

我国大气污染和气候变化协同治理的健康效益研究进展

郭昌胜^{1,2}, 高雅^{1,2}, 樊境朴^{1,2}, 袁欣^{1,2}, 吴荣山^{1,2*}, 徐建^{1,2}

1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012

2. 中国环境科学研究院, 环境健康风险评估与研究中心, 北京 100012

摘要: 大气污染和气候变化是全球普遍存在的环境健康问题, 也是我国面临的重大公共卫生挑战。近年来, 我国关于大气污染与气候变化的流行病学研究逐渐增加, 揭示了大气污染的短期或长期暴露均会对人体产生不良的健康效应。现阶段, 随着我国碳达峰、碳中和的重大决策部署与落实, 未来将会对改善空气质量和减缓气候变化产生积极作用, 并且对人群健康产生深远影响。在此背景下, 本文回顾了我国大气污染和气候变化的治理进程及其对人群健康效益研究。结果表明: 近年来, 我国在大气污染防治和气候变化应对方面均取得了显著成效; 虽然流行病学研究一致表明, 大气污染和气候变化严重威胁着我国人群的健康安全, 但是通过改善空气质量和缓解气候变化也将带来健康收益, 尤其是二者的协同治理具有显著的健康效益。研究显示, 随着“双碳”目标的提出, 对我国空气质量持续改善与气候变化协同应对提出了更高的要求, 未来应积极考虑深入推进大气污染防治和气候变化协同治理来有效地保护人群健康。

关键词: 大气污染; 气候变化; 人群健康; 协同效益

中图分类号: X513 文章编号: 1001-6929(2023)11-2040-10

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.09.09

Research Progress on Health Benefits of Collaborative Management of Air Pollution and Climate Change in China

GUO Changsheng^{1,2}, GAO Ya^{1,2}, FAN Jingpu^{1,2}, YUAN Xin^{1,2}, WU Rongshan^{1,2*}, XU Jian^{1,2}

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. Center for Environmental Health Risk Assessment and Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Air pollution and climate change are the two main environmental health issues in the world and are also major public health challenges in China. In recent years, the epidemiological research on air pollution and climate change has gradually increased in China, revealing the health effects of short-term and long-term exposure to air pollution. The deployment and implementation of major strategic decisions to achieve carbon peak and carbon neutrality will have a positive effect on improving air quality and mitigating the negative effects of climate change, and will also have a profound impact on human health in the future. In this context, the paper reviewed the governance process of air pollution and climate change in China and its epidemiological health effect and benefits on human health. In summary, the results show that China has achieved remarkable results in air pollution prevention and climate change in recent years. Although epidemiological studies have consistently shown that air pollution and climate change seriously threaten health, improving air quality and mitigating climate change will also bring health benefits, especially the collaborative governance of the two has significant health benefits. However, the achieving carbon peaking and carbon neutrality goals also puts forward more stringent requirements for improvement of air quality with coordinated response to climate change in China. We should actively consider how to promote coordinated management of air pollution and climate change to effectively protect human health in the future.

Keywords: air pollution; climate change; human health; co-benefit

收稿日期: 2023-05-20 修订日期: 2023-08-04

作者简介: 郭昌胜(1981-), 男, 河南开封人, 研究员, 博士, 主要从事污染物风险评价与决策支持研究, guocs@craes.org.cn.

* 责任作者, 吴荣山(1992-), 男, 福建莆田人, 助理研究员, 博士, 主要从事环境与健康研究, wu.rongshan@craes.org.cn

基金项目: 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室开放基金项目 (No.2022KFZD02)

Supported by Open Fund of State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, China (No.2022KFZD02)

大气污染和气候变化是全球普遍存在的环境健康问题。研究^[1]表明,大气污染的短期或长期暴露均会对人体产生不良的健康效应,尤其是与心血管系统和呼吸系统疾病的发病率、死亡率存在关联。据世界卫生组织(WHO)估计,全球每年约有700万人由于大气污染暴露而过早死亡,大气污染已成为世界上造成过早死亡的第四大危险因素^[2]。气候变化的健康影响多与极端天气事件有关,如热浪、飓风和洪水等可能导致伤害、疾病和死亡^[3]。《中国气候变化蓝皮书(2022)》^[4]指出,中国升温速率明显高于同期全球平均水平,人类活动所致二氧化碳(CO₂)等温室气体排放量不断增加是造成全球变暖的重要原因。显然,大气污染和气候变化仍是我国重大的公共卫生威胁,未来我国在大气污染治理和气候变化应对方面的工作任重道远。

在气候变化的大背景下,我国提出力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的目标,即“双碳”目标。围绕这两个目标,我国近些年正积极采取大气污染和气候变化协同应对的减排战略,逐步实现减污降碳的双受益。研究^[5-7]显示,空气质量和气候变化的改善将带来了巨大的健康效益,尤其是降低了疾病的死亡和发生风险,并避免了人群的过早死亡。因此,随着污染物减排和气象条件的改善,将会对公共卫生和人群健康产生深远影响。为此,该研究将回

顾我国大气污染和气候变化的协同治理进程及其对人群健康影响和效益研究,重点介绍大气污染和气候变化的治理成效以及二者对健康影响及其协同治理的健康效益,以期为后续我国开展大气污染与气候变化协同治理提供思路和建议。

1 我国大气污染和气候变化的治理成效

随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等一系列政策措施的实施,我国空气质量明显改善。“十二五”以来我国采取了一系列应对气候变化的政策和行动,在应对气候变化方面取得积极成效。“双碳”目标的提出为空气质量持续改善注入了全新动能,为全球气候治理贡献了中国力量。

1.1 大气污染防治成效

过去10年,我国为解决以大气颗粒物(PM_{2.5})污染为特征的区域性突出大气环境问题,在保持经济持续增长的同时,坚决打好“蓝天保卫战”,实现了全国空气质量快速改善(见图1)。2012年发布修订版《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),将PM_{2.5}、可吸入颗粒物(PM₁₀)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)和臭氧(O₃)等六项主要污染物纳入监测和发布范围,2013年构建起一个从74个城市496个监测站点到“十四五”阶段的338个地级及以上城市共1734个监测站点的全国空气质量监测网络。2013年9月国务院出台了《大气污染防治行动计划》。

