

# “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

刘聪 陈仁杰 阚海东

复旦大学公共卫生学院, 上海 200032

通信作者: 阚海东, Email: kanh@fudan.edu.cn

**【摘要】** 气候变化是 21 世纪人类面临的重大健康挑战, 空气污染也是全球重要的公共卫生问题。我国提出 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的“双碳”目标, 不仅会对我国空气污染和气候状况产生深远影响, 也会全面影响人群健康。空气污染和气候变化流行病学是环境流行病学的重要分支, 本文将围绕“双碳”目标背景下的空气污染和气候变化流行病学研究现状和未来趋势展开论述, 以期后续更好地开展环境与健康研究提供思路和建议。

**【关键词】** 空气污染; 气候变化; 碳达峰; 碳中和; 流行病学

## Progress and future perspective of epidemiological research of air pollution and climate change in the context of achieving carbon peaking and carbon neutrality goals

Liu Cong, Chen Renjie, Kan Haidong

School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China

Corresponding author: Kan Haidong, Email: kanh@fudan.edu.cn

**【Abstract】** Climate change is the great health challenge for human beings in the 21<sup>st</sup> century. Air pollution is also an important public health problem worldwide. China announced the climate commitment to achieve carbon peaking by 2030 and carbon neutrality by 2060. Achieving these goals would not only have far-reaching effects on air pollution control and climate change, but also improve the population health in China. Air pollution and climate change epidemiology are important aspects of environmental epidemiology. In this paper, we discuss the current status and future development of epidemiological research of air pollution and climate change in the context of achieving carbon peaking and carbon neutrality goals to provide ideas and suggestions for environmental and health studies in the future.

**【Key words】** Air pollution; Climate change; Carbon peaking; Carbon neutrality; Epidemiology

1. 背景: 空气污染是全球重要的公共卫生问题, 已有大量研究证实了空气污染暴露与人群死亡率、发病率的显著关联<sup>[1-3]</sup>。2019 年全球疾病负担研究表明, 空气污染是全球排名第四位的死亡危险因素, 每年可导致 667 万例过早死亡; 此外, 不适宜温度位列死亡危险因素的第十位, 每年可造成

195 万例过早死亡<sup>[4]</sup>。全面了解和应对气候变化、空气污染对人群健康造成的损害, 是科学界和政府部门面临的共同挑战。

我国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值(碳达峰), 努力争取 2060 年前实现碳中和目标(“双碳”目标)。“双碳”目标的提出, 不仅倡导了绿

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20220824-00732

收稿日期 2022-08-24 本文编辑 万玉立

引用格式: 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. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20220824-00732.

Liu C, Chen RJ, Kan HD. 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]. Chin J Epidemiol, 2023, 44(3): 353-359. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20220824-00732.



色、环保、低碳的生活方式,更有利于引导我国持续推进产业结构、能源结构、甚至是经济结构调整,在未来会对我国大气污染现状和气候变化趋势产生极大影响。同时,“双碳”目标下污染物排放、气象条件的改变,也势必会对公共卫生和人群健康产生巨大而深远的影响。空气污染和气候变化流行病学是环境流行病学的重要分支,提供了建立环境因素与健康关联的评价手段。在当前“双碳”目标背景下,本文总结和归纳了空气污染与气候变化领域的现有研究证据,并对未来研究方向和思路提供展望。

2. 空气污染流行病学:主要探索以空气污染物为主的环境因素对人体健康的影响,按照研究特点,大致可以分为急性效应研究、慢性效应研究、干预研究、“双碳”目标下的空气污染与健康研究。

(1)急性效应研究:空气污染急性效应研究多关注空气污染物短期暴露引起的健康损害,健康结局多采用疾病或死亡统计资料,以时间序列分析、病例交叉分析等方法提供暴露反应关系线索。例如,已有研究利用我国 272 个城市疾病监测系统 2013–2015 年收集的每日居民死亡数据,采用两阶段时间序列分析和 Meta 分析,系统评估了细颗粒物( $PM_{2.5}$ )、粗颗粒物( $PM_{2.5-10}$ )、二氧化氮( $NO_2$ )等空气污染物短期暴露与居民总死亡、心血管和呼吸系统疾病死亡的关联<sup>[5-7]</sup>。也有研究基于多国多城市研究合作网络,采用统一的数据收集和分析方法,开展了颗粒物、 $NO_2$ 与居民死亡率的全球多中心研究,发现了上述污染物与居民死亡的显著关联,获得了具有全球代表性的短期暴露反应关系曲线<sup>[8-10]</sup>。也有研究利用全国城镇居民基础医疗保险数据库,开展了多种空气污染物与居民住院发病率的时间序列研究,如  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$  等空气污染物与脑卒中住院的关联<sup>[11]</sup>、臭氧( $O_3$ )与肺炎住院的关联<sup>[12]</sup>、 $PM_{2.5}$ 与各类心血管疾病住院率的关联等<sup>[13]</sup>。Di 等<sup>[14]</sup>采用病例交叉研究方法,利用 2000–2012 年全美 Medicare 医保数据,发现了  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  短期暴露与居民总死亡的显著关联。此外,还有研究发现了碳组分、硫酸盐、硝酸盐等大气颗粒物组分与人群死亡率和心血管疾病住院率的显著关联<sup>[15-16]</sup>。然而,大部分急性效应研究尚存在暴露错分、生态学偏倚等局限性,需进一步在暴露评价方法、控制混杂等层面进行提升。此外,由于不同研究的区域和空气污染物暴露水平不同,其对人体的健康效应会存在异质性。例如,中国的颗粒物暴露水平较

