

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域PM_{2.5}和臭氧复合污染气象影响评估..... 杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)

“2+26”城市PM_{2.5}与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析..... 吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)

武汉军运会前后大气PM_{2.5}化学组分和来源..... 刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)

2016~2020年邯郸市冬季PM_{2.5}污染特征与来源解析..... 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)

渭南市冬季PM_{2.5}化学组成及来源解析..... 郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)

长三角城郊冬夏PM_{2.5}中铵盐的形成过程及来源解析..... 项妍琨, 曹芳, 张雯淇, 范美益, 章炎麟 (6486)

上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析..... 杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)

吕梁市PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评估..... 车玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)

广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响..... 吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)

南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征..... 陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)

京津冀地区“煤改电”对PM_{2.5}污染的健康效益评估..... 张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)

基于化学损耗修正的青岛胶州市环境VOCs来源解析..... 孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)

聊城市城区夏季VOCs污染特征及来源解析..... 李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)

基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析..... 张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)

中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素..... 欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)

基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展..... 曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)

京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析..... 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)

中国水泥行业通过CCUS技术的减排潜力评估..... 魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)

钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估..... 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)

珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素..... 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)

东莞市低碳路径下加速电气化对CO₂和污染物协同减排影响..... 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)

县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系..... 刘贤赵, 李阳 (6664)

城市草坪温室气体排放特征及影响因素..... 陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)

双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应..... 刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)

中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估..... 赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)

黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险..... 彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)

黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价..... 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)

土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响..... 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)

内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价..... 王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)

锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系..... 孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷杰 (6754)

西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素..... 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)

巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价..... 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)

亚硫酸氢盐强化微量Fe²⁺活化过二硫酸盐降解扑热息痛..... 莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)

污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星..... 郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)

NaHCO₃活化荞麦皮生物炭对碘酚的吸附..... 魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)

竹基N、P共掺杂活性炭的制备及其锂离子吸附性能..... 王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)

西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析..... 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)

生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析..... 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)

农田土壤碳循环过程及其量化方法..... 孙昭安, 朱彪 (6857)

生物炭施用5a后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响..... 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霖, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)

喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征..... 蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)

中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估..... 陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)

基于MGWR的土壤pH值空间建模及其影响因素分析..... 赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)

某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析..... 张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)

重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析..... 张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)

高垦丘陵地区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征..... 陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)

有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响..... 邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)

有机肥处理对旱地土壤细菌群落及玉米生产力的影响..... 林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)

微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响..... 段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)

设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响..... 赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)

3种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系..... 李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)

河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构..... 刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)

玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析..... 汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)

外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染..... 王楷, 王丽, 王一钰, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)

1株肠杆菌与硫酸联合施用对水稻积累镉的影响..... 张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)

《环境科学》第44卷(2023年)总目录..... (7045)

《环境科学》征订启事(6507) 《环境科学》征稿简则(6620) 信息(6743, 6846, 6856)

京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析

郝永佩¹, 宋晓伟^{1*}, 朱晓东², 王京伟¹, 程鹏¹

(1. 山西财经大学资源环境学院, 太原 030006; 2. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210046)

摘要: 机动车尾气排放对城市空气污染的影响日益严峻, 而对特定污染源大气污染排放特征及健康影响进行评估可以为环境空气质量提供科学依据。以 $PM_{2.5}$ 为研究对象, 分析京津冀地区 2010~2020 年机动车污染排放特征、导致的健康效应与经济损失。结果表明, 2010~2020 年间京津冀地区机动车 $PM_{2.5}$ 排放量呈现先逐年递增后缓慢下降的趋势; 不同车型污染物排放贡献率显示, 重型货车和重型客车为 $PM_{2.5}$ 主要贡献车型; 不同城市机动车污染物排放特征存在差异, 北京市污染物贡献率下降幅度明显, 其余城市污染减排也不容忽视。机动车 $PM_{2.5}$ 污染对人群健康影响的评估结果表明, 京津冀地区各健康终端发生人数总体呈上升趋势, 其中, 2020 年 $PM_{2.5}$ 污染造成约 34 337 人 (95% CI: 9 025~57 209 人) 早逝、4.55 万人 (95% CI: 1.08~8.02 万人) 住院、28.23 万人 (95% CI: 14.05~41.63 万人) 门诊及 43.90 万人 (95% CI: 16.03~67.92 万人) 患病; 研究期间 (2010、2015 和 2020 年) 机动车 $PM_{2.5}$ 污染导致的健康经济总损失分别为 277.42 亿元 (95% CI: 86.16~446.43 亿元)、906.08 亿元 (95% CI: 284.76~1 440.50 亿元) 和 1 299.65 亿元 (95% CI: 408.29~2 052.45 亿元); 由于机动车保有量、 $PM_{2.5}$ 浓度、人口数量及健康终端单位经济损失的差异导致区域内不同城市健康效应与经济损失存在差异, 其中北京、天津、保定和唐山市要高于其他城市, 健康风险与经济损失问题相对突出。

关键词: $PM_{2.5}$; 机动车污染; 健康风险; 经济损失; 京津冀

中图分类号: X196 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6610-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302096

Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

HAO Yong-pei¹, SONG Xiao-wei^{1*}, ZHU Xiao-dong², WANG Jing-wei¹, CHENG Peng¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Vehicle exhaust emissions are posing an increasingly adverse impact on urban air quality. The emission characteristics analysis and health effect assessment of specific air pollution sources can provide scientific evidence for environmental air quality management. The characteristics and health effects of $PM_{2.5}$ emissions from vehicles and economic losses caused by them in the Beijing-Tianjin-Hebei Region were analyzed from 2010 to 2020. From 2010 to 2020, $PM_{2.5}$ emissions from vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region showed an annual increase at first, followed by a slow decrease. According to the emission sharing ratios of different vehicle types, heavy-duty trucks and buses were the main contributors to $PM_{2.5}$, with a total contribution rate of over 65.27%. The emission characteristics of vehicle pollutants varied in different cities. The contribution rate of pollutants in Beijing decreased significantly, and the emission reduction in other cities was also dramatic. The evaluation results of the impact of $PM_{2.5}$ emissions from vehicles on human health showed that the number of health endpoints in the Beijing-Tianjin-Hebei Region was on the rise. In 2020, $PM_{2.5}$ pollution caused approximately 34 337 premature deaths (95% CI: 9 025-57 209), 45 500 hospitalizations (95% CI: 10 800-80 200), 282 300 outpatients (95% CI: 140 500-416 300), and 439 000 people to fall ill (95% CI: 160 300-679 200). Beijing had the largest number of patients that presented different health endpoints. The total health and economic losses caused by $PM_{2.5}$ emissions from vehicles in 2010, 2015, and 2020 were 27.742 billion yuan (95% CI: 8.616-44.643 billion yuan), 90.608 billion yuan (95% CI: 28.476-144.050 billion yuan), and 129.965 billion yuan (95% CI: 40.829-205.245 billion yuan), respectively. In addition, due to the differences in vehicle ownership, $PM_{2.5}$ concentrations, population, and economic losses per case of health outcome, the health effects and economic losses varied in different cities within the region. Among these cities, Beijing, Tianjin, Baoding, and Tangshan were at higher health risks and suffered more economic losses. The results of this study will help reduce the adverse effects on health and economic losses caused by pollution discharge and provide scientific evidence for environmental protection authorities to implement targeted pollution prevention and control.