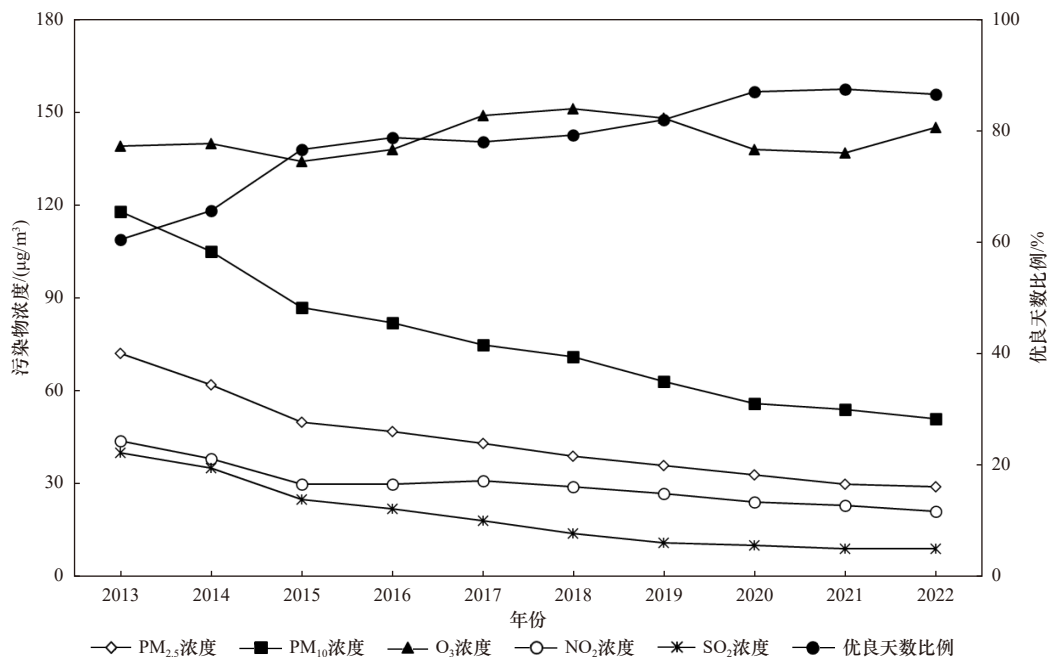


图 1 2013—2022 年我国常规污染物年均浓度和优良天数比例变化趋势

Fig.1 Trend of annual average concentration of air pollutants and the percentage of days with good air quality in China from 2013 to 2022

经过5年努力,到2017年全国空气质量总体改善,空气质量阶段性改善目标全面且超额完成,创造出大气污染防治的中国模式.随着进一步深入打好污染防治攻坚战推进,截至2020年全国 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $33\mu g/m^3$,首次降至GB 3095—2012二级标准限值($35\mu g/m^3$)以内;到2022年,全国 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $29\mu g/m^3$,首次降至 $30\mu g/m^3$ 以内,实现近10年来连续下降.

2013年以来,北京市、上海市、广州市、京津冀及周边地区、长三角地区、珠三角地区空气质量也呈显著下降趋势(见图2).其中,2013—2022年,北京市以及京津冀及周边地区的 $PM_{2.5}$ 浓度分别从89和

$106\mu g/m^3$ 降至30和 $44\mu g/m^3$.但 O_3 污染问题存在加重的趋势,2022年全国地级及以上城市 O_3 日最大8h平均值第90百分位数浓度为 $145\mu g/m^3$,相比2021年($137\mu g/m^3$)上升了5.8%;北京市、上海市、广州市、京津冀及周边地区、长三角地区、珠三角地区 O_3 污染形势依然严峻,均超过我国GB 3095—2012二级标准限值($160\mu g/m^3$).总体来看,我国在实现大气污染治理进程中,虽然 $PM_{2.5}$ 浓度呈逐年下降趋势,但局部地区污染形势依旧严峻,多地 $PM_{2.5}$ 浓度不降反升;此外 O_3 浓度在大部分城市呈上升趋势,提示实现 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染的协同治理是现阶段所面临的新挑战,我国大气污染治理工作仍任重道远.

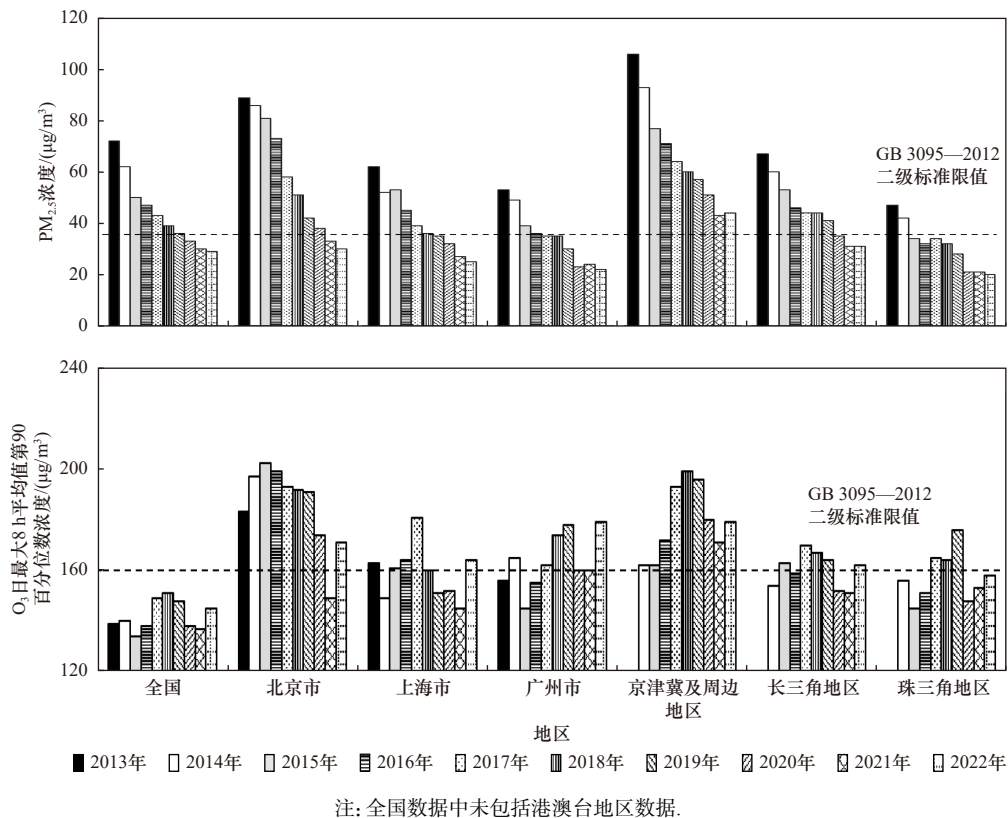


图2 2013—2022年全国及重点城市和区域 $PM_{2.5}$ 浓度和 O_3 日最大8h平均值第90百分位数的变化趋势

Fig.2 Trend of annual average concentration of $PM_{2.5}$ and the 90th percentile of the daily 8-hour maximum concentration of O_3 in China and the key cities and regions from 2013 to 2022