高,在中国开展的  $PM_{2.5}$  与人群死亡风险研究所报道的关联效应值,低于欧洲地区、美国等<sup>[5]</sup>;多个全球多中心研究也发现了相同的趋势,高浓度区间的暴露反应关系曲线相较于低浓度端较为平缓<sup>[8-9]</sup>,究其原因除暴露水平之外,也可能与不同研究区域的污染物组分差异与人群适应性有关。

此外,固定群组研究也是常用的急性效应研究方法,通过在纵向多个不同时间点的重复测量,较为准确地评估空气污染短期暴露与健康效应指标的时间效应关系,该研究设计也有利于揭示潜在作用机制。例如,Li 等<sup>[17]</sup>于 2018–2019 年在 76 名老年人群中进行了 5 次固定群组追踪随访,通过个体  $PM_{2.5}$  暴露测量和肠道菌群检测,发现  $PM_{2.5}$  短期暴露与炎症反应、多种肠道微生物代谢的改变显著相关,也提示了菌群肠-脑轴在  $PM_{2.5}$  诱发心血管系统疾病中起作用的潜在生理机制。Wu 等<sup>[18-19]</sup>招募了 40 名健康大学生开展固定群组研究,2010–2011 年进行了 4 次追踪测量,基于固定监测仪器获得了  $PM_{2.5}$  及其组分的同期暴露水平,并通过重复测量数据分析发现了  $PM_{2.5}$  及部分组分(如镍、镁、钴等)与炎症、氧化应激、内皮功能之间的关联。Chen 等<sup>[20]</sup>通过在 34 名健康成年志愿者中开展固定群组研究,观察到不同粒径段(如  $0.24\sim 0.40\ \mu m$ )的颗粒物短期暴露与炎症、凝血等心血管健康相关蛋白因子的急性上升显著相关。Liu 等<sup>[21]</sup>在 28 名社区慢性阻塞性肺疾病(COPD)人群中,发现了元素碳、有机碳、硝酸根离子等细颗粒物组分可显著升高人体 C 反应蛋白、纤维蛋白原等炎症因子水平。Lei 等<sup>[22]</sup>利用 4 992 名哮喘患者的动态肺功能监测数据,发现粗、细颗粒物短期暴露与肺功能受损显著相关。纵然固定群组研究有诸多设计优势,但精细化的方案对研究人员和仪器设备(如个体采样仪器的数量有限)等的要求较高,限制了研究样本量的规模,并且随着随访时间的延长,有可能因为研究对象行为模式改变而影响结果。

(2)慢性效应研究:空气污染慢性效应研究多采用横断面研究、队列研究来探索污染物长期暴露(>3 个月)对健康的慢性损害。国内空气污染队列研究起步较晚,近期比较有代表性的是 Huang 等<sup>[23-24]</sup>、Liang 等<sup>[25]</sup>利用中国动脉粥样硬化心血管疾病风险队列进行的空气污染队列研究,发现了  $PM_{2.5}$  长期暴露对心血管疾病、脑卒中、高血压发病率的健康影响;Li 等<sup>[26]</sup>利用中国健康长寿追踪调查队列 2008–2014 年随访数据,发现了长期  $PM_{2.5}$  暴露

与老年人群总死亡的健康关联;Yin 等<sup>[27]</sup>利用中国男性队列 1990–2005 年 19 万男性样本的随访数据,同样发现了 PM<sub>2.5</sub> 长期暴露显著升高了人群非意外死亡、心血管疾病死亡和 COPD 死亡率。Liu 等<sup>[28]</sup>基于中国慢性病前瞻性队列 50 万人群样本 2005–2017 年的随访数据,发现了大气 PM<sub>2.5</sub> 长期暴露可显著升高居民缺血性心脏病、脑卒中等心血管疾病的发病风险。慢性效应研究不仅为空气污染长期暴露所致健康损害提供了高证据强度的研究结果,更可以为空气质量标准和健康政策提供科学依据。

