

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)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 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	牟玲, 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, 宋晓东, 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	宋晓璐, 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 CO ₂ 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, 刘廷玺 (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 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫茜婷, 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)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	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铜离子吸附性能	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 5 a 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, 陈运霜, 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)
高垦殖丘陵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)
有机肥处理对旱地红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, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐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“煤改电”对 PM_{2.5} 污染的健康效益评估

张茹婷¹, 陈传敏^{1*}, 刘松涛¹, 吴华成², 周卫青², 李朋²

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 保定 071000; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 为准确评估京津冀地区采暖期实施“煤改电”政策带来的健康效益, 估算了京津冀地区各区县采暖期“煤改电”政策实施前后 PM_{2.5} 污染导致的过早死亡人数, 并采用支付意愿法计算了相应的健康损失价值。结果表明, 京津冀地区“煤改电”政策实施后带来了1 745人(95% CI: 1 443~1 907)健康效益和23.78亿元(95% CI: 14.50~30.63)经济效益。北京、天津及河北地区的健康效益分别为495人(95% CI: 436~554)、296人(95% CI: 238~354)及954人(95% CI: 693~1 076)。经济效益分别为3.50亿元(95% CI: 3.08~3.92)、3.32亿元(95% CI: 2.67~3.96)及16.96亿元(95% CI: 8.75~22.75), 分别占各地区GDP的0.01%、0.02%及0.04%。COPD、LC、ALRI、IHD、STROKE减少的死亡人数分别为187人(95% CI: 165~224)、318人(95% CI: 178~458)、193人(95% CI: 115~204)、506人(95% CI: 232~780)及542人(95% CI: 463~621)。环境PM_{2.5}污染浓度相对较高、人口密集污染排放较集中的地区, 能够获得显著的健康效益和经济效益。

关键词: 京津冀; 煤改电; PM_{2.5}; 过早死亡; 健康效益

中图分类号: X513; X196 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6541-10 DOI: 10.13227/j.hjck.202211327

Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM_{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region

ZHANG Ru-ting¹, CHEN Chuan-min^{1*}, LIU Song-tao¹, WU Hua-cheng², ZHOU Wei-qing², LI Peng²

(1. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China; 2. Jibei Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., North China Electric Power Research Institute Company Limited, Beijing 100045, China)

Abstract: To accurately assess the health benefits of the coal-to-electricity policy during the heating period in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region, the premature deaths caused by PM_{2.5} before and after the implementation of the coal-to-electricity policy during the heating period in each district and county of the BTH Region were estimated, and the corresponding health loss values were calculated using the willingness to pay method. The results showed that the implementation of the coal-to-electricity policy in the BTH Region brought 1 745 cases (95% CI: 1 443-1 907) of health benefits and 2.38 billion yuan (95% CI: 1.45-3.06) in economic benefits. In Beijing, Tianjin, and Hebei there were 495 cases (95% CI: 436-554), 296 cases (95% CI: 238-354), and 954 cases (95% CI: 693-1 076) of health benefits, respectively. The economic benefits were 0.35 billion yuan (95% CI: 0.30-0.39), 0.33 billion yuan (95% CI: 0.27-0.40), and 1.70 billion yuan (95% CI: 0.88-2.28), respectively, accounting for 0.01%, 0.02%, and 0.04% of GDP in each region. The number of premature deaths due to COPD, LC, ALRI, IHD, and STROKE decreased by 187 cases (95% CI: 165-224), 318 cases (95% CI: 178-458), 193 cases (95% CI: 115-204), 506 cases (95% CI: 232-780), and 542 cases (95% CI: 463-621), respectively. Areas with relatively high environmental PM_{2.5} concentrations and concentrated population-intensive pollution emissions can achieve significant health and economic benefits.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei Region; coal-to-electricity policy; PM_{2.5}; premature mortality; health benefits

中国经济快速发展的同时也带来了巨大的环境污染负荷。PM_{2.5} (空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒) 作为中国大气主要污染物, 对环境健康风险影响不可忽视^[1]。根据2015年全球疾病负担 (GBD) 报道, 每年有420万人过早死亡可归因于环境PM_{2.5}暴露。在中国, 环境PM_{2.5}导致110万人过早死亡, 是全球排名第五的死亡风险因素^[2]。根据2019年全球疾病负担研究 (GBD) 框架和方法, 2019年全球与环境PM_{2.5}相关的死亡人数达414万, 中国达142万。缺血性心脏病 (IHD)、脑血管疾病 (STROKE) 和慢性阻塞性肺病 (COPD) 是环境PM_{2.5}导致的三大死亡原因^[3]。有科学证据表明, 长时间呼吸受污染的空气会增加患病和死亡的风险^[4]。

近年来, 已有不少学者对大气污染健康效益进行研究^[5~7]。为了在污染更严重的地区获得更好的

暴露-反应曲线, Burnett等^[8]提出了综合暴露-反应模型 (IER), 使用源自较高暴露浓度的流行病学数据来限制浓度-反应 (C-R) 关系的形状。开发了针对成人死亡原因的整个全球暴露范围的相对风险 (RR) 函数, IHD、STROKE、COPD 和肺癌 (LC)。还开发了急性下呼吸道感染 (ALRI) 发病率的 RR 函数, 可用于估计5岁以下儿童的死亡率和健康生命损失年数。Liu等^[9]使用 IER 模型评估了环境PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数, 估算了343个城市空气污染控制政策实施后过早死亡人数的减少情况。Zheng等^[10]使用更新的 IER 模型来估计环境空气

收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2023-02-14

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5200-202114093A-0-0-00)

作者简介: 张茹婷 (1994~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境政策及健康影响评估, E-mail: 307884579@qq.com

* 通信作者, E-mail: hldccm@126.com

污染和 $\text{PM}_{2.5}$ 综合人口加权暴露导致的 $\text{PM}_{2.5}$ 相关死亡率。Maji 等^[11] 使用 IER 模型报告了 2016 年中国、印度、孟加拉国和巴基斯坦的 13 个特大城市与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的长期死亡率。

