

多学科视野中城市极端高温灾害的复合治理： 研究进展与未来议题

彭彬彬 张海波*

【摘要】近年来，城市极端高温灾害频发，不仅对人类社会产生深远影响，也对应急管理提出新的挑战。城市极端高温灾害的复杂成因和广泛影响使得传统的单一学科视角已无法揭示其形成机理和治理之道。基于工程-技术、组织-制度、政治-社会三个维度的回溯分析显示，改进城市规划减轻城市热岛效应，加强组织协同提高预警响应效率，推进全球治理倡导气候公平，这是推进城市极端高温灾害复合治理的三条关键路径和三个关键议题。下一步可在三个方向上开展研究：一是探索科技创新赋能复合治理的新模式；二是发展基于韧性城市的复合治理政策体系；三是面向全球治理拓展倡导气候公平的参与机制。

【关键词】 极端天气 高温灾害 复合治理 应急管理

【中图分类号】 D63

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-2486 (2024) 02-0004-22

引言

在 21 世纪全球气候变化的背景下，全球极端高温事件呈现频率增高、危害加大、时间拉长的新趋势，并成为威胁人类健康和生命安全的风险之一（Meehl & Tebaldi, 2004）。自 2003 年以来，多项研究已经证明由气温升高所导致的死亡率在持续增高（Basagaña et al., 2011; Davis et al., 2003; Kovats & Hajat, 2008; Diaz et al., 2018; Goggins et al., 2012; Hondula et al., 2015; Robine et al., 2008）。多种突发疾病也被证实与极端高温天气密切相关，除最常见的昏厥、呕吐、休克等中暑症状外（Soneja et al., 2016; Watts et al., 2018），极端

* 彭彬彬，南京大学政府管理学院特任助理研究员；张海波，南京大学政府管理学院教授，博士生导师。

基金项目：江苏省社会科学基金社会风险管理研究基地项目（22JD002），国家社科基金重大项目“提升我国应急管理体系和能力现代化水平研究”（20&ZD160）。

高温还伴随急性心脏衰竭、慢性心脑血管疾病以及呼吸系统疾病等 (Fisher et al., 2017)。长期处于极端高温的环境中,人们会感到压抑、沮丧,进而导致罹患精神疾病的概率增加 (Page et al., 2007; Hansen et al., 2008; Wang et al., 2014)。此外,极端高温还会引起用电能耗增加、基础设施运行中断、粮食供应困难、医疗体系瘫痪等后果,甚至引发全球经济危机 (Wang et al., 2023; Gabbe & Pierce, 2020; Wilson, 2020; Zander et al., 2015; 孔峰, 2023)。

极端高温灾害频发对我国的应急管理提出了新的挑战。《2022 年柳叶刀人群健康与气候变化倒计时中国报告》发现,相较于 1986—2005 年,2021 年中国人均多经历 7.85 个热浪天,这导致人们户外的安全活动时间缩短 48.2%,潜在劳动时间减少 7.1%,野火风险增加 62.7% (柳叶刀倒计时亚洲中心, 2022)。我国 1979—2020 年的热死亡数据显示,14% 的居民死亡与高温异常相关,高温诱发的热疾病高达 20 多种 (Chen et al., 2022; 聂敬娣等, 2021)。另一项研究揭示,若全球升温幅度从 1.5℃ 增加到 2℃,我国每年将增加约 2.8 万个热死亡病例 (Wang et al., 2019)。概言之,城市极端高温已然成为威胁人类生活、城市发展和社会安定的隐形杀手。然而,各国政府对极端高温灾害的风险感知和认识还不充分,对具有警示性的监测预警和防热措施重视不够 (Ballester et al., 2023),公众对极端高温的健康风险感知也偏低 (Howe et al., 2019; 程顺祺等, 2019)。

本文系统地梳理了过去 70 余年 (1950—2022) 与极端高温事件相关的文献,通过“极端”“高温”“热浪”“灾害”“治理”等关键词的组合,在 Web of Science、Scopus、EBSCO、Google Scholar、中国知网等文献数据库检索相关研究。本文讨论的高温灾害主要指由于气候变化引发的极端热和城市热岛效应而加剧的急性和慢性热风险后果,以单次的极端高温事件 (extreme heat event) 和持续高温形成的热浪 (heatwave) 为主要表现形式,不包括农林业、植物学中的干旱灾害,也不包括特殊场所高温事故^①。笔者在对题目和摘要进行人工筛选并通读全文后,以 160 余篇论文作为本文开展分析的基础文献库。进而,本文从工程-技术、组织-制度、政治-社会三个维度讨论不同学科对极端高温灾害的理论研究及其推动的实践探索,剖析极端高温灾害复合治理的关键机制,拓展风险-灾害-危机连续统理论的应用场景 (童星 & 张海波, 2010)。

一、作为工程-技术问题的高温灾害

20 世纪 80 年代,随着全球变暖问题日益严峻,学者们通过历史气象数据观

^① 本文回顾的高温灾害不包括在特定场所里由高温引发的事故灾害,如矿井煤仓高温事故、海洋石油高温灾害、瓦斯高温事故等,也不包括农林业和植物学科中高温引发的干旱现象。

测到气候温度的异常，开始从工程 - 技术视角对极端高温灾害进行探讨 (Prezerakos, 1989)。对极端高温灾害的定义首次出现在 20 世纪 90 年代，其将连续 2—5 天之中最高温度超过某个温度阈值的现象称为极端高温事件 (Prezerakos, 1989)。此后，科学家们开始更详细地记录和分析极端气候事件，研究这些事件对城市基础设施、能源系统、水资源管理和公共卫生的影响，探索如何通过改善城市规划减轻极端高温效应 (Bastos et al., 2014; Burillo et al., 2019; McEvoy et al., 2012; Santamouris et al., 2020)。2003 年欧洲热浪之后，工程和技术领域对极端高温影响的研究显著增加，聚焦通过工程技术手段预测城市热岛效应对经济、环境、社会的潜在破坏性，提出改进城市规划、建筑设计和紧急响应系统，减轻未来热浪事件影响 (Santamouris et al., 2020) 的科学建议。近年来，随着大数据与智能化应用的发展，极端高温灾害的测量与预警得到广泛关注。从总体上看，在工程 - 技术视角下，关于极端高温灾害的研究主要侧重于从新技术、新数据的应用出发，识别极端高温灾害的特征与影响机制，提出基于大数据和强调智能化治理的新路径。

(一) 理论研究：灾害特征

工程 - 技术视角下的极端高温灾害理论研究经历了从强调特征识别到效应分析，再到灾害模拟的发展历程。早期的极端高温灾害研究聚焦其特征与演化机制，大部分使用气象站数据，如温度、湿度、气压等，耦合指数分析和卫星遥感技术，模拟长期和短期的演化过程 (Vaneckova et al., 2008; 黄丹青, 2008)。自 1972 年起，极端高温灾害监测技术的热点从一般卫星专题绘测仪转向增强型卫星绘测仪、热红外传感器 (TIRS) 和中分辨率成像光谱仪 (MODIS) (Kovats & Hajat, 2008)。由于极端高温事件频发对人们的生产生活产生影响，研究重点关注极端高温灾害对经济社会发展的影响效应，大量的研究结合经济、环境、人口等领域的多源异构大数据，通过生物统计、因果相关、演绎推断、大数据驱动的健康实验、地理信息系统等工程技术方法研究极端高温灾害对生产、生活、生态空间的效应 (Basagaña et al., 2011; Huang et al., 2011; 徐金芳等, 2009)。随着大数据、机器学习、人工智能技术的广泛应用，更先进的异常温度监测技术和复杂模拟系统被应用于极端高温灾害的模拟与预测研究。例如，近地面的温度监测技术，通过车载探测仪、无人机传感器等收集更加精确的温度数据 (Vaneckova et al., 2008; O'Neill et al., 2009; Rosenthal, 2010); 社区地球系统模型 (community earth system model) 和流动模拟技术，模拟大气、海洋、陆地和生物系统与极端高温事件的互相作用，提供更精确的预测结果 (Anderson et al., 2018; Founda & Santamouris, 2017; Zhao et al., 2018)。

（二）实践探索：技术防治

在工程-技术视角下，极端高温灾害的治理在宏观和微观层面开展了诸多的实践探索（见表1）。宏观层面，极端高温灾害的治理主要集中在城市高温智能预警、生态基础设施防控、城市结构优化等工程措施。城市高温预警工程主要通过气象和健康数据，构建精准的时间和地点警示系统，应对极端高温引发的健康危害问题（吴朝玮等，2024；Hajat et al.，2010；Liukaityte & Koppe，2009；Kotharkar & Ghosh，2022；Sheridan & Kalkstein，2004；Toloo et al.，2013）。生态基础设施防控工程应用最多，实践效果也最显著，主要通过绿色基础设施、蓝色基础设施建设^①，推进控制温室气体排放等直接或间接降温措施（葛伟强等，2006；周红妹等，2002；Afshari et al.，2018；Barnes & Dow，2022；Byrne，2015；Emmanuel & Loconsole，2015；EPA，2008；Lenzholzer & Kluck，2020；Lingman et al.，2023；Liu et al.，2021；Matthew et al.，2015；Norton et al.，2015；Peng et al.，2021；Weng et al.，2004；Zheng & Weng，2018）。城市结构优化工程主要通过建筑材料设计、城市规划和功能布局、土地利用管理等方法对城市环境进行绿化、更新和功能调整，提升城市环境整体热吸收和热适应能力（Matthews et al.，2015；Jacobs et al.，2020；Peng et al.，2020；Cao et al.，2015；Qin，2015；Santamouris，2013）。