(3) 干预研究:干预研究方法在空气污染流行病学得到了广泛应用,主要包括准自然实验研究、随机对照试验等,其中准自然实验研究有利于评估特定干预政策的公共卫生意义。例如,Rich 等<sup>[29]</sup>通过在 2008 年北京奥林匹克运动会前后阶段招募 125 名健康成年人,依靠奥林匹克运动会期间显著的空气污染治理效果实现准自然实验,发现空气污染水平降低与多种心血管健康指标改善显著相关。Li 等<sup>[30]</sup>在 2014 年南京青年奥林匹克运动会期间招募了 31 名健康成年人,通过青年奥林匹克运动会前后的空气质量改善开展准自然实验,研究发现 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub> 浓度的降低可显著降低受试者的系统炎症指标。Xue 等<sup>[31]</sup>利用准自然实验方法,基于中国健康与养老追踪调查研究,评估了 2013–2017 年《大气污染防治行动计划》所降低的 PM<sub>2.5</sub> 浓度与居民住院费用降低的关联。

随机对照试验是经典和常用的干预研究方法。例如,Li 等<sup>[32]</sup>通过招募健康成年人开展随机双盲对照试验,以空气净化器干预室内 PM<sub>2.5</sub> 水平,发现 PM<sub>2.5</sub> 浓度暴露与血清代谢组学的改变和下丘脑-垂体-肾上腺轴的激活有关,从而提出了颗粒物引起不良健康结局的潜在机理机制。Liu 等<sup>[33]</sup>招募 44 名健康儿童进行了 3 次健康随访、收集尿液等生物样本,并采用负离子空气净化器对颗粒物水平进行干预,研究发现净化后的空气可显著改善儿童的呼吸功能、心血管自主神经功能,并探索了抗炎、抗氧化应激等代谢通路机制所起到的潜在作用。Shi 等<sup>[34]</sup>通过开展随机交叉研究,评估了佩戴口罩对防治颗粒物空气污染的心血管健康收益,发现短期佩戴口罩可以显著改善心率变异性及自主神经功能、降低血压,从而证实了利用口罩降低空气污染健康危害的个体干预方法的可行性。Lin 等<sup>[35]</sup>通过招募 65 名健康成年人开展随机双盲对照试验,经过随

机分组,在 2 个月内通过补充鱼油进行膳食干预与空白对照,研究发现膳食补充鱼油可显著降低炎症、凝血、内皮功能、氧化应激、神经内分泌应激相关的生物标志,从而抵抗 PM<sub>2.5</sub> 造成的健康危害,提示了个体水平进行鱼油膳食补充的心血管健康收益。Wang 等<sup>[36]</sup>在 22 名受试者的随机交叉研究中,发现短期 O<sub>3</sub> 暴露可显著降低心率变异性中的高频指标,且与血清应激激素的水平升高有关。随机对照试验在混杂控制和因果推断上具有较强的优势,可为探索暴露与结局关联背后的机理机制提供可信的研究证据<sup>[37]</sup>。

(4) “双碳”目标下的空气污染与健康研究:在当前气候变化背景下,如何实现“双碳”目标,选择合理的路径至关重要,而不同气候变化情景模拟或路径选择,应同时考虑空气污染或气候改变对人群健康的影响,亟需开展合理的预测研究,预估不同气候路径下的空气污染效应。Cheng 等<sup>[38]</sup>对我国 2015–2060 年碳中和目标的空气质量技术路径(高/中/低排放情景、国家自主贡献承诺,以及碳中和目标路径)进行了比较分析,研究发现我国当前的末端治理污染控制政策可以在 2030 年完成 35 μg/m<sup>3</sup> 的 PM<sub>2.5</sub> 年均值目标并实现碳达峰,但成本效益无法延续到 2060 年,实现 10 μg/m<sup>3</sup> 的年均值目标需要更加严格的碳中和路径和全球 1.5 °C 排放路径。Zhang 等<sup>[39]</sup>开展了我国 2060 年碳中和目标不同技术路径的健康成本效益分析,研究发现碳中和目标的健康收益相当于过去 5~10 年的期望寿命增长,发展可再生能源路径要显著优于发展负排放技术路径。

此外,为实现“双碳”目标,无论采取何种路径,我国未来的空气污染状况势必得到改善,因此未来的空气污染研究应关注低浓度空气污染物下的健康效应。越来越多的研究证据表明,颗粒物等空气污染物与人群死亡、心血管疾病发病等健康结局之间的暴露反应关系曲线呈现线性的无阈值效应。例如,Liu 等<sup>[8]</sup>研究发现,在低于 WHO 和主要国家的空气质量标准浓度限值之下,PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 短期暴露仍对居民死亡存在显著的健康危害;Di 等<sup>[40]</sup>利用全美 Medicare 医保数据,在极低浓度范围水平,仍发现了长期 PM<sub>2.5</sub> 暴露与居民死亡的显著关联。WHO 在 2021 年 11 月颁布了最新的空气质量指南,将大部分空气污染物浓度的推荐值进一步降低<sup>[41]</sup>,这也预示了未来研究应关注更低浓度区间的空气污染与健康暴露反应的关系。

