

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM_{2.5}健康损害价值的动态评估 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM_{2.5}时空演化及人口暴露风险 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM_{2.5}污染特征及理化性质 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM_{2.5}中金属元素污染及来源的区域特征分析 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业城市大气多氯联苯来源及健康风险 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi₂MoO₆/Bi₂S₃异质结构催化降解四环素-铜复合物 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe₃O₄@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH₄⁺和限NO₂⁻厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 赵靛, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姍, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣驥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉米轮作土壤N₂O排放的影响 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

2015 ~ 2018 年我国 PM_{2.5} 健康损害价值的动态评估

李惠娟^{1,2}, 周德群², 魏永杰³

(1. 徐州工程学院金融学院, 徐州 221111; 2. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 211106; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 为了定量评估我国空气污染治理产生环境健康效益的动态变化, 本文运用 2015 ~ 2018 年的全国 297 个地级及以上城市数据, 估算 PM_{2.5} 污染造成的健康效应与健康经济损失变化, 并分区域分城市对比分析。结果表明, 由于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大幅下降, 2015 ~ 2018 年全国暴露于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标地区人口逐年下降, 占总人口的比重从 80.88% 下降至 62.32%。各类健康终点总人数从 3323.25 万人下降到 1591.45 万人, 健康经济损失从 1579.39 亿元下降到 838.16 亿元, 健康经济损失占 GDP 比重从 2.31% 下降到 0.99%。6 大区域中京津冀及周边地区、成渝地区的各类指标逐年下降, 汾渭平原地区、长三角地区、珠三角地区和长江中游地区的各类指标呈现部分年份上升, 随后下降的复杂趋势。但是汾渭平原地区的情况仍比其它地区严重, 2018 年的各类健康终点总人数比 2015 年增加 1.89 万人, 健康经济损失增加 107.14 亿元, 人均健康经济损失增加 182.67 元。保定、邢台和邯郸等市各指标值虽逐年下降, 但每年仍居所有城市前 10, 西安、咸阳和临汾等市 2018 年的指标值不及 2015 年乐观。结果显示, 我国空气污染治理产生的环境健康效益总体显著, 但仍需进一步加强区域联防联控与一市一策。

关键词: PM_{2.5}; 健康损害; 动态价值评估; 6 大区域; 中国

中图分类号: X196; X503.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5225-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004112

Dynamic Assessment of PM_{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018

LI Hui-juan^{1,2}, ZHOU De-qun², WEI Yong-jie³

(1. School of Finance, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221111, China; 2. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: With the development of industrialization and urbanization in China, there are many environmental problems especially air pollution, which has serious impacts on the sustainable development of economy, ecological environment and public health. Since 2013, a series of environmental protection laws and regulations, and industrial and energy policies have been successively implemented, including Action Plan for Air Pollution Control, and Three-Year Action Plan to Win the Blue Sky Defense War etc. The air quality of the whole country has been improved. In order to evaluate the dynamic changes of environmental health benefits from air pollution control in China, this paper estimates the health effects and health economic losses caused by PM_{2.5} pollution, and makes a comparative analysis among different regions and cities based on the data of 297 cities at prefecture level and above in China from 2015 to 2018. The results show that, due to sharp decline of $\rho(\text{PM}_{2.5})$, the population exposed to $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ decreased year by year, and the proportion of the total population decreased from 80.88% to 62.32%. The total number of all kinds of health endpoints decreased from 33.23 million to 15.91 million, health economic loss decreased from 1579.04 billion yuan to 838.42 billion yuan, the proportion of healthy economic loss in GDP dropped from 2.31% to 0.99%. Among the six regions, the index values of Beijing, Tianjin, Hebei, and surrounding areas, and Chengyu areas have declined year by year. However, Fenwei Plain areas, Yangtze River Delta areas, Pearl River Delta areas, and the middle reaches of the Yangtze River show a complex trend of increasing in some years and decreasing later. However, the situation of Fenwei Plain is still more serious than other areas, and the $\rho(\text{PM}_{2.5})$ is next to Beijing, Tianjin, Hebei and surrounding areas. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ of all 11 cities still exceed $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2018. Compared with 2015, the number of early deaths decreased by 1500, but the total number of all kinds of health endpoints increased by 18900. The health economic loss is 80.711 billion yuan, an increase of 10.714 billion yuan than that in 2015. The proportion of health economic loss in GDP is 3.16%, which is 0.25% lower than that in 2015. The per capita health economic loss is 182.67 yuan higher than that in 2015. In terms of cities, from 2015 to 2018, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in 228 cities decreased with varying degrees. Among which, Dezhou and Baoding dropped the most, only 10 cities saw $\rho(\text{PM}_{2.5})$ rise. 14 cities saw an increase in the number of healthy endpoints, and 11 cities saw an increase in the proportion of healthy economic loss to GDP. Although the index values of Baoding, Xingtai, Handan, and other cities have declined year by year, they still rank top 10 every year. The index value of Xi'an, Xianyang, Linfen, and other cities in 2018 is more than that in 2015. The research shows that the environmental health benefits of air pollution control are significant in China, but it is still necessary to further strengthen regional joint prevention and control, as well as one city one policy.

Key words: PM_{2.5}; health damage; dynamic value assessment; six regions; China

收稿日期: 2020-04-13; 修订日期: 2020-06-09

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(17BGL141); 中国博士后科学基金项目(2016M601809); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(JY-082)

作者简介: 李惠娟(1974 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源与环境经济和生态价值评估, E-mail: chinajslhj@163.com

随着我国工业化发展与城镇化推进,引发了诸多环境问题,尤其是空气质量明显下降,对经济、生态环境的可持续发展与公众健康产生了严重影响,人民日益增长的优美生态环境需要与更多优质生态产品供给不足之间的矛盾突出^[1]. 2013年,国务院颁布了《大气污染防治行动计划》,2017年将污染防治列为三大攻坚战之一,2018年又颁布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,二项计划、一系列环境保护法律法规和产业与能源调整等政策的实施,使得全国空气质量总体改善,重污染天数大幅减少,PM_{2.5}浓度显著下降.但是,受多种因素影响,个别地区的空气质量在治理过程中存在反复,空气污染与公众健康之间的矛盾仍然是阻碍美丽中国和健康中国建设的重要因素.

对某区域空气污染健康损害的价值评估,从时间上来说大致可以分为二种情况.一是采用一年或某次重污染数据的评估,二是采用多年数据的评估.第一种情况选择的评估对象有2006年我国113个主要城市的PM₁₀污染^[2]、京津冀地区2013年PM₁₀与PM_{2.5}污染^[3]、2013年1月全国20个省市雾霾污染^[4]和2015年我国62个城市的PM_{2.5}污染^[5]等.但是较小的时间尺度容易忽略污染物对健康影响的滞后效应,连续若干年的研究则能够反映某区域的健康损害动态变化情况,这方面研究选择的评估对象有珠三角地区2006~2012年的O₃污染、兰州市2002~2009年的PM₁₀污染^[6]、西安市2014~2016年冬季PM_{2.5}污染^[7]、上海市2013~2017年PM_{2.5}污染^[8]、郑州市2014~2016年的PM₁₀及PM_{2.5}污染^[9]和全国338个城市2013~2017年的PM_{2.5}污染^[10]等.从相关研究成果看,环境健康效果评价广泛应用,但是针对较长时间尺度、较大区域范围的横向与纵向对比研究以及多种健康终点的研究仍然较少,并且已有研究中对于国家重点防治的京津冀及周边地区和汾渭平原地区等区域的分析仍有待加强.

为了定量评估我国空气污染治理产生环境健康

效益的动态变化,本研究在前人基础上,运用2015~2018年的全国297个地级及以上城市的数据,估算PM_{2.5}污染造成的健康效应与健康经济损失变化,并分区域分城市进行对比分析.本研究数据详尽,所涉及和覆盖的区域广泛,研究结果具有普遍性与更好地解释性,避免了短时间和小范围样本城市研究的特殊性.本研究结果可以为进一步加强空气污染的联防联控、一市一策和保障公众健康政策决策提供成本效益分析依据,服务于美丽中国与健康中国建设.

