 (8.11~8.18)	7.65 (7.61~7.67)	5.70 (5.67~5.72)	4.85 (4.83~4.87)	3.90 (3.88~3.92)	4.66 (4.64~4.68)	
	循环系统疾病住院	19.89 (14.78~23.24)	19.06 (14.12~22.33)	15.82 (11.56~18.71)	14.89 (10.84~17.65)	11.20 (8.05~13.41)	9.58 (6.84~11.52)	7.74 (5.49~9.35)	9.21 (6.57~11.09)	
	慢性支气管炎	8.28 (6.84~9.88)	7.94 (6.54~9.49)	6.59 (5.38~7.97)	6.20 (5.05~7.52)	4.67 (3.76~5.73)	3.99 (3.21~4.92)	3.23 (2.58~4)	3.84 (3.08~4.74)	
	合计	42.75 (35.98~47.85)	41.01 (34.45~45.99)	34.09 (28.43~38.5)	31.98 (26.61~36.19)	23.59 (19.43~26.95)	20.41 (16.79~23.35)	16.59 (13.59~19.03)	19.86 (16.32~22.74)	
	两种污染物合计	218.47 (122.13~304.90)	171.38 (97.78~237.64)	140.66 (80.3~195.26)	128.67 (73.74~178.54)	81.88 (47.92~112.52)	78.62 (44.97~109.33)	72.22 (40.5~101.22)	86.33 (48.57~120.76)	

表3 上海市2种污染物健康效应量评估结果

Table 3 Health effects of two pollutants in Shanghai										万人
污染物	健康终端	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
PM _{2.5}	全因死亡	1.34 (0.36~2.19)	1.21 (0.32~1.99)	1.08 (0.28~1.78)	1.14 (0.3~1.88)	0.99 (0.26~1.65)	0.89 (0.23~1.48)	0.78 (0.2~1.3)	1.07 (0.28~1.78)	
	呼吸系统疾病死亡	0.80 (0.53~1.02)	0.68 (0.44~0.88)	0.59 (0.38~0.77)	0.58 (0.38~0.76)	0.45 (0.29~0.59)	0.41 (0.26~0.54)	0.36 (0.23~0.48)	0.79 (0.5~1.04)	
	呼吸系统疾病住院	1.55 (0~3.07)	1.30 (0~2.59)	1.15 (0~2.29)	1.19 (0~2.37)	1.06 (0~2.11)	0.89 (0~1.78)	0.78 (0~1.55)	0.93 (0~1.87)	
	循环系统疾病住院	1.52 (0.97~2.07)	1.28 (0.81~1.74)	1.13 (0.72~1.54)	1.17 (0.74~1.59)	1.04 (0.66~1.42)	0.87 (0.55~1.19)	0.76 (0.48~1.04)	0.92 (0.58~1.25)	
	慢性支气管炎	7.81 (3.20~10.92)	6.75 (2.71~9.58)	6.06 (2.41~8.68)	6.25 (2.49~8.94)	5.65 (2.23~8.15)	4.84 (1.88~7.05)	4.27 (1.65~6.27)	5.06 (1.97~7.35)	
	内科门诊	82.31 (45.55~117.1)	70.74 (39.12~100.71)	63.06 (34.86~89.82)	67.47 (37.3~96.09)	45.47 (25.13~64.78)	49.75 (27.48~70.91)	43.32 (23.92~61.76)	52.27 (28.88~74.49)	
	儿科门诊	26.34 (9.47~42.05)	24.35 (8.75~38.92)	20.88 (7.5~33.39)	21.62 (7.76~34.57)	9.50 (3.41~15.2)	13.74 (4.93~21.99)	11.96 (4.29~19.16)	14.43 (5.18~23.1)	
	合计	121.68 (60.09~178.42)	106.31 (52.16~156.4)	93.94 (46.14~138.26)	99.42 (48.98~146.19)	64.17 (31.98~93.9)	71.39 (35.34~104.95)	62.23 (30.77~91.57)	75.47 (37.39~110.88)	
	NO ₂	全因死亡	3.47 (3.46~3.47)	3.77 (3.76~3.78)	3.30 (3.29~3.31)	3.64 (3.63~3.64)	3.14 (3.13~3.14)	3.12 (3.11~3.12)	2.22 (2.21~2.22)	3.10 (3.10~3.11)
		呼吸系统疾病死亡	0.69 (0.48~0.83)	0.68 (0.48~0.82)	0.57 (0.4~0.7)	0.59 (0.41~0.71)	0.44 (0.31~0.54)	0.44 (0.3~0.54)	0.32 (0.21~0.39)	0.71 (0.48~0.88)
呼吸系统疾病住院		10.43 (10.39~10.46)	10.62 (10.58~10.66)	9.27 (9.23~9.3)	10.00 (9.96~10.03)	8.81 (8.77~8.84)	8.24 (8.20~8.27)	5.86 (5.84~5.88)	7.18 (7.15~7.20)	
循环系统疾病住院		20.13 (14.84~23.66)	20.48 (15.11~24.05)	17.99 (13.16~21.27)	19.34 (14.21~22.79)	17.13 (12.49~20.3)	16.07 (11.67~19.09)	11.56 (8.27~13.88)	14.07 (10.15~16.80)	
慢性支气管炎		8.38 (6.88~10.07)	8.53 (7.01~10.23)	7.49 (6.12~9.06)	8.05 (6.6~9.7)	7.13 (5.82~8.65)	6.69 (5.44~8.14)	4.82 (3.88~5.93)	5.86 (4.74~7.17)	
合计		43.09 (36.04~48.49)	44.08 (36.94~49.53)	38.64 (32.2~43.64)	41.62 (34.81~46.88)	36.66 (30.51~41.47)	34.56 (28.73~39.16)	24.78 (20.41~28.31)	30.92 (25.62~35.16)	
两种污染物合计		164.77 (96.13~226.91)	150.39 (89.09~205.95)	132.57 (78.35~181.91)	141.04 (83.78~193.07)	100.81 (62.5~135.37)	105.95 (64.05~144.1)	86.88 (51.15~119.63)	106.39 (63.01~146.04)	