最后,随着空气质量改善,极端天气、温度等环

境因素对健康的危害愈发凸显,未来应更加重视探索空气污染与温度的交互作用。例如, Lee 等<sup>[42]</sup>收集了韩国 2008–2014 年的偏头痛急诊人次和同期空气污染数据,发现了颗粒物与高温天气对偏头痛的发生存在着显著的交互作用。Rahman 等<sup>[43]</sup>在美国加利福尼亚州研究了颗粒物空气污染与极端高温共同暴露对人群死亡率的影响,并发现两者共同暴露的效应会显著高于空气污染或极端高温单一暴露所造成的死亡风险,提示在当前气候变化背景下应加强干预和制定适应性政策并特别关注高温与空气污染的交互作用。de Sario 等<sup>[44]</sup>通过综述发现,空气污染和气象条件对欧洲地区呼吸系统健康同时存在独立和协同的作用,在整个气候变化背景下,热浪事件、高温天气、野火、沙尘暴等均与空气污染存在潜在的交互作用。在“双碳”目标背景下,厘清空气污染与气象因素的交互作用会成为深入研究环境与健康关联的重要一环。

3. 气候变化流行病学:气候变化流行病学尚无明确定义,其研究范畴主要包括气候变化所致环境因素改变而对人群健康产生直接或间接的影响。联合国政府间气候变化专门委员会在 2022 年 2 月发布了全球气候变化的第六次评估报告《气候变化 2022:影响、适应和脆弱性》,系统和全面地评估了气候变化给人类带来的健康风险。该报告总结:气候变化对全球人民的身体健康和被评估地区人群的心理健康都产生了不利影响。并指出,未来几十年全球所有地区都将面临气候变化加剧的问题,暖季将变得更长,冷季将更短,同时极端高温等极端天气将变得更加频繁,给农业和人类健康带来更大挑战,对人类社会的影响也逐步增大<sup>[45]</sup>。气候变化的健康影响研究,按研究思路可大致分为当前气候状态下的基线情景疾病负担研究,以及未来气候变化情景下的预测研究。

(1) 基线情景疾病负担研究:由于快速的城市化进程,极端高温天气的增加,以及人口老龄化国家的人口变化,热暴露成为一个越来越大的健康风险。已有大量研究报道了热浪、寒潮等极端天气事件对人群健康的影响,例如, Guo 等<sup>[46]</sup>通过一项多中心研究表明,热浪等高温天气会带来极大的健康负担,并且长期居住在气温中等地区的人群对热浪的反应更为敏感。Yin 等<sup>[47]</sup>开展的一项中国 272 个城市研究显示,热浪导致居民死亡率增加 7%,其中心血管疾病、冠心病、中风、缺血性卒中、出血性卒中、呼吸系统疾病和 COPD 的死亡风险均显著增

加。Lei 等<sup>[48]</sup>在我国 272 个城市开展了寒潮与死亡风险的时间序列研究,在比较了多种寒潮定义和滞后模式后发现,寒潮对人群死亡率的效应在 10~15 d 达到最强,并可延续至 28 d。此外,气候变化也引起了全球不同地区一般温度的改变,非适宜温度和温度变异性所造成的健康风险不容忽视。例如, Gasparrini 等<sup>[49]</sup>通过一项全球 384 个城市研究发现,每日高温、低温所造成的人群死亡负担远高于极端气温事件的贡献,其中低温关联的人群死亡负担尤其严重。Chen 等<sup>[50]</sup>在我国 272 个城市研究了环境温度所造成的死亡风险和疾病负担,该研究发现在全国水平的最低风险温度在 22.8 °C,有 14.3% 的非意外死亡可归因于非适宜温度,极端低温和极端高温的归因风险分别为 1.14% 和 0.63%,并且不同温度带区域、集中供暖、城市化率等因素均会对温度造成的死亡风险起到修饰作用。Jiang 等<sup>[51]</sup>在我国 324 个城市开展了一项病例交叉研究,发现不适宜温度可升高急性心肌梗死的发病风险,并且极端低温的效应在非供暖区域更为明显。Guo 等<sup>[52]</sup>在全球 372 个城市的研究发现,温度变异性(每日最低、最高温度的标准差)与死亡的关联与每日的一般温度和空气污染物浓度相互独立,并且在不同区域和气候带的效应存在差异。基线情景研究的核心是获得当前气候状态下的暴露反应关系,其准确程度是决定未来情景健康预测可靠性的基础,因此需进一步开展多中心、大样本、高质量的相关研究。

除环境因素与人群死亡、慢性病结局的关联研究之外,气候变化还对传染性疾病的传播等造成重要影响。例如,清华大学等机构联合发布的《柳叶刀倒计时》气候变化与健康报告指出,登革热是一种明显的对气候敏感的病媒传播传染病,在全球范围内的各个地区,此类病毒的传播对气候的适应性在逐年上升<sup>[53]</sup>。自 1960 年以来,埃及伊蚊传播登革热病毒的媒介能力增加了 37%,白纹伊蚊传播登革热病毒的媒介能力增加了 14%。同时,全国范围内的登革热发病率和致残率都有相当大的持续增长,在 2017 年,全年龄段的登革热发病率达到 183.8/10 万,残疾调整寿命率达到 1.8/10 万;与 1990 年相比,登革热在 2017 年的发病率增加了 5.7 倍,伤残调整生命年增加了 4.7 倍。除登革热以外,还有多种气候敏感的虫媒传染病与气候变化相关,例如有研究表明,如果空气温度上升 1~2 °C,中国南方地区的疟疾传播潜力将增加 39%~140%<sup>[54]</sup>。出血热合并肾病综合征的发病率也与温度、降水、

