

文章编号: 1000-2812 (2025) 01-0001-12

大气环境影响人群健康的研究进展与展望

朱毅翔, 阚海东

复旦大学 公共卫生学院 环境卫生学教研室, 公共卫生安全教育部重点实验室,
国家卫生健康委员会卫生技术评估重点实验室, 上海 200032

摘要: 大气环境对人类健康产生了深远影响, 已成为全球关注的热点问题。尽管以往研究对空气污染和气候变化影响进行了系统评估, 但仍有许多问题亟待解决, 主要包括大气污染物及其健康效应的复杂性、气候变化及其影响的多元性和复合性等。大气环境对人类健康影响的研究涉及流行病学、毒理学、大气科学, 及公共卫生等多个领域。近年来, 大气环境监测技术的发展, 环境暴露模型和统计分析模型的建立, 为研究大气环境对人群健康的影响提供了技术支持。本研究从大气污染物的健康影响及其生物学机制、气候变化对人群健康潜在威胁和影响路径入手, 综述相关研究现状及进展, 以期为公共卫生决策提供科学依据。

关键词: 大气环境; 空气污染; 气候变化; 极端天气事件; 研究现状; 进展

中图分类号: R122.2; X510.31 文献标识码: A doi: 10.13885/j.issn.1000-2812.2025.01.001

Current research status and advances in the impact of atmospheric environment on human health

ZHU Yixiang, KAN Haidong

Department of Environmental Health, School of Public Health, Key Laboratory of Public Health Safety of Ministry of Education,
Key Laboratory of Health Technology Assessment, National Health Commission, Fudan University, Shanghai 200032, China

Abstract: The atmospheric environment had a profound impact on human health and has become a global issue of significant concern. Despite systematic assessments of the effects of air pollution and climate change in previous studies, many issues remain to be addressed, particularly the complexity of atmospheric pollutants and their health effects, as well as the diversity and complexity of climate change and its impacts. Research on the effects of the atmospheric environment on human health spans multiple fields, including epidemiology, toxicology, atmospheric science, and public health. In recent years, with the development of atmospheric monitoring technologies, the establishment of environmental exposure models and statistical analysis models has provided technical support for studying the impact of the atmospheric environment on public health. This paper reviews the current status and advances of the research, focusing on the health effects of air pollutants and their biological mechanisms, as well as the potential threats and pathways of climate change to public health, aiming to provide scientific evidence for public health decision-making.

Keywords: atmospheric environment; air pollution; climate change; extreme weather event; current research status; advances

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82430105); 上海市科学技术委员会重大专项基金资助项目(2023SHZDZX02); 上海市“一带一路”联合实验室建设基金资助项目(22230750300); 上海市国际科技合作基金资助项目(21230780200)

作者简介: 朱毅翔, 男, 博士研究生, 研究方向为环境流行病学(空气污染与健康、全球气候变化与健康),
e-mail: yxzhu20@fudan.edu.cn;

阚海东, 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 欧洲科学院院士, 教育部长江学者特聘教授, 研究方向为环境流行病学(空气污染与健康、全球气候变化与健康), e-mail: kanh@fudan.edu.cn, 通信作者

大气环境对人群健康的影响深远,主要包括大气颗粒物污染、有害气体成分和不适宜气温等因素。根据《全球疾病负担2021报告》^[1],空气污染、气温异常等已成为全球疾病负担的主要风险因素。其中,空气污染导致全球810万人死亡,已成为全球第二大死亡风险因素。大气污染物中,颗粒物污染是2021年全球疾病负担的首要因素,占总残疾调整生命年的8.0%。近年来,细颗粒物(fine particulate matter, $PM_{2.5}$)污染显著改善,但臭氧污染的增加加剧了健康风险,短期臭氧暴露导致的疾病负担甚至超过 $PM_{2.5}$ ^[2]。二氧化氮(nitrogen dioxide, NO_2)作为常见的大气污染物,主要来源于汽车尾气和工业排放,尤其对城市居民健康构成了较高风险^[3]。除了大气污染,气候变化对大气环境和人群健康的影响同样不容忽视。温室气体的增加导致气温升高和极端天气事件频发,对人类的身体健康和心理健康构成威胁。不适宜气温每年导致全球近200万人死亡^[4],且高温相关死亡人数呈逐年增加趋势。气候预估研究^[4-5]显示,热归因死亡负担未来将急剧增加,且超过冷相关死亡负担的减少。极端天气气候事件频率和强度增大,对人群健康的威胁日益加剧。极端天气事件如飓风、洪水等导致大规模人员伤亡和心理创伤。研究^[6]显示,2014—2023年,全球61%的陆地经历了极端降水事件的增加,导致洪水、传染病和水污染等风险加剧。与1981—2010年相比,2022年干旱和热浪事件的增加,使124个国家/地区遭受中度或重度粮食不安全人数增长1.51亿人^[7]。

大气环境因素通过多种途径影响人体各系统健康。空气污染对呼吸系统、心血管系统的影响显著,非传染性疾病占空气污染疾病负担的90%,主要包括心脏病、中风、糖尿病、慢性阻塞性肺病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)等^[1]。研究^[8]发现, $PM_{2.5}$ 能够深入肺部,进入血液,随血液循环到达全身各个器官,影响各系统功能,造成体内稳态失衡。研究^[9-10]发现,空气污染会增加泌尿系统生殖系统、消化系统、神经系统等疾病的发病率和死亡风险。大气污染物成分,颗粒物的粒径、组分、理化性质等特征均会影响其健康风险。近年来,空气污染与健康的研究不

断深入,朝着“更广、更细、更低、全谱系”的方向发展。关于空气污染的健康危害效应、暴露反应关系、不同污染物及其组分对健康的影响等科学问题研究取得了显著进展。

气候变化背景下,不适宜气温(如极端高温或低温)和极端天气事件(如热浪、暴雨、台风等)对公众健康的影响日益显著。气候变化对健康的多重影响包括直接效应、间接效应、脆弱性因素、风险评估,以及卫生系统的应对能力等多个方面^[11]。近年来,气候变化相关的极端天气事件变得愈发频繁和强烈,导致包括传染性疾病、意外伤害、食品安全问题、心理健康问题等一系列不良健康后果^[10],尤其对脆弱群体构成更大威胁,包括儿童、老年人、体弱者,以及贫困和偏远地区的居民等^[6]。越来越多研究^[5,12-13]通过结合气候模型、社会经济路径和健康数据,预测不同气候变化情景下公众健康遭受的影响,这有助于深入了解气候变化对人类健康的潜在威胁,识别高风险人群,为政策制定者提供科学依据,优化公共卫生应对策略,制定有效的应对措施。