表 4 广州市2种污染物健康效应量评估结果

Table 4 Health effects of two pollutants in Guangzhou										万人
污染物	健康终端	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
PM _{2.5}	全因死亡	0.81 (0.21~1.34)	1.04 (0.28~1.71)	0.81 (0.21~1.33)	0.67 (0.18~1.11)	0.62 (0.16~1.04)	0.57 (0.15~0.95)	0.5 (0.13~0.83)	0.96 (0.25~1.6)	
	呼吸系统疾病死亡	0.41 (0.27~0.54)	0.41 (0.27~0.54)	0.40 (0.26~0.52)	0.36 (0.23~0.47)	0.23 (0.15~0.31)	0.24 (0.15~0.32)	0.45 (0.28~0.6)	0.49 (0.31~0.64)	
	呼吸系统疾病住院	0.83 (0~1.64)	0.84 (0~1.68)	0.79 (0~1.58)	0.73 (0~1.45)	0.54 (0~1.09)	0.57 (0~1.14)	0.49 (0~0.99)	0.73 (0~1.46)	
	循环系统疾病住院	0.81 (0.52~1.11)	0.83 (0.53~1.13)	0.78 (0.49~1.06)	0.71 (0.45~0.97)	0.53 (0.34~0.72)	0.56 (0.35~0.76)	0.48 (0.31~0.66)	0.72 (0.46~0.98)	
	慢性支气管炎	4.33 (1.73~6.18)	4.43 (1.77~6.33)	4.21 (1.66~6.05)	3.91 (1.53~5.66)	3.00 (1.15~4.42)	3.14 (1.21~4.61)	2.75 (1.05~4.06)	3.95 (1.55~5.72)	
	内科门诊	14.00 (7.74~19.93)	14.06 (7.77~20.02)	13.20 (7.29~18.8)	12.71 (7.02~18.1)	8.08 (4.46~11.53)	9.43 (5.21~13.44)	8.15 (4.50~11.63)	12.16 (6.72~17.33)	
	儿科门诊	8.89 (3.19~14.21)	8.83 (3.17~14.11)	8.47 (3.04~13.55)	7.80 (2.80~12.48)	3.25 (1.16~5.20)	4.89 (1.75~7.83)	4.23 (1.52~6.78)	6.31 (2.26~10.1)	
	合计	30.07 (13.66~44.94)	30.44 (13.78~45.52)	28.64 (12.96~42.89)	26.88 (12.21~40.24)	16.26 (7.43~24.32)	19.39 (8.82~29.06)	17.05 (7.79~25.55)	25.32 (11.55~37.83)	
	全因死亡	2.83 (2.83~2.84)	4.21 (4.2~4.22)	3.09 (3.08~3.09)	2.80 (2.79~2.8)	2.82 (2.81~2.83)	2.29 (2.28~2.29)	1.83 (1.82~1.83)	2.47 (2.47~2.48)	
	呼吸系统疾病死亡	0.46 (0.32~0.55)	0.52 (0.37~0.62)	0.47 (0.33~0.57)	0.46 (0.32~0.55)	0.32 (0.22~0.39)	0.29 (0.2~0.36)	0.49 (0.33~0.61)	0.39 (0.26~0.48)	
NO ₂	呼吸系统疾病住院	7.59 (7.56~7.62)	9.00 (8.96~9.03)	7.98 (7.95~8.01)	8.02 (7.98~8.04)	6.51 (6.48~6.53)	6.06 (6.03~6.08)	4.80 (4.78~4.81)	4.96 (4.94~4.98)	
	循环系统疾病住院	14.61 (10.82~17.11)	17.17 (12.86~19.96)	15.36 (11.36~18.01)	15.44 (11.41~18.12)	12.67 (9.23~15.02)	11.83 (8.58~14.07)	9.44 (6.78~11.31)	9.75 (7~11.67)	
	慢性支气管炎	6.08 (5.01~7.27)	7.15 (5.93~8.47)	6.40 (5.27~7.66)	6.43 (5.29~7.71)	5.28 (4.30~6.4)	4.93 (4.00~6.00)	3.93 (3.17~4.83)	4.06 (3.28~4.98)	
	合计	31.57 (26.54~35.39)	38.05 (32.33~42.3)	33.3 (27.99~37.34)	33.14 (27.79~37.22)	27.59 (23.04~31.17)	25.4 (21.1~28.8)	20.49 (16.88~23.39)	21.63 (17.95~24.59)	
	两种污染物合计	61.65 (40.2~80.34)	68.49 (46.11~87.82)	61.96 (40.94~80.23)	60.04 (40~77.46)	43.85 (30.46~55.48)	44.80 (29.91~57.85)	37.54 (24.67~48.94)	46.95 (29.5~62.42)	