湿度等环境因素密切相关<sup>[55]</sup>。我国安徽省农村地区的一项研究也表明,日本脑炎的传播与每月最高温度、最低温度和总降雨量之间存在正相关<sup>[56]</sup>。总而言之,气候变化将继续影响人类传染病的健康风险,通过采取适应措施降低脆弱性是人类应对气候变化风险有效的方法之一。

(2) 未来气候变化下的情景预测研究:气候变化加剧了极端天气事件(热浪、寒潮)的出现频率,也影响了不同地区的气候稳态。已有大量研究预测了不同气候变化情景下气象因素与人群健康指标的关联,在当前“双碳”目标背景下,相关研究有了新的切入点。例如,Gasparrini 等<sup>[57]</sup>通过一项 451 个城市的预测研究发现,在未来高排放情景下气候变化对人群死亡的影响会逐步加剧,且该影响在不同地区、人群的分布存在差异,气候变化在较温暖、贫穷地区的人群健康影响更为严重。一项研究估计了气候变化背景下,未来我国的热相关死亡风险:在 1.5 °C 升温情景下,即使考虑了人群适应性的提升,中国城市每年热相关超额死亡率将从 1986–2005 年的 32.1/100 万增加到 48.8/100 万~67.1/100 万;而在 2.0 °C 升温情景下,每年热相关超额死亡将比 1.5 °C 升温情景下多 2.7 万例/年<sup>[58]</sup>。另一项全国范围的研究显示,在高排放情景下,热相关超额死亡率将从 2010 年的 1.9% 增加到 2030 年的 2.4% 以及 2090 年的 5.5%<sup>[59]</sup>。然而,未来情景预测研究会受到基线疾病测量指标变化、人口数和人口结构改变(如人口老龄化)、暴露反应关系准确程度等诸多不确定性的影响,需进一步完善上述研究瓶颈问题,以期获得更为精确的情景预测指南。

4. 总结与展望:本综述通过总结发现,目前的空气污染和气候变化流行病学研究证据,纵然在研究设计、研究区域和研究人群方面存在异质性,但结论总体指向空气污染暴露与居民死亡率和发病率的升高、亚临床结局和生物标志物改变的显著关联,气候变化也通过温度、极端天气事件、影响病媒生物传播等形式直接或间接地对人群健康产生影响。其中,空气污染流行病学在急性效应研究方面成果丰富,但生态学研究设计所观察结局相对局限;慢性效应研究尚在发展阶段,需针对性提高人群队列资源建设;定群研究和干预研究为机理机制探索和政策评估提供了机会,应着重扩大此类研究的样本量以增加结果的外推性和普适性;气候变化流行病学应进一步完善和落实基线情景分析,不仅包括气象因素对宏观健康指标的影响,还应涉及到

传染病和病媒生物传播等因素在气候变化情景下的改变,从而为预测研究提供基础;不同气候变化路径选择对气候状况和人群健康的影响、空气污染与气候变化的交互作用等领域亟需拓展和扩充。此外,本综述还有一些领域和研究未全面涉及:在暴露因素方面主要关注室外空气污染、气候变化对人群的健康影响,而没有考虑室内空气污染、室内温度等相关研究,下一步综述方向应全面考虑室内外环境因素的健康效应;在健康结局方面,主要综述了空气污染和气候变化对死亡率等宏观人群健康指标和部分亚临床结局,而未涉及环境因素对于慢性病发病率、生物标志物和组学的影响,随着相关研究的推进,未来应着重加强此类研究证据的补充。

“双碳”目标的提出给空气污染流行病学和气候变化流行病学研究提供了新的机遇和挑战,未来需加强空气污染和气候变化的结合研究,共同探讨复合型环境因素对健康的影响。展望未来,仍需在下列方向加强相关工作:

(1) 研发多学科交叉的集成技术方法:在气候变化和“双碳”目标背景下,空气污染流行病学的发展亟需与环境科学与大气科学等进行学科交叉和联合攻关,探明不同路径下污染物排放、气象因素扰动、大气理化特征的时空变化规律,结合排放清单、源解析等技术手段,预测污染物浓度、气象条件在未来场景下的分布和演变,为空气污染流行病学和健康关联研究提供前端数据和场景模拟。