本研究系统阐述了空气污染、不适宜气温、极端天气事件等大气环境因素对人群健康的影响及其生物学机制和影响路径,综述相关研究现状及进展,为更好地理解空气污染和气候变化对健康的潜在威胁提供科学依据,为公共卫生政策制定和健康风险评估提供理论支持,进而推动应对环境健康挑战的策略和措施进一步完善。

1 大气污染物对人群健康的影响

1.1 颗粒物污染的健康风险

颗粒物引发的空气污染是对全球公众健康构成最大威胁的环境因素。虽然,全球多数地区的大气颗粒物浓度整体呈下降或稳定趋势,但其在全球范围内依然造成巨大的疾病负担。研究^[1]表明,颗粒物大气污染是造成2021年全球疾病负担的首要因素,全球每年由于颗粒污染死亡的总人数高达780万人,占全球总死亡人口数的11.5%。

过去几十年,中国经济的快速发展导致大气污染物排放量急剧增加。尽管在严格的控制政策下,大气颗粒物浓度不断下降,但颗粒物污染仍然是中国重要的公共卫生威胁。《全球疾病负担研

究》^[1]估计,2021年,空气污染导致中国234万人死亡,其中227万人死于颗粒物。2021年,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)修订了针对PM_{2.5}和可吸入颗粒物(inhalable particulate matter, PM₁₀)的全球空气质量准则^[4]。充分证据表明,即使在极低浓度的颗粒物暴露下,仍会对健康产生有害影响。研究^[5]估计,若中国年PM_{2.5}质量浓度达到WHO新的空气质量准则目标(5 μg/m³),与2020年PM_{2.5}质量浓度(32.1 μg/m³)相比,可避免121.5万人过早死亡。

关于颗粒物污染对人群健康的影响,已有大量流行病学研究并取得显著进展。近年来,颗粒物污染与健康的研究主要朝4个方向发展:“更广”——全球空间尺度的评估;“更细”——时间尺度的精细化研究;“更低”——污染暴露水平的健康影响;“全谱系”——全面评估健康效应。

1.1.1 更广——在全球尺度评估颗粒物污染与居民死亡的关系

一项对全球6大洲、24个国家/地区、652个城市的大气颗粒物污染与居民死亡关系的研究^[6]发现,颗粒物对人群健康的影响具有独立作用,且未见明显阈值。另一项研究^[7]纳入全球20个国家/地区205个城市的环境与健康数据,发现短期暴露于环境粗颗粒物对居民死亡风险的独立健康效应。这些研究为WHO修订空气质量标准和开展风险评估提供了重要流行病学证据,为各国政府制定空气污染政策、采取公共卫生措施、降低颗粒物疾病负担提供了科学依据。

1.1.2 更细——在小时尺度分析颗粒物污染对人群健康急性影响

近年来,研究者开始从更细化的时间尺度探讨空气污染的健康效应。颗粒物污染在小时尺度的暴露对人群死亡、发病风险、亚临床指标的变化产生显著影响。中国一项研究^[8]显示,多种大气污染物的急性暴露可在极短时间内(如1 h内)诱发急性冠状动脉综合征,效应持续约1 d。另一项在中国25个城市开展的研究^[9]发现,PM_{2.5}、粗颗粒物暴露会导致哮喘患者肺功能下降,效应出现滞后1 d(24~48 h),并在滞后4 d(96~120 h)达到峰值。此外,小时尺度研究^[20]发现,短期PM_{2.5}暴露与血压升高相关,暴露-反应关系几乎呈线性,

未发现明显阈值。

1.1.3 更低——颗粒物污染低浓度暴露下仍有健康风险

欧美等发达国家和地区经过长年污染治理和相关产业转移,空气质量水平已达到或接近WHO旧版空气质量准则,但研究^[21]表明,在低于主要国际组织和国家空气质量标准限值下,颗粒物的暴露-反应曲线呈近乎线性增加趋势,不存在明显阈值。在低暴露水平下,降低PM_{2.5}暴露带来的健康收益尤为显著。因此,实施更严格的空气质量标准,对于更好地保护人群健康至关重要。

1.1.4 全谱系——在疾病谱水平描绘颗粒物污染对居民发病和死亡风险的影响

近年来,随着疾病发病和死亡数据质量的日益精细,关于空气污染对人群健康的研究逐步向揭示颗粒物污染对各类疾病谱系影响的方向发展。多项研究^[9, 22-23]探讨了颗粒物暴露对中国居民呼吸系统、心血管系统等各类疾病谱的住院和死亡风险,不仅识别了更细化的心血管疾病类型(如急性心肌梗死、心力衰竭等)的健康风险,还揭示了部分以往较少报道的呼吸系统疾病(如急性喉炎、流感、鼻、鼻旁窦疾病等)的健康风险。此外,相关研究^[24]显示,颗粒物直接经嗅觉神经通路进入大脑,导致神经炎症、氧化应激、血脑屏障损伤,从而引发或加重阿尔茨海默病、帕金森综合征等神经系统疾病。颗粒物暴露还与糖尿病、甲状腺疾病、代谢综合征等一系列内分泌系统疾病风险相关^[25-26]。相关研究^[27]还识别了颗粒物污染对女性、儿童、老年人等敏感人群的影响,揭示了不同地区和季节下的疾病健康风险。全谱系研究的深入,有助于加深颗粒物污染对人体各系统健康影响的认识,为未来的科学研究和政策制定提供更多理论支持,通过对公众的健康保护带来更大健康获益。

1.2 臭氧

随着全球变暖趋势加剧,环境臭氧的潜在健康威胁日益严峻。根据美国健康效应研究所2024年发布的报告^[28],2020年全球臭氧的平均暴露水平为96.4 μg/mL,全球约93%的人口生活在高峰季节臭氧质量浓度超过WHO高峰季臭氧指导质

量浓度 ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 所在地区。随着经济发展和工业化进程的推进,臭氧前体物(如氮氧化物、甲烷和非甲烷挥发性有机化合物)的排放量不断增加,气温高也加剧了臭氧污染。全球多个地区暴露于臭氧污染的人口比例不断上升。中国近年来在大气污染防治方面取得了显著进展,尤其是在颗粒物污染治理方面取得了良好成效,但臭氧污染形势依然严峻,部分地区的臭氧质量浓度达到历史最高值^[29]。全球疾病负担研究估计,环境臭氧暴露在2021年导致全球约48.9万人的过早死亡,并造成877万伤残调整寿命年损失^[1]。大规模人群调查显示,短期和长期接触臭氧均与心、肺功能恶化密切相关,可增加非意外死亡的风险^[30]。

