

# 气候变化背景下高温热浪与人体健康研究进展

丁净<sup>1,2</sup> 卢苗苗<sup>1,2</sup> 韩素芹<sup>1,2</sup>

(1 天津市环境气象中心, 天津 300074; 2 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074)

**摘要:** 气候变化背景下, 高温热浪及其伴随的城市热岛效应和野火造成的大气污染对人体健康的负面影响加剧, 老年人、儿童、户外作业人员、既有慢性病人对高温热浪更加敏感。高温热浪除直接导致中暑就诊和死亡率升高外, 对心脑血管疾病的影响整体大于呼吸系统疾病, 其中高温热浪本身及其与大气污染物联合暴露对不同国家和地区呼吸系统疾病的影响存在空间差异, 这种差异与城市局地气候和经济发展有关。未来仍需开展多城市、大样本量的流行病学研究, 精细评估气候特点、人口特征、城市公共基础设施建设以及高温应对措施对公众健康的影响, 为因地制宜制定气候变化应对策略和干预措施提供依据。

**关键词:** 高温热浪, 健康风险, 发病, 死亡

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.003

## Research Progress of Heat Wave and Human Health under the Background of Climate Change

Ding Jing<sup>1,2</sup>, Lu Miaomiao<sup>1,2</sup>, Han Suqin<sup>1,2</sup>

(1 Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074; 2 CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074)

**Abstract:** In the context of climate change, the negative health impacts caused by high temperature and heat wave, along with the urban heat island effect, and by the wildfire-induced air pollution are intensifying. Vulnerable groups such as the elderly, children, outdoor workers, and individuals with pre-existing chronic conditions are more sensitive to heat wave. In addition to directly increasing the incidence and mortality rate of heatstroke, high temperature and heat wave exert higher impact on cardiovascular and cerebrovascular diseases than respiratory diseases. Particularly, the impact of heat wave and the joint exposure with atmospheric pollutants on respiratory diseases varies spatially across different countries and regions, which is much related to the local climate and economic development. In the future, it is necessary to conduct epidemiological studies in multiple cities with large sample sizes for the refined assessment on the impact of climate and population characteristics, urban public infrastructure development, and heat countermeasures on health effects. It is expected to provide reference for the formulation of localized climate change response strategies and intervention measures.

**Keywords:** heat wave, health risk, morbidity, mortality

### 0 引言

IPCC第六次评估报告指出, 人类影响造成的气候变暖正以2000年以来前所未有的速度发生, 2011—2020年全球地表温度比1850—1900年升高了1.1 °C, 持续的温室气体排放还将导致全球气温进一步上升<sup>[1]</sup>。在全球持续变暖的背景下, 近年来高温热浪等极端气候事件在全球不同地区频繁发生, 对人类健康造成严重影响<sup>[2]</sup>。连续高温酷暑会使人体不适应进而影响生理、心理健康, 甚至引发疾病或死亡, 对儿童、老

人、慢性病患者影响更大。高温热浪不仅危害人体健康, 还影响生理机能, 降低劳动生产效率, 低收入人群更容易受到高温热浪的影响<sup>[3]</sup>。据评估, 21世纪末不同情景下的热相关死亡人数均高于基准年代<sup>[4]</sup>, RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下, 2090年中国将有20303、35025、72260人死于热浪, 半数与热浪相关的死亡都集中在中国东部和中部<sup>[5]</sup>。为此, 如何有效应对高温热浪, 增强公众防护能力, 成为气候变化、环境健康、公共卫生等多学科领域的共同难题。

为了积极应对气候变化对人类健康的影响, 全球各地针对高温热浪对呼吸系统、心脑血管系统等疾病以及死亡的影响开展了大量研究, 以帮助政府制定积极有效的健康应对策略。文中梳理了高温热浪的变化趋势、对人群发病和死亡影响的研究进展, 同时介绍

收稿日期: 2024年4月1日; 修回日期: 2024年9月19日  
第一作者: 丁净(1990—), Email: dingjing0824@126.com  
通信作者: 韩素芹(1973—), Email: sq\_han@126.com  
资助信息: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J076)

了大气污染、城市热岛效应与高温热浪联合暴露对健康的影响,最后提出目前存在的问题及研究展望。

## 1 高温热浪及其变化趋势

高温热浪是一种由于持续高温引起人、动物、植物不能适应的大气过程。世界气象组织建议将最高气温高于 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且持续3 d以上的天气过程称为热浪。我国一般把日最高气温达到或超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 称为高温天气,连续3 d以上的高温天气过程称为高温热浪<sup>[6]</sup>。不同国家根据其气候特点对高温热浪的定义有所不同,荷兰皇家气象研究所定义热浪为日最高气温高于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且持续5 d以上,其间至少有3 d高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天气过程<sup>[7]</sup>;美国、加拿大、以色列等国家的气象部门依据气温和相对湿度的综合影响(热指数)发布高温警报,当白天热指数预计连续2 d有3 h超过 $40.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者预计热指数在任一时间超过 $46.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,发布高温警报<sup>[8]</sup>。部分研究中选取研究时段日最高气温的第90~99百分位作为备选阈值来定义高温热浪,按照不同的持续时间来定义高温热浪的严重程度<sup>[9-11]</sup>。