1 材料与方法

1.1 暴露人口与暴露水平

为保持连续多年数据的口径一致,本文研究的城市名单来源于文献[11],包括4个直辖市、15个副省级城市和278个地级市,共297个城市.暴露人口选择为各市的常住人口,由于数据出版的滞后性,直辖市的2015~2017年人口数据来源于各市统计年鉴,其它城市数据来源于各省统计年鉴,2018年数据均来自于各市统计公报.

我国从2015年开始才有比较详细的各市 ρ (PM_{2.5})监测数据,因此研究的基准年选择为2015年.2015~2018年 ρ (PM_{2.5})来源于各市统计公报,若统计公报缺失此数据,则用天气后报网补充.本文选取环境空气质量标准(GB 3095-2012)的二级浓度限值35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为基准浓度,当 ρ (PM_{2.5}) > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时称为超标.本文仅研究超标城市的健康效应与健康经济损失.

1.2 健康终点与暴露-反应关系

近年来的环境流行病学及环境毒理学研究已证实,长期或短期暴露于污染(尤其是重污染)空气中,会造成人体的心血管、呼吸、神经和免疫系统疾病,甚至致人早逝^[12-15].考虑到数据的可得性,本文选取的健康风险终点为早逝、住院(呼吸系统疾病与心血管系统疾病)、门诊(内科与儿科)和患病(慢性支气管炎与急性支气管炎).选取的暴露-反应关系系数如表1所示.

表1 各健康终点的暴露-反应关系系数及基准发病率

Table 1 Dose-response relationship coefficients of different health endpoints and baseline incidence

项目	暴露-反应系数 $\beta/\%$ (95%置信区间) ¹⁾	基准发生率 $\%$			
		东部	中部	西部	
早逝	全因死亡	各城市死亡率 ²⁾			
门诊	内科	各城市内科就诊率 ²⁾			
	儿科	各城市儿科就诊率 ²⁾			
住院	呼吸系统疾病	0.109 (0.000 ~ 0.221) ^[17]	0.98	1.29	1.72
	心血管系统疾病	0.068 (0.043 ~ 0.093) ^[17]	1.29	1.67	1.21
患病	急性支气管炎	0.790 (0.270 ~ 1.300) ^[17]	3.42	2.87	4.08
	慢性支气管炎	1.009 (0.366 ~ 1.559) ^[17]	0.61	0.54	1.00

1) β 值为PM_{2.5}浓度每增加1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 导致的人群发病率和死亡率增加的百分数; 括号内为95% CI值 $\% ; 2)$ 各城市死亡率、各城市内科就诊率和各城市儿科就诊率的数据计算方法见1.3节

1.3 健康终点的基准发生率

各市全因死亡率数据来源与人口数据来源相同. 由于很难获得各城市的详细卫生数据, 本文对其健康终点基准发生率进行估算, 所用的原始数据均来自文献[18], 具体方法如下: ①对于各城市内科与儿科的门诊基准发生率, 按以下步骤估算而得. 首先, 假设同一省内各城市的内科、儿科门诊发生率与全省平均状况相同; 根据各省医疗卫生机构中的各科就诊比例估算出各省平均的内科和儿科就诊率, 作为省内每个城市内科和儿科的基准发生率. ②对于各城市住院和患病的基准发生率数据, 按照各城市所属的区域, 选用文献[18]的东部、中部和西部居民的相应疾病住院率与患病率, 如表 1 所示.

1.4 PM_{2.5} 污染归因的健康损失

大气污染对人体健康的影响是一个复杂非线性过程, 影响的结果包括过早死亡、门诊和住院等各种健康终点引发的直接损失与间接损失. 对于总人口来说, 健康终点的发生人数作为一种时间序列, 实际分布近似泊松分布. 由流行病学的研究结果可知, PM_{2.5} 浓度与健康风险之间存在着暴露-反应关系, 根据泊松回归比例风险模型, 归因于 PM_{2.5} 的人群健康风险如式(1)所示:

$$RR = RR_0 \times \exp[\beta \times (c - c_0)] \quad (1)$$

式中, RR 为 PM_{2.5} 污染实际浓度下的健康风险, RR_0 为 PM_{2.5} 污染参考基准浓度下的健康风险, β 为暴露-反应关系系数, c 为实际 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), c_0 为 PM_{2.5} 参考基准浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

当暴露人群数量为 P , 则归因于 PM_{2.5} 的健康效应变化量 ΔE 如式(2)所示:

$$\begin{aligned} \Delta E &= P \times (RR - RR_0) \\ &= P \times RR \times \left\{ 1 - \frac{1}{\exp[\beta \times (c - c_0)]} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

1.5 健康终点的单位成本

早逝的单位成本, 以北京市居民统计寿命价值 (value of statistical life, VSL) 168 万元人民币^[19] 为基础, 运用各市人均可支配收入及 CPI 指数折算为 2015~2018 年各城市的相应值.

门诊成本与住院成本, 采用疾病成本法计算. 它是一种事后计算方法, 该方法以已经发生的医疗费用、收入损失等为标准, 更加接近现实支出^[20]. 疾病成本法对某种疾病 i 单位成本的计算公式如式(3)所示:

$$C_i = C_{pi} + \text{GDP}_p \times T_i \quad (3)$$

式中, C_i 为 PM_{2.5} 污染导致健康终点 i 的单位成本, C_{pi} 为健康终点 i 的单位病例医药费, GDP_p 为人均日误工成本 [$\text{元} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$], T_i 为因治疗健康终点

i 导致的误工时间. 病人前往医院进行门诊的误工 (儿科为陪护) 时间统一按 1 d 计算, 住院的误工时间按住院日计算.

各城市内科和儿科单位病例医药费按如下方法推算: 首先假设各城市门诊内科和儿科的医药费占全部门诊医药费的比例与全国的比例相同, 其次由省的门诊医药费、省和市的人均可支配收入推算得出市的门诊医药费, 最后按照相应比例推算出各市内科和儿科的门诊医药费.

各城市住院单位病例医药费按如下方法推算: 首先假设各城市呼吸系统、心血管系统疾病住院医药费比例及住院日比例与全国平均情况相同; 其次, 从年鉴中得到全国呼吸系统疾病、心血管系统疾病的人均医药费及平均住院日; 最后, 根据全国各种疾病平均住院医药费与两种疾病住院医药费的比例、各省的平均住院医药费、省和市的人均可支配收入, 折算出各市两种疾病住院医药费.

慢性支气管炎病程缓慢, 一般不易痊愈, 患病时间难以确定, 常造成病人极大痛苦, 显著降低病人生活质量, 因此不宜采用疾病成本法计算单位成本. 本文采用 Viscusi 等^[21] 与陈晓兰^[22] 的研究结果的中间值, 即慢性支气管炎的单位成本为统计寿命价值的 40%. 对于急性支气管炎的单位经济损失, 假设它与门诊损失的比例在各城市相同, 依据黄德生等^[17] 对于门诊与急性支气管炎单位损失比例, 结合各市的门诊损失, 估算各市急性支气管炎的单位损失.

卫生数据均来自文献[18]. GDP、可支配收入数据来源与人口数据来源相同. 2015~2018 年内 GDP 和可支配收入数据以 2015 年为基准年, 用 CPI 指数进行削减; 根据文献[23], 2015~2018 年 CPI 指数分别为 1、1.02、1.016 和 1.021.

1.6 健康终点的经济损失

PM_{2.5} 引起所有不良健康终点的总经济损失如式(4)所示:

$$L = \sum_{i=1}^m L_i = \sum_{i=1}^m P \times \Delta RR_i \times L_{pi} \quad (4)$$

式中, L 为 PM_{2.5} 污染导致所有健康终点的损失, L_i 为 PM_{2.5} 污染导致健康终点 i 的损失, m 为健康终点个数, L_{pi} 为 PM_{2.5} 污染导致健康终点 i 的单位损失. 为定量描述估算过程中的不确定性, 本文除了估算总损失的平均值以外, 还估算了 95% CI (置信区间) 的值.