1.2 气候变化应对成效

为应对因温室气体排放而引起的气候变化,我国近年来采取一系列应对气候变化战略、行动措施等(见表1).2007年,我国推出了《中国应对气候变化国家方案》,这是我国第一部应对气候变化的政策性文件,全面阐述了2010年前我国应对气候变化的对策;2013年我国发布《国家适应气候变化战略》;2014年出台的《国家应对气候变化规划(2014—2020年)》提

出,坚持减缓和适应气候变化同步推动原则;2020年在第75届联合国大会上我国正式提出“双碳”目标.为落实“双碳”目标,国家层面成立了碳达峰碳中和工作领导小组,发布《2030年前碳达峰行动方案》,构建起碳达峰碳中和“1+N”政策体系;2022年发布《国家适应气候变化战略2035》,首次将“减少气候变化的健康风险”纳入“健康中国”行动的工作重点^[8],形成了全社会扎实推进碳达峰碳中和、积极应对气候

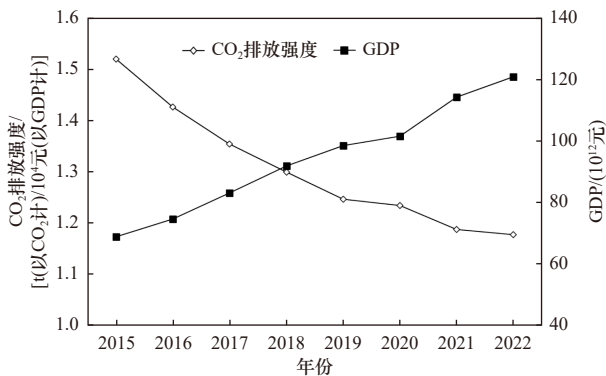
表 1 我国气候变化应对的政策与行动概述

Table 1 Overview of policies and actions to cope with climate change in China

项目	年份	政策名称或行动方案
国家应对政策	2007	《中国应对气候变化国家方案》
	2013	《国家适应气候变化战略》
	2014	《国家应对气候变化规划(2014—2020年)》
	2016	《城市适应气候变化行动计划》
	2021	《碳排放权交易管理办法(试行)》
	2021	《2030年前碳达峰行动方案》
国家应对行动	2022	《国家适应气候变化战略2035》
	2007	《气候变化国家评估报告》
	2008	《中国应对气候变化的政策与行动》
	2009	将单位国内生产总值二氧化碳排放(碳排放强度)下降幅度作为约束性指标纳入国民经济和社会发展规划纲要
	2015	签署《巴黎协定》
	2017	筛选适应气候变化的28个试点城市
	2020	提出力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和
	2021	加快构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系
	2021	将“2025年单位国内生产总值(GDP)CO ₂ 排放较2020年降低18%”作为“十四五”规划和2035年远景目标纲要约束性指标
	2021	《中国应对气候变化的政策与行动》

变化的浓厚氛围。

我国在保持经济稳定增长的同时,为应对气候变化在绿色低碳转型方面取得显著成效(见图3)。2015—2022年,我国经济发展与减污降碳协同效应凸显,CO₂排放强度持续下降,2020年我国CO₂排放强度较2015年下降18.8%,2022年CO₂排放强度比2021年降低0.8%。此外,能源消费结构向绿色低碳加速转化,煤炭消费比重从2015年的63.8%降至2022年的56.2%、清洁能源消费比重从2015年的18.0%升



注:数据来源于《中国应对气候变化的政策与行动》^[9]。

图3 2015—2022年我国CO₂排放强度(估算)和GDP变化情况

Fig.3 Carbondioxide emission intensity (estimated) and GDP in China during 2015-2022

至2022年的25.9%^[9]。然而,尽管现阶段我国政策支持气候变化应对也取得显著成效,然而我国地表年均气温仍呈显著上升趋势,极端强降水事件呈增多趋势,未来在适应气候变化工作方面仍将面临诸多挑战。

1.3 减污降碳协同治理实践

为应对大气污染和气候变化,我国正积极制定大气污染和气候变化的国家战略,将实现生态环境根本好转和“双碳”目标纳入国家生态文明建设两大战略任务,并将协同推进减污降碳写入国民经济和社会发展“十四五”规划。协同推进减污降碳是实现“双碳”目标的重要抓手,对推动大气污染物协同减排及空气质量达标具有显著作用^[10]。在2013—2017年,我国共实现SO₂减排2264.8×10⁴t,NO₂减排656.1×10⁴t,烟尘减排469.2×10⁴t,并同时实现CO₂减排14.62×10⁸t,具有显著的减污降碳协同效应^[11]。Shi等^[12]发现,从2013年《大气污染防治行动计划》到2020年以来我国清洁空气行动的实施,实现CO₂累计净协同减排量为24.3×10⁸t,揭示协同减排带来了可观的气候效益。据测算,我国在实现2030年碳达峰目标后可使全国主要污染物排放下降1/3以上,也将促使PM_{2.5}年均浓度和O₃浓度年评价值分别降至25和130μg/m³左右,在2060年全国PM_{2.5}年均浓度也将下降至10μg/m³左右,并推动O₃浓度年评价值降至100μg/m³^[13-14]。届时将有半数以上城市的年均空气质量可达到WHO 2005版的《全球空气质量指南》(AQG)要求,但随着2021年新版AQG的发布,对PM_{2.5}年均目标值由10μg/m³加严至5μg/m³,也为我国减污降碳协同改善路径下空气质量改善提出了更严格的要求。

2 我国大气污染和气候变化的效益研究进展

流行病学研究^[15]一致表明,大气污染和极端气候变化与包括呼吸系统和心血管疾病在内的多种疾病存在相关性,严重威胁着我国人群的健康安全;在“双碳”目标背景下,通过大气污染与气候变化的协同治理措施,逐步实现我国减污降碳的双受益,也将对人群健康产生巨大而深远的影响。

2.1 大气污染的健康效应研究

大气污染与健康的关系一直是国内外的研究热点^[16]。其中,大气PM_{2.5}、O₃和NO₂是现阶段危害我国人群健康的重要污染物。近年来,随着我国空气质量监测网络和健康数据的日益丰富,我国在大气污染与人群健康研究领域中取得了丰硕的成果,对促进大气污染防控和疾病防治起到了重要作用。