1.2.1 对呼吸系统的影响

流行病学研究^[30-31]表明,短期臭氧暴露会导致肺功能下降,增加呼吸道感染的易感性,导致哮喘恶化,加重肺气肿、COPD等呼吸系统疾病。而长期暴露于大气臭氧导致的呼吸系统疾病死亡负担甚至远大于短期暴露^[32]。臭氧会刺激呼吸道上皮细胞,导致局部炎症反应,增加呼吸道对病原体或过敏原的易感性。此外,臭氧通过生成自由基和活性氧,引起氧化应激反应,直接损伤肺组织,导致细胞凋亡或坏死^[33]。氧化应激的加剧不仅会直接损害呼吸道上皮,还可能导致长期的肺功能下降。人体和动物实验^[34-35]均表明,臭氧暴露可能加剧哮喘型气道的高反应性及免疫系统的异常反应。

1.2.2 对心血管系统的影响

全球疾病负担研究中,臭氧的疾病负担评估很可能被低估,目前仅考虑了臭氧对呼吸系统疾病的影响,未纳入臭氧对心血管疾病和代谢性疾病潜在影响的计算。越来越多的流行病学研究^[36-38]表明,臭氧暴露独立于 $\text{PM}_{2.5}$ 和其他气态污染物,不仅会增加心血管疾病的发病和死亡风险,还会增加缺血性心脏病、心力衰竭、高血压、脑卒中等心血管疾病的风险。臭氧暴露与血清中多种炎症因子水平升高有关,如肿瘤坏死因子 α 、可溶性细胞间黏附因子1和血管内皮生长因子等。这些标志物的变化反映了臭氧引起了循环系统炎症反应^[39]。机制研究^[40]表明,臭氧通过干扰与炎

症、氧化应激、内皮功能和自主神经失衡相关的生物途径,对心血管系统产生有害影响。臭氧暴露可影响心的自主神经功能,通过激活下丘脑-垂体-肾上腺轴和交感神经-肾上腺髓质轴,导致心自主神经功能失衡。这种失衡进一步影响心脏的节律和收缩能力,对心血管系统产生有害影响。此外,臭氧还可能导致脂质过氧化和线粒体氧化损伤,这些氧化应激反应对心血管健康构成威胁。

1.2.3 对全身多系统的影响

长期暴露于臭氧污染的环境中不仅对心血管系统和呼吸系统健康产生危害,还可能提升全身多系统的健康风险。臭氧暴露可引发全身性免疫反应,增加对外界刺激(如病原体)的反应,导致免疫系统过度激活^[41-42]。长期的氧化损伤和炎症反应会损害免疫细胞的功能,降低机体抵抗感染和疾病的能力^[43]。

臭氧暴露通过生成活性氧和自由基,导致脑细胞氧化损伤,引起神经系统功能紊乱。臭氧暴露可能导致认知能力下降和情绪障碍,增加患阿尔茨海默病等神经退行性疾病的风险^[44]。另外,臭氧可引发全身性炎症反应,尤其是通过增加脑血管的通透性,引发神经炎症^[45]。慢性神经炎症被认为与多种神经系统疾病(如帕金森病、阿尔茨海默病等)密切相关^[46]。

臭氧暴露可能通过影响下丘脑-垂体-腺体轴扰乱体内的激素水平,尤其是与应激反应、代谢和免疫调节相关的激素。例如,臭氧暴露可能导致皮质醇等应激激素水平升高,破坏体内的代谢平衡^[47]。臭氧可能通过诱导氧化应激和慢性炎症反应,增加胰岛素抵抗、肥胖、糖尿病等代谢性疾病的发生风险^[48]。

1.2.4 与其他大气环境因素的交互作用

臭氧与环境高温、 $\text{PM}_{2.5}$ 、室内空气污染等环境因素存在正向的交互作用,多种大气污染物的共同暴露会加剧对健康的危害。一项中国的研究^[49]表明,复合高臭氧和热浪暴露事件相比高臭氧污染事件具有更高的风险。高血压心脏病、急性心肌梗死、慢性缺血性心脏病、缺血性中风、COPD,复合暴露事件的死亡风险高于仅热浪和仅高臭氧污染事件。另一项全球多中心研究^[50]发

现臭氧和PM_{2.5}之间存在正向的交互作用,较高的死亡风险预测与较高的共污染物暴露有关。亟须采取多污染物控制措施,例如管理端控制或能源结构转型等策略,实现多种污染物的协同治理。个体,特别是敏感人群(如老年人、儿童、哮喘患者等)需要加强对多种大气环境因素共暴露的防护,以降低健康风险。

1.3 NO₂

NO₂是一种常见的大气污染物,对人体健康具有显著影响。NO₂不仅是地面臭氧的前体,还参与PM_{2.5}的二次形成。《2024年全球空气状况》报告首次将NO₂暴露水平及其相关健康影响纳入评估^[28]。环境中的NO₂主要来源于人类活动,燃料燃烧和交通尾气是其主要来源。人口密集的城市地区,特别在高收入国家,通常面临较高的NO₂暴露水平及健康风险。

近年来,越来越多的研究关注NO₂暴露对人群健康的影响。一项覆盖22个国家/地区、398个城市的全球研究^[46]显示,短期NO₂暴露与总死亡风险、心血管疾病、呼吸道疾病死亡风险之间存在显著关联,研究^[46]还发现这3种原因的暴露-反应关系曲线几乎呈线性,且未见明显的阈值,表明即使在较低浓度的暴露下,NO₂依然存在健康风险。

针对NO₂长期暴露的研究^[3]也表明,其与多系统疾病的发病风险显著相关,尤其是呼吸系统疾病、心血管疾病、精神和行为障碍,以及肌肉骨骼疾病。即使在低于现行空气质量标准质量浓度的NO₂长期暴露情况下,其与老年人群的死亡风险依然存在显著关联,提示减少NO₂排放以改善空气质量将有利于公众健康,特别是显著改善老年人群体的健康^[51-52]。

1.4 二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)