2 结果与讨论

2.1 总体分析

从图 1 可以看出, 2015~2018 年, 全国 297 个

城市的空气质量从总体上逐年显著好转, $\rho(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的非超标城市数量从 59 个增加到 128 个, 增加幅度为 23%。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的城市, 其浓度平均值由 2015 年的 $57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降幅度为 14.92%。这种下降趋势与贺晋瑜等^[24]研究的 74 个重点城市在 2013~2016 年以及武卫玲等^[10]研究的 338 个城市在 2013~2017 年的结果类似。

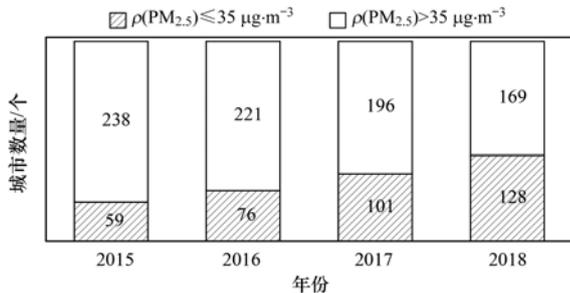


图 1 2015~2018 年按 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分类的城市数量

Fig. 1 Number of cities by $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in 2015-2018

2015 年, 全国 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的 238 个城市总人口数为 11.11 亿人, 占全国总人口的 80.88%; 2018 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的 169 个城市总人口数为 8.69 亿人, 占全国总人口的 62.32%, 受空气污染影响的人口比重下降幅度为 22.96%。

各类健康终点发生总人数从 2015 年的 3 323.25 万人 (95% CI: 1 517.38 ~ 4 953.96 万人), 逐年减少至 2018 年的 1 591.45 万人 (95% CI: 719.45 ~ 2 395.51 万人), 减少了 52%; 健康终点发生率从 2.42% (95% CI: 1.10% ~ 3.60%) 逐年下降至 1.14% (95% CI: 0.52% ~ 1.72%), 下降幅度达 53%, 如图 2 所示。

健康经济损失由 2015 年的 15 790.39 亿元 (95% CI: 5 398.84 ~ 24 027.80 亿元), 逐年下降至 2018 年的 8 384.16 亿元 (95% CI: 2 794.16 ~ 13 043.33 亿元); 人均健康经济损失由 2015 年的 1 148.71 元 (95% CI: 392.75 ~ 1 747.96 元), 逐年下

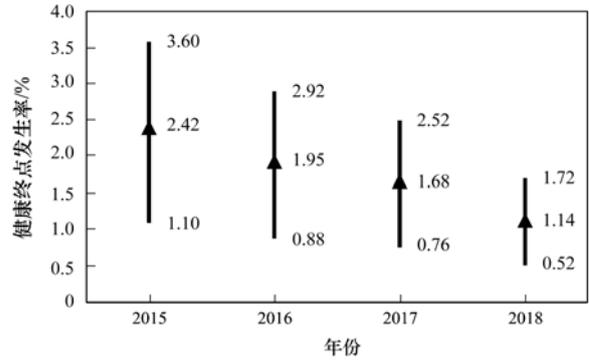


图 2 2015~2018 年全国健康终点发生率

Fig. 2 National health endpoint incidence in 2015-2018

降至 2018 年的 600.85 元 (95% CI: 200.24 ~ 934.75 元); 健康经济损失占 GDP 比重则从 2.31% (95% CI: 0.79% ~ 3.52%) 逐年下降至 0.99% (95% CI: 0.33% ~ 1.53%), 下降幅度达 57.14%, 如图 3 所示。

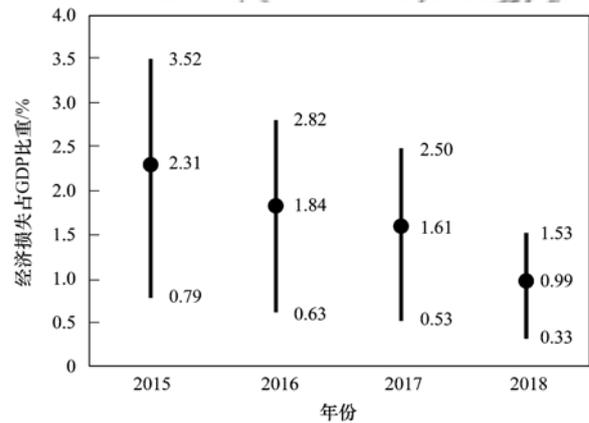


图 3 2015~2018 年全国健康经济损失占 GDP 比重

Fig. 3 Proportion of GDP of national health economic losses in 2015-2018

2.2 区域分析

根据文献[25], 京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原地区等 3 个区域 80 个城市为大气污染防治的重点区域, 珠三角地区、成渝地区和长江中游地区等 3 个区域 52 个城市也是需要重点关注的区域, 6 大区域共 132 个城市, 如表 2 所示。

表 2 大气污染防治的重点区域及城市数量

Table 2 Number of key areas and cities for air pollution prevention

区域名称	城市名称	城市数量
京津冀及周边地区	北京、天津、河北省石家庄、唐山、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊、衡水、山西省太原、阳泉、长治、晋城、山东省济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、河南省郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作和濮阳	28
长三角地区	上海、江苏省的南京、苏州、无锡、常州、扬州、镇江、南通、泰州、徐州、连云港、淮安、盐城、宿迁、浙江省的杭州、宁波、湖州、嘉兴、绍兴、舟山、温州、金华、衢州、台州、丽水、安徽省的宿州、淮北、亳州、阜阳、蚌埠、淮南、滁州、六安、马鞍山、安庆、芜湖、铜陵、宣城、池州和黄山	41
汾渭平原地区	山西省的晋中、运城、临汾、吕梁市、河南省的洛阳、三门峡、陕西省的西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南	11
成渝地区	重庆、四川省的成都、绵阳、德阳、内江、资阳、遂宁、自贡、泸州、宜宾、南充、广安、达州、眉山和乐山	15
长江中游地区	湖北省武汉、黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、襄阳、宜昌、荆州、荆门、湖南省长沙、株洲、湘潭、岳阳、益阳、常德、衡阳、娄底、江西省南昌、九江、景德镇、鹰潭、新余、宜春、萍乡、上饶、抚州和吉安	28
珠三角地区	广东省的广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州和肇庆	9

2.2.1 区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分析

从图 4 可以看出, 2015 ~ 2018 年京津冀及周边地区、汾渭平原地区所有城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均超标; 京津冀及周边地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐年降低并且降幅较大, 但仍为所有区域最高值; 汾渭平原地区 2016 ~ 2017 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 比 2015 年不降反增, 2018 年小幅下降, 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅次于京津冀及周边地区. 长三角地区的空气质量相对较好, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 小于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的城市数量由 2015 年的 3 个增加到 2018 年的 8 个, 是数量增加最多的区域, 但在 2016 ~ 2017 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 没有下降. 长江中游地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与长三角地区相差不大, 2016 ~ 2017 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅下降 $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2015 ~ 2017 年 28 个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均超标, 2018 年超标城市大幅下降至 21 个. 成渝地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐年降低, 至 2018 年仅有 1 个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 小于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 14 个超标城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 珠三角地区的空气质量一直居全国之首, 2015 年仅 4 个城市超标, 超标城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 至 2018 年仅有 1 个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标.

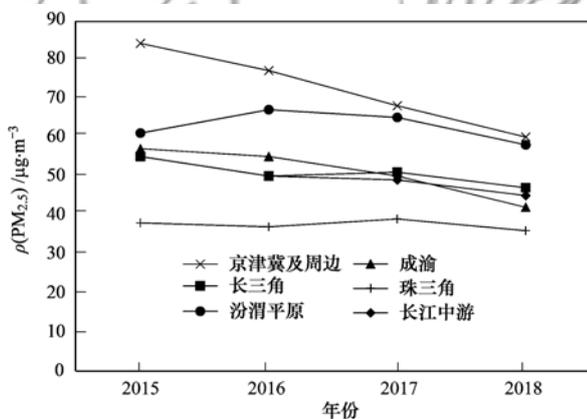


图 4 2015 ~ 2018 年 6 大区域中超标城市的平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$

Fig. 4 Average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in over-standard cities of six regions in 2015-2018

2.2.2 区域健康效应分析

表 3 汇总了 2015 ~ 2018 年 6 大区域的健康效应、区域中超标城市数量, 以及超标城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值. 从总体上看, 6 大区域的健康效应呈现下降趋势, 2018 年比 2015 年大幅减少, 但个别区域的个别年份有所反复.