表1 工程-技术视角下极端高温灾害治理的研究

尺度	主要工程/技术	措施
	城市高温智能预警工程	基于气象、热健康等模型算法，通过构建“暴露性-易损性-适应力”的城市高温脆弱性预警指标体系，完善热健康预警系统（HHWS），动态精细化表征极端气温对多元主体的影响；基于热死亡预测的早起高温预警系统
宏观	生态基础设施防控工程	绿色基础设施系统通过路面材质和性能的优化建设绿色交通网络，并构建绿色廊道鼓励低碳出行，减少汽车尾气的排放，缓解极端高温带来的城市升温；蓝色基础设施系统通过水资源管理促进蒸发，降低城市环境温度，人工增雨技术，江湖连通工程
	城市结构优化工程	土地利用绿色优化，通过城市更新与环境治理，因地制宜增加城市绿地；通风廊道强度控制技术，通过对开场空间增补人工风道

^① 绿色基础设施是基于自然解决方案构建的绿色网络系统，蓝色基础设施是以水体为核心要素的管理网络系统，二者统称为蓝绿基础设施。

(续上表)

尺度	主要工程/技术	措施
微观	生态固碳技术	构建城市森林、城市农业和城市生态服务系统，减少农业化肥使用；提高城市生态系统碳吸收和固存能力以降低城市热风险；恢复退化城市湿地，避免生态系统碳汇功能的丧失
	环保节能技术	绿色建筑改造，如立体绿化、屋顶花园、阳台绿化、增设遮阳棚等多层次建筑节能改造方式；公共服务设施绿色工艺和技术，将社区活动空间与绿地系统结合，控制人为碳排放
	智慧服务技术	基于物联网的热点转换技术，设立社区高温救济网络；热监控技术，进行热监控反馈

资料来源：作者自制。

微观层面的治理包括生态固碳技术、环保节能技术和智慧服务技术。生态固碳技术主要解决大气中二氧化碳浓度过高的问题，通过增加和优化碳汇，吸收或储存大气中的温室气体，减缓全球变暖的速率（Depietri, Renaud, & Kallis, 2012; Jenerette et al., 2011; Pataki et al., 2006）。环保节能技术渗透在能源生产、传输、消费全链条，多使用在建筑设计、能源高效转换和利用、电动汽车交通和公交系统电气化等领域（刘艳红, 2007; 刘焱序等, 2017; Nicol & Humphreys, 2002; Smith & Livermore, 2008）。智慧服务技术强调应用新一代信息技术，如人工智能和物联网，建设社区高温救济网络（韦国锐、林涛, 2022; Heusinger & Sailor, 2019; Santamouris et al., 2020; Materia et al., 2023; Zhi & Wang, 2023）。总而言之，在宏观或微观层面应对极端高温灾害的两大技术思路就是减缓和适应，其要点在于提高城市对极端高温的适应能力，缓解极端高温的灾害后果。

二、作为组织 - 制度问题的高温灾害

随着极端高温灾害的常态化，其治理模式从强调工程技术转向多元治理。越来越多的政府部门和社会团体参与到极端事件防治工作中，使得治理网络呈现复杂化和多元化的特点（Comfort, 2002; Comfort & Kapucu, 2006）。在全球范围内，国际气象组织（World Meteorological Organization, 简称 WMO）是应对极端高温灾害最为关键的组织。1988 年，WMO 和联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, 简称 UNEP）合作成立联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, 简称 IPCC, 以下简称“联合国气候变化委员会”），汇集世界各国的科学家和政府代表，为全球气候变化

提供科学证据，推动国际社会应对气候变化。1995年芝加哥热浪和2003年欧洲大陆热浪事件之后，应对全球气候变化和极端气候事件的参与组织变得更加多元，参与方式也从“被动管控”转变为“联动共治”（Stone et al., 2019; Lanza & Stone, 2016; Stone et al., 2013; Jay et al., 2021; Wang et al., 2021）。从总体上看，“组织-制度”视角关注不同类型的组织的功能与行动特征，以及相关制度体系的构成与特点。

（一）理论研究：体制、机制、法制

从组织-制度视角看，在以“一案三制”为核心的应急管理体系中（钟开斌，2009），可以从体制、机制、法制三个层面探讨包括极端高温灾害作为突发事件的应急管理。在体制方面，极端高温灾害的治理涵盖纵向治理和横向治理两个维度，关于纵向治理的讨论关注集权-分权概念下的灾害应对，分析自上而下和自下而上两种治理体制的异同（Lass, 2011）；关于横向治理的讨论聚焦多元主体和多部门之间的合作与协同（Klinenburg, 2015; Poumadère et al., 2005）。

在机制方面，探索极端高温灾害治理的研究视角包括整体性政府治理（程顺祺等，2019）、嵌套规划方法（nested planning）（Keith et al., 2021）、主体责任视角等（Mees et al., 2015; Bolitho & Miller, 2017）。其中，组织协同机制是一个全球性议题。例如，有研究建议在热浪袭击时特设一个气候调查小组协调各部门应对极端热问题（Mahlkow et al., 2016），尽管至今尚未形成一套成熟的极端热评估体系（Stone et al., 2019; Lanza & Stone, 2016; Stone et al., 2013; Jay et al., 2021; Wang et al., 2021）。在我国，相对于旱涝、台风等极端事件，应对高温热浪的体制机制在研究中受到关注的时间偏晚，关于部门协同联动机制的研究和实践进展都相对缓慢（王伟光、郑国光，2013）。

在法制方面，在建立极端高温灾害应对的法律制度上还存在分歧。例如，有学者认为，极端热治理应该与空气污染的法律制度合并，以期从健康和韧性层面获得关注和保护（Stone, 2005）；也有学者认为，极端热应该成为官方认可的突发事件之一，值得国家发布紧急状态声明（emergency declaration）来获得关注和资源（Bolitho & Miller, 2017）。

（二）实践探索：组织类型与功能

极端高温灾害的治理组织从政治尺度上可以分为国际型、区域型、国家型和地方型（见表2）。国际型组织承担减少极端气候事件风险的全球责任，督促加强极端事件的风险识别、评估、监测、预防，致力于开展宏观层面的全生命周期的灾害治理（IPCC, 2012, 2014）。区域型组织重在进行灾害评估和制定应

对战略，提供资金、技术和行动上的支持（ADPC，2010）。国家型和地方型组织大部分也是灾前就存在的“维持型”组织，多以执行常规任务为主（周利敏，2007）。地方政府的基层组织（如社区组织）主要在提高灾害风险意识、组织社区应对以及执行灾后恢复计划中扮演关键角色（Hammer, et al., 2020; Liu et al., 2023; 刘泽照、祖嘉玮，2023）。极端高温灾害的治理组织还包括以学校和科研机构为代表的结构扩张型和功能拓展型组织（Bolitho & Miller, 2017; Ebi, 2019），以及以志愿者组织为代表的非政府突生组织（Belkin & Kouchaki, 2017）。本文将与极端高温灾害相关的组织机构按照尺度类型和制度特征梳理，如表2所示。

表2 组织 - 制度视角下的极端高温灾害治理的相关组织

范围	类型	功能	组织名称
国际	维持型	减少全球热健康风险，建立全球极端高温灾害治理机制，督促极端高温风险识别、灾害评估、危机管理	政府间气候变化组织（IPCC）、世界气象组织（WMO）、世界卫生组织（WHO）、气候行动网络（CAN）、联合国可持续发展委员会（CSD）、联合国环境规划署（UNEP）
区域	维持型	推进区域风险管理，调动区域资源，协助灾害评估，提供技术指导	亚洲减灾中心（ADPC）、欧洲环境署（EEA）
国家	维持型	灾害评估、监测、预警，资源供给	美国国家海洋和大气管理局（NOAA）、联邦紧急事务管理局（FEMA）、中国应急管理部
	结构扩张型	在原有组织基础上扩展的组织以执行特殊任务，如提供技术、智力支撑	应急管理大学、应急管理研究院
地方	维持型	提供日常应急功能、资源、救援队伍等	社区、景点等微型消防站
	突生组织	满足非常态需求，如辅助救援、协调物资	森林山地火灾救援指挥部、志愿者组织、微型降暑站
	结构扩张型	在原有组织基础上执行非常规任务	政府设立的民防组织，如美国的社区紧急热救援队（CERT）、应急管理研究院
	功能拓展型	执行常规任务的新组织，提供地方层面的物质援助、心理健康、生计发展、文化重建	社区组织、红十字会、救助儿童会、乐施会

资料来源：作者自制。

在全球范围内极端高温灾害治理过度依赖政府行政职能的现象比较普遍，非政府组织的自发性和积极性有待加强（Klinenburg, 2015；程顺祺等，2019）。在认知决定行动的逻辑下，组织对极端高温灾害的知识储备、态势感知等方面差异较大，进而导致了应对行动上的差异。例如，一项针对暴雨和高温协同治理的案例研究发现，即使政策层面同时强调暴雨和极端高温的危害性，但是行动单位在实际灾害风险的评估工作中，被暴雨洪水的视觉冲击模糊了行动焦点，救助基金和资源大面积向暴雨洪水的治理倾斜，导致因高温产生的死亡和患病人群得不到有效救助（Barnes & Dow, 2022）。由于对极端高温有“灾害偏见”，这种复合灾害场景中的焦点模糊现象还发生在政府和公共组织之间：不同的灾害认知导致在极端高温灾害应对行动的优先级落后于暴雨洪水灾害（Barnes & Dow, 2022）。