表5 西安市2种污染物健康效应量评估结果
Table 5 Health effects of two pollutants in Xi'an

Table 5 Health effects of two pollutants in Xi'an										万人	
污染物	健康终端	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
PM _{2.5}	全因死亡	0.85 (0.23~1.36)	0.93 (0.26~1.48)	0.73 (0.20~1.19)	0.83 (0.23~1.34)	1.24 (0.33~2.01)	0.96 (0.25~1.57)	1.19 (0.32~1.94)	1.29 (0.35~2.1)		
	呼吸系统疾病死亡	0.37 (0.26~0.45)	0.40 (0.28~0.48)	0.34 (0.23~0.42)	0.36 (0.24~0.44)	0.34 (0.23~0.43)	0.28 (0.18~0.35)	0.33 (0.22~0.41)	0.34 (0.23~0.42)		
	呼吸系统疾病住院	1.58 (0~3.09)	1.72 (0~3.36)	1.31 (0~2.59)	1.48 (0~2.92)	1.62 (0~3.21)	1.24 (0~2.46)	1.55 (0~3.07)	1.61 (0~3.19)		
	循环系统疾病住院	1.02 (0.65~1.38)	1.11 (0.71~1.51)	0.84 (0.54~1.15)	0.95 (0.61~1.3)	1.04 (0.66~1.42)	0.79 (0.5~1.08)	0.99 (0.63~1.35)	1.03 (0.66~1.41)		
	慢性支气管炎	4.14 (1.83~5.47)	4.51 (1.99~5.96)	3.71 (1.56~5.08)	4.10 (1.75~5.55)	4.62 (1.93~6.36)	3.70 (1.49~5.24)	4.45 (1.85~6.17)	4.60 (1.92~6.35)		
	内科门诊	10.04 (5.57~14.24)	11.59 (6.43~16.44)	9.32 (5.16~13.25)	11.68 (6.47~16.59)	11.85 (6.56~16.85)	10.38 (5.74~14.77)	13.03 (7.21~18.53)	13.56 (7.51~19.27)		
	儿科门诊	7.82 (2.83~12.43)	9.86 (3.56~15.67)	7.43 (2.68~11.85)	9.47 (3.41~15.08)	6.48 (2.34~10.34)	7.18 (2.58~11.47)	9.01 (3.24~14.37)	9.37 (3.37~14.95)		
	合计	25.82 (11.37~38.41)	30.12 (13.23~44.9)	23.69 (10.36~35.53)	28.86 (12.71~43.21)	27.20 (12.05~40.62)	24.52 (10.75~36.95)	30.55 (13.47~45.84)	31.80 (14.04~47.69)		
	NO ₂	全因死亡	1.68 (1.67~1.68)	2.04 (2.04~2.04)	1.86 (1.86~1.87)	1.79 (1.78~1.79)	2.65 (2.65~2.66)	2.64 (2.63~2.64)	2.46 (2.45~2.46)	2.43 (2.42~2.43)	
		呼吸系统疾病死亡	0.27 (0.19~0.32)	0.32 (0.23~0.37)	0.30 (0.21~0.35)	0.27 (0.19~0.32)	0.25 (0.18~0.31)	0.25 (0.17~0.3)	0.23 (0.16~0.28)	0.22 (0.15~0.27)	
呼吸系统疾病住院		7.92 (7.89~7.95)	9.60 (9.57~9.63)	8.68 (8.64~8.7)	8.24 (8.21~8.27)	9.01 (8.97~9.04)	8.95 (8.91~8.98)	8.31 (8.28~8.34)	7.88 (7.84~7.9)		
循环系统疾病住院		9.83 (7.36~11.42)	11.83 (8.95~13.64)	10.79 (8.06~12.56)	10.29 (7.64~12.04)	11.34 (8.33~13.36)	11.27 (8.27~13.29)	10.50 (7.67~12.42)	9.97 (7.26~11.82)		
慢性支气管炎		3.64 (3.02~4.31)	4.37 (3.66~5.14)	3.99 (3.31~4.74)	3.81 (3.14~4.55)	4.2 (3.44~5.05)	4.17 (3.41~5.03)	3.89 (3.17~4.7)	3.69 (3.01~4.48)		
合计		23.34 (20.14~25.68)	28.16 (24.44~30.83)	25.61 (22.08~28.23)	24.4 (20.97~26.97)	27.44 (23.56~30.41)	27.27 (23.39~30.24)	25.39 (21.73~28.2)	24.19 (20.68~26.9)		
两种污染物合计		49.16 (31.5~64.1)	58.28 (37.68~75.72)	49.30 (32.45~63.75)	53.27 (33.67~70.19)	54.64 (35.62~71.04)	51.81 (34.13~67.18)	55.94 (35.2~74.04)	55.99 (34.72~74.59)		