具体看, 京津冀及周边地区的各类指标值均居 6 大区域之首, 但保持逐年下降. 早逝人数从 2015 年的 14.83 万人 (95% CI: 4.03 ~ 23.93 万人) 减少至 2018 年的 8.01 万人 (95% CI: 2.12 ~ 13.27 万人), 健康终点发生率从 6.28% (95% CI: 2.94% ~ 9.24%) 下降至 3.27% (95% CI: 1.50% ~ 4.89%).

汾渭平原地区 2016 年的各健康终点人数比 2015 年有所上升, 其中早逝人数增加了 0.64 万人 (95% CI: 0.18 ~ 1.02 万人); 2015 ~ 2016 年的各健康终点发生率没有太大变化, 但是 11 个城市中仅 2 个 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降, 其余 9 个城市全部上升, 整个区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升了 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2017 年各类健康终点人数小幅下降; 至 2018 年, 早逝人数比 2015 年下降了 0.15 万人 (95% CI: 0.04 ~ 0.24 万人), 但是各类健康终点总人数仍比 2015 年增加 1.89 万人 (95% CI: 0.55 ~ 3.43 万人).

长三角地区 2017 年的早逝人数比 2016 年增加 1.21 万人 (95% CI: 0.32 ~ 2.01 万人), 2018 年早逝人数下降至 3.79 万人 (95% CI: 0.99 ~ 6.35 万人). 长江中游地区 2017 年的早逝、内科门诊、儿科门诊人数均比 2016 年上升, 各类健康终点总人数比 2016 年增加 18.12 万人 (95% CI: 9.80 ~ 23.54 万人). 珠三角地区各类健康终点人数总体较少, 但 2017 年各类健康终点人数均比 2016 年小幅上升. 成渝地区的各类指标值均逐年下降.

2.2.3 区域健康经济损失分析

与 6 大区域的健康效应趋势类似, 区域的健康经济损失也在总体上呈现下降趋势, 个别年份出现上升现象, 如表 4 所示.

京津冀及周边地区 2018 年比 2015 年的健康经济损失减少 1744.35 亿元 (95% CI: 687.15 ~ 2377.04 亿元), 占 GDP 的比重减少 1.90% (95% CI: 0.73% ~ 2.66%), 人均健康经济损失减少 925.14 元 (95% CI: 364.12 ~ 1261.71 元). 长三角地区、成渝地区的各项指标值均与京津冀及周边地区同样呈现逐年下降态势. 但是汾渭平原地区 2015 ~ 2017 年的各项指标值均逐年上升, 2018 年虽又下降, 但仍高于 2015 年; 2018 年比 2015 年的健康经济损失增加 107.14 亿元 (95% CI: 37.41 ~ 164.17 亿元), 人均健康经济损失增加 182.67 元 (95% CI: 63.86 ~ 280.16 元). 长江中游地区的各项指标值虽在 2017 年有所上升, 但 2018 年又大幅下降, 与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标城市数量由 28 个大幅减少至 21 个, 这与减少了 2532.36 万暴露人口有较大关系; 2018 年比 2015 年的健康经济损失减少 679.64 亿元 (95% CI: 207.66 ~ 1027.17 亿元), 占 GDP 的比重减少 1.23% (95% CI: 0.38% ~ 1.87%).

2.3 城市分析

2.3.1 城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分析

2015 ~ 2018 年, 各城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 总体上呈现下降趋势. 至 2018 年, 图 1 中 2015 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的 238 个城市中有 228 个城市均呈现不同程度下

表3 2015~2018年6大区域的健康效应¹⁾
Table 3 Health effects in the six regions in 2015-2018

区域	年份	超标城市数/个	超标城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	早逝/万人	住院		门诊	
					呼吸疾病/万人	心血管疾病/万人	内科/万人	儿科/万人
京津冀及周边地区	2015	28	84	14.83(4.03, 23.93)	10.66(0.01, 20.99)	8.80(5.60, 11.95)	628.82(348.48, 893.42)	
	2016	28	77	13.37(3.61, 21.76)	9.14(0.01, 18.07)	7.52(4.78, 10.23)	540.56(299.29, 768.70)	
	2017	28	68	12.42(3.32, 20.39)	7.26(0.01, 14.43)	5.97(3.79, 8.13)	447.29(247.41, 636.65)	
	2018	28	60	8.01(2.12, 13.27)	5.33(0.00, 10.65)	4.37(2.77, 5.96)	324.29(179.19, 462.03)	
汾渭平原地区	2015	11	61	2.16(0.57, 3.57)	2.09(0.00, 4.16)	1.30(0.83, 1.78)	57.52(31.80, 81.92)	
	2016	11	67	2.80(0.75, 4.59)	2.78(0.00, 5.52)	1.66(1.06, 2.27)	76.20(42.16, 108.42)	
	2017	11	65	2.68(0.72, 4.41)	2.68(0.00, 5.33)	1.61(1.02, 2.19)	85.48(47.28, 121.66)	
	2018	11	58	2.01(0.53, 3.33)	2.01(0.00, 4.01)	1.21(0.77, 1.65)	57.36(31.70, 81.73)	
长三角地区	2015	38	55	7.98(2.10, 13.28)	5.05(0.00, 10.11)	4.14(2.62, 5.64)	318.90(176.13, 454.56)	
	2016	37	50	5.26(1.38, 8.79)	3.70(0.00, 7.42)	3.02(1.92, 4.13)	210.95(116.44, 300.85)	
	2017	37	51	6.47(1.70, 10.79)	3.52(0.00, 7.05)	2.88(1.83, 3.93)	189.80(104.80, 270.63)	
	2018	33	47	3.79(0.99, 6.35)	2.53(0.00, 5.08)	2.07(1.31, 2.82)	140.11(77.33, 199.84)	
成渝地区	2015	15	57	4.23(1.12, 7.03)	4.15(0.00, 8.30)	1.83(1.16, 2.49)	116.12(64.16, 165.46)	
	2016	14	55	3.88(1.02, 6.46)	3.77(0.00, 7.55)	1.66(1.05, 2.27)	107.87(59.59, 153.74)	
	2017	14	50	3.64(0.95, 6.09)	2.51(0.00, 5.05)	1.11(0.70, 1.51)	88.06(48.61, 125.58)	
	2018	14	42	1.54(0.40, 2.60)	1.44(0.00, 2.89)	0.63(0.40, 0.86)	46.11(25.44, 65.79)	
长江中游地区	2015	28	55	4.60(1.22, 7.63)	3.66(0.00, 7.31)	2.99(1.90, 4.07)	117.82(65.12, 167.82)	
	2016	28	50	3.55(0.93, 5.93)	2.75(0.00, 5.52)	2.24(1.42, 3.06)	87.96(48.57, 125.41)	
	2017	28	49	3.84(1.00, 6.33)	2.60(0.00, 5.16)	2.12(1.34, 2.87)	105.59(58.30, 149.56)	
	2018	21	45	1.76(0.46, 2.97)	1.49(0.00, 2.99)	1.21(0.77, 1.65)	48.86(26.97, 69.70)	
珠三角地区	2015	4	38	0.19(0.05, 0.32)	0.11(0.00, 0.22)	0.09(0.06, 0.12)	6.62(3.65, 9.45)	
	2016	3	37	0.07(0.02, 0.11)	0.04(0.00, 0.09)	0.04(0.02, 0.05)	2.58(1.42, 3.69)	
	2017	2	39	0.09(0.02, 0.15)	0.05(0.00, 0.10)	0.04(0.03, 0.06)	3.91(2.15, 5.58)	
	2018	1	36	0.01(0.00, 0.01)	0.00(0.00, 0.01)	0.00(0.00, 0.00)	0.23(0.13, 0.33)	
区域	年份	超标城市数/个	超标城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	早逝/万人	患病		健康终点人数/万人	健康终点发生率/%
京津冀及周边地区	2015	28	84	14.83(4.03, 23.93)	204.98(79.96, 298.39)	44.73(19.05, 60.76)	1 191.32(557.57, 1 752.98)	
	2016	28	77	13.37(3.61, 21.76)	179.85(68.72, 266.62)	39.58(16.45, 54.78)	1 037.81(482.07, 1 535.41)	
	2017	28	68	12.42(3.32, 20.39)	146.92(55.00, 221.90)	32.60(13.21, 46.00)	855.24(395.63, 1 271.44)	
	2018	28	60	8.01(2.12, 13.27)	108.85(39.77, 168.09)	24.44(9.62, 35.29)	622.55(286.32, 930.92)	
汾渭平原地区	2015	11	61	2.16(0.57, 3.57)	31.82(11.67, 48.96)	8.62(3.41, 12.42)	135.27(59.68, 203.61)	
	2016	11	67	2.80(0.75, 4.59)	41.30(15.50, 62.22)	11.27(4.58, 15.85)	181.45(80.39, 271.43)	
	2017	11	65	2.68(0.72, 4.41)	40.04(14.96, 60.59)	10.94(4.43, 15.45)	183.77(82.90, 274.08)	
	2018	11	58	2.01(0.53, 3.33)	30.88(11.27, 47.73)	8.48(3.34, 12.26)	137.16(60.23, 207.04)	
长三角地区	2015	38	55	7.98(2.10, 13.28)	103.05(37.25, 160.72)	23.28(9.04, 33.96)	609.52(279.90, 913.88)	
	2016	37	50	5.26(1.38, 8.79)	73.32(26.20, 115.62)	16.72(6.41, 24.68)	410.95(187.44, 618.54)	
	2017	37	51	6.47(1.70, 10.79)	66.33(23.85, 104.02)	15.16(5.85, 22.25)	379.68(172.26, 571.68)	
	2018	33	47	3.79(0.99, 6.35)	49.39(17.57, 78.22)	11.31(4.31, 16.78)	277.42(125.94, 418.45)	
成渝地区	2015	15	57	4.23(1.12, 7.03)	65.63(23.89, 101.66)	20.01(7.85, 29.00)	269.68(118.89, 406.28)	
	2016	14	55	3.88(1.02, 6.46)	60.10(21.75, 93.63)	18.37(7.15, 26.78)	247.49(109.15, 373.38)	
	2017	14	50	3.64(0.95, 6.09)	40.85(14.57, 64.54)	12.57(4.80, 18.59)	192.63(85.36, 291.69)	
	2018	14	42	1.54(0.40, 2.60)	23.72(8.35, 37.92)	7.33(2.76, 10.99)	104.03(45.68, 158.35)	
长江中游地区	2015	28	55	4.60(1.22, 7.63)	54.38(19.90, 83.89)	12.71(5.01, 18.33)	261.81(116.71, 394.06)	
	2016	28	50	3.55(0.93, 5.93)	42.01(15.05, 66.07)	9.90(3.81, 14.58)	198.05(87.57, 300.09)	
	2017	28	49	3.84(1.00, 6.33)	39.96(14.27, 62.32)	9.43(3.61, 13.78)	216.17(97.37, 323.63)	
	2018	21	45	1.76(0.46, 2.97)	23.03(8.16, 36.60)	5.45(2.07, 8.12)	110.89(48.84, 168.64)	
珠三角地区	2015	4	38	0.19(0.05, 0.32)	2.77(0.96, 4.52)	0.63(0.23, 0.96)	14.74(6.49, 22.55)	
	2016	3	37	0.07(0.02, 0.11)	1.09(0.37, 1.78)	0.25(0.09, 0.38)	5.70(2.51, 8.72)	
	2017	2	39	0.09(0.02, 0.15)	1.25(0.43, 2.04)	0.28(0.10, 0.43)	7.57(3.43, 11.49)	
	2018	1	36	0.01(0.00, 0.01)	0.10(0.03, 0.16)	0.02(0.01, 0.03)	0.51(0.23, 0.79)	