三、作为政治 - 社会问题的高温灾害

在政治 - 社会视角下，极端高温灾害的治理起源于全球对气候变化议题的关注。20 世纪 90 年代，气候变化的科学研究取得显著进展。1997 年 12 月 11 日，149 个国家和地区的代表在日本共同制定研究第一个具有约束力的国际协议《京都议定书》，该公约于 2005 年 2 月 16 日生效，要求发达国家承诺在 2008 年至 2012 年间，在 1990 年排放水平上平均减少至少 5% 的温室气体排放。2015 年 12 月 12 日，全球 197 个国家共同签订《巴黎协定》，该协定在一年内便生效，旨在大幅减少全球温室气体排放，将本世纪全球气温升幅限制在 2℃ 以内，同时寻求将气温升幅进一步限制在 1.5℃ 以内的措施。极端高温事件频发高发，推动了应对气候变化的全球合作。同时，治理极端高温灾害涉及政治决策、国际合作、经济发展、社会正义、环境公平等重要且敏感的议题，一些气候变化治理措施（例如推广可再生能源）可能引发经济重组和转型，触动现有的经济利益格局。极端高温灾害在不同国家的灾害体系中占据不同的优先级，资源配置需要平衡和博弈。在政治 - 社会视角下，极端高温灾害治理还包括公众参与和民主治理，涉及对环境公平与社会正义等理论的探讨，强调多方利益相关者平等地加入治理过程，共同应对极端高温带来的政治社会挑战。

（一）理论研究：社会公平与风险

政治 - 社会视角下的理论研究主要聚焦于极端高温灾害的社会公平和风险评估问题。极端高温引发的公平议题主要包括人口健康风险不平等、社会经济结构不平等、热适应措施和资源不平等，其具体内涵和文献梳理如表 3 所示。

关于不同人群热健康风险差异的研究显示：弱势群体，如老年人、低收入人群、残障人士对昼夜持续性的复合高温异常敏感，适应能力也相对较差，对极端高温的脆弱度更高（Cai et al. , 2019；Wilson & Chakraborty, 2018；Wang et al. , 2021；谢盼等，2015）。此外，极端高温灾害对不同地域的影响也有差异，如郊区、边缘区、乡镇等地区因基础设施的配置不足，缺乏有效应对极端高温的措施，导致地域间极端高温应对能力的差异性增大（Cutter, 2006；Pelling, 2003）。

表3 政治 - 社会视角下的极端高温灾害治理相关研究

社会公平议题	内容
人口健康风险不平等	基于热死亡和热疾病的健康脆弱度、暴露度、风险评估，关注不同性别、年龄、种族、职业的人群差异；关注心理健康的差异；呼吁对弱势群体和行业的关注
社会经济结构不平等	聚焦社会、经济、住房、交通等系统中的不平等因素，反映极端热影响的社会经济结构、社会阶层、安全风险、社会情绪散播等问题
热适应措施不平等	一系列空间视角下的城乡对比、区域差异、生态系统功能分布差异的探索，极端热适应性措施、资源分配、政策干预等的评估和对比研究，包括适应性治理基础设施的建设与分配、土地资源的分配

资料来源：作者自制。

极端高温的风险评估研究衍生于社会脆弱性理论，是灾害学领域的脆弱性理论在社会环境领域的延伸（Yuan et al. , 2017），多以社会脆弱度为基础指标，耦合致灾因子和暴露度，构建应对极端高温的风险指数体系，主要研究极端高温灾害引发的社会公平问题（Aubrecht et al. , 2013；Hua et al. , 2021；Verdonck et al. , 2019）。极端高温公平议题（extreme heat justice）衍生于气候公平（climate justice）理论，是环境公平理论的分支，也是社会公平理论的重要组成部分（Athanasidou & Baer, 2011；Mitchell & Chakraborty, 2014；White-Newson et al. , 2009；Zhang et al. , 2023）。

（二）实践探索：政策制定与执行

政治 - 社会视角下的实践探索主要关注全球合作变化及适应策略。虽然联合国气候变化委员会证实了气候变化和极端气候事件的严峻趋势，但全球各国对极端高温相关议题的认知和关注度依然差异甚大（IPCC, 2012；2014）。在发达国家，极端高温被视为一种健康威胁，尤其是高收入的发达城市，关注因适应性措施不平等而加剧的社会不公平问题（Hondula et al. , 2015；Turek-Hankins et al. , 2021）。发展中国家更多地将极端高温视为一种与诸如干旱的水文灾害类

似的自然灾害，是基础民生和农业问题（Turek-Hankins et al.，2021）。极端高温灾害的适应性策略和减缓性策略是两大主流政策导向。减缓性策略是通过直接减少温室气体排放，以从成因上减缓气候变化速率，稳定和降低极端气候事件的发生概率；适应性策略是通过增强社会、经济和环境系统的抵御能力，对于已经发生或预期的气候变化及影响做出预防性的、及时的、短期与长期并举的灾害全周期响应（Liu et al.，2021；Santamouris et al.，2020；彭仲仁、路庆昌，2012）。国际上对气候变化的关注，尽管在设定减排目标以推动清洁能源利用上已经达成基本共识，但对极端高温灾害的政策制定和执行推进缓慢（Dunn，2002；Levin et al.，2012）。

对于海平面上升、城市微气候极端化这种不可逆转的灾害，适应性策略的社会经济效益往往更高（Peng & Song，2018）。然而，各国政府都更重视以节能减排为主导的减缓性策略，以控制全球升温的幅度，在客观上容易忽视应对极端气候灾害的适应性策略（蒋存妍等，2021；彭仲仁、路庆昌，2012）。这种政策注意力偏差是由政府机构对极端高温灾害的风险感知差异导致，而对高温的风险感知基于气候灾害治理的知识和认知水平，从而间接影响政策注意力在此类突发事件上的分配（Biesbroek et al.，2022）。

在气候变化议题上，全球层面的气候应对计划、规划行动策略以及应急管理政策都具有高度的模糊性，这是政策执行受阻的重要原因（Ji & Darnall，2018；Kiunsi，2013；Bulkeley，2010）。一项针对美国1899个地方政府的调查显示：仅有不到7%的城市制定了关于适应气候变化的减缓性和适应性规划政策（Liao et al.，2020）。欧盟国家在应对极端气候事件议题上的政策态度看似积极，但相关研究显示：其在节能减排的政策目标上没有制定强制性实施要求，使得地方政府在执行应对气候变化的措施时仍然被动和消极（Koutalakis et al.，2010）。在应对极端高温灾害的政治决策中，政府面临着在有限的资源和多重紧迫需求之间进行权衡的巨大挑战（Mahlkow et al.，2016），需要有效处理治理优先级中的一些议题竞争。例如，空调的大面积使用伴随超高电能耗和间接的碳排放，也间接导致城市微气候环境的升温，这是人们在追求热舒适和更高生活品质时，与“双碳”目标之间的博弈。又如上文提到的水体系统虽然被证实是城市降温的有效方法，但在水资源匮乏的干旱或半干旱地区，水体吸收温度的降温措施效果并不理想。再如，一般土地利用规划优先考虑的经济发展因素和极端热灾害规划中需要考虑的气候因素往往产生竞争关系（Donner et al.，2017）。

四、中国极端高温灾害治理的研究与实践：进展、不足与新机遇

我国首次出现“城市高温灾害”概念是在20世纪90年代（谢德寿，1994）。随着高温愈发“极端”，出现了第一个较为被广泛认可的“极端高温”灾害定义，即基于积累频率的统计方法，将日均温度高于90%积累频率的极端高温事件界定为一个极端高温灾害日（黄丹青，2008）。该定义结合国际上对极端高温事件的分析方法，以我国南京站的日温度资料为基础，寻求到一个适合我国大部分城市的极端高温阈值，并将其适用于旬、月、季的时间尺度（黄丹青，2008）。此后，大量的专家学者在我国各个省、市、地区以及全国层面展开了极端高温灾害的影响评估、特征机制、应对策略等一系列案例和实证研究^①。

在我国的极端高温灾害研究中，绝大多数聚焦高温热浪的特征模拟、成因分析、趋势演变和风险评估，其中，风险评估是基于经典的风险三角理论（Risk Triangle Theory），即致灾因子、暴露度、脆弱性这三个因素，依赖气象数据，利用改进的气候模型和卫星遥感技术，预测极端高温的强度和频率，分析气象学成因，监测空气与地表温度变化（Chen et al. , 2022; Shi et al. , 2019; Yang et al. , 2021; Wang et al. , 2021; 陈敏等，2013）。研究显示，我国的极端高温灾害呈现显著的复合特征，其与城市化、人为碳排放、热岛效应均有紧密关系，这一结论在珠三角地区、长三角地区、香港均得到验证（Shi et al. , 2019; Wang et al. , 2019; Wang et al. , 2021; 李琪等，2016）。另一个相对集中的主题为影响评估研究，主要基于热健康和热疾病的因果关系，重点关注极端热对脆弱人群的影响，利用地理信息系统等空间分析方法，揭示极端高温影响的不均等性，并结合脆弱性、风险等概念工具进行热健康风险的量化和评估研究（Cao et al. , 2020; Hu et al. , 2017; Hua et al. , 2021; Ma et al. , 2023; Zhang et al. , 2019; 陈倩等，2017）。在这一主题上，小部分研究还关注极端高温下的工作环境和职业健康问题、热健康行为风险、电力供应等问题（Ban et al. , 2019; Du et al. , 2019; Morakinyo et al. , 2019）。第三个相对集中的主题围绕极端高温灾害的减缓和适应措施，探索不同规划尺度上应对极端高温灾害的有效策略（Yan et al. , 2020; Zeng et al. , 2022）。其中，有关我国极端高温预警系统的相关研究重在评估当前已经形成的预警制度和预警系统的有效性（Tan et al. , 2004; Wu et al. , 2020; 兰莉等，2016; 汪庆庆等，2014）。此外，个别研究还讨论了大数据分析和“人工社会”技术在我国极端高温灾害治理中的应用（He et al. , 2019）。