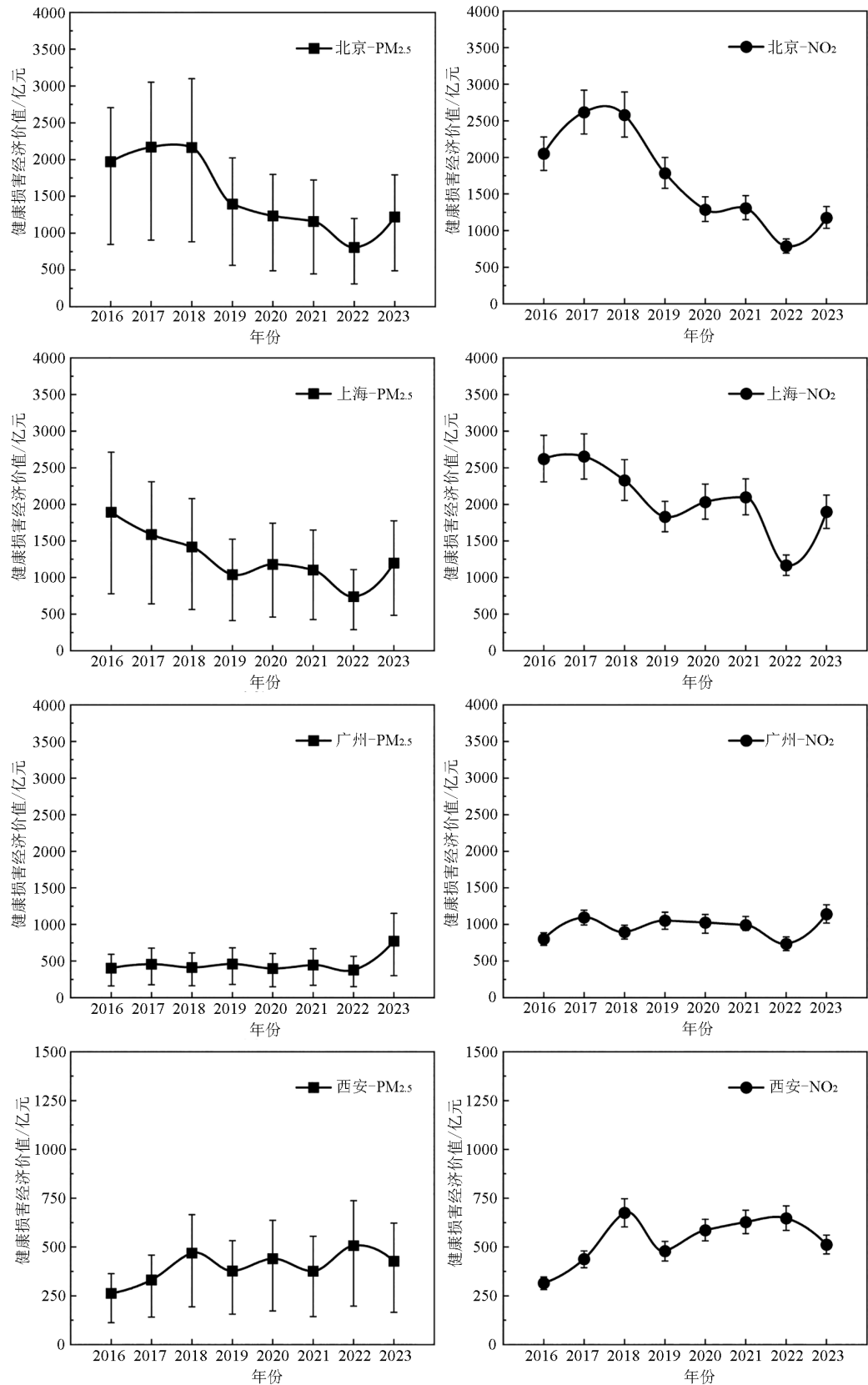


图2 2016—2023年4座城市不同大气污染物的健康损害经济价值

Fig.2 Economic loss of health damages caused by different air pollutants from 2016 to 2023

策略相似,均以机动车限行和工业结构调整为主要方向,并且通过长期的清洁能源技术创新使其健康损害经济价值的下降幅度增大^[59]。相比之下,广州市的健康损害经济价值在过去8年间的变化幅度相对较小,但在2023年因其污染物浓度上升而出现反弹。西安市的健康损害经济价值变化则呈现更加复杂的特征,这主要是由于PM_{2.5}和NO₂浓度显著波动,尤其在采暖期,受逆温现象和地形限制(渭河盆地)导致污染物浓度显著上升^[60]。

