

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫫, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

PM_{2.5} 污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇¹, 廖琴^{1,2}, 赵秀阁^{1,3}, 白云⁴, 陶燕^{1*}

(1. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4. 重庆工商大学管理科学与工程学院, 重庆 400067)

摘要: 开展全国范围归因于 PM_{2.5} 污染的健康负担和经济损失研究, 对于污染防治政策至关重要。首先利用空气质量模型 (WRF-Chem) 模拟结果, 分析 2016 年 PM_{2.5} 的时空分布和暴露水平; 同时结合环境健康风险及环境价值评估方法, 评估 PM_{2.5} 污染引起的健康负担和经济损失; 最后基于情景分析方法, 预估实现具体 PM_{2.5} 控制目标的健康经济效益。结果表明, 2016 年, 我国 PM_{2.5} 污染主要集中在京津冀及周边地区、长三角地区、四川盆地以及西北沙漠地区, 且 71.49% 的人口暴露在 PM_{2.5} 浓度高于 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境空气中; 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%, 其中冠心病和中风约占 80%; PM_{2.5} 污染造成健康经济损失 7059.31 亿元, 约占国内生产总值 (GDP) 的 0.95%。PM_{2.5} 污染造成的健康负担和经济损失存在显著空间差异, 主要分布在 PM_{2.5} 浓度和人口密度高的中东部地区; 情景分析表明, 我国所有地区 PM_{2.5} 浓度降至 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 只能避免 17.11% 的健康经济损失, 而降至 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 可以带来 80.47% 的健康经济效益。建议环境管理者进一步加强控制力度, 更好地保障居民的健康和财富利益, 尤其是心脑血管疾病患者等敏感人群以及归因死亡率高的地区。

关键词: WRF-Chem 模型; PM_{2.5} 污染; 过早死亡; 经济损失; 潜在效益

中图分类号: X503.1; X196 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1688-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008313

Influence of PM_{2.5} Pollution on Health Burden and Economic Loss in China

LI Yong¹, LIAO Qin^{1,2}, ZHAO Xiu-ge^{1,3}, BAI Yun⁴, TAO Yan^{1*}

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Research on health and the economic losses caused by PM_{2.5} pollution nationwide is critical for pollution control planning. First, the spatiotemporal distribution of PM_{2.5} and exposure levels were simulated and analyzed using the air quality model (WRF-Chem) in China in 2016. Then, the health burden and economic loss caused by PM_{2.5} pollution were estimated using environmental health risk and environmental value assessment methods. Finally, the health and economic benefits from achieving specific PM_{2.5} control targets were estimated. In 2016 in China, high levels of PM_{2.5} were concentrated in Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas, the Yangtze River Delta, the Sichuan Basin, and the desert areas in northwest China. Furthermore, 71.49% of the total population of China was exposed to an environment with PM_{2.5} concentrations higher than 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Subsequently, the national PM_{2.5}-related mortality was 1.06 million, accounting for 10.9% of the total deaths in China. Stroke and ischemic heart disease accounted for approximately 80% of the total PM_{2.5}-related deaths caused by the five diseases studied. Meanwhile, the PM_{2.5} pollution resulted in economic losses of 705.93 billion yuan, which was 0.95% of the Gross Domestic Product (GDP) in 2016. There were significant spatial differences in the health burden and economic loss, which primarily occurred in regions with high PM_{2.5} levels or population density. Moreover, reducing PM_{2.5} to 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ would only result in a 17.11% reduction in the health burden and economic loss, while a more exacting standard (reducing PM_{2.5} to 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) would bring 80.47% of the health and economic benefits. It is suggested that environmental managers further strengthen their control to better protect the health and wealth benefits of residents, especially for sensitive groups, such as patients with cardio-cerebrovascular diseases, particularly in areas with high premature mortality.

Key words: WRF-Chem model; PM_{2.5} pollution; premature mortality; economic loss; potential benefits

近十年来, PM_{2.5} 一直是我国大部分地区环境空气的首要污染物。尽管过去几年 PM_{2.5} 污染已明显改善, 但许多发达地区 PM_{2.5} 年均浓度仍高出 WHO 空气质量准则 (WHO AQG: 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 5 倍以上^[1,2]。长期暴露在高水平 PM_{2.5} 浓度下, 给我国的生态环境、公共健康及社会经济带来了严重威胁^[2-4]。全球

疾病负担 (GBD) 研究显示, 2015 年全球约 420 万人因 PM_{2.5} 污染过早死亡, 其中我国大约逾 110 万

收稿日期: 2020-08-31; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0206201); 国家自然科学基金项目 (71801044)

作者简介: 李勇 (1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空气污染与健康, E-mail: liyong17@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: taoyan@lzu.edu.cn

人,远高于欧洲和北美^[5]. PM_{2.5}污染不仅会对健康造成直接损害,同时也会增加健康支出,进而造成经济损失. 根据世界银行报道,从1990~2013年,我国PM_{2.5}污染造成的健康经济损失从0.13万亿美元增至1.59万亿美元^[6]. 然而,这些全球研究都是基于国家尺度的整体分析,没有对我国不同地区的差异进行评估,在空间尺度上,需准确评估不同地区归因于PM_{2.5}污染的健康负担和经济损失,以便因地制宜地制定出基于证据的优先决策.