2021 年中国 29.8% 的城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超过国家环境空气质量标准 (NAAQS) 年平均限值 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[12,13]。尤其是京津冀地区,仅有北京、承德、张家口和秦皇岛 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标^[14~16]。民用散煤燃烧被认为是导致冬季采暖期空气污染严重的重要原因^[17~19]。为改善环境,政府制定“煤改电”政策以期向清洁取暖转型,减少散煤使用,提高区域空气质量^[20,21]。清洁能源转型可使农村民用部门排放对环境 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献显著减少,避免与 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露相关的 13 万人 (95% CI: 9 ~ 16) 过早死亡^[22]。Zhao 等^[23] 估计减少与家庭相关的 $\text{PM}_{2.5}$ 综合人口加权暴露每年可避免 40 万人 (95% CI: 25 ~ 47) 过早死亡。Bilsback 等^[24] 研究指出,北京地区禁煤每年可避免 1 900 人 (95% CI: 1 200 ~ 2 700) 过早死亡,而京津冀地区禁煤每年可避免 13 700 人 (95% CI: 8 900 ~ 19 600) 过早死亡。针对散煤治理情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 健康效益研究方面,于森等^[25] 采取泊松回归模型分析了 2016 年河南省农村散煤替代对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康效益。结果显示,散煤治理情景下河南省 2025 年可避免 2 220 人过早死亡,带来 23.5 亿元经济效益。赵婉屹等^[26] 根据泊松回归模型评估了散煤治理带来的健康经济效益。结果显示,2017 ~ 2020 年关中地区散煤燃烧源 $\text{PM}_{2.5}$ 减排使得居民过早死亡率降低了 1.50×10^{-5} (95% CI: $3.66 \times 10^{-6} \sim 2.62 \times 10^{-5}$),降幅达 98.2%。张翔等^[27] 利用综合评价模型估算不同情景下实施“煤改电”政策对环境质量、健康效益和经济效益的影响。结果显示,京津冀地区实施“煤改电”政策后,2020 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值可下降 6 ~ 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,可避免 2.22 万人过早死亡。闫祯等^[28] 以 2025 年为目标年评估不同控制情景下“煤改电”带来的健康效益。结果显示,京津冀地区在控制情景 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高可下降 5.4、5.6 和 2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,带来 352.34×10^8 元经济效益。以往研究主要讨论的是尚未完成“煤改电”政策预期的健康及经济效益。而针对京津冀地区“煤改电”实际实施情况,有研究表明该政策实施后,采暖季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值可减少 0.2 ~ 6.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降 1.2% ~ 7.8%^[29]。然而,京津冀地区各市“煤改电”政策实际实施后对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康效益研究少有报道。

本研究为准确评估京津冀地区采暖期实施“煤改电”政策带来的健康效益,采用 WRF-Chem 模型

模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据、县级人口数据以及全范围 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 C-R 关系,选取 IHD、STROKE、COPD、LC 和 ALRI 等 5 种疾病作为健康终点。估算京津冀地区各区县采暖期“煤改电”政策实施前后 $\text{PM}_{2.5}$ 导致的过早死亡人数,并采用支付意愿法计算相应的健康损失价值,以期定量评估该政策的健康效益提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文选取京津冀地区作为研究区域,包含北京、天津、唐山、邯郸、邢台、保定、承德、沧州、廊坊、衡水、石家庄、张家口和秦皇岛。

1.2 研究数据

1.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

本研究使用张茹婷等^[29] 基于 WRF-Chem 模型模拟得到的京津冀地区采暖期 (2018 年 11 月 16 日至 2019 年 3 月 15 日) “煤改电”政策实施前后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,见表 1。

表 1 京津冀地区采暖期“煤改电”政策实施前后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 $\text{PM}_{2.5}$ concentration before and after the implementation of the coal-to-electricity policy during the heating period in BTH Region/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地区	采暖期 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值	
	实施前	实施后
北京	62.1	58.6
天津	86.5	80.9
保定	106.5	104.6
沧州	80.8	77.6
廊坊	72.1	68.9
邢台	109.9	106.7
衡水	93.3	90.1
唐山	74.3	71.2
邯郸	108.8	105.7
承德	36.9	33.7
石家庄	110.3	107.1
张家口	22.3	22.1
秦皇岛	57.2	54.0

1.2.2 人口数据及基线死亡率

本研究使用的人口数据来源于 2020 年第七次全国人口普查公报,为分区县的人口数。IHD、STROKE、COPD、LC 和 ALRI 等 5 种疾病的基线死亡率来自 Zhou 等^[30] 的研究报道,见表 2。

1.3 研究方法

1.3.1 暴露-反应关系

C-R 函数是描述长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 与健康结果风险之间关系的数学方程,表示与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增量变化相关的相对死亡风险。本研究使用 Burnett 等^[8] 提

表 2 2013 年 IHD、STROKE、COPD、LC 和 ALRI 的基线死亡率/10⁻⁵ 人

Table 2 Baseline mortality rates for IHD, STROKE, COPD, LC, and ALRI in 2013/10⁻⁵ persons

地区	IHD		STROKE		COPD		LC		ALRI	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性
北京	149.5	104.3	144.5	91.7	37.7	23.7	51.5	23.4	18.9	13.4
天津	153.7	119.6	139.8	91.9	34.0	26.6	53.8	29.6	26.8	17.7
河北	186.0	120.1	258.0	160.7	49.1	28.6	60.7	20.3	16.6	10.2

出的综合暴露-反应模型(IER)计算 PM_{2.5} 相关健康效益. 选取 IHD、STROKE、COPD、LC 和 ALRI 等 5 种疾病作为健康终点, 对应相对风险(RR)计算公式如下.

当 $Z < Z_{cf}$ 时:

$$RR_{IER}(Z) = 1 \quad (1)$$

当 $Z \geq Z_{cf}$ 时:

$$RR_{IER}(Z) = 1 + \alpha \{1 - \exp[-\gamma(Z - Z_{cf})^\delta]\} \quad (2)$$

式中, Z 为 PM_{2.5} 浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; Z_{cf} 为假设没有额外风险的反事实浓度, 即 PM_{2.5} 浓度阈值, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; $RR_{IER}(Z)$ 为特定疾病的相对风险; α 、 γ 和 δ 为暴露反应函数中的计算参数, 决定不同疾病的形状关系, 满足不同的分布.

本研究使用世界卫生组织推荐的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 标准值($10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 作为阈值浓度, 各疾病在不同 PM_{2.5} 暴露水平上($0 \sim 410 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的相对风险值见图 1.

1.3.2 过早死亡估算

PM_{2.5} 暴露导致的各疾病健康终点计算公式如下. 对于每个健康终点, 本研究使用蒙特卡罗法随机选择 Cohen 等^[2] 提供的 1 000 组 IER 模型 α 、 γ 和 δ 参数, 运行 10 000 次, 根据结果的概率分布, 得到每个健康终点的 95% 置信区间.

$$M = Y_0 \times AP \times \text{Pop} \quad (3)$$

$$AP = [RR_{IER}(Z) - 1] / RR_{IER}(Z) \quad (4)$$

式中, M 为归因于 PM_{2.5} 暴露导致的健康结局发生数, 人; Y_0 为特定疾病的基线死亡率, 10^{-6} 人; AP 为归因分数, 用于衡量风险因素对疾病或死亡率的贡献; Pop 为暴露人口, 万人.