(2) 将人群适应性纳入健康风险评估:越来越多的研究表明,人群在全球变暖趋势下的热脆弱性存在差异<sup>[60]</sup>,在气候变化的背景下也同时伴随着人群热适应能力的提升,后者可降低热效应的健康风险;同时,不同年龄、性别和区域人口特征的差异对气候变化的易感性也存在不同,因此在未来进行预测研究和政策制定时,需同时考虑人群适应性的因素,才能具有更为精准的指导意义。

(3) 探索多维健康结局与全疾病谱暴露反应关系:环境因素会对人体复杂系统造成非特异性的健康损害,不同地区的暴露反应关系也存在较大差异。鉴于此,未来的空气污染和气候变化流行病学研究需发展多组学概念,关注基因-生物标志-器官功能-疾病-死亡的健康全链条和多维健康结局,探索空气污染物、环境因素与人群健康全疾病谱的多重暴露反应关系。

(4) 建立以健康收益为中心的综合性评价方

法：“双碳”目标背景下，除传统空气污染物、温度和极端天气等环境因素以外，超细颗粒物、挥发性有机物，以及其他新兴污染物（如环境内分泌干扰物、持久性有机物等），其对人体健康产生的危害尚无充分研究；此外，大气环境危害因素复合暴露对健康的影响，仅依靠单一的空气质量标准或温度情景建议已无法有效保护健康。因此，亟须建立以健康收益为中心的综合评价方法，明确关键暴露因素，发展暴露组学研究，探索“双碳”目标下适宜我国实际情况的情景目标和路径，从而更加系统和全面地守护人群健康。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明** 刘聪：实施研究、采集数据、分析/解释数据、统计分析、论文撰写；陈仁杰：论文修改、研究指导、行政或材料支持；阚海东：研究设计、论文修改、研究指导、行政、材料、经费支持