1) 括号内为95%CI值,下同

表 4 2015 ~ 2018 年 6 大区域的健康经济损失
Table 4 Health economic losses in the six regions in 2015-2018

区域	年份	健康经济损失/亿元	经济损失占 GDP 比重/%	人均健康经济损失/元
京津冀及 周边地区	2015	4 796.74(1 714.67, 7 086.49)	4.23(1.51, 6.25)	2 528.63(903.90, 3 735.69)
	2016	4 550.61(1 593.25, 6 816.31)	3.79(1.33, 5.68)	2 381.90(833.94, 3 567.82)
	2017	4 073.09(1 382.01, 6 217.88)	3.22(1.09, 4.91)	2 121.36(719.79, 3 238.42)
	2018	3 052.39(1 027.52, 4 709.45)	2.33(0.78, 3.59)	1 603.49(539.78, 2 473.98)
汾渭平原地区	2015	699.97(242.61, 1 065.52)	3.41(1.18, 5.19)	1 413.61(489.95, 2 151.87)
	2016	977.75(347.50, 1 461.29)	4.52(1.61, 6.75)	1 961.80(697.23, 2 931.99)
	2017	1 009.35(358.04, 1 511.64)	4.19(1.49, 6.28)	2 012.99(714.05, 3 014.72)
	2018	807.11(280.02, 1 229.69)	3.16(1.09, 4.81)	1 596.28(553.81, 2 432.03)
长三角地区	2015	3 394.36(1 124.74, 5 282.41)	2.09(0.69, 3.25)	1 537.71(509.53, 2 393.03)
	2016	2 307.62(760.23, 3 618.89)	1.32(0.43, 2.07)	1 060.07(349.23, 1 662.44)
	2017	2 272.01(732.44, 3 583.17)	1.19(0.38, 1.88)	1 053.03(339.47, 1 660.74)
	2018	1 627.58(532.08, 2 562.99)	0.81(0.26, 1.27)	764.19(249.82, 1 203.38)
成渝地区	2015	1 473.24(512.98, 2 243.23)	3.39(1.18, 5.16)	1 523.56(530.50, 2 319.86)
	2016	1 455.84(503.87, 2 226.61)	3.11(1.07, 4.75)	1 494.07(517.10, 2 285.09)
	2017	1 228.74(407.78, 1 918.44)	2.41(0.80, 3.76)	1 253.08(415.86, 1 956.44)
	2018	582.82(195.87, 911.77)	1.08(0.36, 1.70)	590.51(198.45, 923.81)
长江中游地区	2015	1 392.54(440.82, 2 150.05)	2.14(0.68, 3.31)	1 118.57(354.10, 1 727.05)
	2016	1 131.97(371.25, 1 772.46)	1.63(0.53, 2.55)	903.56(296.34, 1 414.81)
	2017	1 240.20(399.23, 1 938.24)	1.66(0.53, 2.59)	985.01(317.08, 1 539.41)
	2018	712.90(233.16, 1 122.88)	0.91(0.30, 1.44)	562.37(183.93, 885.79)
珠三角地区	2015	109.08(35.05, 174.66)	0.16(0.05, 0.26)	148.12(47.59, 237.17)
	2016	42.58(13.79, 68.16)	0.06(0.02, 0.10)	56.81(18.40, 90.93)
	2017	47.17(15.13, 75.55)	0.06(0.02, 0.12)	61.68(19.78, 98.78)
	2018	2.14(0.69, 3.44)	0.00(0.00, 0.01)	2.74(0.88, 4.41)