目前,地面监测数据已被广泛应用于PM_{2.5}污染的健康影响评估^[7~10]. 例如,Liu等^[7,8]基于PM_{2.5}监测数据分析了2013年中国74个重点城市死亡负担,同时评估了2013~2015年31个省会城市由于PM_{2.5}改善带来的死亡效益;并且归因于PM_{2.5}污染的健康经济损失评估也在城市/区域层面开始展开^[11,12]. 然而,由于监测点主要分布在城市地区,基于监测数据进行大规模的健康影响和健康经济损失评估存在较大不确定性^[10]. 因此,空间全覆盖的空气质量模型的暴露评估方法,是系统评价PM_{2.5}污染健康效应更有效的方法^[3],例如,Yang等^[13]和Lu等^[14]采用空气质量模型模拟的PM_{2.5}浓度,分别对京津冀和珠三角地区死亡负担的空间分布进行了评估. 此外,以往的研究多使用国家级健康经济数据和某地区人口总数来评估PM_{2.5}的健康经济损失^[2,5],但从较小的空间尺度来看,全国各省份的健康经济状况差异很大,同一城市不同区域的暴露人口数也各不相同,因而预估结果往往会偏离真实值,具有较大的不确定性.

为了定量评估我国PM_{2.5}污染对健康和经济造成的影响,本研究以2016年为基准年,利用WRF-Chem空气质量模型,分析我国PM_{2.5}污染的时空分布特征;基于目前最流行的健康风险和价值评估方法,结合PM_{2.5}模拟数据、精细化人口数据、省级基线死亡和经济指标数据,评估归因于PM_{2.5}污染的过早死亡和健康经济损失,并对特定疾病和特定地区的评估结果进行比较,确定其高危地区及敏感性疾病. 同时基于未来情景假设,估算我国2030年实现不同PM_{2.5}标准的潜在健康效益,以期决策者加强空气质量改善力度提供可衡量的价值,服务于美丽中国和健康中国建设.

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 PM_{2.5}观测数据

2016年1月~12月的PM_{2.5}逐小时浓度来源于中国环境监测总站信息共享平台(<http://106.37.208.233:20035/>),包括我国大陆所有地级市和部分

县级环保示范城市在内的366个监测城市. 将PM_{2.5}逐小时浓度转化为PM_{2.5}月均值和年均值,用于模型的性能评估.

1.1.2 人口数据

中国人口分布数据来自网格化世界人口数据库(GPWv4, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4/>). GPWv4提供了2015年分辨率为2.5弧分(约5 km×5 km)的人口数据,本研究首先利用插值法将其分辨率转换为36 km×36 km,然后利用2016年分地区年末人口数推断出2016年网格人口数^[15]. 2016年国家尺度的年龄结构数据来自于文献^[15],用于计算儿童(<5岁)和成人(≥25岁)人口数.

1.1.3 基线死亡和经济指标数据

国家级疾病特异性基线死亡率来自GBD数据库(<http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>). 省级基线死亡数据来自中国疾病预防控制中心对我国各地区的死因调查,此来源数据仅提供了2013年的死亡率^[16]. 因此,本研究将这两个数据库结合,推算出2016年省级水平的疾病特异性基准死亡率. 2016年省级水平的人均可支配收入来源于文献^[15].

1.2 PM_{2.5}浓度模拟

1.2.1 WRF-Chem模型

本研究采用空气质量模型WRF-Chem^[17]估算我国2016年地表PM_{2.5}浓度. WRF-Chem模型完整考虑了大气物理和大气化学过程,能有效模拟气态污染物和气溶胶的排放、传输、混合和化学转化. 模拟区域的中心点为(36.3°N, 102.2°E),水平分辨率为36 km×36 km,网格点数为144×124,模拟区域覆盖整个中国及其周边地区,如图1所示. 气象初

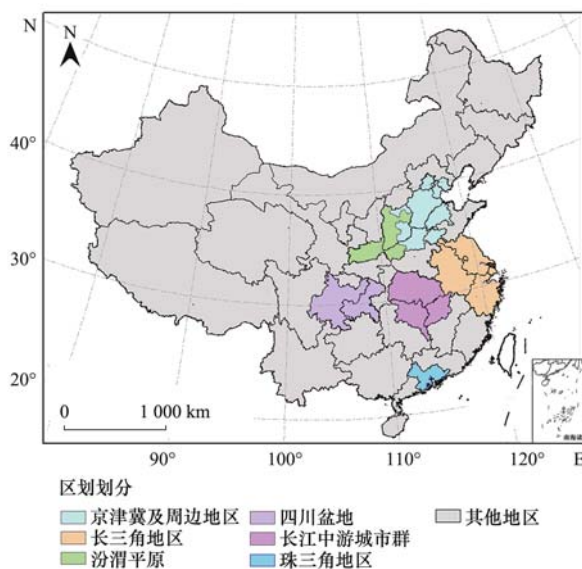


图1 WRF-Chem模拟区域设置及研究区域划分示意

Fig. 1 WRF-Chem simulated domain and study area division

始场和边界条件来自 NCEP-FNL 再分析资料 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>); 化学初始场和边界条件来自 MOZART-4 全球模式输出 (<https://www.acom.ucar.edu/wrf-chem/download.shtml>); 人为排放源采用清华大学基于 2016 年度数据开发的 MEIC 清单 (<http://www.meicmodel.org/>), 为覆盖全中国的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 月排放数据^[18]. 本研究中 WRF-Chem 的详细配置见表 1.