近30年来,我国平均高温日数整体呈上升趋势<sup>[12]</sup>。夏季是我国热浪爆发的主要季节,全国性热浪事件主要出现在7、8月,并以长江中下游为热浪中心,热浪累积日数也大体呈现“南高北低”的空间格局<sup>[13]</sup>。在京津冀地区,高温热浪具有2~5 a显著的短振荡周期,高温热浪日数、频次和有效积温在空间上均呈现南多(强)北少(弱)的分布特征,且高温热浪日数大于4 d的影响区域均呈扩大的态势<sup>[14]</sup>。就气候平均态而言,华北地区高温初日有略提前趋势,高温终日则明显推迟<sup>[15]</sup>。

区域极端高温热浪将随着全球变暖的加剧而显著增多<sup>[16]</sup>。未来即使实现全球升温控制在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,21世纪剩余时间内华北地区发生类似2023年极端热浪的概率仍将比2023年气候状态下至少增加1.6(1.3~2.1)倍、强度至少增强 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ( $0.2\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[17]</sup>。对于发展中国家,未来一段时期内人口数量仍将快速增长,而基础设施相对落后,未来情景下极端高温热浪事件人口暴露度的大幅上升对这些国家可持续发展和人民生命健康造成潜在威胁<sup>[18]</sup>。

## 2 高温热浪对疾病发病及死亡的影响

### 2.1 高温热浪对相关疾病的影响

#### 2.1.1 中暑

中暑是受高温热浪影响最直接的一种疾病,主要是因机体长时间热负荷超载导致的体温调节失常。中暑按发病症状与程度,可分为热痉挛、热衰竭和热射病,其中热射病若救治不及时,可导致死亡或残疾。

我国南方城市早在20世纪先后开展了中暑与高温气象条件的研究,发现中暑与高温和湿度密切相关<sup>[19-21]</sup>。高温热浪引起中暑的单日相对危险度(RR)在发生当天达到最大值,累计RR值在滞后0~3 d达到最大,且对65岁以上老年人的影响大于其他年龄人群<sup>[22-23]</sup>。在日本,中暑死亡率在7—8月较高,且即使月平均气温相同,7月的死亡率也比8月高40%~50%<sup>[24]</sup>。一般来说发生在初夏的极端高温天气引起的人群危害较大,随后人体通过生理改变、采取适应行为逐渐适应了高温环境,并降低了脆弱性。除日最高气温外,日最低气温的升高也会造成中暑就诊量的增大<sup>[25]</sup>。高温暴露下,户外作业人员是中暑高危人群,在印度因中暑而死亡的人群中,男性劳动力死亡人数最多<sup>[26]</sup>。基于气象因素与中暑的关系,各地气象部门建立了中暑风险预报模型<sup>[27-28]</sup>,对公众有效防范高温中暑具有很好的指导性。

#### 2.1.2 心脑血管疾病

心血管疾病和脑血管疾病是高温热浪期间死亡的主要和第三死因<sup>[29]</sup>。人在高温环境下劳动和生活时,体温调节中枢通过神经和体液的共同调节,增加汗腺的汗液分泌,通过汗液的蒸发使人体散热增加,以维持体温的相对恒定。但由于大量出汗容易导致血液浓缩、黏稠度增大,全身小血管舒张,内脏血液充盈度下降,心血管负担加重<sup>[30]</sup>。同时环境低气压使得人体氧分压降低,血氧含量不足,引起心脏、大脑反射性痉挛,诱发心肌梗死、冠心病、缺血性脑卒中等急性心脑血管疾病,环境湿度大时,发病率更高<sup>[31]</sup>。

高温热浪会导致心脑血管疾病急诊就诊率、住院率上升,导致人群超额死亡增加,且风险随温度升高和热浪时间延长而增大<sup>[32-33]</sup>。一项来自27个国家的队列研究发现,极端高温与缺血性心脏病、脑卒中和心力衰竭死亡风险增大(7%~12%)有关<sup>[34]</sup>。天津市 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温导致脑卒中入院率明显增大<sup>[35]</sup>,江苏省高温造成心血管疾病和脑血管疾病的超额死亡率为4.96%和6.67%<sup>[36]</sup>。不同类型高温天气的影响程度略有不同,高温、热浪、闷热天气造成石家庄心脑血管疾病死亡风险分别增加8.6%、25.2%和10.0%<sup>[37]</sup>。近年来,高温事件逐渐从日间极端高温向夜间和日夜持续型极端高温事件转变,相比于单纯的白天高温,日夜持续型高温对人群健康的影响更大,德国研究显示,夏季夜间极端高温会增加7%的脑卒中风险<sup>[38]</sup>。高温对心脑血管的影响一般表现为急性效应<sup>[35, 39]</sup>,24 h内高温暴露增加急性缺血性脑卒中发病风险<sup>[39]</sup>。65岁以上老年人群、男性、既往患有心血管疾病以及从事户外工作

的人群与高温暴露后心脑血管死亡风险增大有关<sup>[32]</sup>。

### 2.1.3 呼吸系统疾病

高温热浪期间，患有慢性呼吸系统疾病的人群由于过度通气和空气污染引发的肺应激反应，使其成为热浪期间仅次于心血管疾病的第二大发病和死亡原因<sup>[29]</sup>。流行病学研究显示极端高温下观察到肺功能下降现象<sup>[40]</sup>，高温对呼吸系统疾病的影响机制可能包括：1) 高温会提高空气中过敏原水平，闷热型高温天气下霉菌浓度大幅度上升，从而对肺功能产生不利影响<sup>[41]</sup>，而干燥型高温会造成气道干燥，可引起支气管收缩，降低肺功能<sup>[42]</sup>；2) 高温通过免疫调节和神经调节影响机体炎症反应，致使细胞死亡，继发急性呼吸窘迫综合征<sup>[30, 43]</sup>。