SO₂是大气主要污染物之一,通常由燃料燃烧、钢铁冶炼、石油提炼等人为活动释放,属WHO国际癌症研究机构公布的3类致癌物之一。近年来,通过清洁能源政策、工业排放控制、脱硫技术的广泛应用,发达国家的SO₂排放和人口暴露水平已显著降低。但是,许多发展中国家的SO₂质量浓度仍相对较高。虽然随着环保政

策的有效实施,SO₂质量浓度呈下降趋势,但对健康影响较大。

一项涵盖23个国家399个城市数据的全球性时间序列研究^[53]结果显示,SO₂质量浓度与人群死亡风险显著相关。暴露反应关系显示,SO₂质量浓度越高,死亡风险先陡然上升,再平缓。即使执行目前的SO₂空气质量指南标准($\rho_{\text{SO}_2}=40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),仍然会导致死亡风险增加,降低现有SO₂质量浓度限值可以获得更多健康效益。另一项在中国开展的环境流行病学研究^[54]显示,SO₂质量浓度每上升10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,总死亡率风险增加0.59%,呼吸系统死亡风险增加0.55%,心血管疾病死亡风险增加0.70%。

SO₂易溶于水,接触湿润的呼吸道黏膜后会形成亚硫酸和硫酸,刺激呼吸道,导致咳嗽和呼吸困难。此外,SO₂短期暴露可引发支气管平滑肌收缩,加重哮喘和COPD患者的症状^[55]。而长期接触SO₂可削弱或破坏呼吸系统的免疫功能和防御能力,造成呼吸道感染,诱发慢性气管炎、支气管炎、肺炎等多种炎症^[56]。此外,SO₂对肺泡有刺激作用,加重肺气肿等疾病,还可能继发性地引起心脏疾病,对心血管系统造成损害。另外,SO₂暴露还会直接引发血管收缩和炎症反应,损害血管内皮细胞,影响其调节血管张力和抗血栓功能,增加心血管事件风险。

1.5 一氧化碳(carbon monoxide, CO)

CO主要由燃料不完全燃烧产生。短期CO暴露,CO进入人体后,会与血红蛋白结合,形成碳氧血红蛋白,降低血液携氧能力,导致组织和器官缺氧,导致头痛、头晕、心悸、恶心、呕吐、乏力等症状,严重时可引发昏迷和死亡。CO暴露会增加心脏负担,诱发心绞痛、心律失常,甚至心肌梗死。长期CO暴露可能导致个体神经行为功能受损,出现注意力不集中、记忆力减退等症状^[57]。此外,CO还可能对心血管系统产生不良影响,增加心脏疾病的风险。孕期CO暴露还可能通过胎盘屏障影响胎儿发育,导致胎儿生长发育迟缓,先天性缺陷等^[58]。

大气污染物对人群健康影响的总结如表1所示。

表 1 大气污染物对人群健康的影响

大气污染物	短期暴露健康效应	长期暴露健康效应
二氧化硫	呼吸道刺激：咳嗽、呼吸困难 支气管收缩：加重哮喘和慢性阻塞性肺病症状	肺功能下降：肺活量和呼气流量减少 慢性呼吸系统疾病：如慢性支气管炎、肺气肿 心血管疾病风险增加：加速动脉粥样硬化 癌症风险：与其他污染物结合，增加肺癌风险
一氧化碳	头痛、头晕、恶心 心血管负担增加（心绞痛、心律失常） 意识模糊、昏迷	慢性心血管疾病：如高血压、冠心病 神经系统损伤：记忆力下降、注意力不集中 胎儿发育影响：导致低出生体重或神经系统缺陷
二氧化氮	呼吸道刺激：咳嗽、呼吸困难 加重哮喘症状：增加哮喘发作频率和严重程度 炎症反应：导致急性支气管炎 眼部刺激：眼睛红肿、流泪	慢性呼吸系统疾病：如慢性支气管炎、肺气肿 肺功能下降：肺活量和呼气流量减少 心血管疾病风险增加：加速动脉粥样硬化
臭氧	呼吸道刺激：咳嗽、呼吸困难 加重哮喘症状：增加哮喘发作频率和严重程度 眼部刺激：眼睛红肿、流泪 炎症反应：导致急性支气管炎或肺炎	慢性呼吸系统疾病：如哮喘、慢性支气管炎 肺功能下降：肺活量和呼气流量减少 心血管疾病风险增加：加速动脉粥样硬化 免疫系统影响：长期暴露削弱免疫功能
颗粒物	呼吸道刺激：咳嗽、呼吸困难 加重哮喘和慢性阻塞性肺病症状：增加发作频率和严重程度 心血管负担：心律失常、心肌梗死 炎症反应：导致急性支气管炎或肺炎	慢性呼吸系统疾病：如慢性支气管炎、肺气肿 肺癌风险增加：长期暴露与肺癌发病率显著相关 心血管疾病风险增加：如冠心病、中风 免疫系统影响：长期暴露削弱免疫功能 神经系统影响：导致长期神经炎症，引发认知障碍等神经退行性疾病

2 气象因素对人群健康的影响

2.1 不适宜气温

不适宜气温主要包括极端寒冷和极端高温，其定义为比最低健康风险温度更高或更低的环境温度。根据过去研究的气温和健康风险暴露-反应关系^[4,59]，最佳温度为暴露-反应关系曲线中气温效应最低的点，认为该温度不会导致超额健康风险；温度低于或高于该最佳温度，即非适宜温度，均会导致健康风险的升高，整体呈现一条U型曲线。气温的极端变化，尤其是极端高温和极端低温，已成为全球公共卫生领域日益关注的重要问题，对人体健康造成显著影响，尤其是对老年人、儿童、孕妇、慢性病患者等敏感人群构成更大健康威胁。

2019年全球疾病负担研究结果显示，非适宜气温是全球十大死亡原因之一，全球每年超过500万人死于不适宜的气温，相当于每10万人中增加74例死亡^[4]。每年约9.43%的死亡病例可归因于气温过低或过高，其中低温所致超额死亡占8.52%，高温所致超额死亡占0.91%。在

过去20年，全球与高温相关的死亡人数不断上升，未来气候变化将可能加剧这一趋势。气温与非意外死亡、呼吸系统疾病和心脑血管疾病死亡均存在显著相关性^[60]。中国气温与死亡风险的暴露-反应关系呈U型曲线，最低死亡风险的温度区间为22~23℃，约11%的死亡与过高或过低气温有关，高于全球平均水平（7.71%）。气温对死亡风险的影响具有滞后效应，通常高温的滞后作用较短，而低温的滞后作用则较长。研究^[5]预测，在气候变化背景下，未来中国低温相关的死亡负担将逐渐下降，高温相关的死亡负担将急剧增加。在中、高排放气候情景下，热相关死亡负担的增加将抵消冷相关死亡负担的下降，总体死亡负担将呈上升趋势。