^① 作者梳理了全国不同范围内的极端高温灾害研究文献，有兴趣的读者可通过联系作者获取。

虽然我国关于极端高温灾害治理的研究取得了一些进展，但无论是从极端高温灾害频发多发的现实挑战看，还是从对其与全球其他国家的比较分析看，都存在不足；尤其从基于工程 - 技术、组织 - 制度、政治 - 社会三个维度的复合治理看，存在巨大的提升空间。

首先，面向极端高温的智能技术尚处于早期探索阶段。我国城市发展迅速，高密度建设和大面积的混凝土化导致城市吸热和储热能力增强。解决这些发展中形成的城市热量积累问题，需要投入大量时间和资源研究和解决其中的工程和技术问题。截至 2023 年 4 月，我国北京、上海、重庆、广州、武汉、南京、哈尔滨等多个城市都开始探索建立极端高温健康预警系统。这些系统通常由地方气象局、卫生健康部门和应急管理部门联合运营，为公众发布高温警报并提供防护建议和行动指南，但数字化、智能化应用程度不高（见表 4）。此外，我国冷却技术的广泛应用促进了制冷设备的普及，可能间接导致巨大的能源消耗和碳排放，从而加剧了微气候变暖问题，也为我国“碳中和”发展战略的实现造成困境。随着人工智能时代的到来，AI 技术在智能温控、能源消耗分析、可再生资源整合、电网运行优化、更高效的碳捕获和储存技术研发等方面，可以为技术降温和人工排碳之间的矛盾提供新的可能性。

表 4 中国城市极端高温预警系统一览

城市	发布渠道	主要防护措施	主要技术
北京	媒体、社交媒体、 官方网站、短信	调整工作时间、健康防 护提示、开放避暑中心	卫星遥感、自动监测站、互联网技术、 大数据和人工智能分析
上海	媒体、社交媒体、 官方网站	提供防暑降温物资、调 整工作时间、公众教育	高精度气象预测模型、数据分析软件、 数字通信技术
重庆	媒体、社交媒体、 官方网站	调整上下班时间、提出 防暑降温指南	环境监测站、温度感应器、大数据分 析、互联网和移动通信技术
广州	媒体、社交媒体、 官方网站	发放防暑降温物品、提 出健康防护建议	气象观测设施、实时数据处理系统、移 动互联网和社交网络
武汉	媒体、社交媒体、 官方网站	开放公共避暑场所、调 整工作和学习时间	自动气象站、气候模型、在线信息发 布平台
南京	媒体、社交媒体、 官方网站	调整工作和学习时间、 开放避暑中心	气象卫星、自动气象站、大数据分析、 社交媒体和移动应用
哈尔滨	媒体、社交媒体、 官方网站	增强公众意识、提出健 康防护建议	气象观测网络、温度监测设备、信息传 播平台

资料来源：作者自制。

其次，传统灾害应急制度缺乏对极端高温的针对性。我国当前的应急管理体系的启动通常以作为焦点事件（focusing event）的突发事件为触发条件，而极端高温事件或热浪引发的民生和健康问题通常进展缓慢，很难成为焦点事件，导致现有的应急管理体系缺乏针对性。长期的高温灾害还会对基础设施系统造成级联损害，可能引发一系列管理上的问题，这些更是未能得到重视。针对极端高温风险的评估、保险等制度暂未包括在应急规划和应急预案之中。单一应对措施无法满足极端高温灾害的多元需求，因此，需要基于极端高温灾害的复合特征，展开有针对性的科学研究和规划干预，实施多层次、多维度、复合型的治理措施。

最后，建设适应极端高温灾害的城市需要强化治理手段。我国气象、卫生、规划、应急等核心部门治理极端高温的职能碎片化，参与主体职责不明晰，各部门对极端高温灾害的风险认知水平和合作意愿偏低。政策实施上的监督力度和激励程度不够，导致执行力度低。建设具有气候韧性的城市大多以设施改造为主，缺乏建设后的治理措施，并且治理主体大多限于政府，缺少基层组织与公众的多元参与。

1994年，国务院发布《中国21世纪议程》，首次提出“适应气候变化”理念。2007年，发改委发布《中国应对气候变化国家方案》，明确了中国适应气候变化的各项任务。自此至2009年，我国各省级政府完成了应对气候变化方案的编制工作，细化了应对气候变化的任务目标。2013年发布的《国家适应气候变化战略》首次将应对气候变化提升到国家战略高度，旨在加强中国在未来几十年内对气候变化的适应能力，确保国家的可持续发展和社会福祉。2015年，我国发布《中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告》，这是我国第一部与极端天气气候事件和灾害应急管理相关的评估报告。2016年，为进一步提升城市的气候变化适应能力，国家发改委、住房与城乡建设部等有关部门制定了城市适应气候变化行动方案，并于2017年印发《气候适应型城市建设试点工作的通知》，选择28个试点城市推进相关工作。然而，《气候变化绿皮书：应对气候变化报告（2020）》指出，大部分试点城市在积累建设经验的同时，仍然存在对适应气候变化认识不足、基础能力薄弱、工作制度和设施保障不完善、跨部门协作机制不健全等问题。2022年6月，生态环境部牵头印发《国家适应气候变化战略2035》，明确指出“减缓和适应是应对气候变化的两大策略，二者相辅相成，缺一不可”，这为极端高温灾害的复合治理提供了新的战略指导。

更为重要的是，自2014年总体国家安全观提出以来，“生命至上”已经成为我国应急管理的价值目标，不仅在安全生产领域得到严格的落实，也深刻地

影响了自然灾害的应急管理，是中国应急管理效能的首要生成机制（张海波、童星，2022）。2022年，党的二十大报告专章部署国家安全体系和能力现代化，专节部署提升公共安全治理水平，要求建立大安全大应急框架，推动公共安全治理模式向事前预防转型。这些都为加强极端高温灾害的理论研究和实践探索提供了新的动力。在总体国家安全观“生命至上”的价值目标的引领下，加强极端高温灾害的应急管理不仅是建立大安全大应急框架的应有之义，也是推动公共安全治理模式向事前预防转型的重要领域。在这一前提下，推进极端高温灾害复合治理的理论研究和政策实践正当其时。

五、未来的研究议题与行动路径

极端高温灾害的复合治理研究在过去20年中逐步发展形成一个新的跨学科研究领域，相关主题从宏观的政治博弈、政策制定、组织管理，到微观的个体认知、风险行为、规划应对需要大气科学、地理学、政治学、社会学、建筑与城乡规划学、环境科学与工程学、公共管理学、公共卫生与预防学、心理学等多学科的交流与合作。本文总结了不同学科在极端高温复合治理议题上的关注重点和作用定位^①，这些研究内容有区别更有交叉，不同学科领域的研究内容边界趋向模糊化，研究尺度趋向多元化。推进极端高温灾害的治理实践要融合多学科知识，以推进应急管理学科建设为契机，未来可在三个方向上拓展极端高温灾害复合治理的理论研究和实践探索。

（一）探索科技创新赋能极端高温灾害的复合治理新模式

以物联网、人工智能、大数据为代表的新一代信息技术对人类社会带来全面而深刻的影响，对推进应急管理现代化具有战略意义（张海波等，2022）。极端高温灾害治理具有复杂性，应用信息技术可以降低治理过程中的不确定性，可重点从以下几个方向展开研究。一是充分利用传感器网络、卫星遥感技术、无人机等手段实时收集相关数据，深度应用大数据分析技术，实现数据收集和智能化的智能化。二是开发基于人工智能的预警系统，例如使用卷积神经网络技术对城市极端高温风险进行自动监测，提高预测模型可解释性；利用自然语言处理（NLP）和众包数据收集技术，提取和分析灾害全过程的社会媒体信息，借助移动应用和社交网络平台传播预警信息，实现高效精准的预警触发系统等。

^① 由于篇幅限制，关于不同学科下的极端高温灾害研究分类，有兴趣的读者可通过联系作者获取。

三是使用地理信息系统、城市仿真建模和数字孪生技术，分析城市结构和基础设施系统，耦合人工智能识别技术和决策树算法，对城市建筑群关键要素进行深度分析，形成环境温度易感风险评估感知地图。四是开发智能化应急响应平台，实现对救援人员和物资的实时调度，优化救灾物资的地理分布，完善平急两用基础设施网络布局。五是利用虚拟现实（VR）和增强现实（AR）进行极端高温灾害科普，提高公众和社区层面的防灾意识和响应能力。