表 1 WRF-Chem 模拟配置

Table 1 WRF-Chem simulation configurations		
项目	属性	模拟配置
时空设置	模拟时期	2016 年 1 ~ 12 月
	模拟区域	中国及周边地区
	水平分辨率	36 km
	垂直分辨率	21 层, 高空 100 hPa (16 km), 近地层为 32 m
物理选项	微物理过程方案	Morrison double-moment
	短波和长波辐射方案	RRTMG
	近地面层方案	MYNN
	陆面过程方案	Noah
	边界层方案	MYNN 2.5 level TKE
	积云参数化方案	Grell-3D
化学选项	气相化学机制	MOZART
	气溶胶模块	MOSAIC
	光解机制	F-TUV
	人为排放源	MEIC (水平分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)
	生物排放源	MEGAN2 (水平分辨率 1 km)
	生物质燃烧源	FINNV1 (水平分辨率 1 km)

1.2.2 模型评估

为评估 WRF-Chem 模拟效果, 引入平均误差 (MB)、均方根误差 (RMSE)、标准化平均偏差 (NMB) 和相关系数 (CC) 这 4 个评价指标^[19], 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的模拟值和监测值进行误差分析. 由表 2 可见, $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值与观测值吻合较好, 除冬季外, MB 均小于 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 年均浓度的 RMSE、NMB 和 CC 分别为 $16.79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、3.97% 和 0.69, 与现有研究具有可比性^[19]. 模拟偏差主要归因于排放清单、大气物理和化学过程模拟中不可避免的不确定性^[3].

表 2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的模拟值与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的监测值的统计性描述

Table 2 Statistics of simulated and observed data of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations				
项目	MB $/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	RMSE $/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	NMB /%	CC
春季	-5.13	19.97	-11.13	0.56
夏季	4.52	14.86	15.54	0.69
秋季	4.13	19.12	9.59	0.67
冬季	-10.9	28.72	-16.11	0.63
全年	-1.85	16.79	-3.97	0.69

1.3 健康影响评估

本研究采用流行病学暴露-响应关系式评估

$\text{PM}_{2.5}$ 污染对健康的慢性影响, 主要包括 5 种疾病的过早死亡: 成人的肺癌、慢性阻塞性肺病、冠心病和中风, 以及儿童的下呼吸道感染^[20]. 健康影响方程如下:

$$\Delta \text{Mort} = y_0 \times [(\text{RR}(c) - 1) / \text{RR}(c)] \times \text{Pop} \quad (1)$$

式中, ΔMort 表示归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染所导致的某疾病过早死亡人数 (万人); y_0 表示某疾病的基线死亡率 (每 10 万人); Pop 表示暴露人口数 (万人); $\text{RR}(c)$ 表示特定浓度 c 下某疾病导致死亡的相对风险. 其中, $\text{RR}(c)$ 可通过 GBD 建立的综合暴露-响应 (IER) 模型进行计算^[21]:

$$\text{RR}(c) = \begin{cases} 1 + \alpha[1 - e^{-\gamma(c-c_0)^\delta}], & c > c_0 \\ 1, & c \leq c_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, c_0 表示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度阈值 ($5.8 \sim 8.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 假设低于此浓度不会对人体产生致命危害^[20]; α 、 γ 和 δ 为函数参数, 可限定不同疾病浓度-响应关系的形状^[21]. 不同疾病在各浓度水平下的 RR 值从 GBD 网站 (<http://ghdx.healthdata.org/record/ihme-data/gbd-2010-ambient-air-pollution-risk-model-1990-2010>) 获取.

1.4 健康经济损失评估

本研究采用统计生命价值 (VSL) 进行货币化评估过早死亡风险. VSL 代表经济价值, 用来衡量个体对降低/规避死亡风险的边际支付意愿. 具体省份的 VSL 主要取决于所在省份的人均可支配收入. 由于我国没有特定省份的 VSL 预估值, 因此采用效益转换方法, 即在调整人均可支配收入差异后, 根据已有省份 (如北京) 的基准 VSL 推导出特定省份的 VSL. 具体推导方法如下^[10]:

$$\text{VSL}_{i,2016} = \text{VSL}_{\text{base}} \times \left(\frac{I_{i,2016}}{I_{\text{base}}} \right)^\beta \quad (3)$$

式中, $\text{VSL}_{i,2016}$ 表示 2016 年某省份经调整后的统计生命价值 (万元); VSL_{base} 为基准统计生命价值, 本研究选择 2012 年北京市最新的 VSL 研究结果, 取值 13.2 万美元 (近似 93.6 万元)^[22]; $I_{i,2016}$ 表示 2016 年某省份的人均可支配收入 (元); I_{base} 为基准人均可支配收入 (元), 即 2012 年北京市人均可支配收入; β 为收入弹性系数, 取值 0.8^[23].