2.1.1 大气污染的健康危害

大量的流行病学研究证实了大气污染对中国人

群急性和慢性健康的危害. 中国疾病预防控制中心牵头的“我国大气污染的急性健康风险研究”系统探讨了我国多城市短期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 NO_2 等常规污染物以及 $\text{PM}_{2.5}$ 的关键组分对健康成人、儿童、心肺疾病患者的急性健康影响, 从多个角度回答了我国大气污染对人群健康的急性影响^[17-19]. 覆盖我国 272 个城市的多中心研究^[20-23] 发现, 短期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 等污染物均可导致居民非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡风险的增加, 并获取了具有全国代表性的暴露反应关系曲线. 近年来, 越来越多探索大气污染对我国人群健康影响的队列研究不断涌现. Yin 等^[24] 基于中国近 19 万成年男性的 15 年随访队列开展了 $\text{PM}_{2.5}$ 的长期暴露对居民死亡影响的流行病学研究, 结果显示, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度每升高 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 对应的非意外总死亡风险增加 9%, 对应的慢性阻塞性肺疾病和肺癌的死亡风险均增加 12%. 我国动脉粥样硬化心血管疾病风险预测队列^[25-28] 发现, 长期大气污染暴露会增加心血管疾病、脑卒中、高血压和糖尿病的发病风险. Liu 等^[29] 基于中国慢性病前瞻性队列共计 50 万人的人群样本研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露对心血管疾病发病率的显著危害.

此外, 越来越多的证据表明, 短期或长期暴露于大气污染可能损害孕产妇^[30] 和儿童^[31] 健康, 降低生殖繁殖力^[32] 和增加多种不良分娩结局^[33] 的发生风险, 以及与肺功能下降^[34]、血压升高^[35]、认知功能改变^[36] 等亚临床结局关联. 随着对大气污染的日益关注, 更多研究也从死亡和发病的临床结局聚焦到表观遗传学以及代谢组学等相关指标^[37-38], 从更精细层面评估大气污染对人体健康的急性危害, 更好地了解到大气污染对健康的影响以及为致病机制研究提供支持. 总体而言, 随着研究的深入, 有足够的证据揭示了大气污染对我国人群健康影响及人群防治的本土化流行病学证据, 未来需应用更加精细化的污染物暴露和结局指标以及更新高质量的队列研究结果, 为我国相关政策和标准的制定提供科学依据.

2.1.2 空气质量改善的健康效益

已有大量研究证实大气污染与人群健康的显著相关性, 且由此导致的疾病负担对人群健康提出巨大挑战. 不过, 得益于近年来我国大气污染水平的持续下降, 以准自然实验研究和随机对照试验等方法评价清洁空气相关政策或大型活动下空气质量改善给居民带来的健康效益, 为评估空气质量改善的人群健康影响提供了有效的支持^[39-41]. Rich 等^[42] 利用北京奥运会期间对 125 名健康成年人在奥运会前中后 3 个阶

段的机体健康指标监测发现, 奥运会期间空气污染水平下降与机体多种炎症和心血管健康指标改善显著相关. Huang 等^[43] 对《大气污染防治行动计划》实施期间 (2013—2017 年) 74 个重点城市空气质量改善及相应的健康效益进行了评估显示, 大气污染相关死亡人数减少了 4.7 万, 寿命损失年减少了 71 万年. Xue 等^[44] 基于中国健康与养老追踪调查发现, 自《大气污染防治行动计划》初步实施后, 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降与中老年人群中医疗支出减少、抑郁风险降低和肺功能改善均显著相关, 有效降低了疾病负担. 此外, 对特定来源的大气颗粒物的管控措施可以带来较好的健康效益, 赵婉屹等^[45] 基于 2020 年冬季实地调研信息和相关统计数据, 评价了 2017—2020 年关中地区 7 市 (区) 的散煤治理成效, 发现研究地区散煤治理使得 $\text{PM}_{2.5}$ 减排量超过 $0.5 \times 10^4 \text{ t}$, 所带来的健康总受益人数为 10 662 人, 共可获得约 $1\ 411.65 \times 10^6$ 元的经济效益.

除了宏观层面减少大气污染物排放外, 以口罩干预、空气净化器干预等个体层面的干预措施为评估空气质量改善的健康效益提供更为可靠的证据支持. Wang 等^[46] 在对 22 名健康年轻人进行的一项随机双盲交叉试验中发现, 急性 O_3 暴露会引起机体应激激素、全身炎症、氧化应激和能量代谢的改变. 一篇有关使用室内空气净化器和口罩对心肺健康影响的系统综述^[47] 中指出, 使用空气净化器会促进机体心血管健康的一些有益变化. 此外, 有研究评估在新型冠状病毒感染 (COVID-19) 疫情流行期间采取相应措施引起的大气污染排放短期内下降对人群的健康效益. 研究显示: 我国 278 个城市的室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 COVID-19 疫情期间下降了 $1.22 \sim 7.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 可避免过早死亡 $5.4 \times 10^4 \sim 50.8 \times 10^4$ 人^[48]; 长三角地区在疫情响应阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相较于疫情前下降了 22.9%~54.0%, 由此避免的早死人数约为 4.2×10^4 人^[49]; Ye 等^[50] 评估了全国 367 个城市在 COVID-19 疫情期间空气污染改善的健康效益及相关经济效益, 发现与未发生疫情的情景相比, 可避免 215~4 711 例的死亡人数, 产生的经济效益为 $0.2 \times 10^8 \sim 12.2 \times 10^8$ 美元. 综上, 国家清洁空气相关政策和个体干预行为能带来一系列健康结果的短期有利改变, 可为深入探索大气污染的致病机制提供可信的研究证据. 不过此类研究的样本量普遍较少, 缺少外推到人群的适用性, 且较少评估人群的长期健康益处, 对于空气质量改善下人群长期健康效益仍有待确定.

2.2 气候变化的健康效应研究

气候变化可通过一系列复杂的过程影响人类健康,进而导致传染病和非传染病等健康风险增加^[51]。未来在极端天气事件发生频率和强度增加的背景下,气候变化同大气污染成为影响人类健康的主要威胁之一。通过减缓气候变化的行动力度,从根源上减少气候变化,是应对气候变化健康风险的根本途径。

2.2.1 历史和现状的气候变化相关健康效应

近年来,我国热浪发生频率和强度均明显增加,导致多种疾病的发病与死亡风险增加。Chen 等^[52]发现,1979 年以来热浪造成的死亡人数从 1980 年代的 3 679 人/a 升至 2010 年代的 15 500 人/a。Yin 等^[53]对 2013—2015 年 272 个城市的研究发现,热浪可能会显著增加全肺和心肺疾病的死亡风险,导致居民死亡率增加 7%。极端寒潮天气所造成的健康风险也不容忽视。一项基于全国 272 个城市人群死因监测数据的研究^[54]发现,低温导致人群死亡的风险比高温的风险更高,所引起的非意外死亡风险可增加 39%。此外,极端天气事件与脑卒中^[55]、哮喘^[56]、精神疾病^[57]以及早产^[58]等不良出生结局的发病风险均存在明显关联,对人群健康造成持续性的危害。