Key words: $PM_{2.5}$; vehicle pollution; health risk; economic losses; the Beijing-Tianjin-Hebei Region

随着我国经济的持续发展和居民可支配收入增加, 机动车保有量呈现逐年稳增态势, 机动车尾气排放引起的环境污染问题日益增多^[1-3]。特别是 $PM_{2.5}$ 作为当前大气环境中的主要污染因子, 给人民的生活和身心健康带来了严重的负面影响, 使居民患呼吸系统疾病和心血管疾病的风险增加^[4,5], 制约着环境经济社会的可持续发展。人群每天暴露于交通环境中的时间虽短, 但其所占总暴露量的比例不容

忽视^[6], 特别是当交通拥堵、怠速运行和低速行驶时机动车排放量较大^[7], 对人体产生的危害更大。尽管许多国家采取了淘汰高排放车辆、提高排放标

收稿日期: 2023-02-14; 修订日期: 2023-05-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (72104132); 教育部人文社会科学研究青年项目 (21YJCZH136); 山西省基础研究计划项目 (20210302124201)

作者简介: 郝永佩 (1986~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气环境污染防治, E-mail: haoyongpei@sxufe.edu.cn

* 通信作者, E-mail: songxiaowei@sxufe.edu.cn

准等措施,但机动车污染排放依旧是全球疾病负担的主要贡献来源^[8],评估大气污染对居民健康的影响,特别是对特定污染源导致的健康效应及经济损失开展研究显得尤为重要^[9].

PM_{2.5}污染与人体健康关系较为密切,西方国家较早开展了大气污染的健康效应的研究,其在研究体系和研究方法上都取得了一定的进展^[10~12].此外在欧洲也有部分研究基于相关模型来进行大气污染防治的成本效益评估分析,如 Buekers 等^[13]利用 ExternE 模型对欧洲各国家引入电动汽车带来的健康效益进行评估.近年来,随着流行病学研究的不断深入,许多中国学者进行了相关研究^[14~18],并逐渐开始采用暴露-反应(integrated exposure-response, IER)模型开展大气污染健康效应评估,发现2017年中国PM_{2.5}污染导致:280 549例全因早逝、216 415例慢性阻塞性肺疾病(COPD)、233 287例脑卒中、122 287例缺血性心脏病(IHD)住院、104 862例心血管疾病以及914 728例呼吸系统疾病门诊;引起的中国年均劳动损失日为2 590.34万d,居民额外医疗支出为86.39亿元,造成的经济损失约占当年GDP的1.48%^[19].随着机动车排放控制技术的不断发展,将有助于减少机动车污染对人体健康的危害,但目前对特定污染源污染排放产生的健康效应研究相对不足,而对此导致的健康损失评估是政府部门进行各项政策措施成本效益分析进而优化污染防控策略的关键.

随着京津冀地区经济高速发展,其在中国乃至世界经济、政治和文化中的地位显得非常重要,伴

随着经济的发展,机动车数量增加明显,区域性颗粒物和臭氧等污染问题不断凸显^[20,21],而作为重要的排放来源,对该地区区域污染控制及环境质量管理带来严重挑战.因此,为合理评估区域机动车污染物排放特征,厘清机动车污染对居民健康影响的程度以及造成的经济损失,本研究估算2010~2020年京津冀地区机动车污染物PM_{2.5}排放量,研究PM_{2.5}污染排放时间变化、分车型和分城市贡献率等特征,评估机动车PM_{2.5}污染导致的健康影响及经济损失,并对不同城市的评估结果进行比较.本研究结果将有助于减轻污染排放导致的健康影响及经济损失,为环保部门针对性实施污染防治措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 排放清单建立

机动车污染物排放量通过以下公式计算求得:

$$T_n = \sum_q \sum_p (V_{n,q,p} \times \text{VKT}_{n,q} \times \text{EF}_{q,p}) \quad (1)$$

式中, T_n 为 n 区域机动车污染物的排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $V_{n,q,p}$ 为 n 区域内 q 种车型在 p 种排放标准下保有量,辆; $\text{VKT}_{n,q}$ 为 n 区域 q 种车型年平均行驶里程, $\text{km} \cdot \text{a}^{-1}$; $\text{EF}_{q,p}$ 为 q 种车型在 p 种排放标准下污染物的排放因子, $\text{g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$;其中, n 为研究区域各个城市; q 为机动车类型:轻型客车(PC)、轻型货车(LDV)、重型客车(BUS)、重型货车(HDT)和摩托车(MC); p 为2010~2020年不同机动车实施的排放标准(表1).

表1 机动车污染物排放标准实施年份¹⁾

Table 1 Vehicular emission standards implementation timetable

城市	机动车类型	国 I	国 II	国 III	国 IV	国 V	国 VI
北京	轻型客车和轻型货车	1999	2003	2006	2008	2013	2017
	重型客车和重型货车	2000	2003	2006	2008	2015	2020
	摩托车	2002	2004	2008	—	—	—
天津	轻型客车	2000	2004	2008	2012	2015	2017
	轻型货车	2001	2006	2008	2012	2015	2017
	重型客车和重型货车	2001	2005	2008	2013	2016	2019
	摩托车	2002	2004	2010	—	—	—
其余城市	轻型客车	2000	2004	2008	2012	2017	2018
	轻型货车	2001	2006	2008	2012	2017	2018
	重型客车和重型货车	2001	2005	2008	2015	2017	—
	摩托车	2002	2004	2010	—	—	—

1)“—”表示还未颁布该排放标准的实施年份

1.1.1 机动车保有量

京津冀地区各城市机动车保有量数据主要来自于2011~2021年的相关统计年鉴:《北京统计年鉴》、《天津统计年鉴》、《河北经济年鉴》以及《中国汽车工业年鉴》等.当年生产的机动车必须严格

实施同一年的污染物排放标准^[22~24].本研究参照已有的方法^[24],根据各个城市每年的新车注册量、机动车存活率以及各类机动车实施不同排放标准的时间(表1)计算各年份各类车型在不同排放标准下的保有量,具体计算方法如下:

$$Q_{a,m,n} = \begin{cases} \sum_b T_{a,m,n} \cdot r_{y-k}, & n \neq S0 \\ Q_{q,m,\text{total}} - \sum_{S1}^{S6} \sum_n T_{a,m,n} \cdot u_{y-k}, & n = S0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $T_{a,m,n}$ 为区域 a 车型 m 在排放标准 n 下的机动车新注册量 ($S0 \sim S6$ 为排放标准国 0 ~ 国 VI), $Q_{a,m,\text{total}}$ 为在区域 a 内车型 m 的全部的机动车保有量, k 为新车注册年份, y 为所研究年份, b 为排放标准 n 执行时长, u 为机动车存活率^[24].

1.1.2 年均行驶里程

本研究估算机动车污染物排放量所需要的年均行驶里程数据采用文献[25]的参考值,并根据已有的研究结果^[21,26~30],参考与中国相似发展规模城市机动车污染排放的相关研究^[2,31~33]来确定。

1.1.3 排放因子

本研究基于 COPERTIV (v11.2) 模型估算京津冀地区各城市各类型机动车污染物排放因子, COPERTIV 模型来源于欧盟环境署所开展的机动车污染物排放因子研究,该模型以台架测试等实验获得的数据为基础;并参考欧洲国家相关标准建立了我国机动车车型分类、测试工况以及排放标准体系等,二者具有一定程度的相似性^[34]. 该模型所需要的数据主要包括平均行驶速度、车辆类型、燃料参数以及气象参数等;其中,通过相关文献资料获取平均行驶速度数据^[2,26,27,35];不同城市月最高温、最低温以及相对湿度等气象数据来源于各省市统计年鉴;而燃料参数数据则来自于国家和地方车用燃油标准。

1.2 空气质量模拟

本研究基于我国分行业、多尺度污染物排放清单数据 (<http://www.meicmodel.org>)^[36,37],采用美国国家环境保护局 USEPA 开发的 CMAQ (community multiscale air quality modeling system) 模型,评估区域机动车污染源对大气 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献程度. 首先,利用前文计算求得的污染物排放量取代全行业清单中的交通源的排放量,再对 2010、2015 和 2020 年全行业污染物排放清单开展空气质量标

准模拟,获得污染物 $PM_{2.5}$ 浓度数据;其次,应用 CMAQ 模型开展敏感性模拟得到交通源污染排放量从全行业排放清单中移除后的 $PM_{2.5}$ 年均浓度;最后,评估标准模拟与敏感性模拟之间的差异,得到交通源对污染物 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率,并应用此贡献率乘以卫星反演的高分辨率大气 $PM_{2.5}$ 浓度,得到交通源所致大气 $PM_{2.5}$ 的浓度,本研究选取卫星反演的大气 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于已有文献的研究成果^[38~42].