将式 (1) 和式 (3) 相乘, 即可得到归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康经济损失 ΔE :

$$\Delta E = \text{VSL} \times \Delta \text{Mort} \quad (4)$$

1.5 情景分析

随着污染控制政策的不断加强, 我国未来的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有望大幅度降低. 为了评估我国 $\text{PM}_{2.5}$ 下

降带来的健康效益和经济效益,本研究设置了4种控制情景,即PM_{2.5}在所有超过定义阈值的地方下降到目标浓度.具体地,本研究采用了WHO指定的4个目标浓度:空气质量准则(WHO AQG: 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)以及3个过渡目标(WHO IT-1: 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、WHO IT-2: 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、WHO IT-3: 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).健康效益及其经济效益可根据基准情景和控制情景之间的差值进行计算.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}污染水平和暴露人口

2.1.1 PM_{2.5}污染水平

基于WRF-Chem模拟数据,首先绘制了2016年我国PM_{2.5}年均浓度的空间分布,如图2所示.从全国范围来看,PM_{2.5}年均浓度存在显著空间差异,华北、东部沿海和西北沙漠等地污染水平较高,东北、华南和西南污染水平较低.其中,PM_{2.5}年均浓度超过90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域普遍位于新疆塔克拉玛干沙漠和内蒙古阿拉善沙漠,主要来自沙尘源的影响^[24],但考虑到这些区域人口稀少,高污染不会带来过大的健康影响;此外,PM_{2.5}年均浓度超过国家二级标准限值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的区域主要分布在京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原、四川盆地、长江中游城市群以及其他个别城市,人口密度高、社会经济活动集中、污染物排放强度高是根本原因^[25];而京津冀及周边地区和四川盆地等部分区域PM_{2.5}年均浓度达到70~90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,除自身高排放影响外,还受不利气象条件和复杂地形影响,使之易形成

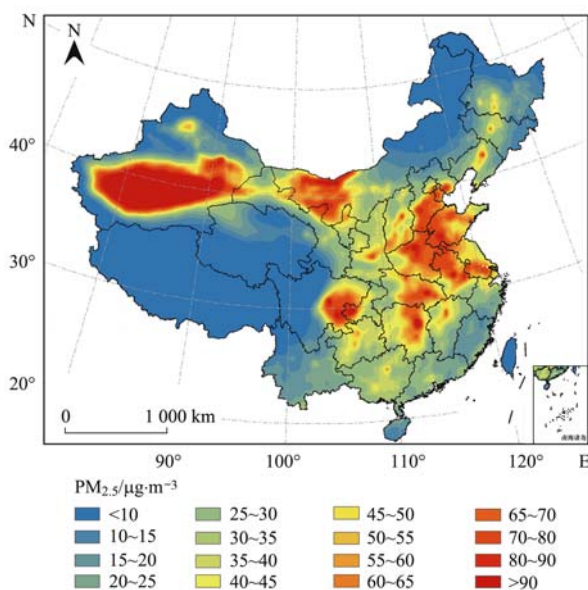


图2 2016年我国PM_{2.5}年均浓度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual PM_{2.5} concentrations in China in 2016

污染物的辐合汇聚带,进而会对大气环境造成负面影响^[26,27].值得注意的是,同属人口和社会经济活动集中的珠三角地区,2016年PM_{2.5}年均浓度普遍低于35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到国家二级标准限值,这与珠三角地区率先开展的一系列大气污染治理工作密不可分,如制定区域污染减排目标、区域联防联控和大气复合型污染治理等措施^[28~30],对区域空气质量改善带来显著效果.

2.1.2 累积暴露人口

利用WRF-Chem模拟的PM_{2.5}浓度和人口分布数据,估算2016年暴露于不同PM_{2.5}浓度下的人口比例(图3).由图3可以看出,2016年,全国仅有1.69%的人口居住在PM_{2.5}年均浓度小于15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境中,而71.49%的人则居住在PM_{2.5}年均浓度大于35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境中,其中总人口的13.43%暴露在PM_{2.5}年均浓度大于70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染环境中.相比较而言,全球平均水平要乐观很多,相对应的人口比例分别为40%、19%和8%,清洁空气主要集中在欧美等发达国家^[20].

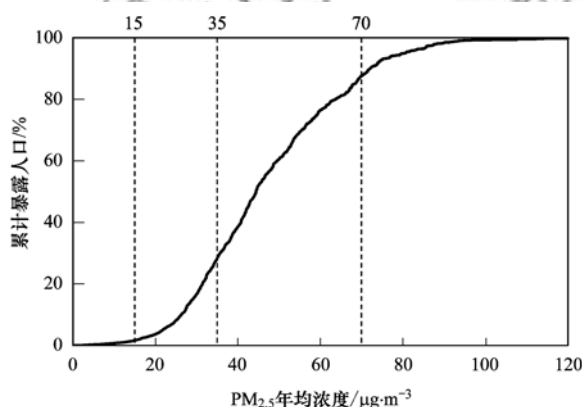


图3 2016年PM_{2.5}不同污染区间的人口频率分布

Fig. 3 Population frequency distribution of different PM_{2.5} pollution zones in 2016

2.2 PM_{2.5}污染的归因死亡

2.2.1 归因死亡总体情况

利用我国2016年的PM_{2.5}年均浓度、基线死亡率和人口数据,结合IER模型^[21],估算归因于PM_{2.5}污染的下呼吸道感染、肺癌、慢性阻塞性肺病、冠心病和中风过早死亡人数,如图4所示.2016年,我国归因于PM_{2.5}污染的过早死亡为106.04万例,占全国总死亡人数的10.9%(2016年我国总死亡人数为977万例^[15]),这一死亡数甚至超过了一些重要的死亡风险因素,例如,2016年全国因交通事故导致的死亡人数为6.3万^[31],因吸烟所致的死亡人数约为100万^[32].