（二）发展基于韧性城市的极端高温灾害治理政策体系

极端气候事件复合治理仍然存在“头疼医头、脚疼医脚”的现象，增强应对极端高温灾害下的系统韧性，可重点从以下几个方面展开研究。一是在统筹发展和安全的理念下，厘清减缓与适应的区别，揭示事前、事中、事后全过程组织统筹机制，结合多案例分析，识别极端高温灾害复合治理体系的关键要素，以系统思维强化关键要素间的关联。二是加强极端高温灾害应急能力实证研究，从全球热治理试点城市的实践经验出发，结合多案例分析和量化模型，识别和评估公众热健康风险，同时结合时空视角探索建立热健康风险方法框架。三是采用情景规划（scenario planning）理论和方法，通过理解城市发展规律，模拟城市土地使用、经济活动、交通系统、住房情况以及人口分布等子系统随时间的演变规律，对未来可能的灾害场景进行预测，服务战略规划制定。四是从政府提供公共安全的职能视角出发，结合复杂适应系统理论，分析政府机构在应对突发极端高温事件下的应急准备、风险感知、应急响应和危机学习，揭示形成合力的组织协同机制，探索多主体协同治理极端高温灾害的动态演化机理。

（三）面向全球治理拓展倡导气候公平的参与机制

在全球协作的层面，极端高温灾害治理需要各国共同参与，形成全球合力。通过建立全球气候治理机制，推动各国在减排、能源转型、科技创新等方面开展合作，共同应对极端高温等气候变化挑战，尤其是要增加发展中国家和欠发达国家在应对全球气候变化中的参与水平，切实提升全球气候公平。同时，国际社会应加强信息共享和预警机制建设，提高全球应对极端高温事件的协同能力。在各国的国家战略层面，政府需要转变传统的治理思维，将极端高温治理纳入国家战略规划，制定长期和短期的应对策略。在基础设施建设方面，应注重在平急两用基础设施的规划和建设中广泛吸收公众意见和建议，确保在极端高温事件发生时能够迅速启动应急响应机制，保障人民生命财产安全。此外，政府还应加强科普宣传和教育，提高公众对极端高温事件的认知和应对能力。在地方治理层面，地方政府应根据本地实际情况，制定具体的应对措施和预案，

强化当地居民、社区、企业等各方共同参与，探索具有地方特色的极端高温治理模式。地方政府应加强与上级政府的沟通协调，确保在极端高温事件发生时能够迅速获得资源和支持，并关注弱势群体、边远地区居民的极端高温应对能力。

参考文献

- 陈倩、丁明军、杨续超、胡可嘉 (2017). 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价. *地球信息科学学报*, 19(11): 1475-1484.
- Chen, Q., Ding, M. J., Yang, X. C., & Hu, K. J. (2017). Spatially Explicit Assessment of Heat Health Risks Using Multi-source Data: A Case Study of the Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Geo-information Science*, 19(11): 1475-1484. (in Chinese)
- 陈敏、耿福海、马雷鸣、周伟东、施红、马井会 (2013). 近 138 年上海地区高温热浪事件分析. *高原气象*, 32(2): 2597-2607.
- Chen, M., Geng, F. H., Ma, L. M., Zhou, W. D., Shi, H., & Ma, J. H. (2013). Analyses on the Heat Wave Events in Shanghai in Recent 138 Years. *Plateau Meteorology*, 32(2): 2597-2607. (in Chinese)
- 程顺祺、王少谷、陈晨、许彬坤、李雅婧、邹秀琦、祁新华 (2019). 整体性政府视角下高温热浪应急管理的协同联动机制研究. *灾害学*, 34(3): 160-166.
- Cheng, S. Q., Wang, S. G., Chen, C., Xu, B. K., Li, Y. J. Zou, X. Q., & Qi, X. H. (2019). A Study on the Collaborative-linkage Mechanism for High Temperature Heat Wave: Based on the Holistic Government Theory. *Journal of Catastrophology*, 34(3): 160-166. (in Chinese)
- 葛伟强、周红妹、杨引明、丁金才 (2006). 基于遥感和 GIS 的城市绿地缓解热岛效应作用研究. *遥感技术与应用*, 21(5): 432-435.
- Ge, W. Q., Zhou, H. M., Yang, Y. M., & Ding, J. C. (2006). The Study of City Green Reducing Thermal Island Effect Based on RS and GIS. *Remote Sensing Technology and Application*, 21(5): 432-435. (in Chinese)
- 黄丹青、钱永甫 (2008). 我国极端温度事件的定义和趋势分析. *中山大学学报(自然科学版)*, 47(3): 112-116.
- Huang, D. Q., & Qian, Y. P. (2008). The Definition of Daily Mean Temperature Extremes over China and Its Trend. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 47(3): 112-116. (in Chinese)
- 蒋存妍、袁青、于婷婷 (2021). 城市应对气候变化不确定性的动态适应性规划国际经验及启示. *国际城市规*, 36(5): 13-22.
- Jiang, C. Y., Yuan, Q., & Yu, T. T. (2021). International Experience and Implications of Dynamic Adaptive Planning for Urban Response to Climate Change Uncertainty. *Urban Planning International*, 36(5): 13-22. (in Chinese)
- 孔锋 (2023). 统筹推动全球气候治理助力极端高温天气灾害应对. *防灾博览*, 4: 4-11.
- Kong, F. (2023). Coordinating and Promoting Global Climate Governance to Facilitate Addressing Extreme Hot Weather Disasters. *Overview of Disaster Prevention*, 4: 4-11. (in Chinese)
- 刘艳红、郭晋平 (2007). 城市景观格局与热岛效应研究进展. *气象与环境学报*, 6: 46-50.
- Liu, Y. H., & Guo, J. P. (2007). Advance in Study on Urban Landscape Pattern and Heat Island Effect. *Journal of Meteorology and Environment*, 6: 46-50. (in Chinese)
- 刘焱序、彭建、王仰麟 (2017). 城市热岛效应与景观格局的关联：从城市规模、景观组分到空间构型. *生态学报*, 37(23): 7769-7780.
- Liu, Y. X., Peng, J., & Wang, Y. L. (2017). The Relationship Between Urban Heat Island Effect and Landscape Pattern: From Urban Scale, Landscape Components to Spatial Configuration. *Acta Ecologica Sinica*, 37(23): 7769-7780. (in Chinese)
- 刘泽照、祖嘉玮 (2023). 极端高温灾害救援行动及应对效能——以中加两国地区火山为背景. *中国应急救援*, (06): 63-68.
- Liu, Z. Z., & Zu, J. W. (2023). Extreme Heat Disaster Rescue Actions and Its Response Effectiveness: Analysis on the Context of Regional Mountain Fires in China and Canada. *China Emergency Rescue*, (6): 63-68. (in Chinese)
- 柳叶刀倒计时亚洲中心 (2022). 2022 年柳叶刀人群健康与气候变化倒计时中国报告. 柳叶刀-公共卫生.
- Lancet Countdown: Health and Climate Change in Asia. (2022). *The 2022 China Report of the Lancet Countdown on*