高温热浪对欧洲、南亚、拉丁美洲等国家的呼吸系统发病有较大影响，高温热浪期间慢性呼吸系统疾病超额死亡率甚至高于心血管疾病死亡率<sup>[44-46]</sup>。当气温高于最适气温时，气温每上升1℃，德国慢性呼吸系统死亡率约上升4.4%，高温热浪期间慢性呼吸系统疾病死亡率增加19.9%，是心肌梗死死亡率的2倍<sup>[44]</sup>。拉丁美洲地区高温造成慢性呼吸系统疾病和呼吸道感染的死亡风险分别增加10%和56%，然而极端高温(>99百分位)对呼吸系统死亡的影响并不显著<sup>[45]</sup>，巴西的独立研究同样发现极端高温的不显著影响<sup>[46]</sup>。我国文献报道高温对呼吸系统疾病的影响并不一致，一些研究显示高温对各类呼吸系统疾病存在不同程度线性或非线性影响<sup>[47-49]</sup>，而近期一些研究则发现高温相对于低温对呼吸系统疾病的影响要弱甚至并不显著<sup>[50-52]</sup>。在石家庄的夏季，7~14岁少儿哮喘对炎热敏感<sup>[53]</sup>，但高温对成人哮喘就诊的影响不显著。辽宁地区同样发现少儿呼吸系统就诊量对极端高温的响应显著<sup>[54]</sup>，这可能与儿童暑假期间户外暴露增加有关。然而同样针对儿童人群，北京发现高温对儿童呼吸系统疾病就诊或住院的影响并不显著<sup>[51]</sup>。高温热浪引起的不同健康结果与城市经济发展水平息息相关，我国城乡空调普及率较高<sup>[55]</sup>，室内空调纳凉等防护措施可能降低了高温的不利影响。

## 2.2 高温热浪与死亡风险

环境温度与死亡的暴露反应关系近似呈反“J”型，环境低温和高温暴露均可引起死亡风险升高<sup>[56]</sup>。基于全球43个国家732个监测点的数据研究发现，暖季37%的死亡与高温有关<sup>[57]</sup>。2000—2019年世界各地与高温相关的死亡人数都有所增多<sup>[58]</sup>。高温热浪期间美国107个社区人群死亡风险增加了3%<sup>[59]</sup>。雅典、伦敦等9个欧洲城市的死亡风险增加水平为

7.6%~33.6%<sup>[60]</sup>。2022年为自1880年有气象记录以来第五热的年份，全球65岁以上的老年人和1岁以下的婴儿所面临的热浪天数是1986—2005年的2倍，与1990—2000年相比，65岁以上老年人因高温死亡的人数增加了85%，明显高于在气温不变情况下预计的38%的增幅<sup>[61]</sup>。2022年夏季全欧洲有61672例死亡与极端高温有关，全年与高温相关的死亡人数为62862人<sup>[2]</sup>。

自1980年以来，我国高温热浪造成的死亡人数快速增多，且在全国范围内表现出较强的空间异质性，东部和中部地区的高温热浪归因死亡人数较多<sup>[62]</sup>。2006—2011年，中国66个县(区)高温热浪所致超额死亡率达5%<sup>[63]</sup>。2022年破纪录的热浪导致我国人均热浪天数达到21 d，与热浪相关的死亡人数是2021年的2倍多。相比历史基准(1986—2005年情况)，热相关死亡人数同比上升342%，过去5年(2018—2022年)的年均死亡率比历史基线高出169%，2000—2020年年均热相关死亡人数为12798人<sup>[64]</sup>。随着社会老龄化趋势的加深，高温暴露对弱势群体造成的死亡负担还会进一步上升，预计其中20%~25%的热相关死亡可归因于人口老龄化<sup>[65]</sup>。

## 3 高温与大气污染物协同作用对疾病发病及死亡的影响

除热浪的直接暴露外，高温与大气污染联合暴露会对人体健康产生一定的协同作用。臭氧目前是我国及其他国家夏季的首要污染物。世界各地的研究结果显示，高温与臭氧的协同作用对健康的影响各不相同(表1)，一些研究显示出较强的协同作用<sup>[9-10, 66-69]</sup>，且对老年慢性病人群的影响较大<sup>[70-71]</sup>。也有部分研究表明二者的协同作用很弱<sup>[72-73]</sup>。例如，针对江苏省的研究发现，臭氧和热浪复合暴露可协同增大居民因心血管疾病死亡的风险，该协同效应随臭氧暴露水平越高、热浪温度阈值越高和持续天数越长而逐渐增强<sup>[9]</sup>。与仅高温热浪和仅臭氧污染相比，高温热浪与臭氧协同作用对缺血性卒中死亡的超额风险最高<sup>[10]</sup>。相比之下，英国除了一个城市外，其他城市都没有观察到臭氧和热浪的协同作用<sup>[72]</sup>。有研究指出，高温热浪期间气温升高是死亡率上升的一个主要驱动因素，臭氧本身与死亡率增加的关联较为微弱，只是死亡率上升的一个额外压力<sup>[74]</sup>。即使在同一个小州，臭氧和高温的影响也是高度不均匀的，二者的协同作用在收入较低、失业率较高的区域对呼吸系统就诊的影响更强<sup>[75]</sup>。