表 3 京津冀地区单位 VSL/万元·人⁻¹

Table 3 Unit value of a statistical life(VSL) in BTH Region/10⁴ yuan·person⁻¹

城市	北京	天津	保定	沧州	廊坊	邢台	衡水	唐山	邯郸	承德	石家庄	张家口	秦皇岛
VSL	71	112	195	183	143	207	209	141	182	211	159	191	173

2 结果与讨论

2.1 健康效益评估

由表 4 可知, 京津冀地区“煤改电”实施前 PM_{2.5} 导致的过早死亡人数为 166 425 人 (95% CI:

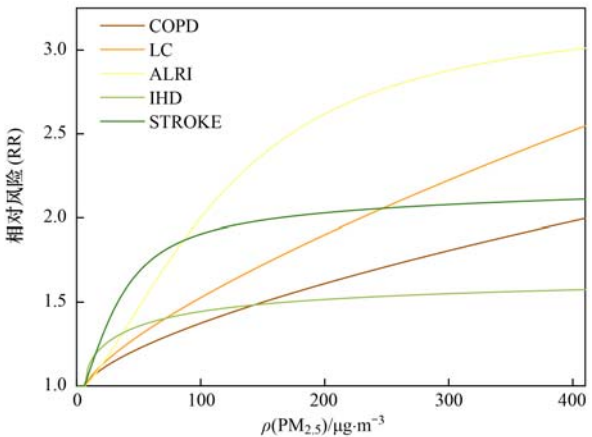


图 1 长期暴露于 PM_{2.5} 导致不同健康终点的综合暴露-反应函数(IER)

Fig. 1 Integrated exposure-response (IER) functions of different health endpoints caused by long-term exposure to PM_{2.5}

1.3.3 健康损失价值

本研究使用统计寿命价值法评估 PM_{2.5} 污染造成的健康损失价值^[31]. 统计学意义上的生命价值 (VSL) 即人们为降低一定的死亡风险而愿意付出的成本. 本文参考谢旭轩^[32] 对北京 2010 年生命价值的研究以及于淼等^[25] 的修正方法, 考虑 2021 年北京、天津和河北省居民人均可支配收入进行修正, 进而得到 2021 年京津冀地区单位 VSL (见表 3), 生命价值及健康损失价值计算公式如下:

$$VSL = \frac{VSL_{\text{北京}}^{2010} \times G}{G_{\text{北京}}^{2010}} \quad (5)$$

$$V = VSL \times M \quad (6)$$

式中, VSL 为研究区域的单位生命价值, 万元·人⁻¹; G 为研究区域的人均可支配收入, 万元; V 为健康损失价值, 万元.

81 972 ~ 222 578), 占 2021 年常住人口的 0.15%. STROKE、IHD 和 LC 是造成京津冀地区主要死亡的健康终点, 占 PM_{2.5} 相关过早死亡人数的 90%, 与以往报道的研究结果一致^[33~35]. 心脑血管系统疾病比起呼吸系统疾病对 PM_{2.5} 的长期暴露更加敏感^[36].

京津冀地区“煤改电”实施后 $PM_{2.5}$ 导致的过早死亡人数为164 680人(95% CI: 80 530 ~ 220 671),带来的健康效益为1 745人(95% CI: 1 443 ~ 1 907). 其中,北京地区 495 人(95% CI: 436 ~ 554),天津地区 296 人(95% CI: 238 ~ 354),河北地区 954 人(95% CI: 693 ~ 1 076). 从不同健康终点来看,京津冀地区“煤改电”实施后 COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 减少的死亡人数分别为 187 人(95% CI: 165 ~ 224)、318 人(95% CI: 178 ~ 458)、193 人(95% CI: 115 ~ 204)、506 人(95% CI: 232 ~ 780)及 542 人(95% CI: 463 ~ 621). 其中,减少的 STROKE 死亡人数是 COPD 死亡人数的 3 倍. 因环境 $PM_{2.5}$ 导致 IHD、COPD 和 STROKE 等三大死亡原因的健康效益合计占总受益人数的

71%. 北京为该政策实施健康受益最大地区,各健康终点减少的死亡总数占比为 52%. 同样的结果在闫祯等^[28]研究中也发现. 吴文静等^[37]研究指出,2015 年京津冀地区归因于 $PM_{2.5}$ 长期暴露的过早死亡人数为 19.38 万人(95% CI: 14.09 ~ 23.33),排名前 5 的城市分别为北京、天津、保定、邯郸和石家庄,与本研究结果相同. 而 Archer 等^[38]估计京津冀地区民用部门每年可造成32 152 例过早死亡. 北京 5 017 例(95% CI: 4391 ~ 5 677),天津3 401 例(95% CI: 2 852 ~ 4 001),河北省23 734 例(95% CI: 20 535 ~ 26 614),远低于本研究结果. 选取不同的研究方法、时间、区域、健康终点和研究数据等原因都会造成估计值的巨大差异.

表 4 京津冀地区采暖期“煤改电”政策实施前后不同健康终点过早死亡人数/人

Table 4 Premature deaths at different health end points before and after the implementation of coal-to-electricity policy during the heating period in BTH Region/person

城市	COPD		LC		ALRI		IHD		STROKE	
	实施前	实施后	实施前	实施后	实施前	实施后	实施前	实施后	实施前	实施后
北京	1 394	1 351	2 189	2 098	1 345	1 288	7 969	7 826	11 548	11 386
天津	1 046	1 022	1 864	1 782	1 444	1 389	5 990	5 900	7 654	7 609
保定	1 009	1 009	1 348	1 332	638	632	4 721	4 658	9 439	9 439
沧州	692	675	913	899	440	431	3 484	3 430	7 234	7 191
廊坊	480	467	639	628	308	298	2 526	2 485	5 282	5 248
邢台	791	777	1 051	1 039	498	491	3 635	3 635	7 269	7 269
衡水	425	425	571	556	273	268	2 066	2 066	4 235	4 211
唐山	6 949	6 769	9 163	9 003	4 415	4 311	35 644	35 060	74 988	74 517
邯郸	2 090	2 052	2 737	2 706	1 310	1 292	9 605	9 605	19 202	19 202
承德	190	180	256	237	107	99	1 219	1 188	2 470	2 348
石家庄	1 248	1 226	1 654	1 636	786	775	5 735	5 735	11 467	11 467
张家口	159	159	206	206	68	68	1 181	1 181	1 784	1 784
秦皇岛	244	236	317	309	149	142	1 325	1 299	2 863	2 799
合计	16 717	16 350	22 907	22 430	11 781	11 485	85 100	84 069	165 435	164 470

由图 2 可见,京津冀地区“煤改电”实施前后 $PM_{2.5}$ 导致的男性过早死亡人数分别为104 086 人(95% CI: 50 957 ~ 139 044)及102 981 人(95% CI: 50 055 ~ 137 844),健康效益人数为1 105 人(95% CI: 902 ~ 1 200). 京津冀地区“煤改电”实施前后 $PM_{2.5}$ 导致的女性过早死亡人数分别为62 339 人(95% CI: 31 015 ~ 83 534)及61 699 人(95% CI: 30 474 ~ 82 827),健康效益人数为 640 人(95% CI: 541 ~ 707). 该政策实施后京津冀各地区男性健康受益均高于女性. Meng 等^[19]研究发现约 90% 的农村人口每日暴露于室内空气污染,减少暴露更多地来自室内空气质量的改善. 考虑到在中国北方女性比男性具有更高的 $PM_{2.5}$ 暴露水平,从而导致女性健康受益高于男性. 而本研究未考虑室内 $PM_{2.5}$ 暴露对过早死亡的影响,这也会对研究结果产生一定的不确定性. Ji 等^[39]研究发现改善室内空气质量比减少