### 参 考 文 献

- [1] Gu JS, Shi Y, Zhu YF, et al. Ambient air pollution and cause-specific risk of hospital admission in China: a nationwide time-series study[J]. *PLoS Med*, 2020, 17(8): e1003188. DOI:10.1371/journal.pmed.1003188.
- [2] Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environ Int*, 2020, 143: 105974. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105974.
- [3] Shah ASV, Lee KK, McAllister DA, et al. Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis[J]. *BMJ*, 2015, 350: h1295. DOI: 10.1136/bmj.h1295.
- [4] 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. DOI: 10.1016/s0140-6736(20)30752-2.
- [5] Chen RJ, Yin P, Meng X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality. A nationwide analysis in 272 Chinese cities[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196(1):73-81. DOI:10.1164/rccm.201609-1862OC.
- [6] Chen RJ, Yin P, Meng X, et al. Associations between coarse particulate matter air pollution and cause-specific mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities[J]. *Environ Health Perspect*, 2019, 127(1): 017008. DOI: 10.1289/ehp2711.
- [7] Chen RJ, 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. DOI: 10.1097/ede.0000000000000829.
- [8] Liu C, Chen RJ, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities[J]. *N Engl J Med*, 2019, 381(8): 705-715. DOI: 10.1056/NEJMoa1817364.
- [9] Liu C, Cai J, Chen RJ, et al. Coarse particulate air pollution and daily mortality: a global study in 205 cities[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2022, 206(8): 999-1007. DOI: 10.1164/rccm.202111-2657OC.
- [10] Meng X, Liu C, Chen RJ, et al. Short term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: multilocation analysis in 398 cities[J]. *BMJ*, 2021, 372: n534. DOI: 10.1136/bmj.n534.
- [11] Tian YH, Liu H, Zhao ZL, et al. Association between ambient air pollution and daily hospital admissions for ischemic stroke: a nationwide time-series analysis[J]. *PLoS Med*, 2018, 15(10):e1002668. DOI:10.1371/journal.pmed.1002668.
- [12] Tian YH, Wu YQ, Liu H, et al. The impact of ambient ozone pollution on pneumonia: a nationwide time-series analysis[J]. *Environ Int*, 2020, 136: 105498. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105498.
- [13] Tian YH, Liu H, Wu YQ, et al. Association between ambient fine particulate pollution and hospital admissions for cause specific cardiovascular disease: time series study in 184 major Chinese cities[J]. *BMJ*, 2019, 367: l6572. DOI: 10.1136/bmj.l6572.
- [14] Di Q, Dai LZ, Wang Y, et al. Association of short-term exposure to air pollution with mortality in older adults[J]. *JAMA*, 2017, 318(24): 2446-2456. DOI: 10.1001/jama.2017.17923.
- [15] Achilleos S, Kioumourtzoglou MA, Wu CD, et al. Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis[J]. *Environ Int*, 2017, 109:89-100. DOI:10.1016/j.envint.2017.09.010.
- [16] Wang WD, Liu C, Ying ZK, et al. Particulate air pollution and ischemic stroke hospitalization: How the associations vary by constituents in Shanghai, China[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 695: 133780. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133780.
- [17] Li TT, Fang JL, Tang S, et al. PM<sub>2.5</sub> exposure associated with microbiota gut-brain axis: Multi-omics mechanistic implications from the BAPE study[J]. *Innovation*, 2022, 3(2):100213. DOI:10.1016/j.xinn.2022.100213.
- [18] Wu SW, Yang D, Pan L, et al. Chemical constituents and sources of ambient particulate air pollution and biomarkers of endothelial function in a panel of healthy adults in Beijing, China[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 560-561:141-149. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.03.228.
- [19] Wu SW, Yang D, Wei HY, et al. Association of chemical constituents and pollution sources of ambient fine particulate air pollution and biomarkers of oxidative stress associated with atherosclerosis: a panel study among young adults in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2015, 135: 347-353. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.04.096.
- [20] Chen RJ, Zhao ZH, Sun QH, et al. Size-fractionated particulate air pollution and circulating biomarkers of inflammation, coagulation, and vasoconstriction in a panel of young adults[J]. *Epidemiology*, 2015, 26(3): 328-336. DOI:10.1097/ede.0000000000000273.
- [21] Liu C, Cai J, Qiao LP, et al. The acute effects of fine particulate matter constituents on blood inflammation and coagulation[J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 51(14): 8128-8137. DOI:10.1021/acs.est.7b00312.
- [22] Lei J, Yang T, Huang SJ, et al. Hourly concentrations of fine and coarse particulate matter and dynamic pulmonary function measurements among 4 992 adult asthmatic patients in 25 Chinese cities[J]. *Environ Int*, 2022, 158: 106942. DOI:10.1016/j.envint.2021.106942.
- [23] Huang KY, Liang FC, Yang XL, 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. DOI:10.1136/bmj.l6720.
- [24] Huang KY, Yang XL, Liang FC, et al. Long-term exposure to fine particulate matter and hypertension incidence in China[J]. *Hypertension*, 2019, 73(6): 1195-1201. DOI: 10.1161/hypertensionaha.119.12666.
- [25] Liang FC, Liu FC, Huang KY, et al. Long-term exposure to fine particulate matter and cardiovascular disease in China[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 75(7): 707-717. DOI: 10.1016/j.jacc.2019.12.031.
- [26] Li TT, Zhang Y, Wang JN, et al. All-cause mortality risk associated with long-term exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> in China: a cohort study[J]. *Lancet Public Health*, 2018, 3(10): e470-477. DOI:10.1016/s2468-2667(18)30144-0.
- [27] 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]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125(11): 117002. DOI: 10.1289/ehp1673.
- [28] Liu C, Chan KH, 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]. *Environ Sci Technol*, 2022, 56(18): 13200-13211. DOI:10.1021/acs.est.2c03084.
- [29] Rich DQ, Kipen HM, 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. DOI:10.1001/jama.2012.3488.
- [30] Li HC, Zhou L, Wang CC, et al. Associations between air quality changes and biomarkers of systemic inflammation during the 2014 Nanjing Youth Olympics: a quasi-experimental study[J]. *Am J Epidemiol*, 2017, 185(12):1290-1296. DOI:10.1093/aje/kww209.