不适宜气温对全身多种系统疾病产生显著影响。不适宜气温与多种心、脑血管疾病风险升高相关。高温环境会导致人体血管扩张，促进散热，血液循环加速，增加心脏负荷，加重患有心血管基础疾病群体的症状，增加心脏疾病发作的风险。环境低温会使血管收缩，增加血液流动阻力和心脏工作负担，引发心脏供血不足或动脉血栓形成，

导致急性心脏事件发生。研究^[61]表明,高温和低温暴露与总心血管系统疾病、缺血性心脏病、中风、心力衰竭的死亡风险和负担增加有关。此外,低温还可能引发呼吸道平滑肌收缩,导致气道狭窄,增加气道阻塞和呼吸困难的风险。研究^[62-64]表明,低温暴露与肺功能下降、哮喘发作、COPD发病等风险均显著相关。

2.2 极端天气事件

极端天气事件通过多种途径直接或间接影响人群健康。例如,热浪和寒潮可诱发呼吸系统和循环系统的疾病,导致死亡风险升高;洪涝、干旱、台风等灾害不仅升高传染病的风险,还可能影响人群的心理健康。

2.2.1 热浪和寒潮

热浪和寒潮均属于不适宜气温的极端事件,表现为气温在某一地区持续异常升高或降低,并超出常年气温范围,通常用气温限值和持续时间两个特征定义。热浪和寒潮对心、肺疾病的发病和死亡风险均存在显著影响,尤其对老年人、儿童、孕妇等脆弱群体的健康构成较大威胁。热浪会使体温调节系统超负荷,增加呼吸系统、循环系统等疾病的发病风险^[65];寒潮则会导致人体皮肤血管收缩,血压升高,诱发支气管痉挛,促进炎症反应,加重心脑血管和呼吸系统疾病^[66]。

寒潮、热浪还可通过多种间接途径加剧健康风险。寒潮期间,大气层稳定,污染物容易在低空积聚,导致颗粒物浓度升高,增加呼吸系统和心血管疾病风险。而强烈的阳光和高温促进地表臭氧生成,刺激呼吸道,加剧哮喘等呼吸系统疾病^[67]。另外,寒潮、热浪均可能间接导致电力需求增加,电力系统过载甚至断电,给居住在空调依赖区域的人群带来额外的健康风险,对医疗系统带来冲击^[68]。

2.2.2 极端降水事件

极端降水是指在特定时间段内降水量显著超过正常水平的事件,具有短时高强度或长时间持续的特点。极端降水已成为影响人类健康的潜在环境风险因素,甚至可能比传统的环境风险因素造成更大危害。研究^[69]发现,极端降水事件(例如5年或10年重现期的降水事件)与呼吸系统疾病死亡风险显著升高相关,尤其对哮喘和COPD

死亡风险影响更为显著,对65岁以上老年人健康影响尤为显著。一项全球研究^[70]表明,极端降水事件与全因死亡、心血管疾病死亡、呼吸系统疾病死亡风险升高有关,且对健康的影响与当地气候和植被覆盖率的不同而有所差异。极端降水的增加还可能引起洪水、水污染、传染病的风险增加。过去10年,全球61%的陆地出现了极端降水事件增多的情况,致命的蚊媒传染病、消化道传染病等疾病的发病风险有所升高^[6]。此外,极端降水事件会迅速提高有害生物气溶胶水平,导致呼吸系统疾病风险升高^[69,71]。

2.2.3 洪水

洪水是指河流、湖泊等水体水位迅速上升,超过正常范围,淹没周边地区的现象。除了极端降水事件以外,洪水的诱因还包括融雪、热带气旋(台风或飓风)、溃坝或堤坝决口等。气候变化导致全球局部地区洪水发生频率和强度增大。洪水对人类健康的影响广泛而复杂,包括直接的溺水、外伤、体温过低、传染病暴发,间接的心理损害和医疗服务中断等。研究^[72]表明,洪水暴露显著升高人群全因死亡风险,洪水发生后2个月,全因死亡风险升高2.1%。洪水导致疾病管理中断、获取清洁水源和卫生设施的途径受阻、人群暴露于水传播病原体、粮食不安全、营养不良,以及心理压力等因素,都可能加剧疾病恶化和过早死亡^[73]。洪水还增加了水传播病原体的接触风险,进一步加重腹泻、疟疾等疾病的传播,特别是孕妇、儿童、老年人、低收入群体等脆弱群体受到洪水相关影响尤为严重。研究^[74-75]表明洪水与妊娠高血压、子痫和妊娠丢失的发生风险显著增加。一项针对非洲地区的研究^[76]发现,洪水暴露与婴儿死亡之间存在显著关联,洪水发生后4年内,婴儿死亡风险依然显著升高。此外,洪水造成的财产损失、流离失所和创伤后应激障碍可能对心理健康产生长期影响^[77]。灾后恢复期长,可能导致持续的焦虑、抑郁等心理问题。

2.2.4 热带气旋

热带气旋(包括飓风和热带风暴)在全球范围内广泛分布。研究^[78]显示,全球每年约有6%~12%的人口(平均约5.6亿人)暴露于热带气旋,并且暴露人数逐年增加。一项美国的流行病学研究^[79]表明,热带气旋的间接死亡人数远远超过直

接死亡人数,平均每次气旋导致7 000~11 000人间接超额死亡。热带气旋的影响不仅局限于灾害发生时,其效应持续长达15年,影响包括基础设施破坏、人口迁移、经济中断、生态变化、污染增加等,这些事件链条通过间接途径影响人类健康。一项全球研究^[80]发现,1980—2019年,每10年有97 430人超额死亡与热带气旋暴露有关,大多数超额死亡发生在亚洲,特别是东南亚和南亚地区人口密度较高的沿海城市。热带气旋的持续风速越高,其相关的死亡风险越大。研究^[81]还发现,热带气旋与呼吸系统疾病死亡风险显著相关,尤其是65岁以上老年人、肺炎和COPD患者的相关死亡风险更高。热带气旋还增加了肠道传染病、败血症和登革热等传染病的发病风险^[78]。