除备受瞩目的臭氧外，其他大气污染物与高温的协同作用也对健康存在影响<sup>[11, 76-78]</sup>。研究指出，高温和PM<sub>2.5</sub>对心肌梗死死亡率有显著的协同作用，高温

表1 高温与大气污染物协同作用与疾病或死亡的相关研究  
Table 1 Studies on synergistic effects of high temperature and air pollution on disease or mortality

研究区域	污染物	疾病类型	研究结论
中国128城 <sup>[69]</sup>		非意外、心血管和呼吸系统疾病死亡	高温环境下O <sub>3</sub> 每升高10 μg/m <sup>3</sup> , 非意外、心血管和呼吸系统疾病死亡的风险分别增加0.44%、0.42%和0.50%
中国江苏 <sup>[9]</sup>		心血管疾病	中水平和高水平O <sub>3</sub> 与热浪复合暴露对心血管疾病死亡风险影响的超额风险分别为7%和27%
法国15城 <sup>[66]</sup>	O <sub>3</sub>	心血管、呼吸系统疾病	O <sub>3</sub> 在热浪和死亡率的关联中起中介作用, O <sub>3</sub> 对非意外、心血管和呼吸系统疾病死亡的自然间接风险分别增加3%、3%和2%
美国加利福尼亚州 <sup>[75]</sup>		呼吸系统疾病	O <sub>3</sub> 和高温对加利福尼亚州呼吸系统就诊的影响高度不均衡, 二者的协同作用在收入较低、失业率较高的区域对呼吸系统就诊的影响更强
中国250县 <sup>[10]</sup>		脑卒中	高温热浪与O <sub>3</sub> 协同、仅高温热浪与仅O <sub>3</sub> 污染对缺血性卒中死亡的超额风险分别为29%、20%和2%
英国15城 <sup>[72]</sup>		全因死亡	O <sub>3</sub> 和高温对全因死亡的协同效应仅在伦敦显著
中国江苏 <sup>[11]</sup>	PM <sub>2.5</sub>	心血管疾病	与没有高温且处于低浓度PM <sub>2.5</sub> 的天气相比, 高温天气持续4 d且PM <sub>2.5</sub> 浓度高于37.5 μg/m <sup>3</sup> , 心梗死亡风险增加1倍; 女性和老年人更容易受到极端高温事件和PM <sub>2.5</sub> 暴露的影响
24国482城 <sup>[77]</sup>		呼吸系统疾病	葡萄牙高温与低、中、高浓度PM <sub>2.5</sub> 的协同作用对呼吸系统死亡率的超额影响分别为13.2%、29.4%和65.1%
24国482城 <sup>[77]</sup>	NO <sub>2</sub>	心血管、呼吸系统疾病	爱沙尼亚高温和高浓度的NO <sub>2</sub> 的协同作用对心血管疾病死亡率的超额影响高达18.3%, 在中国和泰国等国家协同效应不显著; 瑞士高温与低、中、高浓度NO <sub>2</sub> 的协同作用对呼吸系统死亡率的超额影响分别为18.6%, 25.8%和43.5%

强度越大, 持续时间越长, 两者的叠加效应越强。高温可能会通过出汗、增加皮肤血流量、呼吸频率改变而加速人体对PM<sub>2.5</sub>的吸入<sup>[11]</sup>。针对24个国家的研究指出, 高温与大气污染的协同作用对呼吸系统疾病的影响大于心血管疾病, 对不同国家的影响并不一致, 如爱沙尼亚高温和高浓度NO<sub>2</sub>的协同作用对心血管疾病死亡率的超额影响高达18.3%, 而这种协同效应在中国和泰国等国家并不显著<sup>[77]</sup>。欧洲国家受高温和大气污染的协同影响更加突出, 而在美国和中国等空调使用率较高的国家, 高温与大气污染物对健康影响的协同作用较弱<sup>[77, 79]</sup>。高温热浪本身及其与大气污染物的协同作用可能会因不同城市的气候特点、城市整体经济发展及个人收入水平等因素的差异产生不同的健康结局, 经济发展落后以及收入水平较低的城市居民受到高温热浪及污染物协同作用的影响更大。

在一些国家, 野火往往伴随高温热浪事件出现<sup>[80-81]</sup>, 且二者相互作用, 易出现恶性循环。野火产生的烟雾中包含多种有害大气污染物, 并形成局地甚至区域性的大气污染。联合国环境规划署2022年发布的报告指出, 气候变化和土地使用的变化将导致野火更加频繁、更加剧烈, 到21世纪末, 全球极端野火将增加50%<sup>[82]</sup>。多项研究表明野火烟雾造成的空气污染与哮喘加重、急诊就诊以及因支气管炎、呼吸困难和慢性阻塞性肺病症状住院的增加有关<sup>[83-85]</sup>。与城市颗粒物相比, 木材燃烧产生的颗粒所引起的炎症以及细胞毒性反应更强<sup>[86]</sup>。2008—2018年, 野火导致巴西全国呼吸系统住院人数增加23%, 血循环障碍住院人数增加21%<sup>[83]</sup>。即使在西伯利亚北极地带, 近年来频繁发生的野火导致该区域空气质量变差, 2001—2020年北极理事会相关国家野火产生的颗粒物造成年平均约