- Health and Climate Change*. The Lancet Public Health. (in Chinese)
- 聂敬娣、张俊华、黄波 (2021). 城市热岛效应对人体健康影响研究综述. *生态科学*, 40(1): 200–208.
- Nie, J. D., Zhang, J. H., & Huang, B. (2021). A Review of the Human Health Consequences of Urban Heat Island Effect. *Ecological Science*, 40(1): 200–208. (in Chinese)
- 彭仲仁、路庆昌 (2012). 应对气候变化和极端天气事件的适应性规划. *现代城市研究*, 27(01): 7–12.
- Peng, Z. R., & Lu, Q. C. (2012). Adaptation Planning for Climatic Change and Extreme Weather Events. *Modern Urban Research*, 27(1): 7–12. (in Chinese)
- 童星、张海波 (2010). 基于中国问题的灾害管理分析框架. *中国社会科学*, (1): 132–146, 223–224
- Tong, X., & Zhang, H. B. (2010). An Analytical Framework of Disaster Management in the Context of China. *Social Sciences in China*, (1): 132–146, 223–224. (in Chinese)
- 韦国锐、林涛 (2022). 基于物联网的高温预警系统设计与应用. *科技创新与应用*, 12(3): 36–38.
- Wei, G. R., & Lin, T. (2022). Design and Application of High Temperature Warning System Based on Internet of Things. *Technology Innovation and Application*, 12(3): 36–38. (in Chinese)
- 吴朝玮、税伟、黄志刚、汪春辉、乔璐、吴叶玲 (2024). 城市高温脆弱性预警系统构建与应用. *热带地理*, 44(1): 121–142.
- Wu, C. W., Shui, W., Huang, Z. G., Wang, C. H., Qiao, L., & Wu, Y. L. ((2024). Construction and Application of Urban Heat Vulnerability Early Warning System. *Tropical Geography*, 44(1): 121–142. (in Chinese)
- 谢德寿 (1994). 城市高温灾害及其预防. *灾害学*, 9(3): 29–33.
- Xie, D. S. (1994). The Hazard of Megatherm and Its Preventive Measures. *Journal of Catastrophology*, 9(3): 28–33. (in Chinese)
- 谢盼、王仰麟、刘焱序、彭建 (2015). 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价. *地理学报*, 70(7): 1041–1051.
- Xie, P., Wang, Y. L., Liu, Y. X., & Peng, J. (2015). Incorporating Social Vulnerability to Assess Population Health Risk due to Heat Stress in China. *Acta Geographica Sinica*, 70(7): 1041–1051. (in Chinese)
- 徐金芳、邓振镛、陈敏 (2009). 中国高温热浪危害特征的研究综述. *干旱气象*, 27(2): 163–167.
- Xu, J. F., Deng, Z. Y., & Chen, M. (2009). A Summary of Studying on Characteristics of High Temperature and Heat Wave Damage in China. *Journal of Arid Meteorology*, 27(2): 163–167. (in Chinese)
- 张海波、戴新宇、钱德沛、吕建 (2022). 新一代信息技术赋能应急管理现代化的战略分析. *中国科学院院刊*, 37(12): 1727–1737
- Zhang, H. B., Dai, X. Y., Qian, D. P., & Lyu, J. (2022). Strategic Perspective of Leveraging New Generation Information Technology to Enable Modernization of Emergency Management. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(12): 1727–1723. (in Chinese)
- 张海波、童星 (2022). 中国应急管理效能的生成机制. *中国社会科学*, 4: 64–82, 205–206.
- Zhang, H. B., & Tong, X. (2022). The Generative Mechanisms for the Effectiveness of Emergency Management in China. *Social Sciences in China*, 4: 64–82, 205–206. (in Chinese)
- 王伟光、郑国光 (2013). 气候变化绿皮书——应对气候变化报告(2013). 北京: 社科文献出版社.
- Wang, W. G., & Zheng, G. G. (2013). *Annual Report of Actions to Address Climate Change (2013)*. Beijing: Social Sciences Academic Press. (in Chinese)
- 钟开斌 (2009). “一案三制”: 中国应急管理体系建设的基本框架. *南京社会科学*, 11: 77–83.
- Zhong, K. B. (2009). Chinese Emergency Management Construction Framework. *Nanjing Journal of Social Sciences*, (11): 77–83. (in Chinese)
- 周红妹、丁金才、徐一鸣、黄家鑫、杨文悦、方岩 (2002). 城市热岛效应与绿地分布的关系监测和评估. *上海农业学报*, 2: 83–88.
- Zhou, H. M., Ding, J. C., Xu, Y. M., Huang, J. X., Yang, W. Y., & Fang, Y. (2002). The Monitoring and Evaluation of Relation Between Heat Island Effect and Greenbelt Distribution in Shanghai Urban Area. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2: 83–88. (in Chinese)
- Anderson, G. B., Oleson, K. W., Jones, B., & Peng, R. D. (2018). Projected Trends in High-mortality Heatwaves under Different Scenarios of Climate, Population, and Adaptation in 82 US Communities. *Climatic Change*, 146(3–4): 455–470.
- Afshari, A., Schuch, F., & Marpu, P. (2018). Estimation of the Traffic Related Anthropogenic Heat Release Using BTEX Measurements: A Case Study in Abu Dhabi. *Urban Climate*, 24(2): 311–325.
- Athanasίου, T., & Baer, P. (2011). *Dead Heat: Global Justice and Global Warming*. Seven Stories Press.
- Aubrecht, C., & Özceylan, D. (2013). Identification of Heat Risk Patterns in the US National Capital Region by Integrating Heat Stress and Related Vulnerability. *Environment International*, 56: 65–77.

- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Mendez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagana, X., Tonne, C., Anto, J. M., & Achebak, H. (2023). Heat-Related Mortality in Europe During the Summer of 2022. *Nature Medicine*, 29(7): 1857–1866.
- Ban, J., Shi, W. Y., Cui, L. L., Liu, X., Jiang, C., Han, L. Y., Wang, R., & Li, T. T. (2019). Health-Risk Perception and Its Mediating Effect on Protective Behavioral Adaptation to Heat Waves. *Environmental Research*, 172: 27–33.
- Barnes, J., & Dow, K. (2022). Water AND Heat: Intervening in Adaptation Hazard Bias. *Frontiers in Climate*, 4.
- Basagaña, X., Sartini, C., Barrera-Gómez, J., Davvand, P., Cunillera, J., Ostro, B., Sunyer, J., & Medina-Ramón, M. (2011). Heat Waves and Cause-Specific Mortality at All Ages. *Epidemiology*, 22(6): 765–772.
- Bastos, A., Gouveia, C. M., Trigo, R. M., & Running, S. W. (2014). Analysing the Spatio-Temporal Impacts of the 2003 and 2010 Extreme Heatwaves on Plant Productivity in Europe. *Biogeosciences*, 11(13): 3421–3435.
- Biesbroek, R., Wright, S. J., Eguren, S. K., Bonotto, A., & Athanasiadis, I. N. (2022). Policy Attention to Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability: A Global Assessment of National Communications (1994–2019). *Climate Policy*, 22(1): 97–111.
- Bolitho, A., & Miller, F. (2017). Heat as Emergency, Heat as Chronic Stress: Policy and Institutional Responses to Vulnerability to Extreme Heat. *Local Environment*, 22(6): 682–698.
- Burillo, D., Chester, M. V., Pincetl, S., & Fournier, E. (2019). Electricity Infrastructure Vulnerabilities Due to Long-Term Growth and Extreme Heat from Climate Change in Los Angeles County. *Energy Policy*, 128: 943–953.
- Cai, Z., Tang, Y., Chen, K., & Han, G. F. (2019). Assessing the Heat Vulnerability of Different Local Climate Zones in the Old Areas of a Chinese Megacity. *Sustainability*, 11(7): 15.
- Cao, A., Li, Q., & Meng, Q. (2015). Effects of Orientation of Urban Roads on the Local Thermal Environment in Guangzhou City. *Procedia Engineering*, 121: 2075–2082.
- Cao, Z., Wu, Z. F., Li, S. Y., Guo, G. H., Song, S., Deng, Y. J., Ma, W. J., Sun, H., & Guan, W. C. (2020). Explicit Spatializing Heat-Exposure Risk and Local Associated Factors by Coupling Social Media Data and Automatic Meteorological Station Data. *Environmental Research*, 188: 109813.
- Chen, H., Zhao, L., Dong, W., Cheng, L., Cai, W., Yang, J., Bao, J., Liang, X. Z., Hajat, S., Gong, P., Liang, W., & Huang, C. (2022). Spatiotemporal Variation of Mortality Burden Attributable to Heatwaves in China, 1979–2020. *Science Bulletin*, 67(13): 1340–1344.
- Comfort, L. K. (2002). Rethinking Security: Organizational Fragility in Extreme Events. *Public Administration Review*, 62: 98–107.
- Comfort, L. K., & Kapucu, N. (2006). Inter-Organizational Coordination in Extreme Events: The World Trade Center Attacks, September 11, 2001. *Natural Hazards*, 39(2): 309–327.
- Davis, R. E., Knappenberger, P. C., Michaels, P. J., & Novicoff, W. M. (2003). Changing Heat-related Mortality in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 111(14): 1712–1718.
- Depietri, Y., Renaud, F. G., & Kallis, G. (2012). Heat Waves and Floods in Urban Areas: A Policy-Oriented Review of Ecosystem Services. *Sustainability Science*, 7: 95–107.
- Diaz, J., Carmona, R., Miron, I. J., Luna, M. Y., & Linares, C. (2018). Time Trend in the Impact of Heat Waves on Daily Mortality in Spain for a Period of over Thirty Years (1983–2013). *Environment International*, 116: 10–17.
- Du, C., Li, B., Li, Y., Xu, M., & Yao, R. (2019). Modification of the Predicted Heat Strain (PHS) Model in Predicting Human Thermal Responses for Chinese Workers in Hot Environments. *Building & Environment*, 165: 106349.
- Dunn, S. (2002). Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(3): 235–264.
- Ebi, K. L. (2019). Effective Heat Action Plans: Research to Interventions. *Environmental Research Letters*, 14(12), 122001.
- Emmanuel, R., & Loconsole, A. (2015). Green Infrastructure as an Adaptation Approach to Tackling Urban Overheating in the Glasgow Clyde Valley Region, UK. *Landscape and Urban Planning*, 138, 71–86.
- EPA (U. S. Environmental Protection Agency). (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft, <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
- Fisher, J. A., Jiang, C., Soneja, S. I., Mitchell, C., Puett, R. C., & Sapkota, A. (2017). Summertime Extreme Heat Events and Increased Risk of Acute Myocardial Infarction Hospitalizations. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 27: 276.
- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies Between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), During an Extremely Hot Summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1): 10973–10973.
- Gabbe, C. J., & Pierce, G. (2020). Extreme Heat Vulnerability of Subsidized Housing Residents in California. *Housing*