2016年我国归因于PM_{2.5}污染的5种疾病过早

死亡中,中风是最主要的死因(52.76%),其次是冠心病(26.85%)、慢性阻塞性肺病(11.48%)和肺癌(8.57%),下呼吸道感染的比例最低,为0.34%。考虑到2016年中国大陆的总人口数为13.82亿^[15],2016年全国每10万人中就有77人因PM_{2.5}污染而过早死亡,平均死亡率达0.77‰。在这77人中,大约有43人死于中风,21人死于冠心病,主要由于这两种疾病(心脑血管疾病)在我国的发病率和死亡率均高于其他3种疾病^[33]。2016年,心脑血管疾病的归因死亡贡献接近80%,这比WHO报道的全球平均水平(49%)高出不少^[34];更令人不安的是,随着慢性疾病风险因素的流行和人口老龄化的加剧,预计未来我国心脑血管疾病负担还会进一步增加^[35]。为减少心脑血管疾病的归因死亡,一方面需通过改善医疗服务体系和转变生活方式,缓解心脑血管疾病的发病率和死亡率;另一方面应采取更加积极的空气污染防治措施,减少居民的PM_{2.5}暴露水平,特别是减轻心脑血管疾病患者免受PM_{2.5}污染的危害。

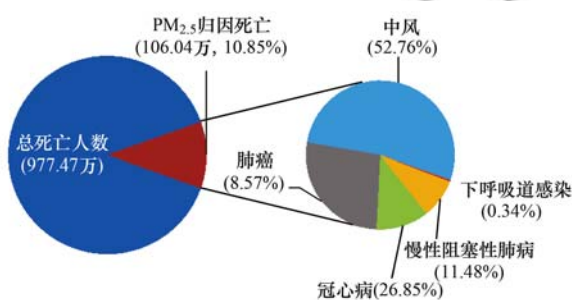


图4 2016年归因于PM_{2.5}污染的各种相关疾病的过早死亡比例

Fig. 4 Proportion of premature deaths attributable to PM_{2.5} pollution for each disease in 2016

2.2.2 归因死亡区域分析

PM_{2.5}归因死亡的空间分布见图5。可以看出,2016我国不同地区的归因死亡存在明显差异,与PM_{2.5}年均浓度的空间分布相似,京津冀及周边、长三角、汾渭平原、四川盆地和长江中游城市群等高污染地区的归因死亡也较高;而东北、西北和西南等地区较低,特别是在人口密度较低的区域,如西北沙漠地区,虽然具有很高的PM_{2.5}浓度,但由于过低的人口密度,导致归因死亡也很低;相反,PM_{2.5}浓度相对较低的珠三角却出现了大量的归因死亡,这主要可能由高人口密度造成的;此外,图中也零星分布着一些归因死亡高值区,主要与人口密集的城市地区相对应。由此可见,对于不同地区应结合实际,因地制宜地制定优先污染控制政策具有重要意义,而对于人口密集的地区,空气质量标准和控制政策应该更加严格,以避免更多的PM_{2.5}归因死亡。

不同省份的PM_{2.5}归因死亡负担也存在差异

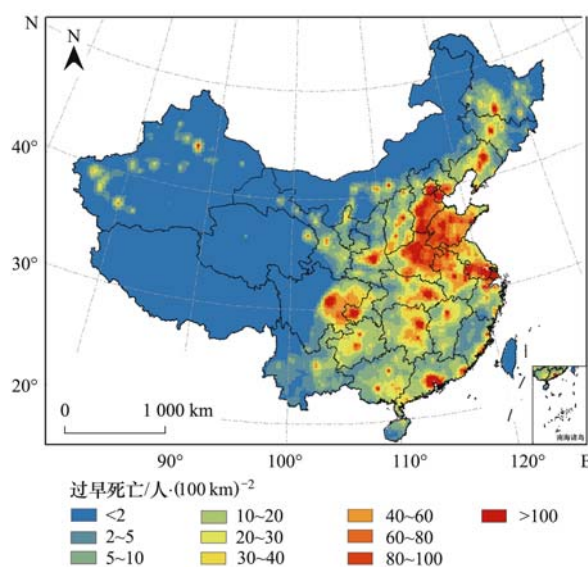


图5 2016年我国归因于PM_{2.5}污染的过早死亡空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of premature deaths caused by PM_{2.5} pollution in China in 2016

(图6)。2016年,河南是PM_{2.5}归因死亡数最多的省份,为10.64万人,其次山东、河北和四川等省份超过6.5万人,上述4个省份贡献了全国PM_{2.5}归因死亡的1/3;与之对应,西藏是归因死亡数最少的地区,仅有77人,海南、青海和宁夏等省份也很低,均在6000人以下。此外,为消除人口数对健康负担的影响,更直观了解PM_{2.5}污染导致的过早死亡,通过除以各省份人口总数的方式计算其PM_{2.5}归因死亡率。结果显示,河南和河北的PM_{2.5}归因死亡率最高,2016年每10万人中分别有112人和106人过早死亡。此外,还有4个省份的归因死亡率超过了0.9‰,这大约是全球平均水平的两倍^[20],反映了我国这些省份较高的污染水平。我国大陆31个省级行政区中,只有西藏、海南、浙江、云南、福建和青海等6个省份的归因死亡率低于世界平均水平,凸显了我国大面积控制空气污染的紧迫性。