2.2.5 干旱

根据联合国《世界水资源开发报告》,预计到2050年,世界52%的人口将生活在缺水地区^[82]。温室气体排放增加、气温上升、局地降水减少导致干旱事件愈加频繁。干旱事件对粮食安全和营养供给造成不利影响,尤其在中、低收入国家,干旱通过影响粮食生产,导致营养不良(包括营养不足和微量营养元素缺乏)、饥荒的风险上升,严重威胁当地儿童生长发育,导致消瘦、发育迟缓、体重不足等^[83]。营养不良的儿童以及生活在粮食不安全环境中的儿童,往往遭受认知损害、身体发育滞后的威胁,疟疾、肺炎、腹泻等疾病发病风险上升。干旱还间接通过影响水资源的可用性和水质,升高霍乱、腹泻、疥疮、疟疾等传染病的发病和死亡风险^[84]。

3 总结与展望

大气环境对人群健康的影响广泛,大气污染物和气象因素通过多种生物学机制和社会路径对健康产生影响。大量研究揭示了空气污染对健康的危害,但仍存在许多未知的风险和机制,尤其是不同污染物之间的协同效应和长期健康影响。现有研究大多集中于单一污染物对健康的直接影响,但多种大气污染物共同作用于人体,且它们之间可能发生复杂的交互作用,其健康后果较难预测。空气污染的健康影响不仅局限于短期暴露,长期暴露的危害更为隐蔽且复杂。长期暴露于低浓度的污染物,虽然在短期内不会引起显著的急

性症状,但可能引发慢性疾病发病及加重,且这种影响可能在若干年甚至几十年后显现。

随着全球环境污染形势日益严峻及气候变化加剧,优化健康风险评估模型尤为重要。未来研究不仅应关注空气污染和气候变化的直接危害,还应考虑环境变化、人口老龄化等因素对污染物暴露模式的影响。这些因素导致大气环境因素的健康风险呈现新的趋势和特征。因此,需要及时调整和完善现有的健康风险评估模型,通过精准评估健康风险并优化相关模型,可以更好地预测健康效应,为政策制定者提供有力支持,推动空气污染源控制和公共健康保护的持续改善。

未来研究应该进一步加强大气环境与健康的综合性风险评估,特别是探索大气环境因素的协同效应及其对人体多系统、长期健康影响的具体机制。研究人员不仅要评估不同大气污染物和气象因素对呼吸系统、心血管系统和神经系统等单一领域的影响,还应考虑其对全身多器官、多系统的综合性影响。此外,应开展跨学科的合作,结合环境科学、公共卫生学、流行病学、毒理学等多个领域的研究成果,全面评估空气污染的健康风险,进一步明确各大气环境因素的健康效应,并确立暴露的安全阈值,为政策制定者提供科学依据,制定更加精准的空气质量标准和健康防护措施。

总的来说,面对气候变化与空气污染交织的复杂局面,未来的空气污染治理及气候变化缓解和适应政策需要更加注重系统性、协同性、可持续性,推动政府、企业、公众,以及科学界的共同参与,以实现人群健康保护目标。

参考文献

- [1] NAGHAVI M, ONG K L, AALI A, et al. Global burden of 288 causes of death and life expectancy decomposition in 204 countries and territories and 811 subnational locations, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. The lancet, 2024, 403(10440):2100-2132.
- [2] ZHANG Q, YIN Z C, LU X, et al. Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China[J]. Environmental science and ecotechnology, 2023, 16: 100280.
- [3] XIA X, MENG X, LIU C, et al. Associations of long-term nitrogen dioxide exposure with a wide spectrum of

- diseases: a prospective cohort study of 0.5 million Chinese adults [J]. *The lancet public health*, 2024, 9(12): e1047-e1058.
- [4] ZHAO Q, GUO Y M, YE T T, et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study [J]. *The lancet planetary health*, 2021, 5(7): e415-e425.
- [5] YIN P, HE C, CHEN R J, et al. Projection of mortality burden attributable to nonoptimum temperature with high spatial resolution in China [J]. *Environmental science & technology*, 2024, 58(14): 6226-6235.
- [6] Romanello M, Walawender M, Hsu S C, et al. The 2024 report of the Lancet Countdown on health and climate change: facing record-breaking threats from delayed action [J]. *The lancet*, 2024, 404(10465): 1847-1896.
- [7] WATTS N, AMANN M, ARNELL N, et al. The 2019 report of the Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate [J]. *The lancet*, 2019, 394(10211): 1836-1878.
- [8] ZHU H H, WU Y L, KUANG X Y, et al. Effect of PM_{2.5} exposure on circulating fibrinogen and IL-6 levels: a systematic review and meta-analysis [J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129565.
- [9] GU J S, SHI Y, ZHU Y F, et al. Ambient air pollution and cause-specific risk of hospital admission in China: a nationwide time-series study [J]. *PLoS medicine*, 2020, 17(8): e1003188.
- [10] YANG T, WANG J W, HUANG J, et al. Long-term exposure to multiple ambient air pollutants and association with incident depression and anxiety [J]. *JAMA psychiatry*, 2023, 80(4): 305-313.
- [11] 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.
- [12] CHEN K, DE SCHRIJVER E, SIVARAJ S, et al. Impact of population aging on future temperature-related mortality at different global warming levels [J]. *Nature communications*, 2024, 15(1): 1796.
- [13] MADANIYAZI L, ARMSTRONG B, TOBIAS A, et al. Seasonality of mortality under climate change: a multi-country projection study [J]. *The lancet planetary health*, 2024, 8(2): e86-e94.
- [14] WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [S]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [15] LEI Y, YIN Z C, LU X, et al. The 2022 report of synergistic roadmap on carbon neutrality and clean air for China: accelerating transition in key sectors [J]. *Environmental science and ecotechnology*, 2024, 19: 100335.
- [16] LIU C, CHEN R J, SERA F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities [J]. *The new England journal of medicine*, 2019, 381(8): 705-715.
- [17] LIU C, CAI J, CHEN R J, et al. Coarse particulate air pollution and daily mortality: a global study in 205 cities [J]. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 2022, 206(8): 999-1007.
- [18] CHEN R J, JIANG Y X, HU J L, et al. Hourly air pollutants and acute coronary syndrome onset in 1.29 million patients [J]. *Circulation*, 2022, 145(24): 1749-1760.
- [19] LEI J, YANG T, HUANG S J, et al. Hourly concentrations of fine and coarse particulate matter and dynamic pulmonary function measurements among 4992 adult asthmatic patients in 25 Chinese cities [J]. *Environment international*, 2022, 158: 106942.
- [20] HU J L, XUE X W, XIAO M, et al. The acute effects of particulate matter air pollution on ambulatory blood pressure: a multicenter analysis at the hourly level [J]. *Environment international*, 2021, 157: 106859.
- [21] WEICHENTHAL S, PINAULT L, CHRISTIDIS T, et al. How low can you go? Air pollution affects mortality at very low levels [J]. *Science advances*, 2022, 8(39): eabo3381.
- [22] LIU C, CHEN R J, MENG X, et al. Criteria air pollutants and hospitalizations of a wide spectrum of cardiovascular diseases: a nationwide case-crossover study in China [J]. *Eco-environment & health*, 2022, 1(4): 204-211.
- [23] LEI J, CHEN R J, LIU C, et al. Fine and coarse particulate air pollution and hospital admissions for a wide range of respiratory diseases: a nationwide case-crossover study [J]. *International journal of epidemiology*, 2023, 52(3): 715-726.
- [24] 胡阅古,周春碚,谭春蕾,等. 大气PM_{2.5}中期暴露与重庆市主城区帕金森病门诊就诊之间的关联 [J]. *兰州大学学报(医学版)*, 2023, 49(8): 16-22.
- [25] LIANG R Y, FAN L Y, LAI X F, et al. Air pollution exposure, accelerated biological aging, and increased thyroid dysfunction risk: evidence from a nationwide prospective study [J]. *Environment international*, 2024,