2.1万例超额死亡<sup>[84]</sup>。

#### 4 高温热浪背景下城市热岛的健康影响

城市人口日益集中是21世纪的主要挑战之一, 越来越多的人面临气候变化带来的风险, 致使人口向城市地区稳步迁移<sup>[87]</sup>。城市热岛和高温热浪共同作用使得城区更加炎热<sup>[88-89]</sup>, 综合热效应直接危害人体健康, 增加住院率和自然死亡率。Goggins等<sup>[90]</sup>发现香港地区当城市热岛强度较高时, 温度每上升1 °C, 自然死亡率增加4.1%。在西班牙, 热岛效应导致城市平均气温升高1.5 °C, 夏季导致6700例过早死亡, 占夏季死亡总数的4.3%<sup>[91]</sup>。城市热岛的健康效应存在空间差异, 内陆城市的死亡率和住院率与日最高气温有关, 而沿海城市与日最低气温有关<sup>[92]</sup>。Jenerette等<sup>[93]</sup>发现热相关疾病与白天地表温度显著相关, 出现热相关疾病地区的地表温度更高。热浪期间城市居民白天和夜间遭受持续的热威胁, 郊区居民在夜间热威胁会得到缓解, 热岛效应导致居住在城市中心的居民比郊区和乡村的人更容易受热浪侵袭<sup>[94]</sup>。随着城市功能区的迁移变化, 部分城市热岛效应对健康的高影响地区从市中心向郊区转移<sup>[95]</sup>。城市热岛效应还通过提升大气污染物浓度间接影响人体健康<sup>[96-97]</sup>, 热岛效应所引起的城市温度升高一方面促进近地层大气化学反应, 另一方面导致夜间城市近地层形成辐合, 在边界层顶辐散, 影响污染物的扩散。

#### 5 结论与展望

随着数据资料的不断丰富, 高温热浪健康影响研究的时空覆盖范围更长、更广, 揭示出不同健康结局在国家层面、区域维度以及城市尺度的空间异质性, 为深入理解高温热浪的健康风险提供了强有力的数据

支撑。气候变化背景下高温热浪对健康的负面影响加剧，增加人群发病率和死亡率，对心脑血管疾病的影响整体大于呼吸系统疾病。高温热浪本身及其与大气污染物的联合暴露对呼吸系统疾病产生的健康结局存在空间差异，城市气候特点、经济发展水平及个人收入水平等因素的差异可能是造成这种空间差异的原因之一。

目前针对高温热浪与健康的研究虽已有一些有价值的研究成果，但仍存在一些不足：1) 我国地域广阔，各地气候不同，人群对高温的耐受力也不尽相同，应分地区进行高温与人体健康关系的研究，一方面获得适合本地区高温热浪的判定标准，另一方面为因地制宜提出人群健康风险干预措施和建议提供科学依据。2) 采用死亡率作为健康结局指标，更多反映出极端气温对老年人或体质虚弱人群的影响，并不能准确反映全体人群寿命损失的信息，难以评估其公共卫生意义。3) 大部分研究只探讨温度与疾病或死亡的关系，较少关注人群自身的社会经济特征和城市公共基础设施建设等情况对高温健康效应的影响，目前研究中高温热浪健康效应在空间分布上的差异本质上受社会经济发展水平的影响，厘清这些因素的影响可为有针对性地制定气候变化应对策略和公共卫生干预措施提供依据。4) 夏季高温与大气污染物的相互作用对健康的影响空间异质性较强，使得风险评估面临较高的不确定性，高温和大气污染物对健康产生协同作用的潜在生物学机制仍不明确。

针对高温热浪健康效应空间差异较大的问题，应设计多城市流行病学对比研究，使用统一的方法对比探究人口学特征（年龄、性别、种族、收入、职业、学历、患病情况、行为特征等）、空调普及率、医疗条件等因素对高温相关疾病发病和死亡率的影响。进一步评估高温应急、城市绿化、“城市冷岛”、高温健康预警、科普宣传、人群主动防御等高温热浪健康风险干预措施的有效性，为各地建立有差别且经济适用的高温健康防御体系提供依据。

#### 参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[2] Ballester J, Quijal-Zamorano M, Turrubiates R F M, et al. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022[J]. *Nature Medicine*, 2023, 29(7): 1857-1866.

[3] 黄存瑞, 何依伶, 马锐, 等. 高温热浪的健康效应: 从影响评估到应对策略[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2018, 56(8): 14-20.

[4] 陆开来, 班婕, 王倩, 等. 不同气候变化情景下未来中国热相关死亡风险的预估[J]. *气象学报*, 2022, 80(3): 349-357.

[5] 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.

[6] 田颖, 张书余, 罗斌, 等. 热浪对人体健康影响的研究进展[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(2): 49-54.

[7] Huynen M M, Martens P, Schram D, et al. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2001, 109(5): 463-470.

[8] Kalkstein L S, Jamason P F, Greene J S, et al. The Philadelphia Hot Weather-Health Watch/Warning System: Development and application, summer 1995[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(7): 1519-1528.

[9] Xu R J, Sun H, Zhong Z H, et al. Ozone, heat wave, and cardiovascular disease mortality: A population-based case-crossover study[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(1): 171-181.

[10] 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): 047012.

[11] Xu R J, Huang S L, Shi C, et al. Extreme temperature events, fine particulate matter, and myocardial infarction mortality[J]. *Circulation*, 2023, 148(4): 312-323.

[12] 中国气象局. 2023年中国气候公报[R]. 北京: 中国气象局, 2024.