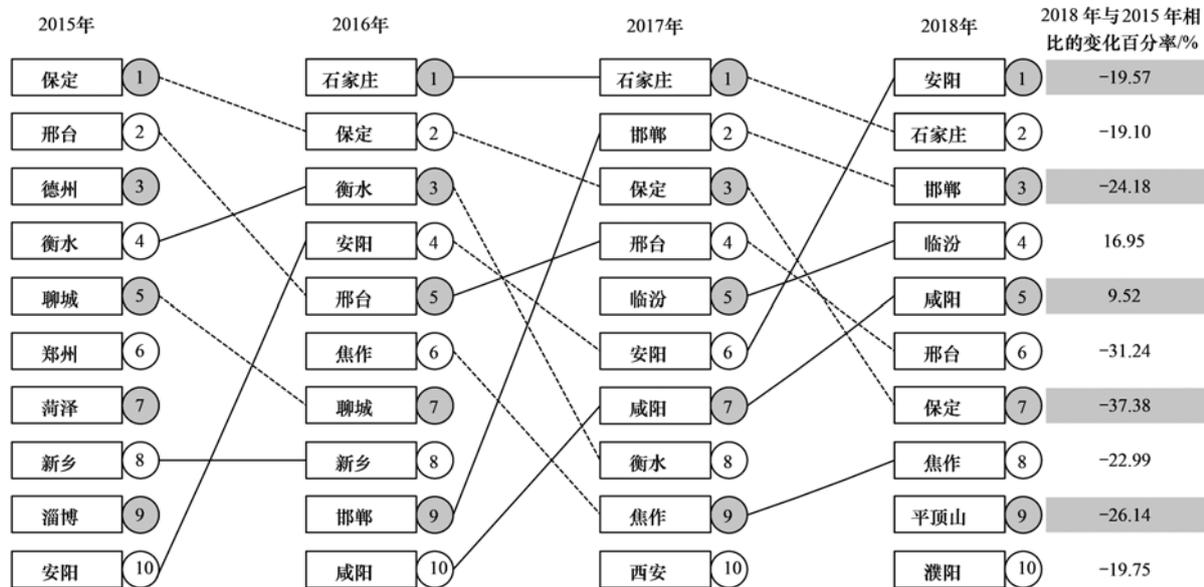


图 5 2015 ~ 2018 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 排名前 10 的城市

Fig. 5 Top ten cities for $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in 2015-2018

降,其中德州和保定下降最多,分别下降了 $46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 仅有 10 个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升(临汾、咸阳、淮南、雅安、阳泉、吕梁、西安、晋城、阜阳和定西,其中 4 个城市位于汾渭平原地区,2 个城市位于京津冀及周边地区和 2 个城市位于长三角地区),其中临汾和咸阳分别上升了 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2015 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 排名前 10 的城市全部

地处京津冀及周边地区; 2016 年有 9 个城市地处京津冀及周边地区, 1 个城市地处汾渭平原地区; 2017 年有 7 个城市地处京津冀及周边地区, 3 个城市地处汾渭平原地区; 2018 年仍有 7 个城市地处京津冀及周边地区, 2 个城市地处汾渭平原地区. 2015 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 排名前 10 城市的平均值为 $97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2018 年为 $69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降了

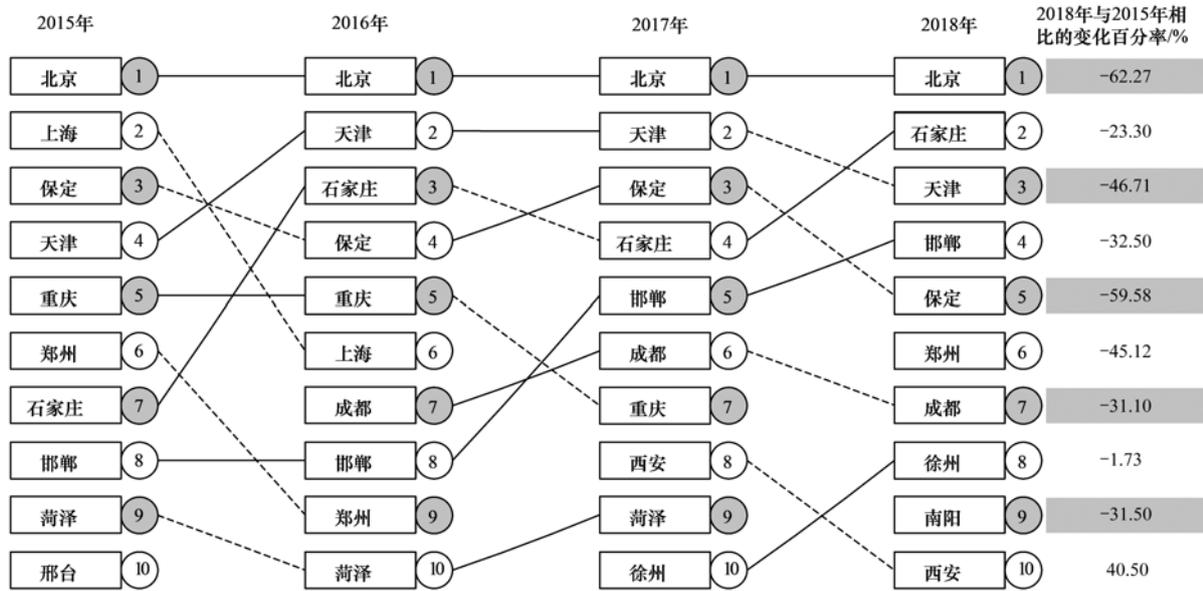


图 6 2015~2018 年健康终点发生人数排名前 10 的城市

Fig. 6 Top ten cities for number of healthy endpoints in 2015-2018

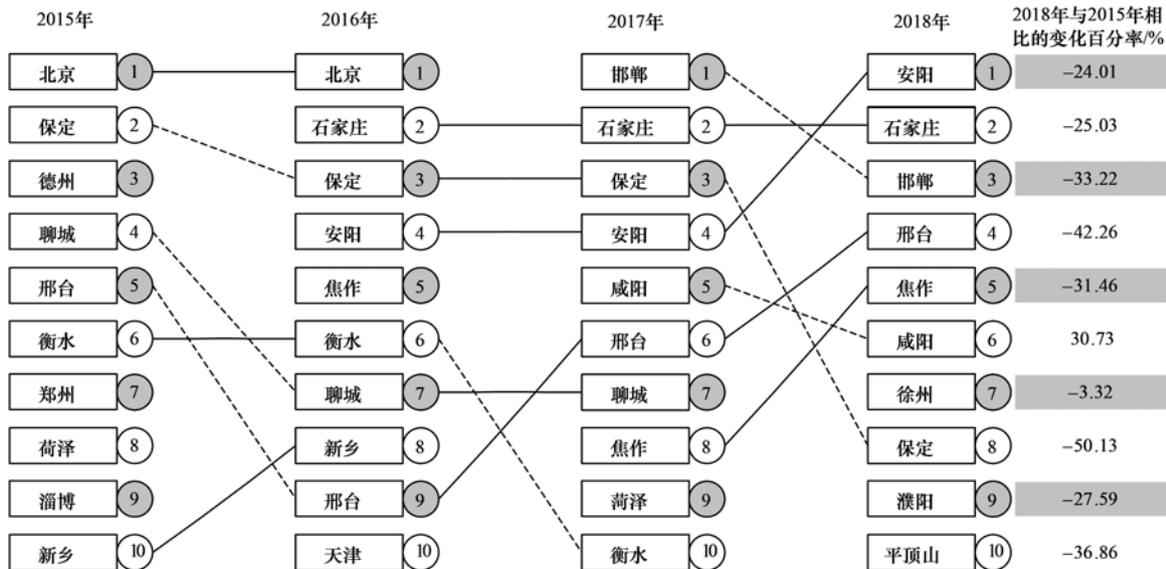


图 7 2015~2018 年健康终点发生人数占总人数比重排名前 10 的城市

Fig. 7 Top ten cities in proportion of number of healthy endpoints in total population in 2015-2018

28.87%。2018 年排名第 1 的安阳市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 相当于 2015 年排名第 32 城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$; 2018 年排名第 10 的濮阳市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 相当于 2015 年排名第 58 城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 。4 年间, 排名前 10 的城市虽有变化, 但保定和邢台等市一直在名单中; 与 2015 年相比, 排名前 10 的城市中有 8 个城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降, 2 个城市不降反升, 如图 5 所示。

2.3.2 城市健康效应分析

至 2018 年, 图 1 中 2015 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的 238 个城市中, 224 个城市的健康终点发生人数下降, 14 个城市的健康终点发生人数上升, 其中包括