- 188;108773.
- [26] LUO H H, ZHANG Q L, YU K X, et al. Long-term exposure to ambient air pollution is a risk factor for trajectory of cardiometabolic multimorbidity: a prospective study in the UK Biobank[J]. *eBioMedicine*, 2022, 84: 104282.
- [27] PELED R. Air pollution exposure: who is at high risk[J]. *Atmospheric environment*, 2011, 45(10): 1781-1785.
- [28] HEALTH EFFECTS INSTITUTE. State of global air 2024 special report [R/OL]. (2024-06-19)[2025-02-06]. Boston: Health Effects Institute, <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>.
- [29] 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2023)[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [30] VICEDO-CABRERA A M, SERA F, LIU C, et al. Short term association between ozone and mortality: global two stage time series study in 406 locations in 20 countries[J]. *BMJ*, 2020, 368: m108.
- [31] FANG X Y, HUANG S J, ZHU Y X, et al. Short-term exposure to ozone and asthma exacerbation in adults: a longitudinal study in China [J]. *Frontiers in public health*, 2023, 10: 1070231.
- [32] 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.
- [33] WU T T, LI Z G, WEI Y J. Advances in understanding mechanisms underlying mitochondrial structure and function damage by ozone[J]. *The science of the total environment*, 2023, 861: 160589.
- [34] WILLIAMS A S, MATHEWS J A, KASAHARA D I, et al. Innate and ozone-induced airway hyperresponsiveness in obese mice: role of TNF- α [J]. *American journal of physiology lung cellular and molecular physiology*, 2015, 308(11): L1168-L1177.
- [35] NIU Y, LI H C, WANG W D, et al. Ozone exposure and prothrombosis: mechanistic insights from a randomized controlled exposure trial[J]. *Journal of hazardous materials*, 2022, 429: 128322.
- [36] NIU Y, ZHOU Y C, CHEN R J, et al. Long-term exposure to ozone and cardiovascular mortality in China: a nationwide cohort study[J]. *The lancet planetary health*, 2022, 6(6): e496-e503.
- [37] JIANG Y X, HUANG J, LI G X, et al. Ozone pollution and hospital admissions for cardiovascular events [J]. *European heart journal*, 2023, 44(18): 1622-1632.
- [38] YANG L, ZHU Y X, ZHAO B W, et al. Long-term cardiometabolic effects of ambient ozone pollution in a large Chinese population[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2023, 261: 115115.
- [39] XIA Y J, NIU Y, CAI J, et al. Acute effects of personal ozone exposure on biomarkers of inflammation, oxidative stress, and mitochondrial oxidative damage-Shanghai municipality, China, May-October 2016[J]. *China CDC weekly*, 2021, 3(45): 954-958.
- [40] 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.
- [41] DU X H, NIU Y, WANG C P, et al. Ozone exposure and blood transcriptome: a randomized, controlled, crossover trial among healthy adults [J]. *Environment international*, 2022, 163: 107242.
- [42] JAKAB G J, SPANNHAKE E W, CANNING B J, et al. The effects of ozone on immune function[J]. *Environmental health perspectives*, 1995, 103(Suppl 2): 77-89.
- [43] HU X Y, HE L C, ZHANG J F, et al. Inflammatory and oxidative stress responses of healthy adults to changes in personal air pollutant exposure [J]. *Environmental pollution*, 2020, 263: 114503.
- [44] CROZE M L, ZIMMER L. Ozone atmospheric pollution and Alzheimer's disease: from epidemiological facts to molecular mechanisms [J]. *Journal of Alzheimer's disease*, 2018, 62(2): 503-522.
- [45] MARIN-CASTAÑEDA L A, GONZALEZ-GARIBAY G, GARCIA-QUINTANA I, et al. Mechanisms of ozone-induced neurotoxicity in the development and progression of dementia: a brief review [J]. *Frontiers in aging neuroscience*, 2024, 16: 1494356.
- [46] MENG X, LIU C, CHEN R J, 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.
- [47] XIA Y J, NIU Y, CAI J, et al. Personal ozone exposure and stress hormones in the hypothalamus-pituitary-adrenal and sympathetic-adrenal-medullary axes [J]. *Environment international*, 2022, 159: 107050.
- [48] ZHONG J X, ALLEN K, RAO X Q, et al. Repeated ozone exposure exacerbates insulin resistance and activates innate immune response in genetically susceptible mice [J]. *Inhalation toxicology*, 2016, 28(9): 383-392.