环境空气污染对人口健康的益处更大,减少室内 $PM_{2.5}$ 排放对健康效益的改善不可忽视. 室内 $PM_{2.5}$ 的减排也应被考虑到后续清洁采暖政策之中. 值得注意的是,张家口地区由于“煤改电”实施前后 $PM_{2.5}$ 导致的过早死亡人数未发生改变而无明显健康效益. 原因跟张家口地区“煤改电”实施前后 $PM_{2.5}$ 浓度变化较小有关. IER 模型受限于 C-R 函数,具有特定的代数形式. 在较高的 $PM_{2.5}$ 浓度范围内具有平缓的曲线,而在相对较低的 $PM_{2.5}$ 范围内具有陡峭的曲线. 目前,污染地区的 $PM_{2.5}$ 水平仍处于 IER 曲线的高端,变幅范围仍处于 IER 曲线中较为平坦的部分,因此边际死亡率的降低受到限制,从而导致后续过早死亡人数计算结果无明显差异^[40]. 有研究发现,即使在 $PM_{2.5}$ 浓度相对较低的地区,减少 $PM_{2.5}$ 暴露也会带来重大的健康效益^[41~43]. Yin 等^[44]基于中国本地的流行病学研究结果认为,IER

模型可能低估了高浓度下的健康风险. 同时, IER 模型只考虑了 5 个主要致死疾病, 但 PM_{2.5} 污染还与二型糖尿病、哮喘、婴儿低出生体重和早产等有关, 对可归因 PM_{2.5} 导致的过早死亡可能存在低估^[45~47]. 所以进一步获取精细化地暴露反应函数对 PM_{2.5} 相关健康效益研究十分重要.

“煤改电”政策实施后京津冀地区不同健康终点均有不同程度的健康受益(见图 3). 其中, 北京 COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 的健康效益占比分别为 8.69%、18.38%、11.31%、28.89% 和 32.73%. 天津 COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 的健康效益占比分别为 8.08%、27.95%、18.52%、30.3% 和 15.15%. COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 在邯郸、石家庄、邢台、保定和承德的健康效益最大, 分别占 43.18%、37.25%、21.21%、74.12% 和 64.89%. 从各健康终点来看, 京津冀地区控制 PM_{2.5} 污染的健康效益巨大, 经济效益

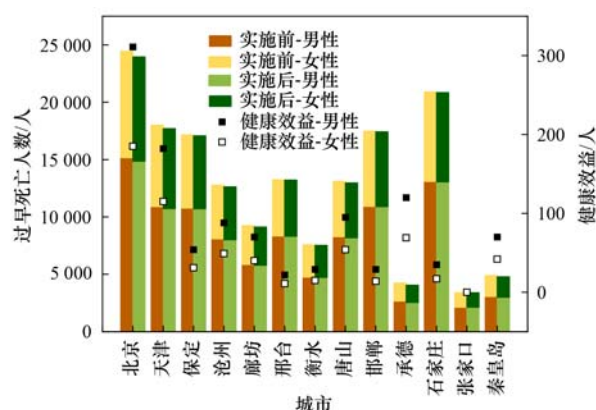


图2 京津冀地区“煤改电”实施前后 PM_{2.5} 相关过早死亡人数及健康效益

Fig. 2 Premature deaths related to PM_{2.5} and health benefits before and after the implementation of coal-to-electricity policy in BTH Region

显著^[48]. 京津冀各区县“煤改电”实施前后 PM_{2.5} 相关过早死亡人数及健康效益的空间分布如图 4 所示, 呈

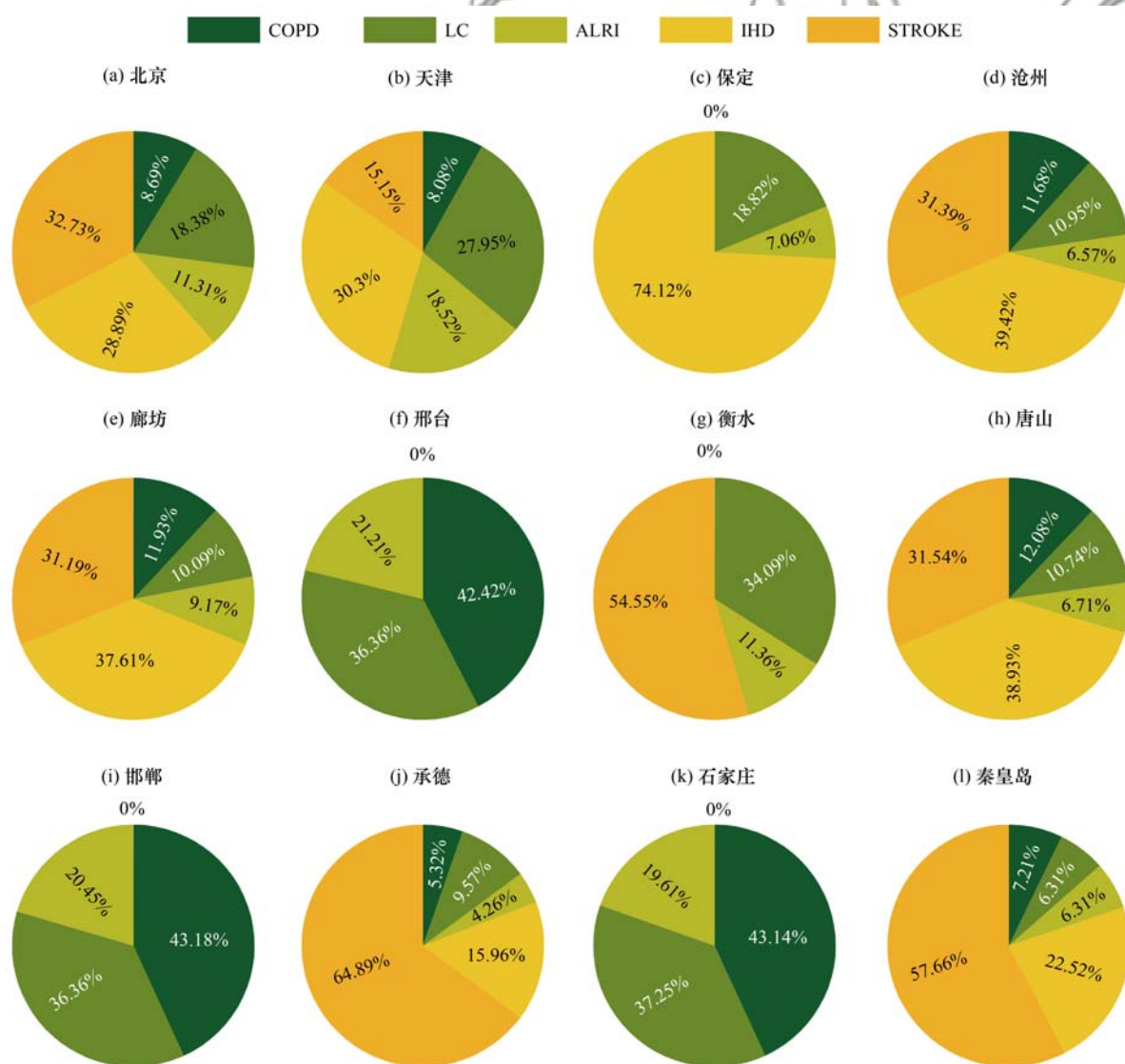


图3 京津冀地区“煤改电”实施后不同健康终点的健康效益占比

Fig. 3 Proportion of health benefits of different health endpoints before and after the implementation of coal-to-electricity policy in BTH Region