2.3 健康经济损失

由于空气污染加重了健康负担,从而增加额外医疗支出,进而引起健康经济损失。基于统计生命价值和归因死亡数,估算2016年我国PM_{2.5}归因死亡的健康经济损失,合计7059.31亿元,相当于人均损失510.80元,占GDP的0.95%(2016年我国GDP为743585亿元^[15])。在省级水平上,山东的健康经济损失最高,为681.46亿元,其次为河南(577.48亿元),江苏、广东和河北也处于较高水平,分别为487.32、473.75和451.42亿元,上述5个省份贡献了全国健康经济损失的39.27%;相反,西藏的健康经济损失最低,仅为0.33亿元,青海、海南和宁夏均在30亿以下。此外,人均健康经济损失较高的省份

主要集中在北京、天津、山东和上海等经济发达和PM_{2.5}污染严重的地区,而西藏、海南、云南、青海和甘肃等经济相对落后和污染较轻的省份人均健康经济损失较少(图7).不同省份的健康经济损失主要取决于当地的归因死亡水平和死亡健康成本(即统计生命价值,由人均可支配收入控制),归因死亡水

平和死亡健康成本高的地区,健康经济损失也相对较高.例如,2016年北京的归因死亡人数(1.44万人)低于贵州(3.30万人),但健康经济损失(180.90亿元)却高于贵州(152.55亿元),主要是由北京较高的人均可支配收入造成的(北京和贵州分别为52 530元和15 121元)^[15].

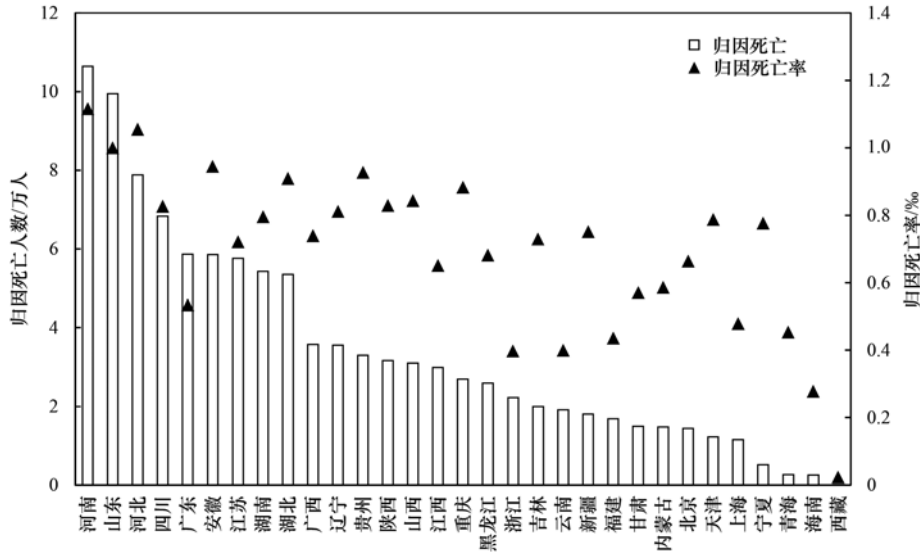


图6 2016年我国各省份归因于PM_{2.5}的过早死亡

Fig. 6 Premature mortality due to PM_{2.5} pollution in different provinces in 2016

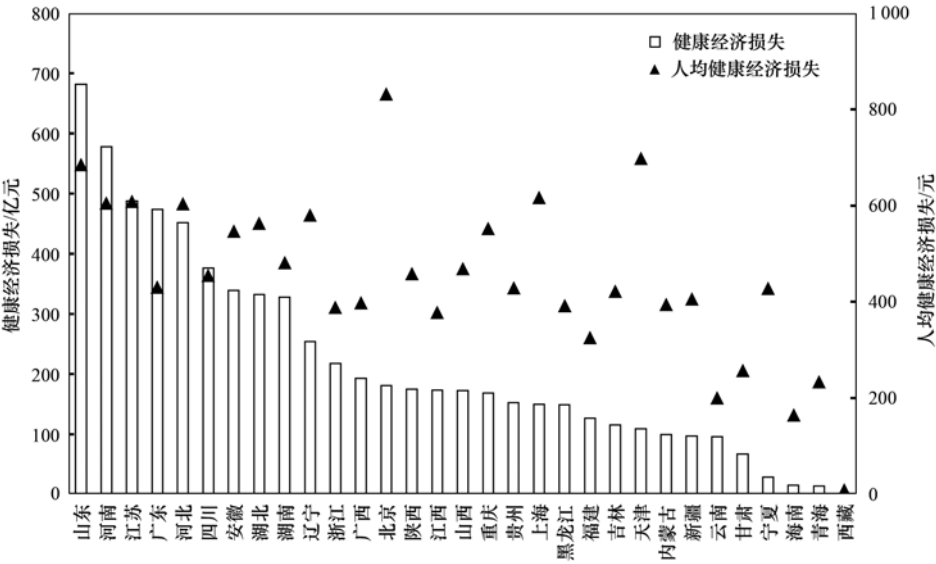


图7 2016年我国各省份归因于PM_{2.5}过早死亡的健康经济损失

Fig. 7 Economic losses due to PM_{2.5} pollution in different provinces in 2016

2.4 不同目标情景的健康经济效益

近年来,政府已采取多项措施积极控制空气污染,规划我国在2030年实现PM_{2.5}全面达标(WTO IT-1: 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[36].如果此目标得以实现,PM_{2.5}归因死亡人数将在2016年的基础上减少18.15万,下降幅度为17.11%(表3).然而,如果考虑未来的人口趋势,降低PM_{2.5}并不一定会减轻健康负担.据报道,到2030年,我国总人数预计将达到14.6亿,