- [49] DU H, YAN M L, LIU X, et al. Exposure to concurrent heatwaves and ozone pollution and associations with mortality risk; a nationwide study in China[J]. *Environmental health perspectives*, 2024, 132(4):47012.
- [50] LIU C, CHEN R J, SERA F, et al. Interactive effects of ambient fine particulate matter and ozone on daily mortality in 372 cities: two stage time series analysis [J]. *BMJ*, 2023, 383: e075203.
- [51] XING Z Z, YANG T, SHI S, et al. Combined effect of ozone and household air pollution on COPD in people aged less than 50 years old [J]. *Thorax*, 2023, 79(1): 35-42.
- [52] QIAN Y Y, LI H M, ROSENBERG A, et al. Long-term exposure to low-level NO₂ and mortality among the elderly population in the southeastern United States [J]. *Environmental health perspectives*, 2021, 129(12): 127009.
- [53] O'BRIEN E, MASSELOT P, SERA F, et al. Short-term association between sulfur dioxide and mortality: a multicountry analysis in 399 cities [J]. *Environmental health perspectives*, 2023, 131(3):37002.
- [54] 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.
- [55] ZHANG S Q, LI G X, TIAN L, et al. Short-term exposure to air pollution and morbidity of COPD and asthma in East Asian area: a systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental research*, 2016, 148:15-23.
- [56] WRIGHT N, NEWELL K, CHAN K H, et al. Long-term ambient air pollution exposure and cardiorespiratory disease in China: findings from a prospective cohort study [J]. *Environmental health*, 2023, 22(1):30.
- [57] BLEECKER M L. Carbon monoxide intoxication [J]. *Handbook of clinical neurology*, 2015, 131:191-203.
- [58] XU Q, GUAN Q Q, LU Y Y, et al. Effect of short-term ambient air pollution exposure on early miscarriage and pregnancy hormones with critical window identification [J]. *Journal of hazardous materials*, 2023, 460: 132328.
- [59] GASPARRINI A, GUO Y M, HASHIZUME M, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study [J]. *The lancet*, 2015, 386(9991):369-375.
- [60] CHEN R J, 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]. *Environmental health perspectives*, 2019, 127(1):17008.
- [61] ALAHMAD B, KHRAISHAH H, ROYÉ D, et al. Associations between extreme temperatures and cardiovascular cause-specific mortality: results from 27 countries [J]. *Circulation*, 2023, 147(1):35-46.
- [62] LEI J, PENG L, YANG T, et al. Non-optimum ambient temperature may decrease pulmonary function: a longitudinal study with intensively repeated measurements among asthmatic adult patients in 25 Chinese cities [J]. *Environment international*, 2022, 164: 107283.
- [63] 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.
- [64] KONSTANTINOUDIS G, MINELLI C, VICEDO-CABRERA A M, et al. Ambient heat exposure and COPD hospitalisations in England: a nationwide case-crossover study during 2007-2018 [J]. *Thorax*, 2022, 77(11): 1098-1104.
- [65] GUO Y M, GASPARRINI A, ARMSTRONG B G, et al. Heat wave and mortality: a multicountry, multi-community study [J]. *Environmental health perspectives*, 2017, 125(8):087006.
- [66] 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.
- [67] SCHWARZ L, HANSEN K, ALARI A, et al. Spatial variation in the joint effect of extreme heat events and ozone on respiratory hospitalizations in California [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2021, 118(22): e2023078118.
- [68] AÑEL J, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ M, LABANDEIRA X, et al. Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector [J]. *Atmosphere*, 2017, 8(11): 209.
- [69] HE C, KIM H, HASHIZUME M, et al. The overlooked health impacts of extreme rainfall exposure in 30 East Asian cities [J]. *Nature sustainability*, 2024, 7:423-431.
- [70] HE C, BREITNER-BUSCH S, HUBER V, et al. Rainfall events and daily mortality across 645 global locations: two stage time series analysis [J]. *BMJ*, 2024, 387: e080944.

- [71] ZHANG T, ZHANG D Q, LYU Z H, et al. Effects of extreme precipitation on bacterial communities and bio-aerosol composition: dispersion in urban outdoor environments and health risks[J]. *Environmental pollution*, 2024, 344: 123406.
- [72] YANG Z Y, HUANG W Z, MCKENZIE J E, et al. Mortality risks associated with floods in 761 communities worldwide: time series study [J]. *BMJ*, 2023, 383: e075081.
- [73] WU Y, WEN B, GASEVIC D, et al. Climate change, floods, and human health[J]. *The new England journal of medicine*, 2024, 391(20): 1949-1958.
- [74] HE C, ZHU Y X, ZHOU L, et al. Flood exposure and pregnancy loss in 33 developing countries [J]. *Nature communications*, 2024, 15(1): 20.
- [75] YANG Z Y, HUANG W Z, MCKENZIE J E, et al. The association of adverse birth outcomes with flood exposure before and during pregnancy in Australia: a cohort study[J]. *The lancet planetary health*, 2024, 8(8): e554-e563.
- [76] ZHU Y X, HE C, BACHWENKIZI J, et al. Burden of infant mortality associated with flood in 37 African countries[J]. *Nature communications*, 2024, 15(1): 10171.
- [77] MUNRO A, KOVATS R S, RUBIN G J, et al. Effect of evacuation and displacement on the association between flooding and mental health outcomes: a cross-sectional analysis of UK survey data [J]. *The lancet planetary health*, 2017, 1(4): e134-e141.
- [78] HUANG W Z, LI S S, VOGT T, et al. Global short-term mortality risk and burden associated with tropical cyclones from 1980 to 2019: a multi-country time-series study[J]. *The lancet planetary health*, 2023, 7(8): e694-e705.
- [79] YOUNG R, HSIANG S. Mortality caused by tropical cyclones in the United States [J]. *Nature*, 2024, 635(8037): 121-128.
- [80] HUANG W Z, VOGT T, PARK J, et al. Risks of infectious disease hospitalisations in the aftermath of tropical cyclones: a multi-country time-series study[J]. *The lancet planetary health*, 2024, 8(9): e629-e639.
- [81] HE C, CHEN R J, KIM H, et al. Tropical cyclone and daily respiratory mortality across east asia: a time series study[J]. *The European respiratory journal*, 2023, 62(1): 2300546.
- [82] NATIONS U. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace[R/OL]. (2024-03-22) [2025-01-13]. <https://www.unesco.org/en/articles/united-nations-world-water-development-report-2024-water-prosperity-and-peace?hub=418>.
- [83] ASMALL T, ABRAMS A, RÖÖSLI M, et al. The adverse health effects associated with drought in Africa[J]. *Science of the total environment*, 2021, 793: 148500.
- [84] EBI K L, VANOS J, BALDWIN J W, et al. Extreme weather and climate change: population health and health system implications[J]. *Annual review of public health*, 2021, 42: 293-315.

(责任编辑:王春燕)