单一的健康影响人数或健康损害经济价值可能无法全面反映大气污染对地区经济水平的影响。因此,本研究将北京市、上海市、广州市和西安市的GDP总量作为参照,分析不同污染物导致的健康损害经济价值在这些城市GDP中的比重(图3)。从图3可以看出,NO₂导致的健康损害经济价值在4个城市GDP中的占比最高,这可能与机动车排放中NO₂占较大比例有关,尤其是在大城市中,交通排放对空气质量和人体健康的影响尤为显著^[56,61]。北京市和上海市的PM_{2.5}和NO₂污染物健康损害经济价值占GDP比重较为相似。本研究核算的PM_{2.5}导致的健康损害经济价值的占比与黄德生和张世秋

等^[28]研究的结果相近。相比之下,广州市健康损害经济价值在GDP中的占比最低,低于10%。这一现象可能与广州市较早实施的空气污染防治政策有关,特别是工业排放和机动车排放的控制方面取得的成效^[62-63]。近年来,西安市的大气污染物健康损害经济价值在GDP中的占比呈现较为稳定的趋势,这也表明了西安市未来的大气污染防治仍是该地区的环境挑战。

2.4 不确定性分析

本研究在评估大气污染对健康经济损失的过程中,会受到多方面不确定性因素的影响。首先,大气污染通常由多种污染物(如PM_{2.5}、NO₂、SO₂、O₃等)共同作用引发^[64],但现有研究方法难以准确区分每种污染物的具体健康效应贡献。这种局限可能导致在健康效应评估中出现不同污染物的影响简单叠加,从而产生重复计算的情况,最终造成健康损害的经济价值的高估。其次,研究中使用的数据和医疗成本数据主要来源于统计年鉴和政府工作报告,这些数据可能因统计周期或方法的差异存在一定滞后性,从而给健康经济损失的估算带来不确定性。同时,由于缺乏针对公众支付意愿和心理

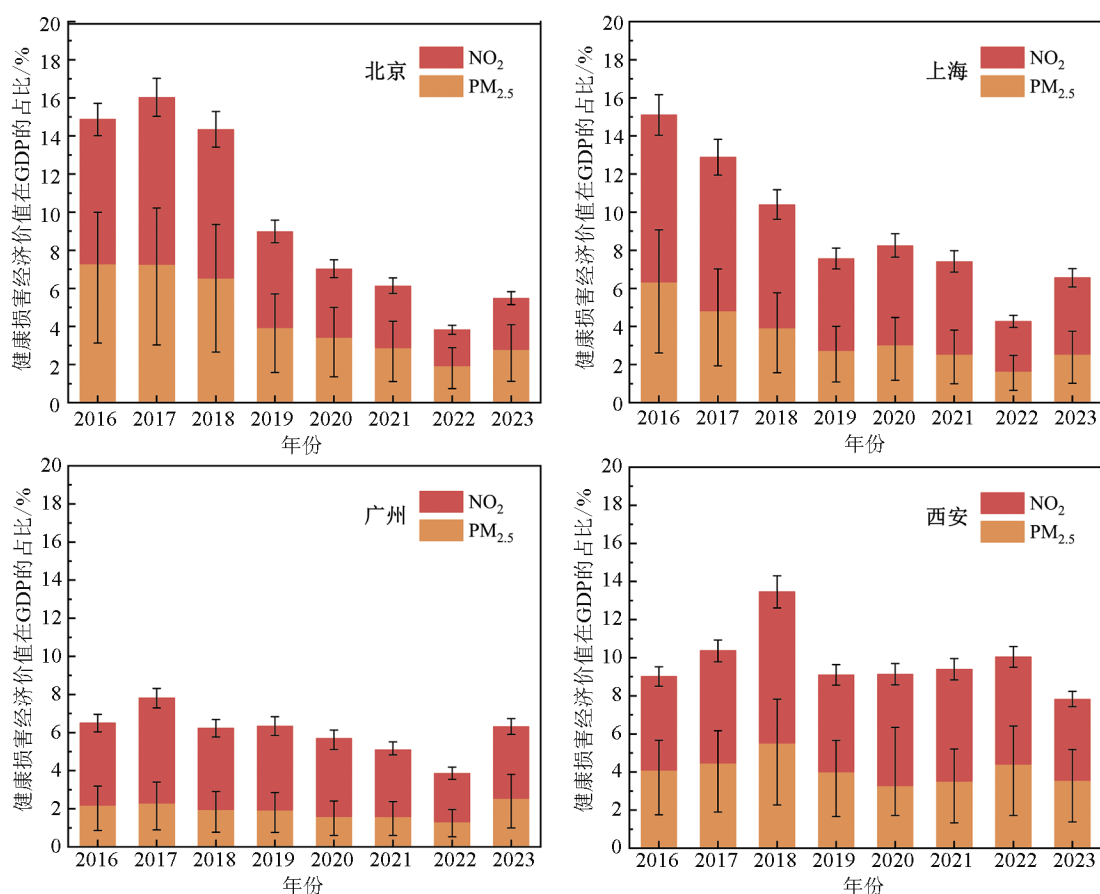


图3 2016—2023年不同大气污染物的健康损害经济价值在GDP中的比重

Fig.3 Proportion of economic loss of health damages caused by different air pollutants in GDP from 2016 to 2023