- Policy Debate*, 30(5): 843–860.
- Goggins, W. B., Chan, E. Y. Y., Ng, E., Ren, C., & Chen, L. (2012). Effect Modification of the Association Between Short-term Meteorological Factors and Mortality by Urban Heat Islands in Hong Kong. *PLoS ONE*, 7(6): 1–6.
- Grossman-Clarke, S., Zehnder, J. A., Loridan, T., & Grimmond, C. S. B. (2010). Contribution of Land Use Changes to Near-Surface Air Temperatures During Recent Summer Extreme Heat Events in the Phoenix Metropolitan Area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(8): 1649–1664.
- Hajat, S., Sheridan, S. C., Allen, M. J., Pascal, M., Laaidi, K., Yagouti, A., Bickis, U., Tobias, A., Bourque, D., Armstrong, B. G., & Kosatsky, T. (2010). Heat-Health Warning Systems: A Comparison of the Predictive Capacity of Different Approaches to Identifying Dangerously Hot Days. *American Journal of Public Health*, 100(6): 1137–1144.
- Hansen, A., Bi, P., Nitschke, M., Ryan, P., Pisaniello, D., & Tucker, G. (2008). The Effect of Heat Waves on Mental Health in a Temperate Australian City. *Environmental Health Perspectives*, 116(10): 1369–1375.
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood Microclimates and Vulnerability to Heat Stress. *Social Science & Medicine*, 63(11): 2847–2863.
- He, C., Ma, L., Zhou, L. G., Kan, H. D., Zhang, Y., Ma, W. C., & Chen, B. (2019). Exploring the Mechanisms of Heat Wave Vulnerability at the Urban Scale Based on the Application of Big Data and Artificial Societies. *Environment International*, 127: 573–583.
- Heusinger, J., & Sailor, D. J. (2019). Heat and Cold Waves of US Cities: A New Tool for Optimizing Urban Climate. *Sustainable Cities and Society*, 51: 1–8.
- Hondula, D. M., Davis, R. E., Saha, M. V., Wegner, C. R., & Veazey, L. M. (2015). Geographic Dimensions of Heat-Related Mortality in Seven US Cities. *Environmental Research*, 138: 439–452.
- Hua, J., Zhang, X., Ren, C., Shi, Y., & Lee, T.-C. (2021). Spatiotemporal Assessment of Extreme Heat Risk for High-density Cities: A Case Study of Hong Kong from 2006 to 2016. *Sustainable Cities and Society*, 64: 1–15.
- Huang, C., Barnett, A. G., Wang, X., Vaneckova, P., FitzGerald, G., & Tong, S. (2011). Projecting Future Heat-related Mortality under Climate Change Scenarios: A Systematic Review. *Environmental Health Perspectives*, 119(12): 1681.
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F. & Dahe, Q. (Eds.), Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability: Synthesis Report. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S., & Kluck, J. (2020). Are Urban Water Bodies Really Cooling? *Urban Climate*, 32(2): 1–14.
- Jenerette, G. D., Harlan, S. L., Stefanov, W. L., & Martin, C. A. (2011). Ecosystem Services and Urban Heat Riskscape Moderation: Water, Green Spaces, and Social Inequality in Phoenix, USA. *Ecological Applications*, 21(7), 2637–2651.
- Johnson, D. P., Webber, J. J., UrsBeervalRavichandra, K., Lulla, V., & Stanforth, A. C. (2013). Spatiotemporal Variations in Heat-Related Health Risk in Three Midwestern US Cities Between 1990 and 2010. *Geocarto International*, 29(1): 65–84.
- Klinenberg, E. (2015). *Heat wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago*. University of Chicago Press.
- Kotharkar, R., & Ghosh, A., (2022). Progress in Extreme Heat Management and Warning Systems: A Systematic Review of Heat-Health Action Plans (1995–2020). *Sustainable Cities and Society*, 76: 103487.
- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annual Review Public Health*, 29: 41–55.
- Lanza, K., & Stone, B. (2016). Climate Adaptation in Cities: What Trees Are Suitable for Urban Heat Management? *Landscape and Urban Planning*, 153(9): 74–82.
- Levin, K., Cashore, B., Bernstein, S., & Auld, G. (2012). Overcoming the Tragedy of Super Wicked Problems: Constraining our Future Selves to Ameliorate Global Climate Change. *Policy Sciences*, 45(2): 123–152.
- Liu, Z., Cheng, W., Jim, C. Y., Morakinyo, T. E., Shi, Y., & Ng, E. (2021). Heat Mitigation Benefits of Urban Green and Blue Infrastructures: A Systematic Review of Modeling Techniques, Validation and Scenario Simulation in ENVI-met V4. *Building and Environment*, 200(14): 1–15.
- Lungman, T., Cirach, M., Marando, F., Barboza, E. P., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparrini, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2023). Cooling Cities Through Urban Green Infrastructure: A Health Impact Assessment of European Cities. *The Lancet*,

- 401(10376): 577–589.
- Ma, L., Huang, G., Johnson, B. A., Chen, Z., Li, M., Yan, Z., Zhan, W., Lu, H., He, W., & Lian, D. (2023). Investigating Urban Heat-Related Health Risks Based on Local Climate Zones: A Case Study of Changzhou in China. *Sustainable Cities and Society*, 91: 104402.
- Mahlkow, N., Lakes T., Donner J., Köppel, J., & Schreurs, M. (2016). Developing Storylines for Urban Climate Governance by Using Constellation Analysis-Insights from a Case Study in Berlin, Germany. *Urban Climate*, 17(3): 266–283.
- Materia, S., García, L. P., van Straaten, C., Mamalakis, A., Cavicchia, L., Coumou, D., De Luca, P., Kretschmer, M., & Donat, M. G. (2023). Artificial Intelligence for Prediction of Climate Extremes: State of the Art, Challenges and Future Perspectives. *arXiv preprint arXiv: 2310.01944*.
- Matthews, T., Lo, A. Y., & Byrne, J. A. (2015). Reconceptualizing Green Infrastructure for Climate Change Adaptation: Barriers to Adoption and Drivers for Uptake by Spatial Planners. *Landscape and Urban Planning*, 138(6): 155–163.
- McEvoy, D., Ahmed, I., & Mullett, J. (2012). The Impact of the 2009 Heat Wave on Melbourne's Critical Infrastructure. *Local Environment*, 17(8): 783–796.
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305(5686): 994–997.
- Meerow, S., & Keith, L. (2021). Planning for Extreme Heat: A National Survey of US Planners. *Journal of the American Planning Association*, 88(3): 319–334.
- Mitchell, B. C., & Chakraborty, J. (2014). Urban Heat and Climate Justice: A Landscape of Thermal Inequity in Pinellas County, Florida. *Geographical Review*, 104(4): 459–480.
- Morakinyo, T. E., Ren, C., Shi, Y., Lau, K. K. L., Tong, H. W., Choy, C. W., & Ng, E. (2019). Estimates of the Impact of Extreme Heat Events on Cooling Energy Demand in Hong Kong. *Renewable Energy*, 142: 73–84.
- Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I., Hsu, W. H., Muscatiello, N., & Hwang, S. A. (2018). Development of a Heat Vulnerability Index for New York State. *Public Health*, 161(8): 127–137.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. *Energy and Buildings*, 34(6): 563–572.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. (2015). Planning for Cooler Cities: A Framework to Prioritise Green Infrastructure to Mitigate High Temperatures in Urban Landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134: 127–138.
- O'Neill, M. S., Carter, R., Kish, J. K., Gronlund, C. J., White-Newsome, J. L., Manarolla, X., & Schwartz, J. D. (2009). Preventing Heat-related Morbidity and Mortality: New Approaches in a Changing Climate. *Maturitas*, 64(2): 98–103.
- Page, L. A., Hajat, S., & Kovats, R. S. (2007). Relationship Between Daily Suicide Counts and Temperature in England and Wales. *British Journal of Psychiatry*, 191(2): 106–112.
- Pataki, D. E., Alig, R., Fung, A., Golubiewski, N., Kennedy, C., McPherson, E., Nowak, D., Pouyat, R., & Romero Lankao, P. (2006). Urban Ecosystems and the North American Carbon Cycle. *Global Change Biology*, 12(11): 2092–2102.
- Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., Lyu, D., Du, Y., Qiao, R., & Wu, J. (2020). How to Effectively Mitigate Urban Heat Island Effect? A Perspective of Waterbody Patch Size Threshold. *Landscape and Urban Planning*, 202(10): 1–10.
- Peng, B., & Song, J. (2018). A Case Study of Preliminary Cost-Benefit Analysis of Building Levees to Mitigate the Joint Effects of Sea Level Rise and Storm Surge. *Water*, 10(2): 169–177.
- Pomadère, M., Mays, C., & Mer, S. L. (2005). The 2003 Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now. *Risk Analysis*, 25(6): 1483–1494.
- Prezerakos, N. G. (1989). A Contribution to the Study of the Extreme Heatwave over the South Balkans in July 1987. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 41(4): 261–271.
- Qin, Y. (2015). A Review on the Development of Cool Pavements to Mitigate Urban Heat Island Effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 445–459.
- Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., & Herrmann, F. R. (2008). Death Toll Exceeded 70,000 in Europe During the Summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2): 171–178.
- Rosenthal, J. K. (2010). *Evaluating the Impact of the Urban Heat Island on Public Health: Spatial and Social Determinants of Heat-related Mortality in New York City*. Columbia University.