气候变化也会通过影响传染病的传播对人群造成健康影响。Yi 等^[59]综述了我国气候变异与传染病传播的关系发现,温度每上升 1 °C 可能导致华南地区杆菌性痢疾发病率增加 3.6%~14.8%,温度每升高 1 °C、相对湿度每上升 1%、日照每增加 1 h,导致每月疟疾病例分别增加 0.90%、3.99%、0.68%。Ding 等^[60]对广西壮族自治区 2005—2012 年洪水敏感传染病的分析发现,洪水可导致甲型流感、结核病、乙型脑炎等 11 种传染病发病率显著上升。我国东南沿海地区的研究^[61]显示,极端温度和降雨量与登革热疫情呈较强的正相关,极端降雨后登革热的发病风险上升 50.5%。

气候变化也能通过影响粮食短缺和生态系统稳定性等方式间接影响人群健康,并使人对疾病的易感性增加。Xu 等^[62]对长江流域 1990—2015 年气候变异对作物生产影响的研究发现,作物生长季的总降水量会增加作物产量,而作物生长季的平均温度与作物产量之间存在明显的负相关。一项湖南省的研究^[63]显示,年均气温升高以及年均降水量增加会减少稻谷、小麦的气候产量,年均日照时数对低产区稻谷、小麦、玉米的气候产量均有显著正效应。Liu 等^[64]综述了我国气候变化与作物产量的关系发现,温度每上升 1 °C,可能导致全国范围内作物减产 2.58%。

2.2.2 未来不同情景下的气候变化相关健康效应预测

随着气候变化对全球经济发展和人民健康安全造成的风险将日益增加,将全球温升控制在 2 °C 以内,并努力达到 1.5 °C 的控制目标已成为国际社会的广泛共识。通过设定未来不同温室气体排放路径和升温情景预测气候变化对人群的健康影响,为评估缓解气候变化带来的健康效益提供证据支持。其中代表性浓度路径 (RCPs) 以及共享社会经济路径 (SSPs) 情景是用来开展未来气候变化下情景预测的主要方法,主要依据一系列综合的浓缩和排放情景描述未来人口、社会经济、能源消耗以及土地利用等方面发生变化时,温室气体、气溶胶和大气成分等浓度的改变。

Chen 等^[65]估计未来气候变化情景下热相关死亡风险的研究发现,与 1986—2005 年基线期相比,到 21 世纪末热浪发生频率在高排放情景 (RCP8.5, 到 2100 年辐射强迫水平为 8.5 W/m²) 和低排放情景 (RCP2.6, 到 2100 年辐射强迫水平为 2.6 W/m²) 下分别增加了 10.3 和 2.6 倍,热浪相关年死亡人数预计分别增加 6.7 和 1.9 倍。另一项全国范围的研究^[66]使用 28 个全球气候模型预测了中国 161 个区/县未来高温造成的超额死亡率,结果发现,在高排放情景 (RCP8.5) 下,与热相关的超额死亡率预计从 2010 年代的 1.9% 增加至 2030 年代的 2.4% 和 2090 年代的 5.5%。Li 等^[67]预估我国有登革热潜在风险的地区将在未来扩大,而且在高排放情景 (RCP8.5) 下水文气象变化将显著影响我国中低纬度地区,特别是沿海地区的登革热风险;预计到 2100 年,登革热年均超额风险在西北地区为 12.56%、华南地区为 17.62%。然而,不同情景下气候变化的健康风险预测仍存在诸多不确定性,如未来人口结构改变、对气候变化的易感性以及与其他环境因素的交互作用等均会干扰结果的可靠性,未来仍需不断探索更为精准的情景风险预测评估。

2.3 大气污染与气候变化协同治理的健康效益研究

2.3.1 大气污染与气候变化对健康影响的交互作用

大气污染与气象因素在环境中并非孤立存在。研究^[68]显示,大气 PM_{2.5} 可以吸收热量,提高地表温度,而其他次级颗粒物,如硫酸盐颗粒物可以降低气候温度。此外,大气污染物的形成、积累和扩散等与多种气象条件密切相关,如温度、湿度、风向等会对污染物的排放、运输、扩散、转化和沉积产生影响,通过改变颗粒物的扩散,加剧次级污染物的形成,进而使空气质量下降,加剧大气污染。在全球气候变化背景下,随着大气污染和气候变化之间的交互作用在不断增加,二者联合暴露可能对人体健康的影响综合而复杂。2013—2018 年北京市、天津市、河北省及周边地

区的一项研究^[69]显示,在相对较高温度条件下, O_3 急性心肺疾病死亡效应增强,尤其在极端高温和极端低温条件下,疾病的死亡风险进一步提升.一项学龄前儿童回顾性队列研究^[70]显示,温度和 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 暴露对男孩和幼儿哮喘风险均有显著正向相互作用. Wu等^[71]在对大气污染与过敏性鼻炎门诊就诊之间的关联分析中发现,大气污染对过敏性鼻炎门诊患者的影响在低温和高湿条件下显著增加,提示大气污染与温湿度的协同风险效应.为此,大气污染与气候变化存在交互作用规律,重视大气污染和气候变化的协同治理是确定保护人群健康措施的重要环节.

2.3.2 大气污染与气候变化协同治理的健康效益

在“双碳”目标背景下,“温室气体与空气污染物的协同治理”的减污降碳路径为评估大气污染和气候变化协同治理的健康效益提供新的切入点. Tang等^[72]首次定量分析了中国提前实现碳排放达峰的潜在环境健康效益,发现在绿色发展路径(SSP1)和全球 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 控制目标下,我国可在2030年和2050年分别避免约 11.8×10^4 和 61.4×10^4 人的 $PM_{2.5}$ 归因死亡;在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 控制目标下,我国到2050年的健康协同效益有望抵消气候减排成本,并带来 $3\ 930\times 10^8\sim 30\ 170\times 10^8$ 美元的净收益. Zhang等^[73]发现在可再生能源主导的碳中和路径下,空气质量的改善将减少居民的预期寿命损失,预计到2060年我国能够避免的人均寿命损失为0.88~2.80岁,揭示碳中和路径将会对当代和未来中国居民的健康产生非常深远的影响. Liu等^[74]通过耦合大气化学模型和健康效应模型开展对各类减污降碳路径下未来中国空气质量变化和影响的全面评估,提示在最严格的2个减污降碳协同情景($2\text{ }^\circ\text{C}$ 温升叠加强化末端治理、 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 温升叠加强化末端治理)能够显著减少2030—2050年的 $PM_{2.5}$ 污染健康损失,揭示了减污降碳协同是降低中国人群健康损失的必由之路. Yang等^[75]采用能源经济模型、空气质量模型和浓度响应模型相结合的综合框架,评估了减污降碳协同作用下对空气质量和人类健康的益处,提示在最严格的方案中,全国范围内与 $PM_{2.5}$ 和 O_3 相关的死亡率预计将下降23%,即 28.9×10^4 人(95%置信区间: $22\times 10^4\sim 36\times 10^4$ 人). 综上,实施大气污染防治,协同治理气候变化能够带来巨大的健康效益,未来在实现碳中和目标的过程中,仍需加强以健康驱动的大气污染与气候变化协同治理,以保护人群健康为目的.