其中60岁以上老年人高达24.8%^[37].一项最新的研究显示,由于人口增长和老龄化的加剧,即使2030年我国所有地区的PM_{2.5}浓度均达到35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}归因死亡仍会增加28万^[38].因此,我国需要将PM_{2.5}降至更低水平,才能避免足够的归因死亡.为此,设定2030年我国PM_{2.5}浓度分别达到WHO IT-2、IT-3和AQG标准,估算可以避免的归因死亡及其健康经济损失(表3),与2016年相比,

2030 年 $\text{PM}_{2.5}$ 分别达到上述标准,我国归因死亡人数将分别减少 35.05 万、65.52 万和 85.33 万。

表 3 2030 年不同情景下的健康效益和健康经济效益¹⁾

Table 3 Premature death and health economic benefits in different scenarios in 2030

项目	2016 情景	IT-1	IT-2	IT-3	AQG
归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 的过早死亡/万人	106.04	87.89	70.99	40.52	20.71
归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 的健康经济损失/亿元	7 059.31	5 158.50	4 726.33	2 697.56	1378.74
可避免的过早死亡/万人	—	18.15	35.05	65.52	85.33
可避免的健康经济损失/亿元	—	1 207.81	2 332.98	4 361.75	5 680.57
可避免的死亡/健康经济损失比例/%	—	17.11	33.05	61.79	80.47

1) IT-1、IT-2、IT-3 和 AQG 分别代表 WHO 空气质量指南中规定的过渡时期目标-1($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、过渡时期目标-2($25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、过渡时期目标-3($15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和准则值($10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降不仅可以带来健康效益,还可通过减少健康支出带来潜在经济效益。2030 年若能满足 WHO IT-1 标准,每年平均可避免约 1 207.81 亿元的健康经济损失;如果进一步将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 IT-2 和 IT-3 标准,每年可分别避免约 2 332.98 亿元和 4 361.75 亿元的健康经济损失;考虑一个雄心勃勃的目标,将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 AQG 标准,每年可避免的健康经济损失将达到 5 680.57 亿元,这一健康经济效益甚至超过了我国一些重要支出,如 2016 年,全国节能环保、文化体育与传媒支出、商业服务业等支出分别为 4 734.82、3 163.08 和 1 742.82 亿元^[15],均低于达到 AQG 标准后的健康经济效益。

总体来看,减少污染带来的健康效益和经济效益巨大,考虑到 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和过早死亡的超线性关系,随着空气质量的进一步改善,单位 $\text{PM}_{2.5}$ 降低带来的边际效益会越来越大^[20]。因此,我国有必要实施更加强劲的污染控制政策,在获得较高边际效益的同时,并在一定程度上抵消人口增长和老龄化的影响,从而在更大程度上减轻污染造成的健康负担和经济损失。

3 结论

(1) 2016 年, $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要集中在工业化和城市化水平较高的京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原、四川盆地和长江中游城市群。此外,全国有 71.49% 的居民生活在 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度超过国家二级标准的环境中,远高于全球平均水平(19%)。

(2) 2016 年,我国因 $\text{PM}_{2.5}$ 污染造成约 106.04 万人过早死亡,并带来 7 059.31 亿元的健康经济支出,分别占全国总死亡人数的 10.9% 和 GDP 的 0.95%,其中冠心病和中风贡献了约 80%。相比西北、西南和东北等地,京津冀、长三角等污染严重和经济发达的地区健康经济损失更大。

(3) 如果 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到国家二级标准,我国每年因 $\text{PM}_{2.5}$ 导致的过早死亡和健康经济损失将

减少 17.11%, 进一步加强控制使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 WHO AQG 标准,将带来 80.47% 的健康经济效益。为减少 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康经济的影响,我国需要持续努力减少污染,并在现有科学证据的基础上系统地实施控制措施和改善计划。

参考文献:

- [1] 王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013~2017 年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 453-468.
Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [2] Maji K J, Ye W F, Arora M, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ -related health and economic loss assessment for 338 Chinese cities [J]. Environment International, 2018, **121**: 392-403.
- [3] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的快速改善及其健康效益[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 441-452.
Xue T, Liu J, Zhang Q, *et al.* Rapid improvement of $\text{PM}_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013-2017 [J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1847-1856.
- [4] 李惠娟, 周德群, 魏永杰. 我国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ -related health risks and associated economic losses in Chinese cities [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- [5] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, *et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. The Lancet, 2017, **389** (10082): 1907-1918.
- [6] World Bank, Institute for Health Metrics and Evaluation. The cost of air pollution: strengthening the economic case for action [M]. Washington, DC: World Bank, 2016.
- [7] Liu J, Han Y Q, Tang X, *et al.* Estimating adult mortality attributable to $\text{PM}_{2.5}$ exposure in China with assimilated $\text{PM}_{2.5}$ concentrations based on a ground monitoring network [J]. Science of the Total Environment, 2016, **568**: 1253-1262.
- [8] Liu T, Cai Y Y, Feng B X, *et al.* Long-term mortality benefits of air quality improvement during the twelfth five-year-plan period in 31 provincial capital cities of China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **173**: 53-61.
- [9] Guan Y, Kang L, Wang Y, *et al.* Health loss attributed to $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China's cities: Economic impact, annual change and reduction potential [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,