1.3 健康效应评价方法

本研究采用基于流行病学的泊松回归相对危险模型,来量化污染物 $PM_{2.5}$ 浓度增加所引起的人群健康影响变化:

$$\Delta X = X_0 \cdot [1 - e^{-\beta \Delta C}] \cdot \text{Pop} \quad (3)$$

式中, ΔX 为染物浓度变化导致的健康效应; X_0 为不同健康效应终端的基线发生率 (表 2); Pop 为暴露人群数量,本研究以各城市的常住人口作为暴露人口; ΔC 为 $PM_{2.5}$ 浓度变化, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, β 为暴露-反应关系系数;参考文献[43],本研究评估 $PM_{2.5}$ 污染对人体健康的影响无阈值浓度。

表 2 各健康终端基准发生率¹⁾

健康效应终点	项目	基准发生率/%
早逝	全因死亡	各城市死亡率
住院	呼吸系统疾病	8.8
	心血管疾病	14.2
门诊	内科	各城市内科就诊率
	儿科	各城市儿科就诊率
患病	急性支气管炎	28.1
	慢性支气管炎	4.6

1)各城市死亡率、内科就诊率和儿科就诊率数据及其他数据均引自文献[44~46]

本研究选取早逝、患病(慢性支气管炎与急性支气管炎)、门诊(内科与儿科)以及住院(心血管疾病和呼吸系统疾病)为健康效应终点;对于暴露-反应关系系数的选取非常关键, β 取值参考 Meta 分析针对中国不同区域和城市的研究结果^[16,47~51],使结果更符合中国的实际,选取的暴露-反应关系系数如表 3 所示。

表 3 主要健康影响暴露-反应系数

健康效应终点	项目	β	95% CI	文献
早逝	全因死亡	0.002 96	(0.000 76, 0.005 04)	[47]
住院	呼吸系统疾病	0.001 09	(0, 0.002 21)	[48,49]
	心血管疾病	0.000 68	(0.000 43, 0.000 93)	[48,49]
门诊	内科	0.000 49	(0.000 27, 0.000 70)	[50,51]
	儿科	0.000 56	(0.000 20, 0.000 90)	[50,51]
患病	急性支气管炎	0.007 9	(0.002 70, 0.013 00)	[16,52]
	慢性支气管炎	0.010 09	(0.003 66, 0.015 59)	[16,52]

1.4 健康效应的货币化评价方法

本研究针对死亡终端和疾病终端分别采用支付意愿法和疾病成本法评估其单位健康经济损失,然后将各个健康终端的经济损失进行加和. 早逝的单位经济损失获取以 2010 年北京市民统计寿命价值 (value of statistical life, VSL) 168 万元为基础^[51],参考不同城市 CPI 指数和人均可支配收入换算求得各城市 2010、2015 和 2020 年单位经济损失.

采用疾病成本法计算求得住院单位经济损失,计算公式如下:

$$Q_i = Q_{ip} + \text{GDP}_p \times H_{il} \quad (4)$$

式中, Q_i 为污染导致的不同健康终端 i 的单位经济损失, Q_{ip} 为直接费用,即为健康终端 i 个体病体的诊疗费用, GDP_p 为个人单日误工成本 [$\text{元} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$], H_{il} 则为相应的误工时间 (住院时间). 其中,人均直接费用和住院时间数据来自于相应年鉴^[44-46],采用支气管肺炎、细菌性肺炎和浸润性肺结核等疾病的平均值替代呼吸系统疾病住院的人均直接费用和住院天数,而充血性心力衰竭和急性心肌梗塞等疾病的平均值则用来替代心血管疾病住院的相应值;人均误工成本则采用各城市年人均

GDP 的日均值^[53-55].

对于门诊 (内科和儿科) 的单位经济损失计算,假设研究区域不同城市全部门诊医药费中内科与儿科所占的比例与全国对应的比例相同,再根据省、市人均可支配收入以及省级门诊医药费推算得出各市对应的门诊费用,最终得出门诊费用中内科与儿科的相应费用.

对于患病导致的单位经济损失,假设急性支气管炎与各城市门诊损失的比例相同,根据文献 [16] 中关于急性支气管炎和门诊单位损失比例的研究结果,并参考相关文献关于门诊单位经济损失的研究^[49,56,57],估算不同城市急性支气管炎的损失. 而由于慢性支气管炎通常情况不易痊愈,病程相对缓慢,确定患病时间比较困难,易造成病人生活质量的降低,固不适合采用疾病成本法获取单位经济损失,本研究参考 Viscusi 等^[58]的研究成果,采用统计寿命价值的 32% 作为慢性支气管炎的单位经济损失.

根据以上方法,估算得到京津冀地区各个城市机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的各类不同健康终端的单位经济损失 (见表 4).

表 4 京津冀地区 2010、2015 和 2020 年各城市不同健康终端的单位经济损失

Table 4 Unit economic losses of different health outcomes of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2010, 2015, and 2020

项目	早逝			住院						门诊						患病					
	VSL/万元·人 ⁻¹			呼吸系统/元·人 ⁻¹			心血管疾病/元·人 ⁻¹			内科/元·人 ⁻¹			儿科/元·人 ⁻¹			急性支气管炎/元·人 ⁻¹			慢性支气管炎/万元·人 ⁻¹		
年份	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
北京	168	275.5	357.1	8 754	10 863	14 542	20 214	27 541	34 521	742	773	795	710	725	763	3 250	3 748	4 321	53.8	88.2	114.3
天津	162.8	222.6	211.2	7 410	9 074	12 014	14 641	19 811	25 541	575	613	643	543	581	612	2 541	2 972	3 654	52.1	71.2	67.6
石家庄	88.2	122.3	127.2	6 237	8 120	9 854	10 933	15 505	19 874	450	480	520	435	460	500	1 650	1 985	2 700	28.2	39.1	40.7
保定	54.2	77.9	93.1	5 676	6 939	8 541	10 869	14 796	18 541	450	480	520	435	460	500	1 630	1 980	2 700	17.3	24.9	29.8
沧州	82.2	110.2	121.7	6 068	8 095	9 421	10 492	15 417	19 774	440	470	510	427	445	480	1 800	2 300	2 800	26.3	35.3	38.9
承德	70.6	97.6	112.7	5 272	7 133	8 954	10 446	14 997	18 654	400	420	450	390	410	430	1 200	1 600	2 200	22.6	31.2	36.1
邯郸	71.6	87.2	89.7	5 372	7 207	7 954	10 550	15 075	17 041	415	437	476	405	420	450	1 300	1 700	2 350	22.9	27.9	28.7
衡水	53.3	74.6	94.4	5 340	7 267	8 742	10 517	15 138	17 541	415	437	476	405	420	450	1 300	1 700	2 350	17.1	23.9	30.2
廊坊	83.8	128.8	141.9	5 172	7 961	9 354	10 550	15 173	17 754	415	437	476	405	420	450	1 300	1 700	2 350	26.8	41.2	45.4
秦皇岛	82.4	102.1	127.7	5 816	7 391	9 014	11 016	15 267	18 987	440	470	515	430	455	480	1 700	2 100	2 750	26.4	32.7	40.8
唐山	138	172.3	198.5	6 402	8 337	9 541	11 632	16 252	18 854	450	480	525	435	460	495	1 900	2 300	2 950	44.2	55.1	63.5
邢台	51.2	67.4	81.9	5 103	6 792	8 324	10 268	14 642	18 042	400	420	460	390	410	440	1 200	1 600	2 250	16.4	21.6	26.2
张家口	63.5	81.7	97.8	5 287	7 113	8 124	10 461	14 977	18 020	410	430	460	400	416	445	1 250	1 650	2 300	20.3	26.1	31.3

2 结果与讨论

2.1 机动车污染排放特征

2.1.1 机动车污染物时间变化趋势分析

2010~2020 年京津冀地区机动车污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量时间变化趋势如图 1 所示. $\text{PM}_{2.5}$ 排放量从 2010~2014 年一直保持一个相对平稳的增长趋势,由 4.21 万 t 增加到 4.71 万 t;自 2015 年以来 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量开始缓慢下降,到 2020 年污染物排放量降为 4.46 万 t,与北京市和天津市提早实施污染物排放

标准有一定的关系 (表 1);由此得出,在个别年份机动车污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 排放总量略有下降,但整体上机动车污染物的减排形势仍然十分严峻,减排力度不容松懈.