- [31] Xue T, Zhu T, Peng W, et al. Clean air actions in China, PM<sub>2.5</sub> exposure, and household medical expenditures: a quasi-experimental study[J]. *PLoS Med*, 2021, 18(1): e1003480. DOI:10.1371/journal.pmed.1003480.
- [32] Li HC, Cai J, Chen RJ, et al. Particulate matter exposure and stress hormone levels: a randomized, double-blind, crossover trial of air purification[J]. *Circulation*, 2017, 136(7):618-627. DOI:10.1161/circulationaha.116.026796.
- [33] Liu S, Huang QY, Wu Y, et al. Metabolic linkages between indoor negative air ions, particulate matter and cardiorespiratory function: a randomized, double-blind crossover study among children[J]. *Environ Int*, 2020, 138:105663. DOI:10.1016/j.envint.2020.105663.
- [34] Shi JJ, Lin ZJ, Chen RJ, et al. Cardiovascular benefits of wearing particulate-filtering respirators: a randomized crossover trial[J]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125(2): 175-180. DOI:10.1289/ehp73.
- [35] Lin ZJ, Chen RJ, Jiang YX, et al. Cardiovascular benefits of fish-oil supplementation against fine particulate air pollution in China[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73(16): 2076-2085. DOI:10.1016/j.jacc.2018.12.093.
- [36] Wang CP, Lin JY, Niu Y, et al. Impact of ozone exposure on heart rate variability and stress hormones: a randomized-crossover study[J]. *J Hazard Mater*, 2022, 421:126750. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.126750.
- [37] 任国强, 王于丹, 周云波. 科学研究中因果推断的方法、应用与展望——以个体健康研究为例[J]. *人口与经济*, 2022(2):1-25. DOI:10.3969/j.issn.1000-4149.2021.00.070.
- Ren GQ, Wang YD, Zhou YB. Methods, applications and prospects of causal inference in scientific research: a study of individual health research[J]. *Popul Econom*, 2022(2): 1-25. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4149.2021.00.070.
- [38] Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al. Pathways of China's PM<sub>2.5</sub> air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality [J]. *Natl Sci Rev*, 2021, 8(12):nwab078. DOI:10.1093/nsr/nwab078.
- [39] Zhang SH, An KX, Li J, et al. Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: a modelling study[J]. *Lancet Planet Health*, 2021, 5(11): e808-817. DOI: 10.1016/s2542-5196(21)00252-7.
- [40] Di Q, Wang Y, Zanobetti A, et al. Air pollution and mortality in the medicare population[J]. *N Engl J Med*, 2017, 376(26):2513-2522. DOI:10.1056/NEJMoa1702747.
- [41] WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide[EB/OL]. (2021) [2022-08-20]. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
- [42] Lee H, Myung W, Cheong HK, et al. Ambient air pollution exposure and risk of migraine: synergistic effect with high temperature[J]. *Environ Int*, 2018, 121(Pt 1): 383-391. DOI:10.1016/j.envint.2018.09.022.
- [43] Rahman M, McConnell R, Schlaerth H, et al. The effects of coexposure to extremes of heat and particulate air pollution on mortality in California: implications for climate change[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2022, 206(9):1117-1127. DOI:10.1164/rccm.202204-0657OC.
- [44] de Sario M, Katsouyanni K, Michelozzi P. Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe[J]. *Eur Respir J*, 2013, 42(3): 826-843. DOI:10.1183/09031936.00074712.
- [45] IPCC. The IPCC 6<sup>th</sup> assessment report[R]. Geneva:IPCC.
- [46] Guo YM, Gasparrini A, Armstrong BG, et al. Heat wave and mortality: a multicountry, multicomunity study[J]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125(8): 087006. DOI: 10.1289/ehp1026.
- [47] Yin P, Chen RJ, Wang LJ, et al. The added effects of heatwaves on cause-specific mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities[J]. *Environ Int*, 2018, 121(Pt 1):898-905. DOI:10.1016/j.envint.2018.10.016.
- [48] Lei J, Chen RJ, Yin P, et al. Association between cold spells and mortality risk and burden: a nationwide study in China[J]. *Environ Health Perspect*, 2022, 130(2):027006. DOI:10.1289/ehp9284.
- [49] Gasparrini A, Guo YM, Hashizume M, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study[J]. *Lancet*, 2015, 386(9991):369-375. DOI:10.1016/s0140-6736(14)62114-0.
- [50] Chen RJ, Yin P, Wang LJ, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities[J]. *BMJ*, 2018, 363: k4306. DOI:10.1136/bmj.k4306.
- [51] Jiang YX, Hu JL, Peng L, et al. Non-optimum temperature increases risk and burden of acute myocardial infarction onset: A nationwide case-crossover study at hourly level in 324 Chinese cities[J]. *eClinicalMedicine*, 2022, 50: 101501. DOI:10.1016/j.eclinm.2022.101501.
- [52] Guo YM, Gasparrini A, Armstrong BG, et al. Temperature variability and mortality: a multi-country study[J]. *Environ Health Perspect*, 2016, 124(10):1554-1559. DOI: 10.1289/ehp149.
- [53] Cai WJ, Zhang C, Suen HP, et al. The 2020 China report of the *Lancet* Countdown on health and climate change[J]. *Lancet Public Health*, 2021, 6(1):e64-81. DOI: 10.1016/s2468-2667(20)30256-5.
- [54] Du YD, Wang XW, Yang XF, et al. Impacts of climate change on human health and adaptation strategies in south China [J]. *Adv Clim Change Res*, 2013, 4(4): 208-214. DOI: 10.3724/SPJ.1248.2013.208.
- [55] Xiao H, Tian HY, Gao LD, et al. Animal reservoir, natural and socioeconomic variations and the transmission of hemorrhagic fever with renal syndrome in Chenzhou, China, 2006-2010[J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2014, 8(1): e2615. DOI:10.1371/journal.pntd.0002615.
- [56] Bai L, Morton LC, Liu QY. Climate change and mosquito-borne diseases in China: a review[J]. *Global Health*, 2013, 9(1):10. DOI:10.1186/1744-8603-9-10.
- [57] Gasparrini A, Guo YM, Sera F, et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios[J]. *Lancet Planet Health*, 2017, 1(9): e360-367. DOI:10.1016/s2542-5196(17)30156-0.
- [58] Wang YJ, Wang AQ, Zhai JQ, et al. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5 °C and 2.0 °C warming[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 3376. DOI:10.1038/s41467-019-11283-w.
- [59] Yang J, Zhou MG, Ren ZP, et al. Projecting heat-related excess mortality under climate change scenarios in China [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 1039. DOI: 10.1038/s41467-021-21305-1.
- [60] Petkova EP, Ebi KL, Culp D, et al. Climate change and health on the U.S. gulf coast: public health adaptation is needed to address future risks[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12(8): 9342-9356. DOI: 10.3390/ijerph120809342.