- 217: 284-294.
- [10] 曾贤刚, 阮芳芳, 彭彦彦. 基于空间网格尺度的中国 PM_{2.5} 污染健康效应空间分布[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(6): 2624-2632.
- Zeng X G, Ruan F F, Peng Y Y. Health effects' spatial distribution analysis of PM_{2.5} pollution in China based on spatial grid scale[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(6): 2624-2632.
- [11] 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.
- [12] Wang J, Zhang L, Niu X, *et al.* Effects of PM_{2.5} on health and economic loss: Evidence from Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120605.
- [13] Yang H, Tao W, Liu Y, *et al.* The contribution of the Beijing, Tianjin and Hebei region's iron and steel industry to local air pollution in winter[J]. Environmental Pollution, 2018, **245**: 1095-1106.
- [14] Lu X C, Yao T, Fung J C H, *et al.* Estimation of health and economic costs of air pollution over the Pearl River Delta region in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **556-567**: 134-143.
- [15] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴: 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [16] Zhou M G, Wang H D, Zhu J, *et al.* Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990-2013: a systematic subnational analysis for the Global Burden of Disease Study 2013[J]. The Lancet, 2016, **387**(10015): 251-272.
- [17] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(37): 6957-6975.
- [18] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**: 5131-5153.
- [19] Zheng Y X, Xue T, Zhang Q, *et al.* Air quality improvements and health benefits from China's clean air action since 2013[J]. Environmental Research Letters, 2017, **12**(11), doi: 10.1088/1748-9326/aa8a32.
- [20] Apte J S, Marshall J D, Cohen A, *et al.* Addressing global mortality from ambient PM_{2.5}[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(13): 8057-8066.
- [21] Burnett R T, Pope III C A, Ezzati M, *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure[J]. Environmental Health Perspectives, 2014, **122**(4): 397-403.
- [22] Yin H, Pizzol M, Xu L Y. External costs of PM_{2.5} pollution in Beijing, China: uncertainty analysis of multiple health impacts and costs[J]. Environmental Pollution, 2017, **226**: 356-369.
- [23] Organization for Economic Co-operation and Development. The economic consequences of outdoor air pollution[M]. Paris: OECD Publishing, 2016.
- [24] Li Y, Zhao X, Liao Q, *et al.* Specific differences and responses to reductions for premature mortality attributable to ambient PM_{2.5} in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140643.
- [25] 马宗伟. 基于卫星遥感的我国 PM_{2.5} 时空分布研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- Ma Z W. Study on spatiotemporal distributions of PM_{2.5} in China using satellite remote sensing[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [26] Gao L, Wang T, Ren X, *et al.* Impact of atmospheric quasi-biweekly oscillation on the persistent heavy PM_{2.5} pollution over Beijing-Tianjin-Hebei region, China during winter[J]. Atmospheric Research, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105017.
- [27] 蒋婉婷, 谢汶静, 王碧菡, 等. 2014-2016 年四川盆地重污染大气环流形势特征分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 180-188.
- Jiang W T, Xie W J, Wang B H, *et al.* Analysis on the characteristics of heavy pollution atmospheric circulation in the Sichuan Basin from 2014 to 2016[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 180-188.
- [28] 广东省人民政府. 珠江三角洲环境保护规划纲要(2004-2020 年)[R]. 广州: 广东省人民政府, 2005.
- [29] 广东省人民政府. 广东省珠江三角洲大气污染防治办法[R]. 广州: 广东省人民政府, 2009.
- [30] 广东省环境保护厅, 广东省发展和改革委员会, 广东省经济和信息化委员会, 等. 广东省珠江三角洲清洁空气行动计划第二阶段(2013 年-2015 年)空气质量持续改善实施方案[R]. 广州: 广东省人民政府, 2013.
- [31] Matthias G, 胡子红, 周旋, 等. 道路交通安全发展报告(2017)[J]. 中国应急管理, 2018, (2): 48-58.
- [32] 中华人民共和国卫生部. 中国吸烟危害健康报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012.
- [33] 国家卫生计生委疾病预防控制局. 中国居民营养与慢性病状况报告(2015 年)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2015.
- [34] World Health Organization. Ambient air pollution: Health impacts[EB/OL]. <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>, 2018-05-02.
- [35] 胡盛寿, 高润霖, 刘力生, 等. 《中国心血管病报告 2018》概要[J]. 中国循环杂志, 2019, **34**(3): 209-220.
- Hu S S, Gao R L, Liu L S, *et al.* Summary of the 2018 report on cardiovascular diseases in China[J]. Chinese Circulation Journal, 2019, **34**(3): 209-220.
- [36] 赵华林. 国家环保“十三五”规划编制思路[J]. 环境保护, 2014, **42**(22): 28-32.
- Zhao H L. Progress of formulating "13th Five-year Plan" for national environmental protection[J]. Environmental Protection, 2014, **42**(22): 28-32.
- [37] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects 2019[M]. New York: United Nations, 2019.
- [38] Yue H B, He C Y, Huang Q X, *et al.* Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM_{2.5} pollution in China[J]. Nature Communications, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-15319-4.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)