[13] 吴锦成, 朱烨, 刘懿, 等. 中国热浪时空变化特征分析[J]. *水文*, 2022, 42(3): 72-77.

[14] 张兴山, 王娟怀, 赵亮, 等. 1960—2020年京津冀高温热浪时空分布特征[J]. *气象与减灾研究*, 2022, 45(3): 179-186.

[15] 邢佩, 杨若子, 杜吴鹏, 等. 1961—2017年华北地区高温日数及高温热浪时空变化特征[J]. *地理科学*, 2020, 40(8): 1365-1376.

[16] Perkins-Kirkpatrick S E, Lewis S C. Increasing trends in regional heatwaves[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3357.

[17] Qian C, Ye Y B, Jiang J C, et al. Rapid attribution of the record-breaking heatwave event in North China in June 2023 and future risks[J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(1): 014028.

[18] 王芳, 张晋韬, 葛全胜, 等. “一带一路”沿线区域21世纪极端高温热浪风险预估[J]. *科学通报*, 2021, 66(23): 3045-3058.

[19] 何权, 何祖安, 郑有清. 炎热地区热浪对人群健康影响的调查[J]. *环境与健康杂志*, 1990, 7(5): 206-211.

[20] 焦艾彩, 朱定真, 陶玫, 等. 南京地区中暑期天气条件指数研究预报[J]. *气象科学*, 2001, 21(2): 246-252.

[21] 何玲玲, 陈正洪, 李松汉, 等. 城市居民中暑流行病学特征及其与气象因子的关系[J]. *暴雨灾害*, 2007, 26(3): 271-274.

[22] 鹿文涵, 谷少华, 孙仕强, 等. 2013—2019年宁波市高温热浪对中暑的滞后影响[J]. *气象与环境学报*, 2022, 38(1): 106-112.

[23] 张敏, 蔡子颖, 姚青, 等. 基于人体热量平衡模型的天津地区中暑气象风险预报技术研究[J]. *气象*, 2024, 50(7): 877-886.

[24] Fumiaki F, Jun M, Hideto S. Spatial and temporal features of heat stroke mortality in Japan and their relation to temperature variations, 1999—2014[J]. *Geographical Review of Japan Series B*, 2018, 91(1): 17-27.

[25] Otani S, Funaki Ishizu S, Masumoto T, et al. The effect of minimum and maximum air temperatures in the summer on heat stroke in Japan: A time-stratified case-crossover study[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(4): 1632.

[26] Kumar A, Singh D P. Heat stroke-related deaths in India: An analysis of natural causes of deaths, associated with the regional heatwave[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 95: 102792.

[27] 陈静, 韩军彩, 张素果, 等. 基于暑热指数的河北省中暑气象等级预报指标研究[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(5): 86-91.

[28] 党冰, 刘博, 尹岭, 等. 气象条件对北京夏季中暑的影响及预测研究[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(2): 67-72.

[29] Ebi K L, Capon A, Berry P, et al. Hot weather and heat extremes: Health risks[J]. *The Lancet*, 2021, 398(10301): 698-708.

[30] 孟祥燕. 夏季高温对主要心脑血管疾病患病人数及相关理化指标影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.

[31] Cheng X S, Su H. Effects of climatic temperature stress on cardiovascular diseases[J]. *European Journal of Internal Medicine*, 2010, 21(3): 164-167.