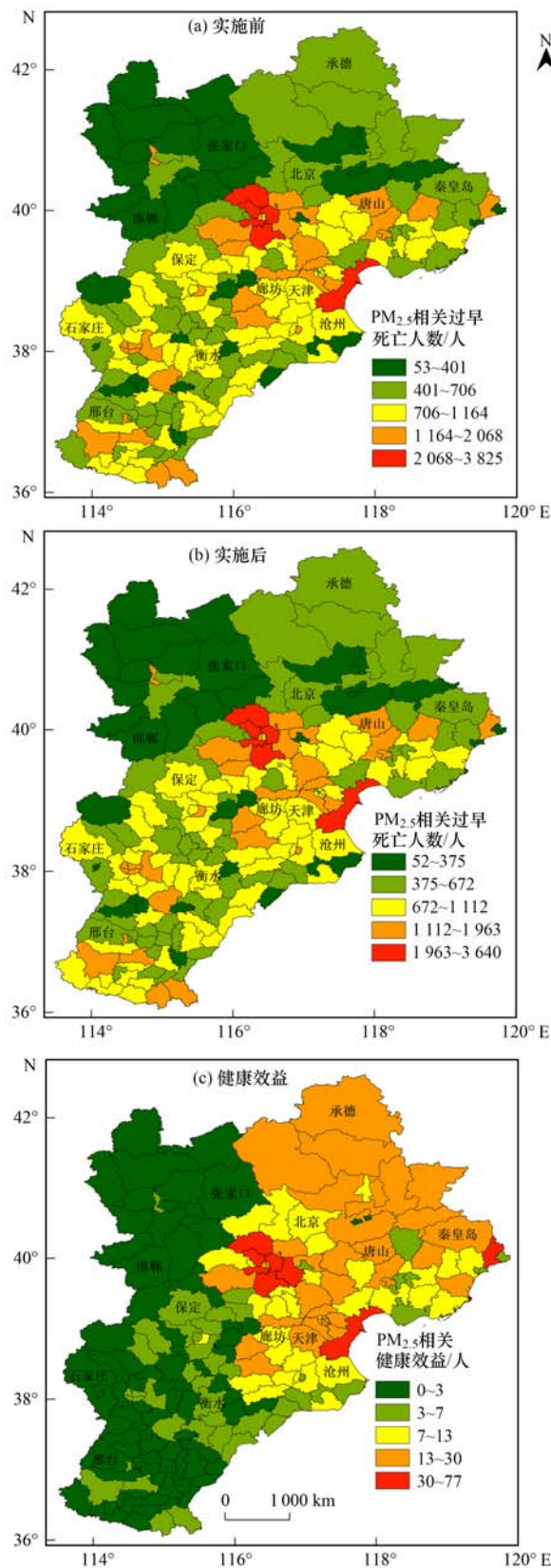


图4 京津冀地区“煤改电”实施前后 $\text{PM}_{2.5}$ 相关过早死亡人数及健康效益的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ -related premature deaths and health benefits before and after the implementation of coal-to-electricity policy in BTH Region

地区“煤改电”实施前后 $\text{PM}_{2.5}$ 相关过早死亡人数集中在东部、南部和部分北部地区,如北京、天津、保定、沧州、邢台、唐山、邯郸和石家庄地区,与以往研究的结果一致^[34,49]. 有研究发现,以上地区民用燃煤量较大,污染物排放较集中^[50]. 民用部门对 $\text{PM}_{2.5}$ 相关过早死亡的贡献十分显著,应严格控制民用散煤燃烧^[51]. 杜艳君等^[52] 研究显示北京朝阳区、海淀区为归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过早死亡人数最多的地区,与本研究结果相同. “煤改电”政策实施后北京、天津、沧州、廊坊、唐山、承德和秦皇岛等地区健康效益较明显,占比达总健康效益的 85%. 其中,健康效益较为突出的区县为北京朝阳区、丰台区、海淀区、房山区、通州区、顺义区、昌平区和大兴区,天津滨海新区及秦皇岛海港区,各区健康收益人数超过 30 人. 以上地区人口分布密集且“煤改电”政策实施后 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度改善较大,所以健康效益更加显著. 张梦娇等^[53] 研究了人口总量、人口老龄化、基准死亡率和 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度等因素对健康负担的贡献,发现污染物浓度的降低是减轻健康负担的主要原因. 控制污染物排放、降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍是减轻健康负担最主要最有效的途径^[54].

2.2 经济效益评估

如表 5 所示,京津冀地区“煤改电”实施前造成的居民健康经济损失为 2 579.32 亿元 (95% CI: 1 266.87 ~ 3 439.94),占 2021 年京津冀地区 GDP 的 3%. 实施后造成的居民健康经济损失为 2 555.54 亿元 (95% CI: 1 252.38 ~ 3 409.34),带来了 23.78 亿元 (95% CI: 14.50 ~ 30.63) 的经济效益. 与其他研究成果对比,京津冀地区“煤改电”政策实施前造成的居民经济损失相近,但政策实施后带来的健康效益远低于其他研究 (见表 6). 张翔等^[27] 研究中选取的健康终点与本文的不一致. 闫祯等^[28] 研究中除非意外总死亡外,还选取了住院和门诊等作为健康终点. 以上研究都以 2015 年为基准年,讨论尚未完成的“煤改电”政策预期的健康与经济效益. 除此之外,还使用了不同的评估模型进行 $\text{PM}_{2.5}$ 相关健康效益计算. 不同年份单位 VSL 的选取也会造成最终健康经济效益结果的差异. “煤改电”政策实施后,北京、天津和河北的健康经济效益分别为 3.50 亿元 (95% CI: 3.08 ~ 3.92)、3.32 亿元 (95% CI: 2.67 ~ 3.96) 和 16.96 亿元 (95% CI: 8.75 ~ 22.75),分别占各地区 GDP 的 0.01%、0.02% 和 0.04%. 京津冀地区因减少 COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 等健康终点死亡所产生的健康经济效益分别为 2.64 亿元 (95% CI: 2.13 ~ 3.05)、4.19 亿元 (95% CI: 1.07 ~ 6.15)、2.45 亿元 (95% CI: 1.56 ~

现出相同的总体特征以及明显的空间差异. 京津冀

2.61)、6.73 亿元(95% CI: 6.55 ~ 10.43) 和 7.78 亿元(95% CI: 3.19 ~ 8.39). 该政策实施后,承德地区的健康经济效益为 3.98 亿元(95% CI: 2.32 ~ 5.45), 占总健康经济效益的 17%, 收益最高. 从各健康终点来看,石家庄、天津、天津、保定和承德地区分别为减少 COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 等健康终点死亡健康经济收益最大的地区,分别占

13%、22%、25%、18% 和 33%. 京津冀地区因减少 STROKE 死亡产生的经济效益高于因减少 COPD 及 ALRI 死亡产生的经济效益. 总体而言,京津冀地区“煤改电”政策的实施对提高居民健康水平具有重要意义. 尤其是在环境 PM_{2.5} 污染浓度相对较高、人口密集的区域,能够获得显著的健康效益和经济效益.