损失的调查数据,结果可能低估了实际的经济损害^[40]。此外,新冠疫情的暴发影响了各地的经济发展,可能会对总人力资本损失的计算产生影响。目前尚未明确大气污染对健康影响的阈值浓度,研究中使用的基准值和参考标准存在差异,也可能对结果的可靠性造成影响。为降低这些不确定性的干扰,本研究结合我国现有的流行病学研究成果,并参考WHO发布的最新空气质量指导值,采用95%置信区间的暴露反应系数进行核算。这些优化措施有效地将不确定性控制在合理范围内,为评估结果的科学性和可信度提供了必要保障。

3 结论

近年来,我国在大气污染治理方面取得了显著成效,PM_{2.5}和NO₂的污染浓度均呈下降趋势,健康效应和经济损失也得到明显改善。然而,治理效果受地理条件和政策执行力度的影响存在显著区域差异。其中,北京市大气污染物健康效应量改善显著,2种污染物导致的健康效应量分别下降62.17%和53.54%;上海市和广州市的改善幅度分别为35.43%和23.84%。西安市健康效应量却从2016年的49.16万人上升至2022年的55.99万人,增幅达13.89%,表明其治理工作仍面临严峻挑战。

从健康损害经济价值来看,北京市和上海市的降幅最大。广州市保持相对平稳,而西安市则呈现较大波动。北京市和上海市健康损害经济价值占GDP的比值显著下降,而西安市的比值呈现较为稳定的趋势。

基于以上研究结果,可根据不同城市特点制定更加精细化的大气污染治理策略:北京市和上海市应巩固现有成果,针对机动车尾气排放、建筑扬尘和非道路移动机械(如建筑施工机械)加强管控,优化高密度空气质量监测和预警体系,提升重污染天气响应能力,并通过区域协作平台推广成功的政策经验;广州市需加强PM_{2.5}、NO₂的协同治理,推动化工、石化等重点行业深度减排,同时强化港口和船舶排放控制,通过岸电推广减少NO₂排放,并建立健康效应评估指标体系,将空气质量改善与健康效益挂钩;西安市则需构建渭河盆地联防联控机制,统一排放标准,建立排放权交易体系,并共享污染监测与预警数据,同时加快清洁能源替代,逐步将采暖期清洁能源使用比例提升至50%以上,严格整治“散乱污”企业,确保政策执行到位。这些因地制宜的治理措施将有效提升空气质量,降低健康损害风险,为其他城市提供可借鉴的实践经验。同时,建立长期跟踪评估机制,动态优化治理方案,确保治理效果的可持续性。

参 考 文 献

- [1] Zhao B, Wang S X, Hao J M. Challenges and perspectives of air pollution control in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2024, 18(6): 68.
- [2] Meo S A, Shaikh N, Alotaibi M, et al. Effect of air pollutants particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), sulfur dioxide (SO₂) and ozone (O₃) on cognitive health[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 19616.
- [3] Bodor K, Szép R, Bodor Z. The human health risk assessment of particulate air pollution (PM_{2.5} and PM₁₀) in Romania[J]. *Toxicology Reports*, 2022, 9: 556–562.
- [4] Liu Y, Liu C H, Song Y, et al. Short-term association of PM_{2.5}/PM₁₀ on lung cancer mortality in Wuhai city, China (2015–2019): a time series analysis[J]. *European Journal of Cancer Prevention*, 2022, 31(6): 530–539.
- [5] Wan Mahiyuddin W R, Ismail R, Mohammad Sham N, et al. Cardiovascular and respiratory health effects of fine particulate matters (PM_{2.5}): a review on time series studies[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(5): 856.
- [6] Krittanawong C, Qadeer Y K, Hayes R B, et al. PM_{2.5} and cardiovascular diseases: state-of-the-art review[J]. *International Journal of Cardiology Cardiovascular Risk and Prevention*, 2023, 19: 200217.
- [7] Xi Y Z, Richardson D B, Kshirsagar A V, et al. Effects of short-term ambient PM_{2.5} exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U.S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study[J]. *Environmental Health*, 2022, 21(1): 33.
- [8] Health Effects Institute. State of Global Air 2024[R]. Boston: Health Effects Institute, 2024: 1–50.
- [9] 刘静怡, 孟聪申, 韩京秀. 1990—2019年全球环境危险因素疾病负担GBD2019数据再分析[J]. *环境卫生学杂志*, 2023, 13(3): 170–176.
- [10] 张昱勤, 罗傲, 陈世瑞, 等. 长期大气二氧化氮暴露与心脑血管住院风险的因果关联研究[J]. *中华流行病学杂志*, 2023, 44(6): 885–890.
- [11] Meng X, Liu C, Chen R J, et al. Short term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: multilocation analysis in 398 cities[J]. *BMJ*, 2021, 372: n534.
- [12] 柴发合. 中国未来三年大气污染治理形势预判与对策分析[J]. *中国环境监察*, 2019(1): 29–31.
- [13] 滕博, 王贺彬, 汪雅芳, 等. 细颗粒物(PM_{2.5})与呼吸系统疾病的关系及机制[J]. *中国实验诊断学*, 2014, 18(2): 334–338.
- [14] 邹佳乐, 林尧林, 杨薇. 中国近年PM_{2.5}污染研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(3): 357–361, 366.
- [15] 白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 灰霾的健康效应[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(3): 198–201.