2.1.2 不同车型污染物排放贡献率分析

2010~2014 年京津冀地区污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要贡献车型为重型客车和重型货车,二者总贡献率一直保持在 65.27% 以上 (图 1). 造成以上特征的主要原因是:①我国重型客车与重型货车燃料的使用主要以柴油为主,在行驶的过程中容易发生不完全

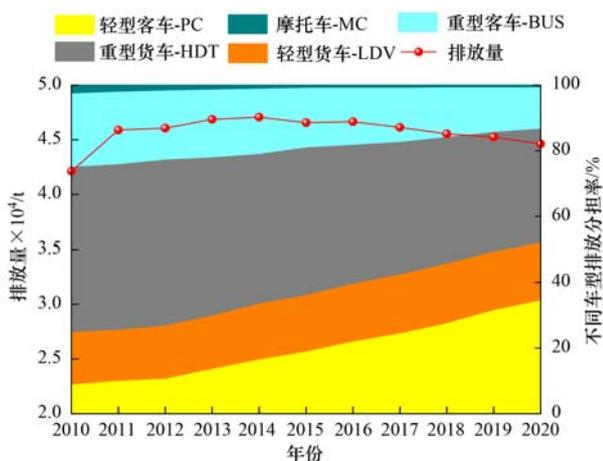


图1 2010~2020年京津冀地区机动车污染物 $PM_{2.5}$ 排放量及不同车型排放分担率

Fig. 1 $PM_{2.5}$ emissions from vehicles and contribution rates of emissions by different types of vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2010 to 2020

燃烧,从而导致颗粒物的产生^[59];②重型货车与重型客车年均行驶里程较高^[24];随着近几年对重型货车在城市内部行驶的管控越来越严格,其年均行驶里程有所下降,重型货车的贡献率有所下降,到2020年贡献率仅为34.63%。另外,轻型货车也为污染物 $PM_{2.5}$ 的主要贡献车型,其贡献率在2020年达到了17.53%。随着经济的发展,人民出行需求的提升,轻型客车保有量近年来大量增加,其贡献率呈逐年递增的趋势,年均增长率达到14.83%。故未来加大力度推广新能源汽车及淘汰高污染排放车辆等措施对有效控制污染物排放至关重要。

2.1.3 不同城市机动车污染物排放特征

由图2可知,整体上,北京、天津、石家庄和唐山市排放量所占京津冀地区整体的排放量比重较大,其余城市所占的排放比例较小。由于北京市各类型机动车保有量均较大,使其占京津冀地区整体排放比例较高,但是北京市由于机动车排放标准与燃油标准普遍实施较早,推行机动车尾号限行等措施,减少了机动车污染物的排放,机动车污染物 $PM_{2.5}$ 所占比例总体呈下降的趋势,从2010年的15.43%下降到2020年的11.87%。天津市机动车污染物 $PM_{2.5}$ 主要由重型货车和重型客车产生,污染物占比上下波动,近年来下降趋势明显,但其占比一直保持在8.51%以上;由于机动车保有量的大量增加,河北省的石家庄和唐山市污染物所占比例总体呈上升的趋势,从2010年的11.89%和10.13%上升到2020年的12.99%和17.05%。其余城市所占比例较小,各污染物占排放总量的比例均小于10%,但是其占比总体呈增加的趋势。因此,对这些城市的机动车污染减排工作不容松懈。由此建议,京津冀地区

机动车排放管理应重点针对河北省各城市进行;例如,提高机动车排放标准、加强机动车排放管理、对机动车污染物排放总量进行控制以及必要时实行车辆限行等措施。

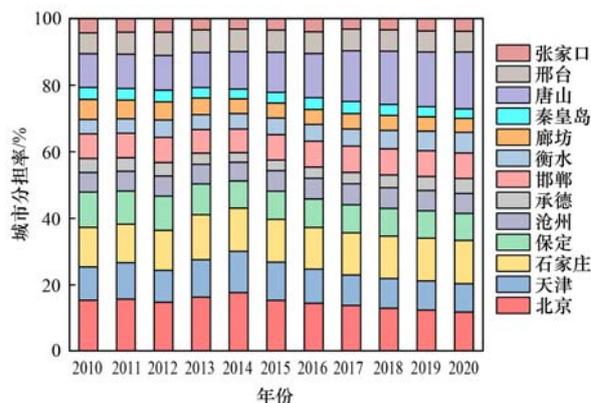


图2 2010~2020年京津冀地区机动车污染物 $PM_{2.5}$ 排放量城市分担率

Fig. 2 Contributions of $PM_{2.5}$ emissions by vehicles in different cities to total emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2010 to 2020

2.2 机动车污染健康效应及健康经济损失

2.2.1 居民健康风险评价结果

由于机动车保有量、 $PM_{2.5}$ 浓度、人口数量及死亡和患病发生率的差异使得区域不同城市污染导致的健康效应存在差异,且同一城市污染产生的健康影响在不同年份也有所不同;2010、2015和2020年京津冀地区各城市可归因于机动车 $PM_{2.5}$ 污染的各健康终端效应总体呈现出波动上升,近年来部分城市出现缓慢下降趋势(表5)。2020年不同健康终端相关总人数最多的是北京,其次是天津、保定和石家庄等城市,这些城市机动车保有量较大,排放量高,暴露人口分布密集、数量大,其中北京市暴露人口数量明显高于其余城市;虽然近年来通过政府大力污染防治,机动车污染物 $PM_{2.5}$ 排放量呈现缓慢下降,部分城市污染相关的死亡、住院、门诊及患病人数也出现下降趋势,但未来仍需加大机动车污染减排力度。

对污染导致不同健康终点的健康影响分析得出,早逝人数高于呼吸系统和心血管住院人数,却明显低于门诊人数,急性支气管炎和慢性支气管炎患病人数较多,患病人数超过死亡、住院和门诊人数,其中,污染导致的慢性支气管炎相关人数要明显低于急性支气管炎,急性支气管炎相关人数占总患病人数的比例能够达到80%以上,占有健康终端效应的43%以上(表5)。

京津冀地区2010、2015和2020年机动车 $PM_{2.5}$ 污染导致的各健康终点发生人数与总发生率

表 5 京津冀地区 2010、2015 和 2020 年各城市机动车 PM_{2.5} 污染的健康风险¹⁾Table 5 Health risk of PM_{2.5} pollution from vehicles of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2010, 2015, and 2020