表 5 京津冀地区采暖期“煤改电”政策实施健康经济效益¹⁾ × 10⁸/元

城市	实施前经济损失	实施后经济损失	经济效益
北京	172.87(83.88 ~ 239.10)	169.36(80.80 ~ 235.18)	3.50(3.08 ~ 3.92)
天津	201.51(103.44 ~ 273.13)	198.19(100.77 ~ 269.17)	3.32(2.67 ~ 3.96)
保定	334.22(167.54 ~ 436.53)	332.57(166.92 ~ 434.28)	1.65(0.62 ~ 2.25)
沧州	233.09(110.75 ~ 310.27)	230.58(108.34 ~ 307.67)	2.51(2.42 ~ 2.61)
廊坊	131.99(60.64 ~ 177.43)	130.42(60.58 ~ 175.63)	1.57(0.05 ~ 1.81)
邢台	273.57(138.21 ~ 356.16)	272.90(138.13 ~ 355.10)	0.68(0.08 ~ 1.06)
衡水	157.99(77.10 ~ 208.79)	157.07(76.74 ~ 207.31)	0.92(0.36 ~ 1.48)
唐山	184.69(85.99 ~ 248.61)	182.58(84.28 ~ 246.11)	2.11(1.71 ~ 2.50)
邯郸	318.71(161.20 ~ 415.31)	317.92(161.10 ~ 413.87)	0.79(0.10 ~ 1.44)
承德	89.69(40.06 ~ 126.61)	85.70(37.74 ~ 121.16)	3.98(2.32 ~ 5.45)
石家庄	331.38(167.42 ~ 431.42)	330.56(167.32 ~ 430.14)	0.82(0.10 ~ 1.28)
张家口	64.98(32.31 ~ 99.76)	64.98(32.31 ~ 99.76)	0.00(0.00 ~ 0.00)
秦皇岛	84.63(38.33 ~ 116.82)	82.69(37.34 ~ 113.95)	1.93(0.99 ~ 2.87)
合计	2 579.32(1 266.87 ~ 3 439.94)	2 555.54(1 252.38 ~ 3 409.34)	23.78(14.50 ~ 30.63)

1) 括号内为 95% 置信区间

表 6 京津冀地区“煤改电”政策实施健康经济效益比较 × 10⁸/元

地区	年份	实施前经济损失	经济效益	文献
京津冀	2020	2 788.47	408.56	[27]
京津冀	2025	3 911.04	352.34	[28]
京津冀	2019	2 579.32	23.78	本研究

2.3 不确定性分析

选取的研究方法、研究时间、研究区域、健康终点和研究数据等都会造成结果的差异,产生一定的不确定性^[55,56].

本研究使用的 PM_{2.5} 浓度数据为京津冀地区采暖期(2018 年 11 月 16 日至 2019 年 3 月 15 日)“煤改电”政策实施前后的 PM_{2.5} 浓度数据,不能完整地代表 PM_{2.5} 暴露程度. 选择不同的 PM_{2.5} 浓度阈值也会影响计算结果. 此外,本研究只考虑了室外 PM_{2.5} 污染的影响,未考虑室内 PM_{2.5} 暴露对过早死亡的影响,这也会对研究结果产生一定的不确定性. 不同来源大气 PM_{2.5} 的组分、毒性和对健康的影响也存在差异^[51,57]. 研究表明民用部门排放的一次 PM_{2.5} 毒性主要来自于不完全燃烧释放的多环芳烃^[58]. PM_{2.5} 组分中的 BC 及 OC 对居民健康的影响更大^[59].

本研究使用的是各疾病全年龄别的基线死亡率,未考虑人口年龄分布对健康效益的影响. 但有研

究表明,不同年龄人群别的基线死亡率以及 IHD 健康终点相关的相对风险存在较大差异^[60,61]. 另外,本研究使用河北省级的基线死亡率数据替代河北省各市的基线死亡率,无法捕捉到微小的空间差异,也造成了研究结果的不确定性^[62,63].

IER 模型受限于 C-R 函数,具有特定的代数形式. 在较高的 PM_{2.5} 浓度范围内具有平缓的曲线,而在相对较低的 PM_{2.5} 浓度范围内具有陡峭的曲线. 目前,污染地区的 PM_{2.5} 浓度水平仍处于 IER 曲线的高端,变幅范围较为平坦,因此边际死亡率的降低受到限制,从而导致后续过早死亡人数计算结果无明显差异^[40]. 同时,本研究只考虑了 COPD、LC、ALRI、IHD 和 STROKE 等 5 个健康终点导致的过早死亡,未考虑 PM_{2.5} 污染对门诊、住院和患病等健康终点的影响,对 PM_{2.5} 的健康负担可能存在低估.

3 结论

(1) 京津冀地区“煤改电”实施前 PM_{2.5} 导致的

过早死亡人数为166 425人(95% CI: 81 972 ~ 222 578),占2021年常住人口的0.15%。STROKE、IHD和LC是造成主要过早死亡的健康终点,占90%。政策实施后带来了1 745人(95% CI: 1 443 ~ 1 907)健康效益。北京地区495人(95% CI: 436 ~ 554),天津地区296人(95% CI: 238 ~ 354),河北地区954人(95% CI: 693 ~ 1 076)。京津冀地区男性、女性健康效益分别为1 105人(95% CI: 902 ~ 1 200)及640人(95% CI: 541 ~ 707),各地区男性健康受益均高于女性。

(2)京津冀地区“煤改电”实施后COPD、LC、ALRI、IHD和STROKE减少的死亡人数分别为187人(95% CI: 165 ~ 224)、318人(95% CI: 178 ~ 458)、193人(95% CI: 115 ~ 204)、506人(95% CI: 232 ~ 780)和542人(95% CI: 463 ~ 621)。各健康终点在邯郸、石家庄、邢台、保定和承德的健康效益最大。北京各健康终点的健康效益占比分别为8.69%、18.38%、11.31%、28.89%和32.73%,为健康受益最大地区,占京津冀地区总健康效益的52%。

(3)PM_{2.5}相关过早死亡人数集中在东部、南部和部分北部地区,如北京、天津、保定、沧州、邢台、唐山、邯郸和石家庄地区。“煤改电”实施后北京、天津、沧州、廊坊、唐山、承德和秦皇岛等地区健康效益较明显,占总健康效益的85%。其中,健康效益较为突出的区县为北京朝阳区、丰台区、海淀区、房山区、通州区、顺义区、昌平区和大兴区,天津滨海新区及秦皇岛海港区,各区健康收益人数超过30人。