- Santamouris, M. (2013). Using Cool Pavements as a Mitigation Strategy to Fight Urban Heat Island: A Review of the Actual Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26: 224 – 240.
- Santamouris, M., Paolini, R., Haddad, S., Synnefa, A., Garshasbi, S., Hatvani-Kovacs, G., Gobakis, K., Yenneti, K., Vasilakopoulou, K., & Feng, J. (2020). Heat Mitigation Technologies Can Improve Sustainability in Cities. An Holistic Experimental and Numerical Impact Assessment of Urban Overheating and Related Heat Mitigation Strategies on Energy Consumption, Indoor Comfort, Vulnerability and Heat-related Mortality and Morbidity in Cities. *Energy and Buildings*, 217(12): 1 – 15.
- Sapkota, A., Dong, Y., Li, L., Asrar, G., Zhou, Y., Li, X., Coates, F., Spanier, A. J., Matz, J., & Bielory, L. (2020). Association Between Changes in Timing of Spring Onset and Asthma Hospitalization in Maryland. *JAMA Network Open*, 3(7): 1 – 11.
- Sheridan, S. C., & Kalkstein, L. S. (2004). Progress in Heat Watch-Warning System Technology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(12): 1931 – 1942.
- Shi, Y., Ren, C., Cai, M., Lau, K. K. L., Lee, T. C., & Wong, W. K. (2019). Assessing Spatial Variability of Extreme Hot Weather Conditions in Hong Kong: A Land Use Regression Approach. *Environmental Research*, 171: 403 – 415.
- Smith, C., & Levermore, G. (2008). Designing Urban Spaces and Buildings to Improve Sustainability and Quality of Life in a Warmer World. *Energy Policy*, 36(12): 4558 – 4562.
- Soneja, S., Jiang, C. S., Fisher, J., Upperman, C. R., Mitchell, C., & Sapkota, A. (2016). Exposure to Extreme Heat and Precipitation Events Associated with Increased Risk of Hospitalization for Asthma in Maryland, USA. *Environmental Health*, 15: 1 – 7.
- Stone, B. (2005). Urban Heat and Air Pollution: An Emerging Role for Planners in the Climate Change Debate. *Journal of the American Planning Association*, 71(1): 13 – 25.
- Stone, B., Lanza, K., Mallen, E., Vargo, A., & Russell, A. (2019). Urban Heat Management in Louisville, Kentucky: A Framework for Climate Adaptation Planning. *Journal of Planning Education and Research*, 43(2): 1 – 13.
- Stone, B., Vargo, J., Liu, P., Hu, Y. T., & Russell, A. (2013). Climate Change Adaptation Through Urban Heat Management in Atlanta, Georgia. *Environmental Science & Technology*, 47(14): 7780 – 7786.
- Toloo, G., FitzGerald, G., Aitken, P., Verrall, K., & Tong, S. (2013). Are Heat Warning Systems Effective? *Environmental Health*, 12: 1 – 4.
- Turek-Hankins, L. L., Coughlan de Perez, E., Scarpa, G., Ruiz-Diaz, R., Schwerdtle, P. N., Joe, E. T., Galappaththi, E. K., French, E. M., Austin, S. E., Singh, C., Sina, M., Siders, A. R., Van, A. M., Templeman, S., Nunbogu, A. M., Berrang-Ford, L., Agrawal, T., & Mach, K. J. (2021). Climate Change Adaptation to Extreme Heat: A Global Systematic Review of Implemented Action. *Oxford Open Climate Change*, 1(1): 1 – 13.
- Vaneckova, P., Hart, M. A., Beggs, P. J., & De Dear, R. J. (2008). Synoptic Analysis of Heat-related Mortality in Sydney, Australia, 1993 – 2001. *International Journal of Biometeorology*, 52(6): 439 – 451.
- Wang, C., Wang, Z. -H., Wang, C., & Myint, S. W. (2019). Environmental Cooling Provided by Urban Trees under Extreme Heat and Cold Waves in US Cities. *Remote Sensing of Environment*, 227: 28 – 43.
- Wang, F. Y., Duan, K. Q., & Zou, L. (2019). Urbanization Effects on Human-Perceived Temperature Changes in the North China Plain. *Sustainability*, 11(12): 1 – 15.
- Wang, J., Chen, Y., Liao, W., He, G., Tett, S. F., Yan, Z., Zhai, P., Feng, J., Ma, W., & Huang, C. (2021). Anthropogenic Emissions and Urbanization Increase Risk of Compound Hot Extremes in Cities. *Nature Climate Change*, 11(12): 1084 – 1089.
- Wang, X., Lavigne, E., Ouellette-kuntz, H., & Chen, B. E. (2014). Acute Impacts of Extreme Temperature Exposure on Emergency Room Admissions Related to Mental and Behavior Disorders in Toronto, Canada. *Journal of Affective Disorders*, 155: 154 – 161.
- Wang, Y. L., Chan, A., Lau, G. N. C., Li, Q. X., Yang, Y. J., & Yim, S. H. L. (2019). Effects of Urbanization and Global Climate Change on Regional Climate in the Pearl River Delta and Thermal Comfort Implications. *International Journal of Climatology*, 39(6): 2984 – 2997.
- Wang, Y., Lu, B., & Han, Z. (2023). Rapid Increase of the Nighttime Electricity Demand in Beijing Due to Compound Heatwaves. *Urban Climate*, 50: 101595.
- Wang, Y., Wang, A., Zhai, J., Tao, H., Jiang, T., Su, B., Yang, J., Wang, G., Liu, Q., & Gao, C. (2019). Tens of Thousands Additional Deaths Annually in Cities of China Between 1.5°C and 2.0°C Warming. *Nature Communications*, 10(1): 1 – 7.
- Watts, N. et al. (2018). The Lancet Countdown on Health and Climate Change: from 25 Years of Inaction to a Global Transformation for Public Health. *The Lancet*, 391(10120): 581 – 630.

- Weng, Q. H. , Lu, D. S. , & Schubring, J. (2004). Estimation of Land Surface Temperature-vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 467 – 483.
- White-Newsome, J. , O'Neill, M. S. , Gronlund, C. , Sunbury, T. M. , Brines, S. J. , Parker, E. , Brown, D. G. , Rood, R. B. , & Rivera, Z. (2009). Climate Change, Heat Waves, and Environmental Justice: Advancing Knowledge and Action. *Environmental Justice*, 2(4): 197 – 205.
- Wilson, B. (2020). Urban Heat Management and the Legacy of Redlining. *Journal of the American Planning Association*, 86(4): 443 – 457.
- Wilson, B. , & Chakraborty, A. (2018). Mapping Vulnerability to Extreme Heat Events: Lessons from Metropolitan Chicago. *Journal of Environmental Planning and Management*, 62(6): 1065 – 1088.
- Wu, Y. Q. , Wang, X. Y. , Wu, J. Y. , Wang, R. , & Yang, S. N. (2020). Performance of Heat-Health Warning Systems in Shanghai Evaluated by Using Local Heat-Related Illness Data. *Science of the Total Environment*, 715: 10.
- Yan, C. H. , Guo, Q. P. , Li, H. Y. , Li, L. J. , & Qiu, G. Y. (2020). Quantifying the Cooling Effect of Urban Vegetation by Mobile Traverse Method: A Local-Scale Urban Heat Island Study in a Subtropical Megacity. *Building and Environment*, 169: 12.
- Yang, J. , Zhou, M. , Ren, Z. , Li, M. , Wang, B. , Liu, D. L. , Ou, C. Q. , Yin, P. , Sun, J. , Tong, S. , Wang, H. , Zhang, C. , Wang, J. , Guo, Y. , & Liu, Q. (2021). Projecting Heat-Related Excess Mortality under Climate Change Scenarios in China. *Nature Communications*, 12(1): 1035.
- Yuan, X. C. , Wei, Y. M. , Wang, B. , & Mi, Z. F. (2017). Risk Management of Extreme Events under Climate Change. *Journal of Cleaner Production*, 166: 1169 – 1174.
- Zander, K. K. , Botzen, W. J. W. , Oppermann, E. , Kjellstrom, T. , & Garnett, S. T. (2015). Heat Stress Causes Substantial Labour Productivity Loss in Australia. *Nature Climate Change*, 5(7): 647 – 651.
- Zeng, P. , Sun, F. , Shi, D. , Liu, Y. , Zhang, R. , Tian, T. , & Che, Y. (2022). Integrating Anthropogenic Heat Emissions and Cooling Accessibility to Explore Environmental Justice in Heat-Related Health Risks in Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 226: 104490.
- Zhang, H. , Luo, M. , Pei, T. , Liu, X. , Wang, L. , Zhang, W. , Lin, L. , Ge, E. , Liu, Z. , & Liao, W. (2023). Unequal Urban Heat Burdens Impede Climate Justice and Equity Goals. *The Innovation*, 4(5): 100488.
- Zhang, W. , Zheng, C. , & Chen, F. (2019). Mapping Heat-Related Health Risks of Elderly Citizens in Mountainous Area: A Case Study of Chongqing, China. *Science of the Total Environment*, 663: 852 – 866.
- Zhang, X. , Zhou, T. , Zhang, W. , Ren, L. , Jiang, J. , Hu, S. , Zuo, M. , Zhang, L. , & Man, W. (2023). Increased Impact of Heat Domes on 2021 – like Heat Extremes in North America under Global Warming. *Nature Communication*, 14(1): 1690.
- Zhao, L. , Oppenheimer, M. , Zhu, Q. , Baldwin, J. , Guan, K. , & Liu, X. (2018). Interactions Between Urban Heat Island Effects and Heat Waves. *Environmental Research Letters*, 13(3): 1 – 11.
- Zheng, Y. F. , & Weng, Q. H. (2018). High Spatial-and Temporal-resolution Anthropogenic Heat Discharge Estimation in Los Angeles County, California. *Journal of Environmental Management*, 206: 1274 – 1286.
- Zhi, X. , & Wang, J. (2023). Ai-Based Prediction of High-Impact Weather and Climate Extremes under Global Warming: A Perspective from the Large-Scale Circulations and Teleconnections. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1126381.

责任编辑：张书维