- [16] 孔琴心, 刘广仁, 李桂忱. 近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(1): 61–66.
- [17] 杨建文, 郑慧芳, 张胜林, 等. 兰州市2000和2004年大气污染物中SO₂、NO₂和TSP浓度变化对健康人群的影响[J]. 职业与健康, 2008, 24(19): 2072–2073.
- [18] 代甜, 王敏珍, 靳亚飞, 等. 大气SO₂和NO₂对2型糖尿病发病影响的队列研究[J]. 兰州大学学报(医学版), 2021, 47(3): 51–57.
- [19] 崔亮亮, 牛纪伦, 于坤坤, 等. 2013—2015年济南市大气污染物SO₂和NO₂对居民心血管疾病应急呼叫事件影响的急性效应[J]. 山东大学学报(医学版), 2018, 56(11): 105–110.
- [20] 赵肃, 王任群, 金焕荣, 等. SO₂和NO₂混合气对大鼠呼吸系统的影响[J]. 中国公共卫生, 2004, 20(12): 114–115.
- [21] Crouse D L, Peters P A, Hystad P, et al. Ambient PM_{2.5}, O₃, and NO₂ exposures and associations with mortality over 16 years of follow-up in the Canadian census health and environment cohort (CanCHEC)[J]. Environmental Health Perspectives, 2015, 123(11): 1180–1186.
- [22] 2023年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2024, 52(11): 53–65.
- [23] 张永年, 潘竟虎. 基于DMSP/OLS数据的中国碳排放时空模拟与分异格局[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1436–1446.
- [24] Zhao Y X, An X Q, Sun Z B, et al. Identification of health effects of complex air pollution in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(19): 12652.
- [25] Zeng Y Y, Cao Y F, Qiao X, et al. Air pollution reduction in China: recent success but great challenge for the future[J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 329–337.
- [26] 王蒙, 吕曼青, 周雪冬, 等. 2014—2022年青岛大气污染健康损害经济价值评估[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(12): 203–211.
- [27] 胡佩雯, 周雪冬, 王蒙, 等. 天津与重庆大气污染物健康损失经济价值评估及主导工业因素分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(4): 569–576.
- [28] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制PM_{2.5}污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 166–174.
- [29] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 1–8.
- [30] 魏国茹, 史兴民. 西安市PM_{2.5}健康损害价值评估[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3014–3021.
- [31] 关杨, 容冰, 王依, 等. 中国PM_{2.5}暴露人群健康损失评价及区域差异分析[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(7): 798–802.
- [32] 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.
- [33] 戴海夏, 安静宇, 黄成, 等. 长江三角洲区域大气PM_{2.5}和臭氧污染协同控制路径[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 2100–2112.
- [34] Faustini A, Stafoggia M, Renzi M, et al. Does chronic exposure to high levels of nitrogen dioxide exacerbate the short-term effects of airborne particles?[J]. Occupational and Environmental Medicine, 2016, 73(11): 772–778.
- [35] Faustini A, Rapp R, Forastiere F. Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies[J]. European Respiratory Journal, 2014, 44(3): 744–753.
- [36] Guan Y, Xiao Y, Chu C J, et al. Trends and characteristics of ozone and nitrogen dioxide related health impacts in Chinese cities[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 241: 113808.
- [37] 徐欢, 李红. 南京城市绿地阻滞吸附PM_{2.5}的健康效益评估[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(19): 271–275.
- [38] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(6): 422–424.
- [39] 马洪群, 崔莲花. 大气污染物(SO₂、NO₂)对中国居民健康效应影响的meta分析[J]. 职业与健康, 2016, 32(8): 1038–1044.
- [40] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 我国人群大气颗粒物污染暴露反应关系的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1034–1040.
- [41] 刘昌景, 黄飞, 杨志洲, 等. 我国空气污染物与人群呼吸系统疾病死亡急性效应的Meta分析[J]. 中华流行病学杂志, 2015, 36(8): 889–895.
- [42] 张燕萍, 张志琴, 李晋芬. 空气颗粒物与呼吸及心脑血管疾病每日住院率相关性研究[J]. 中华预防医学杂志, 2008, 42(2): 96–102.
- [43] Ponka A, Virtanen M. Chronic bronchitis, emphysema, and low-level air pollution in Helsinki, 1987–1989[J]. Environmental Research, 1994, 65(2): 207–217.
- [44] 马洪宝, 洪传洁. 大气颗粒物污染对慢性呼吸道疾病的影响[J]. 中国公共卫生学报, 1992, 11(4): 229–232.
- [45] 刘晓云, 谢鹏, 刘兆荣, 等. 珠江三角洲可吸入颗粒物污染急性健康效应的经济损失评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(5): 829–834.
- [46] 梅强, 陆玉梅. 人的生命价值评估方法述评[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(3): 56–61.
- [47] 吕铃钥, 李洪远. 京津冀地区PM₁₀和PM_{2.5}污染的健康经济学评价[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2016, 49(1): 69–77.
- [48] Yang X C, Xiao H, Wu Q Z, et al. Numerical study of air pollution over a typical basin topography: source appointment of fine particulate matter during one severe haze in the megacity Xi'an[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135213.
- [49] Wang P, Cao J J, Tie X X, et al. Impact of meteorological parameters and gaseous pollutants on PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations during 2010 in Xi'an, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15(5): 1844–1854.
- [50] Li R, Gao Y N, Xu J H, et al. Impact of clean air policy on criteria air pollutants and health risks across China during 2013–2021[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(14): e2023JD038939.
- [51] Ainur D, Chen Q C, Sha T, et al. Outdoor health risk of atmospheric particulate matter at night in Xi'an, northwestern China[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(25): 9252–9265.
- [52] Majumder A K, Rahman M, Patoary M N A, et al. Time series analysis PM_{2.5} concentration for capital City Dhaka from 2016 to 2023[J]. Science Frontiers, 2024, 5(1): 35–42.
- [53] Meo S A, Shaikh N, Alotaibi M. Association between air pollutants particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), volatile organic compounds (VOCs), ground-level ozone (O₃) and hypertension[J]. Journal of King Saud University- Science, 2024, 36(11): 103531.
- [54] Jagielło P, Struzewska J, Jeleniewicz G, et al. Evaluation of the effectiveness of the national clean air programme in terms of health impacts from exposure to