- [32] Kazi D S, Katznelson E, Liu C L, et al. Climate change and cardiovascular health: A systematic review[J]. *JAMA Cardiology*, 2024, 9(8): 748.
- [33] Liu J W, Varghese B M, Hansen A, et al. Heat exposure and cardiovascular health outcomes: A systematic review and meta-analysis[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(6): e484-e495.
- [34] 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.
- [35] Hao T Y, Wang X J, Han S Q, et al. Investigating the impact of weather on stroke in summer[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2024, 68(10): 2015-2027.
- [36] Ma Y Q, Zhou L, Chen K. Burden of cause-specific mortality attributable to heat and cold: A multicity time-series study in Jiangsu Province, China[J]. *Environment International*, 2020, 144: 105994.
- [37] 付桂琴, 陆倩, 张亚男. 石家庄高温、热浪和闷热天气对心脑血管疾病死亡人数的影响[J]. *气象学报*, 2022, 80(3): 403-409.
- [38] He C, Bretnier S, Zhang S Q, et al. Nocturnal heat exposure and stroke risk[J]. *European Heart Journal*, 2024, 45(24): 2158-2166.
- [39] Zhu X L, Chen R J, Yuan J, et al. Hourly heat exposure and acute ischemic stroke[J]. *JAMA Network Open*, 2024, 7(2): e240627.
- [40] 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.
- [41] Ren J, Xu J, Zhang P B, et al. Prevalence and risk factors of asthma in preschool children in Shanghai, China: A cross-sectional study[J]. *Frontiers in Pediatrics*, 2022, 9: 793452.
- [42] Lepeule J, Litonjua A A, Gasparrini A, et al. Lung function association with outdoor temperature and relative humidity and its interaction with air pollution in the elderly[J]. *Environmental Research*, 2018, 165: 110-117.
- [43] Han A Z, Deng S Z, Yu J R, et al. Asthma triggered by extreme temperatures: From epidemiological evidence to biological plausibility[J]. *Environmental Research*, 2023, 216: 114489.
- [44] Schlegel I, Muthers S, Mücke H G, et al. Comparison of respiratory and ischemic heart mortalities and their relationship to the thermal environment[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(8): 826.
- [45] Kephart J L, Sánchez B N, Moore J, et al. City-level impact of extreme temperatures and mortality in Latin America[J]. *Nature Medicine*, 2022, 28(8): 1700-1705.
- [46] Silveira I H, Cortes T R, Bell M L, et al. Effects of heat waves on cardiovascular and respiratory mortality in Rio de Janeiro, Brazil[J]. *PLoS One*, 2023, 18(3): e0283899.
- [47] Huang W, Kan H D, Kovats S. The impact of the 2003 heat wave on mortality in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(11): 2418-2420.
- [48] 王敏珍, 郑山, 王武功, 等. 气温与湿度的交互作用对呼吸系统疾病的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 581-588.
- [49] 周建丁, 马玉霞, 杨丝絮, 等. 最高气温对呼吸系统疾病急诊人次的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 372-378.
- [50] 刘华悦, 付桂琴, 王洁. 石家庄市气象要素对成人哮喘住院人数的影响[J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(5): 137-143.
- [51] Fang J K, Song J, Wu R S, et al. Association between ambient temperature and childhood respiratory hospital visits in Beijing, China: A time-series study (2013-2017)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(23): 29445-29454.
- [52] 林珊珊, 何慧慧, 贾瑞, 等. 大气污染与气象因素对郑州市不同人群和急慢性呼吸系统疾病的影响[J]. *职业与健康*, 2023, 39(5): 577-583, 588.
- [53] 付桂琴, 贾小卫, 刘华悦, 等. 河北石家庄地区气温对儿童哮喘病就诊人数的影响[J]. *干旱气象*, 2017, 35(1): 122-127.
- [54] 殷宁璐, 李俊林, 洪也, 等. 辽宁省两县域城市气温对呼吸系统疾病住院人数的影响[J]. *干旱气象*, 2023, 41(1): 132-142.
- [55] 国家统计局. 2023中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2023.
- [56] 周璐, 陈仁杰, 阙海东. 中国不适环境温度对人群死亡影响的疾病负担分析和健康经济学评价[J]. *气象学报*, 2022, 80(3): 358-365.
- [57] Vicedo-Cabrera A M, Scovronick N, Sera F, et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(6): 492-500.
- [58] Martínez-Solanas È, Quijal-Zamorano M, Achebak H, et al. Projections of temperature attributable mortality in Europe: A time series analysis in 147 contiguous regions[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2021, 5(7): e446-e454.
- [59] Anderson B G, Bell M L. Weather-related mortality[J]. *Epidemiology*, 2009, 20(2): 205-213.
- [60] D'Ippoliti D, Michelozzi P, Marino C, et al. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: Results from the EuroHEAT project[J]. *Environmental Health*, 2010, 9: 37.
- [61] Romanello M, di Napoli C, Green C, et al. The 2023 report of the *Lancet* countdown on health and climate change: The imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms[J]. *The Lancet*, 2023, 402(10419): 2346-2394.
- [62] 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.
- [63] Ma W J, Zeng W L, Zhou M G, et al. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities[J]. *Environment International*, 2015, 75: 103-109.
- [64] Zhang S H, Zhang C, Cai W J, et al. The 2023 China report of the *Lancet* countdown on health and climate change: Taking stock for a thriving future[J]. *The Lancet Public Health*, 2023, 8(12): e978-e995.
- [65] 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.
- [66] Alari A, Chen C, Schwarz L, et al. The role of ozone as a mediator of the relationship between heat waves and mortality in 15 French urban areas[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2023, 192(6): 949-962.
- [67] Bae S, Lim Y H, Oh J, et al. Mediation of daily ambient ozone concentration on association between daily mean temperature and mortality in 7 metropolitan cities of Korea[J]. *Environment International*, 2023, 178: 108078.
- [68] 武昊. 臭氧与气象因素对人群心脑血管疾病死亡的风险评估——基于江西省南昌市7年死因登记数据的时间序列研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [69] Shi W Y, Sun Q H, Du P, et al. Modification effects of temperature on the ozone-mortality relationship: A nationwide multicounty study in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(5): 2859-2868.
- [70] 付桂琴, 田亚芹, 张成伟. 气温与臭氧协同作用对COPD住院人数的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(12): 5312-5318.
- [71] Ding P H, Wang G S, Guo Y L, et al. Urban air pollution and meteorological factors affect emergency department visits of elderly patients with chronic obstructive pulmonary disease in Taiwan[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 751-758.
- [72] Pattenden S, Armstrong B, Milojevic A, et al. Ozone, heat and mortality: Acute effects in 15 British conurbations[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2010, 67(10): 699-707.
- [73] Scortichini M, de Sario M, de'Donato F K, et al. Short-term effects of heat on mortality and effect modification by air pollution in 25 Italian cities[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1771.
- [74] Krug A, Fenner D, Holtmann A. Occurrence and coupling of heat and ozone events and their relation to mortality rates in Berlin, Germany, between 2000 and 2014[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(6): 348.
- [75] 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.
- [76] Wang H, Lu F, Guo M M, et al. Associations between PM1 exposure and daily emergency department visits in 19 hospitals, Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142507.
- [77] Rai M, Stafoggia M, de'donato F, et al. Heat-related cardiorespiratory mortality: Effect modification by air pollution

(下转38页)