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升的 10 个城市, 11 个暴露人口增加的城市。如图 6 所示, 排名前 10 的城市中, 北京、保定、天津、石家庄和邯郸由于暴露人口基数大并且 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较高, 一直处于健康终点发生人数排名前 10; 与 2015 年相比, 2018 年北京等 9 个城市的健康终点发生人数均出现不同程度下降, 其中北京下降幅度达 62.27%; 仅西安市的健康终点发生人数出现较大幅度上升。2015~2018 年西安市暴露人口逐年上升, 2018 年的暴露人口比 2015 年增加约 130 万人, 年均增加约 43 万人; 4 年间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 58、71、73 和 $61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2017 年的健康终点总人数达到最大值 44.76 万人 (95% CI: 20.08 ~ 66.65 万人), 2018 年下降至 31.44 万人 (95% CI:

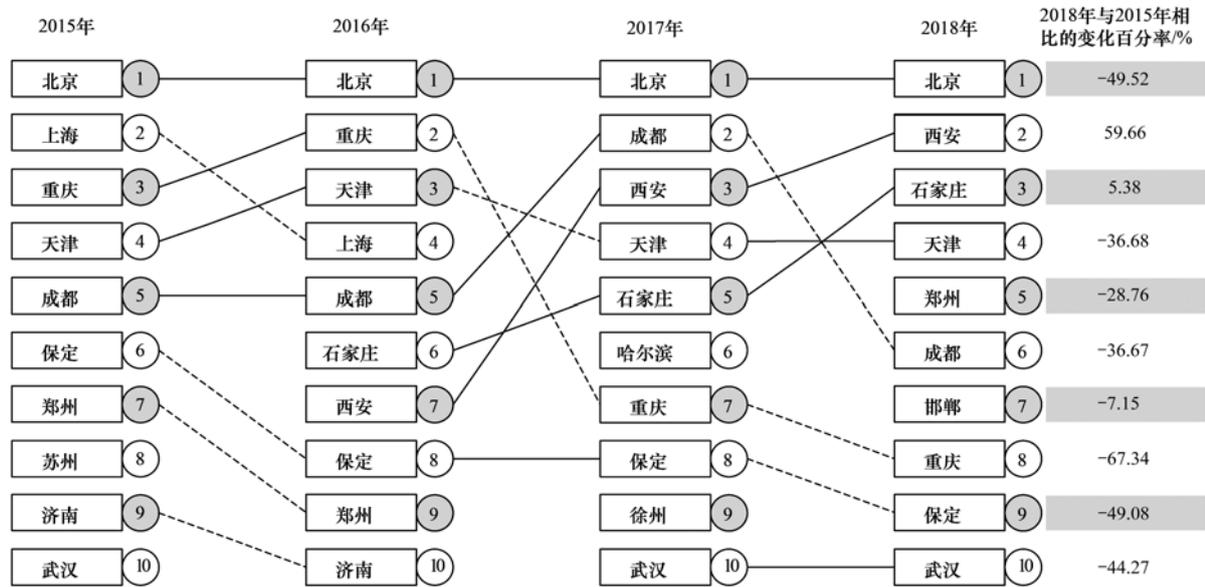


图 8 2015 ~ 2018 年健康经济损失排名前 10 的城市

Fig. 8 Top ten cities in health economic loss in 2015-2018

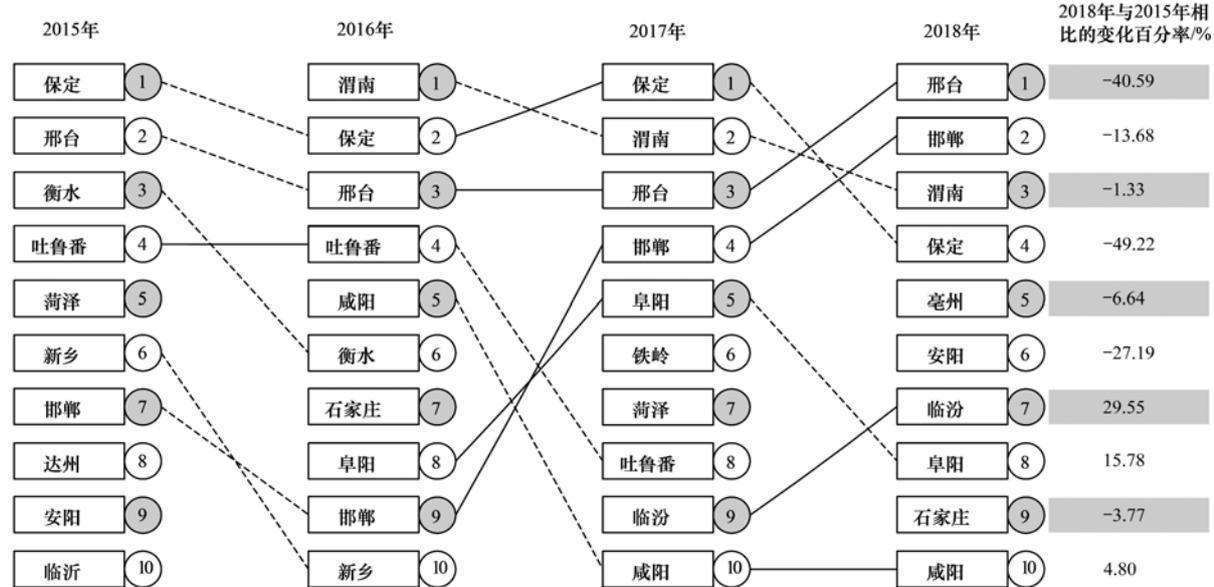


图 9 2015 ~ 2018 年健康经济损失占 GDP 比重排名前 10 的城市

Fig. 9 Top ten cities in proportion of health economic loss in GDP in 2015-2018

13.46 ~ 47.70 万人),但仍比 2015 年增加 9.07 万人(95% CI: 3.94 ~ 13.68 万人),其中早逝增加 0.09 万人(95% CI: 0.02 ~ 0.15 万人),内科门诊增加 3.43 万人(95% CI: 1.89 ~ 4.88 万人)。

随着空气质量好转,大部分城市的健康终点发生人数占暴露总人数比重下降,小部分上升.如图 7 所示,4 年间,保定和邢台始终排名前 10,石家庄和安阳有 3 次排名前 10;2018 年,排名前 10 的城市中有 9 个城市的比重下降,仅咸阳的比重上升,从 2015 年的 3.11% (95% CI: 1.33% ~ 4.71%) 上升到 2018 年的 4.07% (95% CI: 1.75% ~ 6.13%). 咸阳市 2018 年的暴露人口比 2015 年减少约 60 万人,年

均减少约 20 万人;其 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在 2015 ~ 2018 年分别为 63、82、79 和 69 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2016 年的健康终点总人数达到最大值 26.07 万人(95% CI: 11.35 ~ 38.89 万人),2017 年下降至 23.41 万人(95% CI: 10.55 ~ 34.71 万人),2018 年进一步降至 17.75 万人(95% CI: 7.66 ~ 26.75 万人),但仍比 2015 年增加 2.29 万人(95% CI: 1.04 ~ 3.35 万人),而且由于暴露人口持续减少,所以健康终点发生人数占总人数比重仍比 2015 年上升了 30.73%。

2.3.3 城市健康经济损失分析

2015 ~ 2018 年,214 个城市的健康经济损失下降,24 个上升.4 年间排名前 10 的城市中,北京、重

庆、天津和保定一直在名单中,郑州有3次在名单中. 2015年排名前10的城市中有8个为一线或新一线城市,2018年7个为一线或新一线城市,均为经济较发达人均收入较高城市;另外3个城市为石家庄、邯郸和保定,均为 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、健康终点发生人数、健康终点发生人数占总人数比重排名前10的城市. 与2015年相比,2018年北京等8个城市的健康经济损失值下降,西安与石家庄上升,如图8所示.