- PM_{2.5} and NO₂ concentrations in Poland[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(1): 530.
- [55] Mebrahtu T F, Santorelli G, Yang T C, et al. The effects of exposure to NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ on health service attendances with respiratory illnesses: a time-series analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 333: 122123.
- [56] 郭秀锐, 吉木色, 郎建垒, 等. 基于情景分析的北京市机动车污染排放控制研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(9): 1690–1696.
- [57] 阿迪拉·阿力木江, 蒋平, 董虹佳, 等. 推广新能源汽车碳减排和大气污染控制的协同效益研究: 以上海市为例[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(5): 1873–1883.
- [58] 高尚涛. 伦敦治霾经验: 立法减排与能源优化[J]. *前线*, 2017(2): 77–80.
- [59] 李海棠. 全球城市环境经济政策与法规的国际比较及启示[J]. *浙江海洋学院学报(人文科学版)*, 2019, 36(5): 28–36.
- [60] 张欢, 吴瑛祖, 梅煜臻, 等. 我国空气质量的时空变化及其城市群分布特征: 兼论“十三五”时期以来我国空气污染治理成效[J]. *环境经济研究*, 2023, 8(3): 46–65.
- [61] 黄婧, 郭新彪. 交通相关空气污染的健康影响研究进展[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(6): 1592–1598.
- [62] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2655–2669.
- [63] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源VOCs排放的源头追踪和行业特征研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 48–55.
- [64] Zhang Y H, Chen C H, Chen G H, et al. Application of DALYs in measuring health effect of ambient air pollution: a case study in Shanghai, China[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 268–272.

Assessment of the Economic Loss of Health Damages Caused by Air Pollutants in Typical Chinese Cities from 2016 to 2023

CUI Lijiang¹, ZHOU Xuedong², ZHANG Miao¹, XU Yihang¹, WU Yan^{1,*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao Shandong 266237, China;

2. Assets and Laboratory Management Office, Shandong University, Qingdao Shandong 266237, China)

Abstract: Atmospheric contaminants can cause negative health impacts to humans. This work aimed to evaluate the economic loss of health damage caused by air pollutants in China. This study employs a Poisson regression relative risk estimation model, integrated with the human capital approach and the cost-of-illness method, to evaluate the economic loss of health damages caused by Particulate Matter (PM_{2.5}) and Nitrogen Dioxide (NO₂) in Beijing, Shanghai, Guangzhou, and Xi'an from 2016 to 2023. The findings reveal that the maximum economic loss resulting from health damages in the four cities is as follows: Beijing, 478.589 billion Chinese Yuan (CNY); Shanghai, 451.271 billion CNY; Guangzhou, 191.442 billion CNY; and Xi'an, 115.286 billion CNY. The general trend indicates that the economic loss of health damages in all cities underwent an initial increase followed by a decrease, which was mainly attributed to the change in NO₂ concentration with the increase in human capital loss. Specifically, Beijing and Shanghai exhibited the highest ratios of health economic loss to their gross domestic product (GDP), and they experienced the most significant declines during the study period. The economic loss of health damages in Guangzhou accounted for the smallest percentage of its GDP, indicating the comparatively good performance of its pollution control measures. The findings of this study provide important theoretical support for improving air pollution control strategies in urban areas and help with reducing the impact of air pollution on health and the economy.

Keywords: air pollution; economic loss of health damages; PM_{2.5}; NO₂