城市	年份	早逝/人		住院/人		门诊/人		患病/人	
		全因	呼吸系统	心血管	内科	儿科	急性支气管炎	慢性支气管炎	
北京	2010	3 977(1 034, 6 693)	2 097(0, 4 225)	2 116(1 340, 2 889)	23 999(13 240, 34 244)	10 903(3 902, 17 489)	46 725(16 437, 74 764)	9 652(3 628, 14 471)	
	2015	7 841(2 057, 13 086)	4 029(0, 8 080)	4 072(2 581, 5 556)	47 759(26 373, 65 904)	17 331(6 211, 27 760)	87 321(31 373, 136 935)	17 882(6 897, 26 241)	
	2020	14 198(3 784, 23 346)	11 897(0, 23 667)	7 171(4 554, 9 766)	81 525(45 091, 116 047)	30 214(10 858, 48 277)	146 096(54 444, 22 1419)	29 476(11 887, 41 729)	
天津	2010	1 547(400, 2 616)	812(0, 1 641)	819(518, 1 119)	10 699(5 899, 15 274)	3 377(1 207, 5 421)	18 383(6 390, 29 756)	3 816(1 414, 5 793)	
	2015	3 697(963, 6 212)	1 888(0, 3 800)	1 905(1 207, 2 602)	30 840(17 017, 43 998)	5 076(1 817, 8 139)	41 839(14 778, 66 685)	8 628(3 259, 12 882)	
	2020	3 252(846, 5 468)	2 669(0, 5 376)	1 602(1 014, 2 187)	25 404(14 017, 36 246)	5 939(2 126, 9 527)	35 274(12 434, 56 331)	7 280(2 743, 10 892)	
石家庄	2010	1 395(361, 2 357)	733(0, 1 480)	739(468, 1 010)	7 678(4 234, 10 960)	3 585(1 281, 5 753)	16 536(5 763, 26 699)	3 429(1 274, 5 192)	
	2015	3 175(829, 5 319)	1 626(0, 3 268)	1 642(1 041, 2 242)	18 797(10 375, 26 808)	8 781(3 145, 14 073)	35 664(12 699, 56 409)	7 330(2 797, 10 856)	
	2020	2 638(686, 4 436)	2 166(0, 4 362)	1 299(823, 1 775)	14 999(8 276, 21 401)	6 735(2 411, 10 802)	28 617(10 088, 45 699)	5 906(2 226, 8 836)	
保定	2010	1 599(414, 2 702)	841(0, 1 697)	848(537, 1 158)	8 808(4 858, 12 572)	4 112(1 471, 6 599)	18 948(6 608, 30 570)	3 928(1 461, 5 942)	
	2015	4 238(1 112, 7 070)	2 178(0, 4 368)	2 202(1 396, 3 004)	25 207(13 919, 35 935)	11 773(4 219, 18 858)	47 159(16 957, 73 898)	9 654(3 727, 14 156)	
	2020	3 193(833, 5 357)	2 626(0, 5 283)	1 577(999, 2 152)	18 202(10 045, 25 964)	8 172(2 926, 13 102)	34 452(12 212, 54 724)	7 094(2 691, 10 554)	
沧州	2010	679(175, 1 151)	356(0, 720)	359(227, 491)	3 729(2 056, 5 325)	1 741(622, 2 796)	8 100(2 806, 13 155)	1 684(621, 2 565)	
	2015	2 029(529, 3 402)	1 038(0, 2 087)	1 048(664, 1 430)	11 989(6 617, 17 101)	5 601(2 006, 8 979)	22 858(8 111, 36 269)	4 705(1 787, 6 991)	
	2020	1 506(391, 2 536)	1 234(0, 2 488)	740(469, 1 011)	8 546(4 715, 12 195)	3 837(1 373, 6 156)	16 393(5 757, 26 274)	3 388(1 271, 5 089)	
承德	2010	141(36, 239)	74(0, 149)	74(47, 101)	769(424, 1 099)	359(128, 577)	1 691(581, 2 767)	353(129, 542)	
	2015	523(135, 884)	266(0, 537)	268(170, 366)	3 068(1 692, 4 378)	1 433(513, 2 301)	5 994(2 091, 9 670)	1 243(462, 1 879)	
	2020	400(103, 677)	327(0, 660)	196(124, 268)	2 258(1 245, 3 224)	1 014(363, 1 628)	4 403(1 529, 7 136)	915(338, 1 390)	
邯郸	2010	1 094(283, 1 851)	574(0, 1 160)	579(366, 791)	6 016(3 317, 8 588)	2 809(1 004, 4 509)	13 003(4 520, 21 047)	2 699(1 000, 4 098)	
	2015	3 065(802, 5 126)	1 572(0, 3 156)	1 588(1 006, 2 167)	18 179(10 037, 25 922)	8 492(3 042, 13 607)	34 298(12 260, 54 045)	7 038(2 698, 10 381)	
	2020	2 251(586, 3 784)	1 848(0, 3 721)	1 109(702, 1 514)	12 801(7 063, 18 264)	5 748(2 057, 9 218)	24 403(8 607, 38 948)	5 035(1 899, 7 529)	
衡水	2010	384(99, 651)	201(0, 407)	203(128, 277)	2 107(1 161, 3 008)	984(352, 1 579)	4 582(1 586, 7 448)	953(351, 1 453)	
	2015	1 065(277, 1 789)	544(0, 1 095)	549(348, 749)	6 279(3 465, 8 958)	2 934(1 050, 4 704)	12 049(4 257, 19 202)	2 485(939, 3 709)	
	2020	650(168, 1 098)	532(0, 1 073)	319(202, 436)	3 678(2 028, 5 249)	1 652(591, 2 651)	7 124(2 485, 11 494)	1 477(549, 2 234)	
廊坊	2010	352(91, 597)	185(0, 373)	186(118, 254)	1 932(1 065, 2 759)	902(322, 1 449)	4 209(1 455, 6 849)	876(322, 1 337)	
	2015	928(241, 1 563)	473(0, 954)	477(302, 652)	5 461(3 013, 7 793)	2 552(913, 4 093)	10 556(3 710, 16 905)	2 181(819, 3 273)	
	2020	1 060(275, 1 787)	869(0, 1 752)	521(329, 712)	6 014(3 317, 8 582)	2 700(966, 4 333)	11 563(4 053, 18 563)	2 392(895, 3 599)	
秦皇岛	2010	165(42, 280)	86(0, 175)	87(55, 119)	902(497, 1 289)	421(151, 676)	1 976(681, 3 226)	412(151, 631)	
	2015	498(129, 842)	254(0, 512)	256(162, 350)	2 927(1 614, 4 178)	1 368(489, 2 195)	5 704(1 993, 9 185)	1 182(441, 1 783)	
	2020	474(123, 800)	387(0, 782)	232(147, 317)	2 678(1 477, 3 823)	1 203(430, 1 930)	5 192(1 810, 8 380)	1 077(400, 1 629)	
唐山	2010	918(238, 1 553)	482(0, 974)	486(308, 664)	5 050(2 785, 7 209)	2 358(843, 3 785)	10 911(3 794, 17 656)	2 265(839, 3 437)	
	2015	2 494(652, 4 172)	1 279(0, 2 568)	1 292(819, 1 763)	14 787(8 163, 21 086)	6 907(2 475, 11 068)	27 927(9 976, 44 037)	5 733(2 196, 8 462)	
	2020	2 489(651, 4 166)	2 052(0, 4 122)	1 232(781, 1 682)	14 231(7 856, 20 294)	6 389(2 289, 10 239)	26 700(9 523, 42 165)	5 484(2 096, 8 108)	
邢台	2010	762(197, 1 289)	400(0, 807)	403(255, 550)	4 184(2 307, 5 973)	1 953(698, 3 136)	9 065(3 146, 14 698)	1 883(696, 2 864)	
	2015	2 090(546, 3 503)	1 070(0, 2 151)	1 080(685, 1 475)	12 365(6 825, 17 636)	5 776(2 069, 9 259)	23 508(8 359, 37 232)	4 835(1 841, 7 170)	
	2020	1 511(393, 2 544)	1 239(0, 2 497)	743(471, 1 015)	8 579(4 733, 12 241)	3 853(1 378, 6 179)	16 436(5 777, 26 321)	3 396(1 275, 5 097)	
张家口	2010	335(86, 567)	175(0, 355)	177(112, 242)	1 835(1 012, 2 621)	857(306, 1 376)	4 001(1 383, 6 514)	833(306, 1 272)	
	2015	818(212, 1 378)	416(0, 840)	420(266, 574)	4 804(2 650, 6 856)	2 245(803, 3 601)	9 320(3 267, 14 962)	1 928(722, 2 901)	
	2020	717(186, 1 209)	587(0, 1 183)	352(223, 481)	4 059(2 239, 5 793)	1 823(652, 2 925)	7 832(2 739, 12 606)	1 622(605, 2 447)	