从健康经济损失占GDP比重来看,2015年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的238个城市中,至2018年仅有11个城市的健康经济损失占GDP比重上升,其余227个城市均下降,其中达州和保定下降幅度最大. 如图9所示,2015~2018年排名前10的城市中,保定、邢台和邯郸一直在名单中,渭南、阜阳和咸阳有3次在名单中;与2015年相比,2018年临汾、阜阳和咸阳的健康经济损失占GDP比重上升. 临汾的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在2015~2018年分别为59、74、79和69 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,并且2018年的暴露人口比2015年增加约6万人,年均增加约2万人. 同期,阜阳的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为51、61、67和54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,暴露人口年均增加约10万人.

3 结论

(1)2015~2018年全国 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈现逐年下降趋势,超标城市的平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由2015年的57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到48 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降幅度为14.92%;暴露于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标地区人口占总人口的比例也逐年下降,分别为80.88%、76.84%、70.33%和62.32%. 以环境空气质量标准(GB 3095-2012)的二级浓度限值35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为基准浓度,各类健康终点总人数从2015年的约3323.25万人下降到2018年的约1591.45万人,健康经济损失从2015年的约15790.39亿元下降到2018年的约8384.16亿元,健康经济损失占GDP比重从2015年的约2.31%下降到2018年的约0.99%.

(2)2015~2018年6大区域中京津冀及周边地区、成渝地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、各类健康终点总人数、健康经济损失及其占GDP比重均呈现逐年下降趋势. 至2018年,京津冀及周边地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仍在6大区域中最高,健康终点总人数约为622.55万人,健康终点发生率约为3.27%,健康经济损失约为3052.39亿元,占GDP比重约为2.33%. 长江中游地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 虽然逐年下降,但2016~2017年健康终点总人数小幅上升. 汾渭平原地区、长三角地区和珠三角地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、各类健康终点总人

数、健康经济损失及其占GDP比重呈现部分年份上升,随后下降的复杂趋势. 汾渭平原地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅次于京津冀及周边地区,至2018年,全部11个城市的浓度仍超标,各类健康终点总人数比2015年增加约1.89万人;健康经济损失约为807.11亿元,比2015年增加约107.14亿元;健康经济损失占GDP比重约为3.16%,比2015年减少0.25%;人均健康经济损失比2015年增加182.67元. 珠三角地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低,至2018年仅一个城市超标,健康损失较少.

(3)至2018年,2015年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标的238个城市中有228个城市均呈现不同程度下降,其中德州和保定下降最多,仅有10个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升;14个城市的健康终点发生人数上升,11个城市的健康经济损失占GDP比重上升. 2015~2018年间,北京、保定、天津、石家庄和邯郸这5个城市的健康终点发生人数均排名前10,保定和邢台的健康终点发生人数占总人数比重均排名前10,北京、重庆、天津和保定这4个城市的健康经济损失均排名前10,保定、邢台和邯郸这3个城市的健康经济损失占GDP比重均排名前10. 与2015年相比,2018年西安的健康终点发生人数上升40.50%,健康经济损失大幅上升59.66%;咸阳的健康终点发生人数占总人数比重增加30.73%;临汾的健康经济损失占GDP比重上升29.55%;以上3个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均大于2015年,均位于汾渭平原地区.

(4)考虑到数据的可得性与统计数据的缺失,本文的评估结果具有一定的不确定性,主要表现为:一是部分数据尤其是各地级市的卫生数据采用省级数据推算而得或直接采用全国东中西部的数据,将会影响评估结果的准确性;二是选取的健康终点不够全面,仅选择早逝、呼吸系统与心血管系统疾病住院、内科与儿科门诊、急性支气管炎与慢性支气管炎,未考虑其它不良健康终点,可能使评估结果偏低;三是仅考虑 $\text{PM}_{2.5}$ 导致的影响,未考虑其它污染物的影响,可能使评估结果偏低;四是已有文献发现建立暴露-反应关系的过程仍存在不确定性,不同城市的暴露-反应关系系数由于气象、人为等原因而产生差异. 由于资料限制,各市只能采用统一的暴露-反应关系系数,但本文根据95%置信区间对结果进行低值、中值及高值估算,这在一定程度上将不确定性控制在相对可靠范围.

(5)鉴于全国的总体情况好转,但部分区域如京津冀及周边地区、汾渭平原地区,部分城市如保定、邢台、邯郸、西安、咸阳和临汾等市仍不乐观,应加强空气污染治理的区域联防联控与一市一策.

参考文献:

- [1] 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.
- Zhang Y N, Pan J H. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1436-1446.
- [2] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(3): 410-415.
- Chen R J, Chen B H, Kan H D. A health-based economic assessment of particulate air pollution in 113 Chinese cities[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(3): 410-415.
- [3] 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.
- Lü L Y, Li H Y. Health economic evaluation of PM₁₀ and PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2016, **49**(1): 69-77.
- [4] 穆泉, 张世秋. 2013 年 1 月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 2087-2094.
- Mu Q, Zhang S Q. An evaluation of the economic loss due to the heavy haze during January 2013 in China [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(11): 2087-2094.
- [5] 李惠娟, 周德群, 魏永杰. 我国城市 PM_{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- Li H J, Zhou D Q, Wei Y J. An assessment of PM_{2.5}-related health risks and associated economic losses in Chinese cities[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- [6] 侯青, 安兴琴, 王自发, 等. 2002~2009 年兰州 PM₁₀ 人体健康经济损失评估[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(8): 1398-1402.
- Hou Q, An X Q, Wang Z F, et al. Assessment on health economic costs of particulate air pollution in Lanzhou during 2002~2009 [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(8): 1398-1402.
- [7] 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.
- Wei G R, Shi X M. Evaluation the extent of health damage caused by PM_{2.5} particulate in Xi'an City [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3014-3021.
- [8] 戴海夏, 安静宇, 李莉, 等. 上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 24-32.
- Dai H X, An J Y, Li L, et al. Health benefit analyses of the Clean Air Action Plan implementation in Shanghai [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 24-32.
- [9] 韩士杰, 王佳, 燕启社, 等. 2014~2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2565-2571.
- Han S J, Wang J, Yan Q S, et al. Health benefit evaluation for PM₁₀ and PM_{2.5} pollution control in Zhengzhou, China, 2014-2016 [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2565-2571.
- [10] 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 等. 《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2961-2966.
- Wu W L, Xue W B, Wang Y L, et al. Health benefit evaluation for air pollution prevention and control action plan in China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2961-2966.
- [11] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [12] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. Nature, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [13] Zanobetti A, Schwartz J. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: A national analysis [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, **117**(6): 898-903.
- [14] Ebenstein A, Fan M Y, Greenstone M, et al. Growth, pollution, and life expectancy: China from 1991-2012 [J]. American Economic Review, 2015, **105**(5): 226-231.
- [15] Chen W Q, Zheng R S, Baade P D, et al. Cancer statistics in China, 2015 [J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2016, **66**(2): 115-132.
- [16] 王桂芝, 武灵艳, 陈纪波, 等. 北京市 PM_{2.5} 污染健康经济效应的 CGE 分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2779-2785.
- Wang G Z, Wu L Y, Chen J B, et al. A CGE-based analysis on PM_{2.5}-induced health-related economic effect in Beijing [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2779-2785.
- [17] 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.
- Huang D S, Zhang S Q. Health benefit evaluation for PM_{2.5} pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(1): 166-174.
- [18] 国家卫生健康委员会. 2019 中国卫生健康统计年鉴 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2019.
- [19] 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: control strategy of environmental benefit assessment and urban air pollution [D]. Beijing: Peking University, 2011.
- [20] 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.
- Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 1-8.
- [21] Viscusi W K, Magat W A, Huber J. Pricing environmental health risks: survey assessments of risk-risk and risk-dollar trade-offs for chronic bronchitis [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1991, **21**(1): 32-51.
- [22] 陈晓兰. 大气颗粒物造成的健康损害价值评估 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- Chen X L. Evaluating the health damage costs of atmospheric particulates [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [24] 贺晋瑜, 燕丽, 王彦超, 等. 我国 PM_{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2036-2042.
- He J Y, Yan L, Wang Y C, et al. Scenario analysis of PM_{2.5} concentration targets and milestones in China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2036-2042.
- [25] 国务院. 打赢蓝天保卫战三年行动计划 [R]. 北京: 国务院, 2018.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forss.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)