3 展望

基于以上的文献综述发现,我国在过去10年中,

大气污染防治和气候变化应对取得了显著成效,有关大气污染和气候变化与我国人群健康的流行病学研究一直处于增长趋势,在证明大气污染和极端气候变化与诸多健康结局提供了足够令人信服的证据,且通过行之有效的空气质量改善和气候变化缓解措施将有力地促进人群健康. 未来在“双碳”目标下,我国应继续深入开展减污降碳协同治理,促使生态环境根本好转和缓解气候变化,将大气污染和气候变化协同治理作为未来环境健康领域的工作重点. 然而,尽管现阶段大气污染和气候变化与人群健康研究取得了进展,但仍存在以下局限性:①我国大气污染的急性健康效应研究多以空气质量监测站点的污染物数据与疾病死亡和发病为结局的关联性分析,尚缺乏更精细化的污染物暴露组学技术应用研究;②我国大气污染慢性健康队列研究仍处于发展阶段,多中心、大样本的前瞻性队列研究成果尚在探索阶段,缺乏高质量大气污染健康危害因果推断证据;③我国气候变化的健康研究尚在探索阶段,对于未来情景模拟研究仍存在诸多不确定性;④此外,大气污染和气候变化复合环境因素对人群健康影响的研究不足,缺乏大气污染和气候变化的交互作用规律以及以保护人群健康为目的的大气污染与气候变化协同治理的健康影响研究.

鉴于此,提出以下研究展望:①为更好地了解大气污染和气候变化对健康的影响,应将流行病学、毒理学和环境科学等多科学交叉融合,建立涵盖大气污染物、气象因素与全疾病谱的暴露反应关系的数据库,更好地探究大气污染和气候变化影响人类健康的机制;②鉴于大气污染与气候变化是由多因素共同作用导致的,未来应开展气候变化与大气污染等多因素复合暴露的健康风险研究,运用更加精细化的暴露测量技术和多组学方法,以探讨多因素共同作用下对人类健康的影响;③为更好地了解大气污染和气候变化的健康效应,建议增强针对性的队列研究,以识别气候敏感疾病和脆弱人群,评估大气污染和气候变化的健康风险,解析大气污染和气候变化与健康效应之间可能的因果关联,为健康风险评估标准提供科学依据;④由于大气污染和气候变化的复杂性和多因素性,应厘清我国未来不同路径下污染物排放与气候变化的时空变化规律,以健康为出发点,加强评估“双碳”目标下适宜我国实际情况的大气污染及气候变化的协同治理路径对人群的健康效益,从而更加系统地保护人群健康.

参考文献(References):

[1] DI Q, DAI L Z, WANG Y, et al. Association of short-term exposure

- to air pollution with mortality in older adults[J].*JAMA*,2017,318(24):2446-2456.
- [2] GBD 2019 Risk Factors Collaborators.Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories,1990-2019:a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J].*Lancet*,2020,396(10258):1223-1249.
- [3] 黄存瑞,刘起勇.IPCC AR6 报告解读:气候变化与人类健康 [J].*气候变化研究进展*,2022,18(4):442-451.
HUANG C R,LIU Q Y.Interpretation of IPCC AR6 on climate change and human health[J].*Climate Change Research*,2022,18(4):442-451.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府.中国气象局发布《中国气候变化蓝皮书(2022)》[EB/OL].北京:中国气象局,(2022-08-03)[2023-06-22].https://www.gov.cn/xinwen/2022-08/10/content_5704792.htm.
- [5] 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.
- [6] 施小明.碳达峰碳中和背景下推进空气污染和气候变化与人群健康研究 [J].*中华疾病控制杂志*,2021,25(10):1117-1119.
SHI X M.Promoting research on air pollution,climate change and population health under the goal of carbon neutrality and at the peak carbon dioxide emissions[J].*Chinese Journal of Disease Control & Prevention*,2021,25(10):1117-1119.
- [7] 刘聪,陈仁杰,阚海东.“双碳”背景下的空气污染和气候变化流行病学研究进展与展望 [J].*中华流行病学杂志*,2023,44(3):353-359.
LIU C,CHEN R J,KAN H D.Progress and future perspective of epidemiological research of air pollution and climate change in the context of achieving carbon peaking and carbon neutrality goals[J].*Chinese Journal of Epidemiology*,2023,44(3):353-359.
- [8] 周泽宇,曹颖.《国家适应气候变化战略 2035》解析与思考 [J].*环境保护*,2022,50(15):42-46.
ZHOU Z Y,CAO Y.Analysis and thinking of national climate change adaptation strategy 2035[J].*Environmental Protection*,2022,50(15):42-46.
- [9] 国务院新闻办公室.中国应对气候变化的政策与行动 [EB/OL].北京:中华人民共和国国务院新闻办公室,(2021-10-27)[2023-06-21].<http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/44689/47315/index.htm>.
- [10] 徐北瑶,王体健,李树,等.“双碳”目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估 [J].*科学通报*,2022,67(8):784-794.
XU B Y,WANG T J,LI S,et al.Assessment of the impact of ‘dual-carbon’ goal on future changes in air pollution and climate in China[J].*Chinese Science Bulletin*,2022,67(8):784-794.
- [11] 高庆先,高文欧,马占云,等.大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用 [J].*气候变化研究进展*,2021,17(3):268-278.
GAO Q X,GAO W O,MA Z Y,et al.The synergy effect assessment method and its application for air pollutants and greenhouse gases reduction[J].*Climate Change Research*,2021,17(3):268-278.
- [12] SHI Q R,ZHENG B,ZHENG Y X,et al.Co-benefits of CO₂ emission reduction from China’s clean air actions between 2013-2020[J].*Nature Communications*,2022,13:5061.
- [13] CHENG J,TONG D,ZHANG Q,et al.Pathways of China’s PM_{2.5} air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality[J].*National Science Review*,2021,8(12):nwab078.
- [14] SHI X R,ZHENG Y X,LEI Y,et al.Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China[J].*Science of the Total Environment*,2021,795:148784.
- [15] 施小明.空气污染、气候变化与健康:从证据到行动 [J].*中华预防医学杂志*,2019,53(1):1-3.
SHI X M.Air pollution,climate change and health:from evidence to action[J].*Chinese Journal of Preventive Medicine*,2019,53(1):1-3.
- [16] 阚海东,施小明.我国大气污染与人群健康关系研究进展 [J].*中华预防医学杂志*,2019,53(1):4-9.
KAN H D,SHI X M.Research progress of ambient air pollution and human health in China[J].*Chinese Journal of Preventive Medicine*,2019,53(1):4-9.
- [17] CHEN J Y,ZENG J,SHI C L,et al.Associations between short-term exposure to gaseous pollutants and pulmonary heart disease-related mortality among elderly people in Chengdu,China[J].*Environmental Health*,2019,18(1):1-10.
- [18] NIU H T,YU T,LI X X,et al.Exposure response relationship of acute effects of air pollution on respiratory diseases:China,2013-2018[J].*China CDC Weekly*,2021,3(45):943-947.
- [19] LIU F C,LIN Z N,WANG X Y,et al.Impacts of PM_{2.5} on ambulatory blood pressure monitoring indicators attenuated by blood pressure control status and treatment:two cities and two municipalities,China,2017-2019[J].*China CDC Weekly*,2021,3(45):948-953.
- [20] CHEN R J,YIN P,MENG X A,et al.Fine particulate air pollution and daily mortality:a nationwide analysis in 272 Chinese cities[J].*American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*,2017,196(1):73-81.
- [21] YIN P,CHEN R J,WANG L J,et al.Ambient ozone pollution and daily mortality:a nationwide study in 272 Chinese cities[J].*Environmental Health Perspectives*,2017,125(11):117006.
- [22] CHEN R J,YIN P,MENG X,et al.Associations between ambient nitrogen dioxide and daily cause-specific mortality:evidence from 272 Chinese cities[J].*Epidemiology*,2018,29(4):482-489.
- [23] WANG L J,LIU C,MENG X,et al.Associations between short-term exposure to ambient sulfur dioxide and increased cause-specific mortality in 272 Chinese cities[J].*Environment International*,2018,117:33-39.
- [24] 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):117002.