- [68] Cintineo J L, Smith T M, Lakshmanan V, et al. An objective high-resolution hail climatology of the contiguous United States[J]. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(5): 1235-1248.
- [69] Zharashuev M V. Statistical analysis of hail activity in Stavropol krai and Crimea[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, 37(7): 455-460.
- [70] Junghänel T, Brendel C, Winterrath T, et al. Towards a radar- and observation-based hail climatology for Germany[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2016, 25(4): 435-445.
- [71] Schilling W. Rainfall data for urban hydrology: What do we need?[J]. *Atmospheric Research*, 1991, 27(1-3): 5-21.
- [72] Thorndahl S, Einfalt T, Willems P, et al. Weather radar rainfall data in urban hydrology[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1359-1380.
- [73] Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(5): 1129-1144.
- [74] 朱睿. 多普勒雷达观测资料质量控制方法研究及其应用[J]. *科技创新与应用*, 2014(27): 291-291.
- [75] 宋林焯, 陈明轩, 程丛兰, 等. 京津冀夏季雷达到定量降水估测的误差统计及定量气候校准[J]. *气象学报*, 2019, 77(3): 497-515.
- [76] 黄安明, 冷谦, 袁博, 等. 郴州天气雷达到降水估测误差分析[J]. *气象科技*, 2020, 48(2): 178-184.
- [77] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设和技术应用[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(6): 7-14.
- [78] Chandrasekar V, Beauchamp R M, Bechini R. *Introduction to Dual Polarization Weather Radar*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [79] 张东明, 卢兴来, 杨豪, 等. 新一代天气雷达产品故障识别及监测预警系统设计实现[J]. *气象科技*, 2023, 51(3): 381-387.
- [80] 程勇, 钱坤, 康志明, 等. 一种雷达回波外推的注意力融合和信息回忆的LSTM方法[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(5): 653-663.
- [81] 李显凤, 张玮, 黄少平, 等. 江西省气象-水文-雷达小时雨量信息融合试验结果分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(3): 276-284.
- [82] 张玉洁, 邵楠, 高林, 等. 基于多源数据融合的综合气象观测产品系统设计与应用[J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(3): 96-104.
- [83] 吴静, 艾小锋, 徐志明, 等. 组网雷达到融合处理模板设计与拓展[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022, 20(2): 119-126.

(编辑: 郑秋红)

(上接29页)

- across 482 cities from 24 countries[J]. *Environment International*, 2023, 174: 107825.
- [78] Pascal M, Wagner V, Alari A, et al. Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings?[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 249: 118249.
- [79] Cheng Y X, Kan H D. Effect of the interaction between outdoor air pollution and extreme temperature on daily mortality in Shanghai, China[J]. *Journal of Epidemiology*, 2012, 22(1): 28-36.
- [80] Weinhhammer V, Schmid J, Mittermeier I, et al. Extreme weather events in Europe and their health consequences—A systematic review[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2021, 233: 113688.
- [81] Burke M, Driscoll A, Heft-Neal S, et al. The changing risk and burden of wildfire in the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(2): e2011048118.
- [82] United Nations Environment Programme. *Spreading like wildfire: The rising threat of extraordinary landscape fires*[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2022.
- [83] Requia W J, Amini H, Mukherjee R, et al. Health impacts of wildfire-related air pollution in Brazil: A nationwide study of more than 2 million hospital admissions between 2008 and 2018[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6555.
- [84] Silver B, Arnold S R, Reddington C L, et al. Large transboundary health impact of Arctic wildfire smoke[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 199.
- [85] Karanasiou A, Alastuey A, Amato F, et al. Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146739.
- [86] Jalava P I, Salonen R O, Hälinen A I, et al. In vitro inflammatory and cytotoxic effects of size-segregated particulate samples collected during long-range transport of wildfire smoke to Helsinki[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2006, 215(3): 341-353.
- [87] IOM. June 10. Data on urbanization and migration[EB/OL]. (2022-06-10)[2024-03-25]. <https://www.migrationdataportal.org/themes/urbanization-and-migration>.
- [88] Luo M, Lau N C. Increasing heat stress in urban areas of eastern China: Acceleration by urbanization[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(23): 13060-13069.
- [89] 张雷, 任国玉, 苗世光, 等. 城市化对北京单次极端高温过程影响的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 2020, 44(5): 1093-1108.
- [90] Goggins W B, Chan E Y Y, Ng E, et al. Effect modification of the association between short-term meteorological factors and mortality by urban heat islands in Hong Kong[J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e38551.
- [91] Lungman T, Cirach M, Marando F, et al. Cooling cities through urban green infrastructure: A health impact assessment of European cities[J]. *The Lancet*, 2023, 401(10376): 577-589.
- [92] Cuerdo-Vilches T, Díaz J, López-Bueno J A, et al. Impact of urban heat islands on morbidity and mortality in heat waves: Observational time series analysis of Spain's five cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 890: 164412.
- [93] Jenerette G D, Harlan S L, Buyantuev A, et al. Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(4): 745-760.
- [94] He C, Kim H, Hashizume M, et al. The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: A modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(8): e648-e657.
- [95] Dai Y F, Liu T T. Spatiotemporal mechanism of urban heat island effects on human health—Evidence from Tianjin City of China[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 1010400.
- [96] Lai L W, Cheng W L. Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(8): 2724-2733.
- [97] Aslam M Y, Krishna K R, Beig G, et al. Diurnal evolution of urban heat island and its impact on air quality by using ground observations (SAFAR) over New Delhi[J]. *Open Journal of Air Pollution*, 2017, 6(2): 52-64.

(编辑: 卢冰)