(4)京津冀地区“煤改电”实施前健康经济损失为2 579.32亿元(95% CI: 1 266.87 ~ 3 439.94),占2021年该地区GDP的3%。政策实施后带来了23.78亿元(95% CI: 14.50 ~ 30.63)经济效益。北京3.50亿元(95% CI: 3.08 ~ 3.92),天津3.32亿元(95% CI: 2.67 ~ 3.96),河北16.96亿元(95% CI: 8.75 ~ 22.75),分别占各地区GDP的0.01%、0.02%和0.04%。京津冀地区减少COPD、LC、ALRI、IHD和STROKE等健康终点经济受益最大的地区分别为石家庄、天津、天津、保定和承德,减少STROKE导致的过早死亡带来的经济效益最大。

参考文献:

[1] Qi J L, Ruan Z L, Qian Z M, *et al.* Potential gains in life expectancy by attaining daily ambient fine particulate matter pollution standards in mainland China: a modeling study based on nationwide data[J]. PLOS Medicine, 2020, 17(1), doi: 10.1371/journal.pmed.1003027.

[2] 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.

[3] Sang S W, Chu C, Zhang T C, *et al.* The global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis of the global burden of disease study 2019[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 238, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113588.

[4] Health Effects Institute, Institute for Health Metrics and Evaluation. State of global air 2020: a special report on global exposure to air pollution and its health impacts[R]. Boston: Health Effects Institute, 2020.

[5] Vodonos A, Schwartz J. Estimation of excess mortality due to long-term exposure to PM_{2.5} in continental United States using a high-spatiotemporal resolution model[J]. Environmental Research, 2021, 196, doi: 10.1016/j.envres.2021.110904.

[6] Hu J L, Huang L, Chen M D, *et al.* Premature mortality attributable to particulate matter in China: source contributions and responses to reductions[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(17): 9950-9959.

[7] Liu M, Saari R K, Zhou G X, *et al.* Recent trends in premature mortality and health disparities attributable to ambient PM_{2.5} exposure in China: 2005-2017[J]. Environmental Pollution, 2021, 279, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116882.

[8] 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.

[9] Liu H M, Liu J, Li M C, *et al.* Assessing the evolution of PM_{2.5} and related health impacts resulting from air quality policies in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 93, doi: 10.1016/j.eiar.2021.106727.

[10] Zheng H T, Zhao B, Wang S X, *et al.* Transition in source contributions of PM_{2.5} exposure and associated premature mortality in China during 2005-2015[J]. Environment International, 2019, 132, doi: 10.1016/j.envint.2019.105111.

[11] Maji K J, Arora M, Dikshit A K. Premature mortality attributable to PM_{2.5} exposure and future policy roadmap for ‘airpocalypse’ affected Asian megacities[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 118: 371-383.

[12] 中国环境保护部. 2021 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220608338202870777.pdf>, 2022-09-01.

[13] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].

[14] GB 3095-2012, Ambient air quality standard[S].

[15] 北京市生态环境局. 2021 北京市生态环境状况公报[EB/OL]. <http://sthj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/325831146/2022051016315449098.pdf>, 2022-09-01.

[16] 天津市生态环境局. 2021 天津市生态环境状况公报[EB/OL]. <https://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202206/W020220606518211382984.pdf>, 2022-09-01.

[17] Tianjin Ecology and Environment Bureau. 2021 Tianjin ecology and environment 2021[EB/OL]. <https://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202206/W020220606518211382984.pdf>, 2022-09-01.

[18] 河北省生态环境厅. 2021 河北省生态环境状况公报[EB/OL]. <http://hbepb.hebei.gov.cn/res/hbhjt/upload/file/>

- 20220606/c2dd5c5c31b04235a0ef1ed09c7e3daa.pdf, 2022-09-01.
- Department of Ecology and Environment of Hebei Province. 2021 Hebei Province ecology and environment condition statement [EB/OL]. <http://hbepeb.hebei.gov.cn/res/hbhjt/upload/file/20220606/c2dd5c5c31b04235a0ef1ed09c7e3daa.pdf>, 2022-09-01.
- [17] Zhou Y, Huang D W, Lang J L, *et al.* Improved estimation of rural residential coal emissions considering coal-stove combinations and combustion modes [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115558.
- [18] Zhou Y, Zi T, Lang J L, *et al.* Impact of rural residential coal combustion on air pollution in Shandong, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127517.
- [19] Meng W J, Zhong Q R, Chen Y L, *et al.* Energy and air pollution benefits of household fuel policies in Northern China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(34): 16773-16780.
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/W020170824378273815892.pdf>, 2022-09-01.
- [21] 中国国家发展和改革委员会. 关于印发北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021 年)的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm, 2022-09-01.
- [22] Shen G F, Ru M Y, Du W, *et al.* Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**, doi: 10.1038/s41467-019-11453-w.
- [23] Zhao B, Zheng H T, Wang S X, *et al.* Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005-2015 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(49): 12401-12406.
- [24] Biltsback K R, Baumgartner J, Cheeseman M, *et al.* Estimated aerosol health and radiative effects of the residential coal ban in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, **20**(11): 2332-2346.
- [25] 于森, 马秋红, 朱明月, 等. 农村散煤替代对 PM_{2.5} 污染影响及健康效益评估——以河南省为例 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(8): 3906-3916.
- Yu M, Ma Q H, Zhu M Y, *et al.* Evaluation for impact on PM_{2.5} pollution and healthy benefits of rural scattered coal replacement—a case study of Henan Province [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3906-3916.
- [26] 赵婉屹, 刘萍萍, 孙健, 等. 关中地区散煤源 PM_{2.5} 污染防治的健康经济效益评估 [J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(9): 2216-2224.
- Zhao W Y, Liu P P, Sun J, *et al.* Health and economic benefits of control of PM_{2.5} pollution from residential coal combustion in Guanzhong area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(9): 2216-2224.
- [27] 张翔, 戴瀚程, 靳雅娜, 等. 京津冀居民生活用煤“煤改电”政策的健康与经济效益评估 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(2): 367-376.
- Zhang X, Dai H C, Jin Y N, *et al.* Evaluation of health and economic benefits from “coal to electricity” policy in the residential sector in the Jing-Jin-Ji region [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55**(2): 367-376.
- [28] 闫祯, 金玲, 陈潇君, 等. 京津冀地区居民采暖“煤改电”的大气污染物减排潜力与健康效益评估 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(1): 95-103.
- Yan Z, Jin L, Chen X J, *et al.* Assessment of air pollutants emission reduction potential and health benefits for ‘residential heating coal changing to electricity’ in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(1): 95-103.
- [29] 张茹婷, 陈传敏, 吴华成, 等. 京津冀煤改电对 PM_{2.5} 浓度的影响 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(3): 1022-1031.
- Zhang R T, Chen C M, Wu H C, *et al.* Impact of the coal-to-electricity policy on PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 1022-1031.
- [30] 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.
- [31] Thao N N L, Pimonsree S, Prueksakorn K, *et al.* Public health and economic impact assessment of PM_{2.5} from open biomass burning over countries in mainland southeast Asia during the smog episode [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, **13**(6), doi: 10.1016/j.apr.2022.101418.
- [32] 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.
- [33] Xie R, Sabel C E, Lu X, *et al.* Long-term trend and spatial pattern of PM_{2.5} induced premature mortality in China [J]. *Environment International*, 2016, **97**: 180-186.
- [34] Liu M M, Huang Y N, Ma Z W, *et al.* Spatial and temporal trends in the mortality burden of air pollution in China: 2004-2012 [J]. *Environment International*, 2017, **98**: 75-81.
- [35] Zhao B, Wang S X, Ding D, *et al.* Nonlinear relationships between air pollutant emissions and PM_{2.5}-related health impacts in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **661**: 375-385.
- [36] Fang D, Wang Q G, Li H M, *et al.* Mortality effects assessment of ambient PM_{2.5}, pollution in the 74 leading cities of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569-570**: 1545-1552.
- [37] 吴文静, 杨晓翠, 姚明宏, 等. 京津冀地区长期 PM_{2.5} 暴露的死亡负担与经济损失评价 [J]. *中华流行病学杂志*, 2020, **41**(9): 1471-1476.
- Wu W J, Yang X C, Yao M H, *et al.* Assessment of mortality burden and economic loss attributed to long-term PM_{2.5} exposure in the Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2020, **41**(9): 1471-1476.
- [38] Archer-Nicholls S, Carter E, Kumar R, *et al.* The regional impacts of cooking and heating emissions on ambient air quality and disease burden in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 9416-9423.
- [39] Ji W J, Zhou B, Zhao B. Potential reductions in premature mortality attributable to PM_{2.5} by reducing indoor pollution: a model analysis for Beijing-Tianjin-Hebei of China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 260-271.
- [40] Li Y, Liao Q, Zhao X G, *et al.* Premature mortality attributable to PM_{2.5} pollution in China during 2008-2016: underlying causes and responses to emission reductions [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127925.
- [41] Apte J S, Marshall J D, Cohen A J, *et al.* Addressing global mortality from ambient PM_{2.5} [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(13): 8057-8066.
- [42] Wang Y, Shi L H, Lee M, *et al.* Long-term exposure to PM_{2.5} and mortality among older adults in the southeastern US [J].