- [25] HUANG K Y,YANG X L,LIANG F C,et al.Long-term exposure to fine particulate matter and hypertension incidence in China[J]. *Hypertension*,2019,73(6):1195-1201.
- [26] HUANG K Y,LIANG F C,YANG X L,et al.Long term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of stroke: prospective cohort study from the China-PAR project[J].*BMJ*, 2019,367:l6720.
- [27] LIANG F C,YANG X L,LIU F C,et al.Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of diabetes in China: a cohort study[J].*Environment International*,2019,126:568-575.
- [28] LIANG F C,LIU F C,HUANG K Y,et al.Long-term exposure to fine particulate matter and cardiovascular disease in China[J]. *Journal of the American College of Cardiology*,2020,75(7):707-717.
- [29] LIU C,CHAN K H,LV J,et al.Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of major cardiovascular diseases:a prospective study of 0.5 million adults in China[J].*Environmental Science & Technology*,2022,56(18):13200-13211.
- [30] ZHANG Y,LI J X,LIAO J Q,et al.Impacts of ambient fine particulate matter on blood pressure pattern and hypertensive disorders of pregnancy[J]. *Hypertension*,2021,77:1133-1140.
- [31] ZHU Y Q,PAN Z Y,JING D R,et al.Association of air pollution, genetic risk,and lifestyle with incident adult-onset asthma:a prospective cohort study[J].*Ecotoxicology and Environmental Safety*,2023,257:114922.
- [32] LI Q,ZHENG D N,WANG Y Y,et al.Association between exposure to airborne particulate matter less than 2.5 μm and human fecundity in China[J].*Environment International*,2021,146: 106231.
- [33] LIN L Z,LI Q,YANG J,et al.The associations of particulate matters with fetal growth *in utero* and birth weight:a birth cohort study in Beijing,China[J].*Science of the Total Environment*,2020, 709:136246.
- [34] ZHOU Y,MA J X,WANG B,et al.Long-term effect of personal $\text{PM}_{2.5}$ exposure on lung function:a panel study in China[J].*Journal of Hazardous Materials*,2020,393:122457.
- [35] LV S Y,LI Z W,LI H B,et al.Long-term effects of $\text{PM}_{2.5}$ components on hypertension:a national analysis in China[J]. *Environmental Research*,2023,222:115323.
- [36] WANG J N,LI T T,LV Y B,et al.Fine particulate matter and poor cognitive function among Chinese older adults:evidence from a community-based,12-year prospective cohort study[J]. *Environmental Health Perspectives*,2020,128(6):67013.
- [37] DU X H,JIANG Y X,LI H C,et al.Traffic-related air pollution and genome-wide DNA methylation:a randomized,crossover trial[J]. *Science of the Total Environment*,2022,850:157968.
- [38] ZHANG Q L,DU X H,LI H C,et al.Cardiovascular effects of traffic-related air pollution:a multi-omics analysis from a randomized,crossover trial[J].*Journal of Hazardous Materials*, 2022,435:129031.
- [39] 王情,朱欢欢,杜鹏,等.京津冀及周边地区“十四五”及中长期 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ control targets in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(1):220-228.
- [40] WU R S,SONG X M,CHEN D H,et al.Health benefit of air quality improvement in Guangzhou,China:results from a long time-series analysis (2006-2016)[J].*Environment International*,2019,126:552-559.
- [41] 李晓瑜,王念,刘慧文,等.京津冀地区 NO_x 和 VOCs 协同减排成本及减排策略研究[J].*环境科学研究*,2022,35(11):2618-2626.
- LI X Y,WANG N,LIU H W,et al.Collaborative emission reduction cost and strategies of NO_x and VOCs in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J].*Research of Environmental Sciences*,2022,35(11): 2618-2626.
- [42] RICH D Q,KIPEN H M,HUANG W,et al.Association between changes in air pollution levels during the Beijing Olympics and biomarkers of inflammation and thrombosis in healthy young adults[J].*JAMA*,2012,307(19):2068-2078.
- [43] HUANG J,PAN X C,GUO X B,et al.Health impact of China’s Air Pollution Prevention and Control Action Plan:an analysis of national air quality monitoring and mortality data[J].*The Lancet Planetary Health*,2018,2(7):e313-e323.
- [44] XUE T,ZHU T,PENG W,et al.Clean air actions in China, $\text{PM}_{2.5}$ exposure,and household medical expenditures:a quasi-experimental study[J].*PLoS medicine*,2021,18(1):e1003480.
- [45] 赵婉屹,刘萍萍,孙健,等.关中地区散煤源 $\text{PM}_{2.5}$ 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 benefit evaluation of $\text{PM}_{2.5}$ pollution prevention from bulk coal sources in Guanzhong area[J].*Research of Environmental Sciences*,2022, 35(9):2216-2224.
- [46] WANG C P,LIN J Y,NIU Y,et al.Impact of ozone exposure on heart rate variability and stress hormones:a randomized-crossover study[J].*Journal of Hazardous Materials*,2022,421:126750.
- [47] LIU S,WU R S,ZHU Y T,et al.The effect of using personal-level indoor air cleaners and respirators on biomarkers of cardiorespiratory health:a systematic review[J].*Environment International*,2022,158:106981.
- [48] QI J L,ZHANG D D,ZHANG X,et al.Short- and medium-term impacts of strict anti-contagion policies on non-COVID-19 mortality in China[J].*Nature Human Behaviour*,2022,6(1):55-63.
- [49] HUANG L,LIU Z Y,LI H L,et al.The silver lining of COVID-19: estimation of short-term health impacts due to lockdown in the Yangtze River Delta Region,China[J].*Geohealth*,2020,4(9): e2020GH000272.
- [50] YE T T,GUO S Y,XIE Y,et al.Health and related economic benefits associated with reduction in air pollution during COVID-19 outbreak in 367 cities in China[J].*Ecotoxicology and Environmental Safety*,2021,222:112481.