1) 括号外的数值表示均值, 括号内的数值表示 95% CI, 下同

情况如表 6 所示, 京津冀地区归因于机动车 PM_{2.5} 污染的患病 [190 912 人 (95% CI: 67 340 ~ 304 746 人)、439 021 人 (95% CI: 158 416 ~ 686 120 人)、439 032 人 (95% CI: 160 336 ~ 679 194 人)] 人数明显高于早逝 [13 349 人 (95% CI: 3 457 ~ 22 545 人)、32 463 人 (95% CI: 8 487 ~ 54 347 人)、34 337 人 (95% CI: 9 025 ~ 57 209 人)]、门诊 [112 070 人 (95% CI: 55 146 ~ 166 069 人)、282 731 人 (95% CI: 140 514 ~ 415 195 人)、282 252 人 (95% CI: 140 521 ~ 416 291 人)] 和住院 [14 090 人 (95% CI: 4 478 ~ 23 829 人)、33 431 人 (95% CI: 10 645 ~

56 343 人)、45 527 人 (95% CI: 10 838 ~ 80 281 人)] 人数. 机动车 PM_{2.5} 污染导致的各健康终点发生人数及健康终点总发生率变化总体呈上升趋势, 虽然根据前文分析部分城市污染相关的死亡、住院、门诊及患病人数出现下降趋势, 但整体京津冀地区机动车污染导致的健康损失不容乐观, 未来需要对机动车保有量大及高人口密度城市加强污染治理, 减少实际暴露于污染物的人群数量.

2.2.2 居民健康经济损失评价结果

2010、2015 和 2020 年京津冀地区各城市污染导致的健康经济损失、占 GDP 比重和人均健康经

济损失总体呈现出波动上升趋势,近年来部分城市出现缓慢下降(表7)。其中,若按污染导致的健康经济损失值排序,2020年北京、天津、唐山、石家庄、保定、邯郸、沧州、廊坊、邢台和张家口市为前10名城市,与健康风险的排名差别不大。然而以污染导致的健康经济损失占GDP比重排序,则发生明显变动,北京、保定、唐山、邢台、邯郸、石家庄、沧州、天津、张家口和衡水市分别为前十大占比城市。对人均健康经济损失排序可知,排名靠前的城市分别为北京、唐山、天津、石家庄和保定市。从总体看,北京、天津、保定和唐山等市机动车污染物导致的总体健康经济损失情况较严重。

对京津冀地区PM_{2.5}污染健康经济损失特征分析得出(表8),随着我国经济水平的不断提高,不同健康终点的单位货币损失也相应增加;区域的健康经济损失、经济损失占GDP比重和人均经济损失也在总体上呈现上升趋势,2020年健康经济损失相对于2010年增加了1 022.24亿元(95% CI:322.13~1 606.02亿元),污染导致的人均健康经济损失增长了911.84元(95% CI:287.41~1 432.04元),2020年健康经济损失占GDP的比重增长趋势有所放缓,但是相对于2010年依旧增加了0.87%(95% CI:0.27~1.35%)。其中,健康经济损失最重要的部分为早逝和慢性支气管炎,其所占比例加和达到97.53%以上;对不同健康终点的经济损失分析得出,早逝对应的经济损失占比最大,达到45.85%以上,其次是慢性支气管炎,占总损失的35.55%以上,然后依次为急性支气管炎、心血管疾病住院、呼吸系统疾病住院、内科和儿科。

3 不确定性分析

对于污染导致的健康效应及经济损失,本研究只评估机动车PM_{2.5}污染导致的健康效应,而进入人体的不同污染物可能对人体健康产生协同作用,但本研究并未对其他污染物开展研究,可能导致评估结果偏低。人口数据来自于不同城市群各城市的常住人口数据,而人口存在空间流动性,且总量处于动态变化,但本研究并未考虑人口的时间变化和动态变化,选用区域总人口开展健康影响评估,存在一定的误差。

选用的健康终点仅考虑早逝、住院(心血管和呼吸系统)、门诊(内科和儿科)和患病(急性支气管炎与慢性支气管炎),由于卫生资料的缺乏,未考虑不良生殖、肺功能降低等,对健康终点的评估不够全面。在评估相关疾病健康终点的单位经济损失时采用疾病成本法,仅考虑误工费 and 医疗费,未考虑

交通费、自我治疗费等费用;虽支付意愿法具有一定优势,但由于忽略了相关部门在医疗研发和救治等方面的经济投入,导致存在一定的误差,在评估过程中采用的VSL和COI等指标数据与不同城市经济发展关系密切,本研究采用北京市本地化的VSL研究结果,并根据北京市暴露人群的损失及各市的人均可支配收入进行推算,以尽可能提高评估准确性。

目前对PM_{2.5}污染导致的健康效应研究机制还不够健全,建立暴露-响应关系过程仍存在人群暴露模式和气象因素等各种不确定因素^[60],导致不同城市系数存在差异^[61]。本研究由于资料的限制,评估污染健康效应过程中只采用了统一的暴露-响应关系系数及其95%置信区间,将研究产生的不确定性控制在相对可靠的范围。对于各健康终点的基准发生率本研究根据相关文献进行推算,其中对于住院和患病基准发生率,由于数据的缺乏,故采用其平均发生率。

4 结论

(1)对2010~2020年京津冀地区机动车污染物PM_{2.5}排放量变化特征分析,京津冀地区污染物排放量总体呈现增长趋势,近年来出现缓慢下降,2020年下降到4.46万t;分车型京津冀地区污染物PM_{2.5}的主要贡献车型为重型客车和重型货车,二者总贡献率一直保持在65.27%以上,因此对污染主要贡献车型针对性地制定防治措施是非常重要的;另外,区域各城市机动车污染排放特征存在明显差异,北京市污染物贡献率下降幅度明显,未来需加大力度促进河北省各城市机动车污染减排。

(2)研究期间(2010、2015和2020年)京津冀地区机动车PM_{2.5}污染导致的各健康终点发生人数变化总体呈上升趋势,虽然部分城市污染导致相关健康终点的人数出现下降趋势,但整体京津冀地区机动车污染导致的健康损失不容乐观;其中,归因于机动车PM_{2.5}污染的患病人数明显高于早逝、门诊和住院人数;而不同健康终端相关人数最多的城市是北京,其次是天津、保定等城市,说明当个别城市存在暴露人口基数大和老龄化严重等问题,并伴随着高浓度PM_{2.5}污染,将承担极大的健康风险。

(3)研究期间(2010、2015和2020年)京津冀地区机动车PM_{2.5}污染导致区域的健康经济损失、人均经济损失和经济损失占GDP比重总体上呈现上升趋势,2020年健康经济损失相对于2010年增加了1 022.24亿元(95% CI:322.13~1 606.02亿元),污染导致的人均健康经济损失增长了911.84

表 6 京津冀地区 2010、2015 和 2020 年机动车 PM_{2.5} 污染的健康风险

Table 6 Health risks of PM_{2.5} pollution from vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2010, 2015, and 2020

年份	早逝/人			住院/人			门诊/人			患病/人			健康终点 总发生率 /人·(万人) ⁻¹
	全因	呼吸系统	心血管	内科	儿科	内科	儿科	内科	儿科	急性支气管炎	慢性支气管炎	哮喘	
2010	13 349(3 457, 22 545)	7 016(0, 14 163)	7 074(4 478, 9 666)	77 710(42 857, 110 922)	34 360(12 289, 55 147)	158 129(55 148, 255 150)	32 783(12 192, 49 596)	32(12, 49)					
2015	32 463(8 487, 54 347)	16 632(0, 33 414)	16 799(10 645, 22 929)	202 464(111 762, 286 556)	80 267(28 752, 128 639)	364 198(129 831, 575 434)	74 823(28 585, 110 686)	71(29, 108)					
2020	344 337(9 025, 572 009)	28 433(0, 56 966)	17 094(10 838, 23 315)	202 974(112 102, 289 324)	79 278(28 419, 126 967)	364 487(131 458, 570 058)	74 545(28 878, 109 136)	73(29, 112)					