- Epidemiology, 2017, **28**(2): 207-214.
- [43] Pappin A J, Christidis T, Pinault L L, *et al.* Examining the shape of the association between low levels of fine particulate matter and mortality across three cycles of the Canadian census health and environment cohort [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2019, **127**(10), doi: 10.1289/EHP5204.
- [44] Yin P, Brauer M, Cohen A, *et al.* Long-term fine particulate matter exposure and nonaccidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, **125**(11), doi: 10.1289/EHP1673.
- [45] Wang B, Xu D H, Jing Z H, *et al.* MECHANISMS IN ENDOCRINOLOGY: effect of long-term exposure to air pollution on type 2 diabetes mellitus risk: a systemic review and meta-analysis of cohort studies [J]. *European Journal of Endocrinology*, 2014, **171**(5): R173-R182.
- [46] Lu F, Xu D Q, Cheng Y B, *et al.* Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population [J]. *Environmental Research*, 2015, **136**: 196-204.
- [47] Stieb D M, Chen L, Eshoul M, *et al.* Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environmental Research*, 2012, **117**: 100-111.
- [48] 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.
- [49] 谢志祥, 秦耀辰, 郑智成, 等. 京津冀大气污染传输通道城市 PM_{2.5} 污染的死亡效应评估[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 843-852.
Xie Z X, Qin Y C, Zheng Z C, *et al.* Assessing the death effect of PM_{2.5} pollution in cities of atmospheric pollution transmission channel in the Beijing-Tianjin-Hebei district[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 843-852.
- [50] 吴华成, 张茹婷, 陈传敏, 等. 京津冀地区散煤燃烧大气污染物排放清单[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4547-4555.
Wu H C, Zhang R T, Chen C M, *et al.* Emission inventory of air pollutants from coal combustion in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4547-4555.
- [51] 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.
- [52] 杜艳君, 王倩, 张翼, 等. 2010 年北京市归因于大气 PM_{2.5} 污染的过早死亡研究[J]. *环境与健康杂志*, 2016, **33**(12): 1056-1060.
Du Y J, Wang Q, Zhang Y, *et al.* Premature mortality attributable to ambient PM_{2.5} pollution in 2010 in Beijing[J]. *Journal of Environment and Health*, 2016, **33**(12): 1056-1060.
- [53] 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.
- [54] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Estimated contributions of emissions controls, meteorological factors, population growth, and changes in baseline mortality to reductions in ambient PM_{2.5} and PM_{2.5}-related mortality in China, 2013- 2017 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2019, **127**(6), doi: 10.1289/EHP4157.
- [55] Chen H, Li L, Lei Y L, *et al.* Public health effect and its economics loss of PM_{2.5} pollution from coal consumption in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138973.
- [56] Maji K J, Ye W F, Arora M, *et al.* PM_{2.5}-related health and economic loss assessment for 338 Chinese cities[J]. *Environment International*, 2018, **121**(1): 392-403.
- [57] Yun X, Meng W J, Xu H R, *et al.* Coal is dirty, but where it is burned especially matters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(11): 7316-7326.
- [58] Wu D, Zheng H T, Li Q, *et al.* Toxic potency-adjusted control of air pollution for solid fuel combustion[J]. *Nature Energy*, 2022, **7**(2): 194-202.
- [59] Yang Y, Ruan Z L, Wang X J, *et al.* Short-term and long-term exposures to fine particulate matter constituents and health: a systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 874-882.
- [60] 张珊, 姜莹莹, 董文兰, 等. 2007-2016 年中国居民慢性非传染性疾病死亡水平与变化趋势[J]. *中国慢性病预防与控制*, 2018, **26**(11): 801-804, 809.
Zhang S, Jiang Y Y, Dong W L, *et al.* Mortality and trend of chronic non-communicable diseases in China from 2007 to 2016 [J]. *Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases*, 2018, **26**(11): 801-804, 809.
- [61] Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, *et al.* Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(38): 9592-9597.
- [62] 郭云, 蒋玉丹, 黄炳昭, 等. 我国大气 PM_{2.5} 及 O₃ 导致健康效益现状分析及未来 10 年预测[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(4): 1023-1032.
Guo Y, Jiang Y D, Huang B Z, *et al.* Health impact of PM_{2.5} and O₃ and forecasts for next 10 years in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(4): 1023-1032.
- [63] Liu Y, Zhao N Z, Vanos J K, *et al.* Revisiting the estimations of PM_{2.5}-attributable mortality with advancements in PM_{2.5} mapping and mortality statistics[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 499-507.

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)