- [51] WANG Y J,WANG A Q,ZHAI J Q,et al.Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5 °C and 2.0 °C warming[J].*Nature Communications*,2019,10:3376.
- [52] CHEN H Q,ZHAO L,DONG W,et al.Spatiotemporal variation of mortality burden attributable to heatwaves in China,1979-2020[J].*Science Bulletin*,2022,67(13):1340-1344.
- [53] YIN P,CHEN R J,WANG L J,et al.The added effects of heatwaves on cause-specific mortality:a nationwide analysis in 272 Chinese cities[J].*Environment International*,2018,121:898-905.
- [54] LEI J,CHEN R J,YIN P,et al.Association between cold spells and mortality risk and burden:a nationwide study in China[J].*Environmental Health Perspectives*,2022,130(2):27006.
- [55] CHEN Z Z,LIU P L,XIA X S,et al.Temperature variability increases the onset risk of ischemic stroke:a 10-year study in Tianjin,China[J].*Frontiers in Neurology*,2023,14:1155987.
- [56] ZHU Y X,YANG T,HUANG S J,et al.Cold temperature and sudden temperature drop as novel risk factors of asthma exacerbation:a longitudinal study in 18 Chinese cities[J].*Science of the Total Environment*,2022,814:151959.
- [57] ZHOU Y M,JI A L,TANG E J,et al.The role of extreme high humidex in depression in Chongqing,China:a time series-analysis [J].*Environmental Research*,2023,222:115400.
- [58] WANG Q,YIN L N,WU H C,et al.Effects of gestational ambient extreme temperature exposures on the risk of preterm birth in China:a sibling-matched study based on a multi-center prospective cohort[J].*The Science of the Total Environment*,2023,887:164135.
- [59] YI L P,XU X,GE W X,et al.The impact of climate variability on infectious disease transmission in China:current knowledge and further directions[J].*Environmental Research*,2019,173:255-261.
- [60] DING G Y,LI X M,LI X W,et al.A time-trend ecological study for identifying flood-sensitive infectious diseases in Guangxi,China from 2005 to 2012[J].*Environmental Research*,2019,176:108577.
- [61] CHENG J,BAMBRICK H,YAKOB L,et al.Extreme weather conditions and dengue outbreak in Guangdong,China:spatial heterogeneity based on climate variability[J].*Environmental Research*,2021,196:110900.
- [62] XU X B,HU H Z,TAN Y,et al.Quantifying the impacts of climate variability and human interventions on crop production and food security in the Yangtze River Basin,China,1990-2015[J].*Science of the Total Environment*,2019,665:379-389.
- [63] 冯琳,庞玉亭,钟琪,等.1980—2016年气候变化对湖南省农业产量的影响[J].*资源科学*,2019,41(3):582-590.
FENG L,PANG Y T,ZHONG Q,et al.Impacts of climate variability on crop yields in Hunan Province during 1980-2016[J].*Resources Science*,2019,41(3):582-590.
- [64] LIU Y,LI N,ZHANG Z T,et al.The central trend in crop yields under climate change in China:a systematic review[J].*Science of the Total Environment*,2020,704:135355.
- [65] CHEN H Q,ZHAO L,CHENG L L,et al.Projections of heatwave-attributable mortality under climate change and future population scenarios in China[J].*The Lancet Regional Health:Western Pacific*,2022,28:100582.
- [66] YANG J,ZHOU M G,REN Z P,et al.Projecting heat-related excess mortality under climate change scenarios in China[J].*Nature Communications*,2021,12:1039.
- [67] LI C X,LIU Z,LI W,et al.Projecting future risk of dengue related to hydrometeorological conditions in Chinese mainland under climate change scenarios:a modelling study[J].*The Lancet Planetary Health*,2023,7(5):e397-e406.
- [68] ORRU H,EBI K L,FORSBERG B.The interplay of climate change and air pollution on health[J].*Current Environmental Health Reports*,2017,4(4):504-513.
- [69] CHEN C,LIU J,SHI W Y,et al.Temperature-modified acute effects of ozone on human mortality:Beijing municipality,Tianjin municipality,Hebei Province,and surrounding areas,China,2013-2018[J].*China CDC Weekly*,2021,3(45):964-968.
- [70] LU C,ZHANG Y P,LI B Z,et al.Interaction effect of prenatal and postnatal exposure to ambient air pollution and temperature on childhood asthma[J].*Environment International*,2022,167:107456.
- [71] WU R S,GUO Q,FAN J P,et al.Association between air pollution and outpatient visits for allergic rhinitis:effect modification by ambient temperature and relative humidity[J].*Science of the Total Environment*,2022,821:152960.
- [72] TANG R,ZHAO J,LIU Y F,et al.Air quality and health co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030[J].*Nature Communications*,2022,13:1008.
- [73] ZHANG S H,AN K X,LI J,et al.Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal:a modelling study[J].*The Lancet Planetary Health*,2021,5(11):e808-e817.
- [74] LIU Y,TONG D,CHENG J,et al.Role of climate goals and clean-air policies on reducing future air pollution deaths in China:a modelling study[J].*The Lancet Planetary Health*,2022,6(2):e92-e99.
- [75] YANG J Z,ZHAO Y,CAO J,et al.Co-benefits of carbon and pollution control policies on air quality and health till 2030 in China[J].*Environment International*,2021,152:106482.

(责任编辑:刘 方)