表 7 京津冀地区 2010、2015 和 2020 年各城市机动车 PM_{2.5} 污染的健康经济损失

Table 7 Health economic losses of PM_{2.5} pollution from vehicles of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2010, 2015, and 2020

项目	经济损失/亿元			占 GDP 比重/%			人均经济损失/元		
	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
北京	121.09(37.80, 194.01)	379.03(119.62, 600.16)	805.83(253.67, 1263.14)	0.86(0.27, 1.37)	1.53(0.48, 2.42)	2.24(0.70, 3.51)	617.16(192.66, 988.84)	1 745.87(550.97, 2 764.45)	3 680.75(1 158.70, 5 769.61)
天津	45.78(14.15, 73.91)	145.77(45.44, 233.21)	127.36(39.97, 203.52)	0.49(0.15, 0.80)	1.33(0.41, 2.14)	0.88(0.28, 1.40)	352.44(108.95, 568.99)	942.25(293.72, 1 507.48)	918.36(288.19, 1 467.57)
石家庄	22.42(6.95, 36.14)	68.72(21.56, 109.42)	57.20(17.61, 92.00)	0.65(0.20, 1.06)	1.61(0.51, 2.57)	0.96(0.29, 1.55)	220.34(68.29, 355.15)	642.18(201.48, 1 022.44)	508.82(156.62, 818.39)
保定	15.98(4.97, 25.74)	58.68(18.59, 92.86)	55.83(17.69, 88.72)	0.78(0.24, 1.26)	1.78(0.56, 2.81)	1.41(0.45, 2.24)	142.57(44.35, 229.64)	507.94(160.89, 803.79)	483.57(153.25, 768.41)
沧州	10.25(3.16, 16.58)	39.79(12.46, 63.48)	34.28(10.75, 54.86)	0.47(0.14, 0.75)	1.49(0.47, 2.39)	0.93(0.29, 1.48)	143.47(44.29, 232.12)	534.60(167.44, 852.86)	469.48(147.27, 751.27)
承德	1.82(0.56, 2.97)	9.16(2.83, 14.77)	8.69(2.71, 13.99)	0.21(0.06, 0.33)	0.67(0.21, 1.09)	0.56(0.17, 0.90)	52.56(16.14, 85.45)	259.49(80.28, 418.36)	259.14(80.90, 417.29)
邯郸	14.31(4.43, 23.11)	47.41(14.94, 75.29)	38.69(12.26, 61.57)	0.61(0.19, 0.97)	1.79(0.57, 2.85)	1.06(0.33, 1.69)	155.78(48.23, 251.47)	502.59(158.36, 798.21)	410.92(130.25, 653.96)
衡水	3.78(1.17, 6.11)	14.25(4.46, 22.79)	12.36(3.91, 19.77)	0.48(0.14, 0.78)	1.17(0.37, 1.87)	0.79(0.25, 1.27)	86.87(26.86, 140.61)	321.23(100.46, 513.81)	293.53(92.90, 469.56)
廊坊	5.39(1.66, 8.74)	21.26(6.61, 34.13)	25.22(7.71, 40.71)	0.39(0.12, 0.65)	0.86(0.27, 1.38)	0.76(0.23, 1.23)	123.69(38.11, 200.38)	466.04(144.79, 747.89)	459.64(140.47, 741.98)
秦皇岛	2.50(0.77, 4.06)	9.15(2.84, 14.74)	10.87(3.36, 17.54)	0.27(0.08, 0.44)	0.73(0.23, 1.18)	0.64(0.19, 1.04)	83.56(25.69, 135.68)	297.78(92.28, 479.51)	345.96(106.87, 558.03)
唐山	23.00(7.11, 37.13)	75.66(23.77, 120.23)	86.56(27.09, 137.79)	0.51(0.16, 0.83)	1.47(0.46, 2.35)	1.21(0.38, 1.92)	303.39(93.74, 489.74)	969.79(304.66, 1 541.13)	1 121.56(351.06, 1 785.36)
邢台	7.18(2.22, 11.59)	25.21(7.92, 40.16)	23.73(7.49, 37.89)	0.59(0.18, 0.96)	1.43(0.45, 2.28)	1.08(0.34, 1.72)	100.89(31.25, 163.02)	345.54(108.62, 550.49)	333.85(105.39, 533.05)
张家口	3.91(1.21, 6.33)	11.99(3.73, 19.28)	13.04(4.07, 20.95)	0.40(0.12, 0.66)	1.05(0.33, 1.68)	0.81(0.25, 1.31)	89.87(27.72, 145.62)	271.32(84.33, 436.03)	316.53(98.72, 508.58)

表 8 京津冀地区 2010、2015 和 2020 年机动车 PM_{2.5} 污染的健康经济损失

Table 8 Health economic losses of PM_{2.5} pollution from vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2010, 2015, and 2020

年份	经济损失/亿元			占 GDP 比重/%			人均经济损失/元
	早逝	住院	门诊	早逝	住院	门诊	
2010	152.42(39.50, 257.25)	0.48(0.0, 0.97)	0.99(0.0, 1.98)	0.43(0.13, 0.73)	0.86(0.27, 1.37)	1.53(0.48, 2.42)	265.35(82.42, 427.02)
2015	513.11(134.21, 858.59)	1.41(0.2, 2.84)	3.15(1.99, 4.29)	1.13(0.62, 1.59)	0.41(0.15, 0.66)	0.94(0.3, 1.4)	813.14(255.55, 1292.75)
2020	778.04(205.68, 1289.29)	3.17(0.6, 6.36)	4.24(2.69, 5.78)	1.29(0.71, 1.84)	0.47(0.17, 0.76)	1.24(0.4, 1.88)	1177.19(369.83, 1859.06)

元(95% CI:287.41 ~ 1 432.04元),但是健康经济损失占 GDP 的比重虽在 2020 年出现下降趋势,但仍高于 2010 年;不同城市机动车 PM_{2.5} 污染导致的健康经济损失也有极大不同,但北京、天津、保定和唐山等城市所导致的健康经济损失问题比较突出。

参考文献:

- [1] Zhao X, Doering O C, Tyner W E. The economic competitiveness and emissions of battery electric vehicles in China [J]. *Applied Energy*, 2015, **156**: 666-675.
- [2] Sun S D, Jin J X, Xia M, *et al.* Vehicle emissions in a middle-sized city of China: current status and future trends [J]. *Environment International*, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105514.
- [3] Hao Y P, Song X W. Research on trends and spatial distribution of vehicular emissions and its control measure assessment in the Yangtze River Delta, China, for 1999-2015 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(36): 36503-36517.
- [4] Brugge D, Durant J L, Rioux C. Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: a review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks [J]. *Environmental Health*, 2007, **6**; doi: 10.1186/1476-069X-6-23.
- [5] HEI Panel on the Health Effects of Traffic-Related Air Pollution. Traffic - related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. HEI Special Report 17 [R]. Boston, Massachusetts: Health Effects Institute, 2010.
- [6] 刘林瑶, 牟子平, 秦惠平, 等. 苏州市空气质量现状及其影响因素评析 [J]. *苏州科技大学学报(自然科学版)*, 2018, **35**(3): 64-69, 84.
Liu L Y, Mou Z P, Qin H P, *et al.* Current situation of air quality in Suzhou and the influencing factors [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, **35**(3): 64-69, 84.
- [7] Fondelli M C, Chellini E, Yli-Tuomi T, *et al.* Fine particle concentrations in buses and taxis in Florence, Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(35): 8185-8193.
- [8] Anenberg S C, Miller J, Henze D K, *et al.* The global burden of transportation tailpipe emissions on air pollution-related mortality in 2010 and 2015 [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, **14**(9), doi: 10.1088/1748-9326/ab35fc.
- [9] 阮芳芳, 曾贤刚. 2010 ~ 2018 年中国交通行业污染排放健康影响分析 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(3): 1480-1488.
Ruan F F, Zeng X G. Health impact analysis of air pollution from China's transportation industry in 2010-2018 [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(3): 1480-1488.
- [10] Voorhees A S, Fann N, Fulcher C, *et al.* Climate change-related temperature impacts on warm season heat mortality: a proof-of-concept methodology using BenMAP [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(4): 1450-1457.
- [11] Fann N, Lamson A D, Anenberg S C, *et al.* Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM_{2.5} and Ozone [J]. *Risk Analysis*, 2012, **32**(1): 81-95.
- [12] 李苏桓. 基于 BenMAP 的京津冀 PM_{2.5} 和 O₃ 达标情景下健康经济效益评估 [D]. 天津: 天津师范大学, 2018.
Li S H. Health and economic benefit assessment of controlling PM_{2.5} and O₃ pollution based BenMAP in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2018.
- [13] Buekers J, van Holderbeke M, Bierkens J, *et al.* Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, **33**: 26-38.
- [14] 王情, 朱欢欢, 杜鹏, 等. 京津冀及周边地区“十四五”及中长期 PM_{2.5} 污染控制目标的健康效益预估研究 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 220-228.
Wang Q, Zhu H H, Du P, *et al.* Health benefit of '14th Five-Year' and medium & long-term PM_{2.5} Control targets in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 220-228.
- [15] Xu W J, Zeng Z T, Xu Z Y, *et al.* Public health benefits of optimizing urban industrial land layout- The case of Changsha, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114388.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013 ~ 2017 年中国 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 PM_{2.5} pollution and associated health benefits in China during 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1847-1856.
- [19] 曾贤刚, 阮芳芳. 中国 PM_{2.5} 污染健康效应的国民经济影响分析 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 3228-3238.
Zeng X G, Ruan F F. Analysis on the national economic impact of PM_{2.5}-induced health effects in China [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 3228-3238.
- [20] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [21] 郎建奎, 程水源, 韩力慧, 等. 京津冀地区机动车大气污染物排放特征 [J]. *北京工业大学学报*, 2012, **38**(11): 1716-1723.
Lang J L, Cheng S Y, Han L H, *et al.* Vehicular emission characteristics in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, **38**(11): 1716-1723.
- [22] Wang H K, Chen C H, Huang C, *et al.* On-road vehicle emission inventory and its uncertainty analysis for Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 60-67.
- [23] Huo H, Zhang Q, He K B, *et al.* Modeling vehicle emissions in different types of Chinese cities: importance of vehicle fleet and local features [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2954-2960.
- [24] Sun S D, Jiang W, Gao W D. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **147**: 190-199.
- [25] 生态环境部. 关于印发《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 4 项技术指南的公告 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm, 2014-08-20.
- [26] Lang J L, Cheng S Y, Wei W, *et al.* A study on the trends of

- vehicular emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**, 605-614.
- [27] Lang J L, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Unregulated pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2014 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **573**: 974-984.
- [28] Sun S D, Zhao G, Wang T, *et al.* Past and future trends of vehicle emissions in Tianjin, China, from 2000 to 2030 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **209**: 182-191.
- [29] 王计广, 桂华侨, 陈金潮, 等. 唐山市机动车排放清单与减排经济效益研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5114-5124.
- Wang J G, Gui H Q, Chen J C, *et al.* Vehicle emission inventory and economic benefits of emission reduction in Tangshan[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5114-5124.
- [30] 沈岩, 武彤冉, 闫静, 等. 基于 COPERT 模型北京市机动车大气污染物和二氧化碳排放研究[J]. *环境工程技术学报*, 2021, **11**(6): 1075-1082.
- Shen Y, Wu T R, Yan J, *et al.* Investigation on air pollutants and carbon dioxide emissions from motor vehicles in Beijing based on COPERT model [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, **11**(6): 1075-1082.
- [31] Huo H, Zhang Q, He K B, *et al.* Vehicle-use intensity in China: current status and future trend[J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 6-16.
- [32] 姚志良, 张明辉, 王新彤, 等. 中国典型城市机动车排放演变趋势[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(9): 1565-1573.
- Yao Z L, Zhang M H, Wang X T, *et al.* Trends in vehicular emissions in typical cities in China [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(9): 1565-1573.
- [33] Lang J L, Cheng S Y, Zhou Y, *et al.* Air pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2011 [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **496**: 1-10.
- [34] 谢绍东, 宋翔宇, 申新华. 应用 COPERT III 模型计算中国机动车排放因子[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 415-419.
- Xie S D, Song X Y, Shen X H. Calculating vehicular emission factors with COPERT III mode in China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(3): 415-419.
- [35] Wang H K, Fu L X, Zhou Y, *et al.* Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005 [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(2): 394-400.
- [36] 清华大学. 中国多尺度排放清单模型 (MECI) [EB/OL]. http://meicmodel.org.cn/?page_id=560, 2022-12-05.
- [37] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [38] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 3762-3772.
- [39] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(2): 135-143.
- [40] Ma Z W, Hu X F, Sayer A M, *et al.* Satellite-based spatiotemporal trends in PM_{2.5} concentrations: China, 2004-2013 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, **124**(2): 184-192.
- [41] 屈加豹, 王鹏, 伯鑫, 等. 超低改造下中国火电排放清单及分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3969-3975.
- Qu J B, Wang P, Bo X, *et al.* Inventory and distribution characteristics of China's thermal power emissions under ultra-low reconstruction [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3969-3975.
- [42] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [43] Li T T, Guo Y M, Liu Y, *et al.* Estimating mortality burden attributable to short-term PM_{2.5} exposure: a national observational study in China [J]. *Environment International*, 2019, **125**: 245-251.
- [44] 中华人民共和国卫生部. 中国卫生统计年鉴-2011 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2011.
- [45] 国家卫生和计划生育委员会. 中国卫生和计划生育统计年鉴-2016 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2016.
- [46] 国家卫生和计划生育委员会. 中国卫生和计划生育统计年鉴 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2021.
- [47] Shang Y, Sun Z W, Cao J J, *et al.* Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality [J]. *Environment International*, 2013, **54**: 100-111.
- [48] 王珮玮. 北京机动车细颗粒物排放的浓度模拟和人体健康影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- Wang P W. Research on concentration simulation and health impact of vehicular fine particles in Beijing [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [49] 陈莎, 刘影影, 李素梅, 等. 京津冀典型城市 PM_{2.5} 污染的健康风险及经济损失研究 [J]. *安全与环境学报*, 2020, **20**(3): 1146-1153.
- Chen S, Liu Y Y, Li S M, *et al.* Health risks and economic losses caused by PM_{2.5} pollution in the typical urban regions of Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, **20**(3): 1146-1153.
- [50] 杜沛, 王建州. 北京市控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1255-1267.
- Du P, Wang J Z. Health benefit assessment of PM_{2.5} pollution control in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1255-1267.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴-2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [54] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴-2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [55] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [56] 李惠娟, 周德群, 魏永杰. 2015~2018 年我国 PM_{2.5} 健康损害价值的动态评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5225-5235.
- Li H J, Zhou D Q, Wei Y J. Dynamic assessment of PM_{2.5} health damage value in China from 2015 to 2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5225-5235.
- [57] 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 等. 2013~2017 年中国 PM_{2.5} 污染防治的健康效益评估 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 513-522.

- Zhang M J, Su F C, Xu Q X, *et al.* Health impact attributable to the control of PM_{2.5} pollution in China during 2013-2017 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 513-522.
- [58] 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.
- [59] 刘永红, 姚达文, 黄建彰. 珠三角地区机动车排放清单建立与来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(6P): 458-463. Liu Y H, Yao D W, Huang J Z. Vehicle exhaust emissions inventory and characteristics in the Pearl River Delta region[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(6P): 458-463.
- [60] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 603-608. Chen R J, Chen B H, Kan H D. Health impact assessment of surface ozone pollution in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(5): 603-608.
- [61] Hubert H B, Bloch D A, Oehlert J W, *et al.* Lifestyle habits and compression of morbidity [J]. *The Journals of Gerontology: Series A*, 2002, **57**(6): M347-M351.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论.重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in "2+26" Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)