

人为气候变化下外源热浪加剧中国热风险

王港^{1,2}, 张强^{2*}, Iestyn WOOLWAY³, Vijay SINGH^{4,5,6}, 罗明⁷, 杨志峰^{1,8}

1. 广东工业大学生态环境与海洋学院, 湾区生态安全与绿色发展广东省高等学校基础研究卓越中心, 广州 510006

2. 北京师范大学未来技术学院, 广东省污水信息解析与预警重点实验室, 珠海 519087

3. School of Ocean Sciences, Bangor University, Bangor LL57 2DG, UK

4. Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University, College Station 77843, USA

5. Zachry Department of Civil and Environmental Engineering, Texas A&M University, College Station 77843, USA

6. National Water and Energy Center, United Arab Emirates University, Al Ain 15551, United Arab Emirates

7. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510006

8. 北京师范大学环境学院, 区域环境安全全国重点实验室, 北京 100875

* 通讯作者, E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

2025-04-23收稿, 2025-10-10修回, 2026-02-04接受, 2026-04-15网络版发表

国家自然科学基金项目(52388101)、内蒙古自治区科技计划项目(2025YFHH0134)、新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2024A03006-2)、国家重点研发计划项目(2019YFA0606900)、英国国家科研与创新署项目(NE/T011246/1)和中国博士后科学基金项目(2025T180861、2025M780302)资助

摘要 在人为气候变化的影响下, 热浪日益频繁和强烈, 对自然生态系统和人类系统产生了深远影响。然而, 热浪在中国的跨界迁移仍然不清楚, 忽视了外源热浪(即来源于特定区域以外的热浪)的重要影响, 阻碍了对致命热浪的准确预测和有效缓解策略的制定。本研究采用拉格朗日追踪方法评估外源热浪对中国热风险的影响。结果发现, 中国42.7%的热浪与外源热浪相关, 外源热浪事件呈现出显著增加(每十年增加4.35次)的趋势, 影响遍及整个中国, 尤其是西北、东北和东南沿海地区。外源热浪暴露度平均每年3.49天, 且呈上升趋势(每十年增加1.42天)。人为气候变化是中国外源热浪加剧和占比升高的主要驱动因素。未来预估结果表明外源热浪将呈现强劲增长态势并成为主导类型。在SSP585情景下和1.5 °C全球温升水平条件下, 外源热浪暴露度将比历史时期(1975–2014年)增加236.3%, 频率增加188.3%, 累积热量增加313.4%, 影响面积增加98.5%。控制住额外的0.5 °C变暖, 可以显著避免28.7%的外源热浪暴露度、39.8%的人口暴露度和31.3%的经济暴露度。本研究强调了外源热浪在放大区域热浪影响中的关键作用, 凸显了采取针对性缓解措施以应对这一日益严重的致命威胁的必要性。

关键词 外源热浪, 时空连续热浪, 人为气候变化, 全球温升水平, 检测和归因

1 引言

热浪对生态系统和人类社会产生了深远而广泛的影响(Murali等, 2023), 其中对人类健康的影响尤为严重(Watts等, 2018)。在中国, 2015–2020年期间热浪相关的死亡率与2000–2004年相比, 飙升了63.6%, 年均死亡人数达到17270人(Cai等, 2021; Liu等, 2024)。历史上极端热浪曾在几周内致使某些社区数千人死亡(Ballester等,

2023; Fouillet等, 2006; Lüthi等, 2023)。人为温室气体的排放推动了全球气温显著上升, 导致以持续性极端高温为主要特征的热浪事件加剧(Domeisen等, 2023; Fischer等, 2021; Perkins-Kirkpatrick和Lewis, 2020)。目前, 约三分之一的全球热相关死亡事件可归因于人为气候变化(Vicedo-Cabrera等, 2021)。随着气候持续变暖, 致命热浪的风险预计还将进一步增加(Meehl和Tebaldi, 2004; Mora等, 2017)。此外, 气温的加速上升导致了更

中文引用格式: 王港, 张强, Woolway I, Singh V, 罗明, 杨志峰. 2026. 人为气候变化下外源热浪加剧中国热风险. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1837–1848, doi: 10.1360/N072025-0160

英文引用格式: Wang G, Zhang Q, Woolway I, Singh V, Luo M, Yang Z. 2026. Exogenous heatwaves amplify heat risks in China under anthropogenic climate change. Science China Earth Sciences, 69(5): 1795–1806, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1862-x>

多创纪录的热浪事件(Fischer等, 2021), 并带来严重的社会和经济影响。例如, 2021年北美西部的热浪是全球记录中最极端的事件之一, 创下了49.6 °C的日最高温记录, 并致使野火蔓延, 超过600多人死亡(Philip等, 2022; Thompson等, 2022)。2022年8月, 中国南方经历了自1961年以来持续时间最长、强度最强的极端热浪, 直接经济损失超过512亿元人民币(China, 2024)。应对气候变暖并减轻热浪影响的关键在于理解驱动这些事件的机制, 并提升预测能力(Fischer等, 2021)。

上风向热源的热量输送是导致下游热浪发生的关键驱动因素(Pfahl和Wernli, 2012; Röthlisberger和Papritz, 2023; Schumacher等, 2019; Vautard等, 2023)。2021年6月太平洋西北地区发生的史无前例的热浪热量来源于北太平洋(White等, 2023)。此外, 空气中的热量可以通过热平流作用传递, 并在局地陆气耦合的作用下放大生成超级热浪(Miralles等, 2014; Schumacher等, 2019)。这些过程可以使热浪能够在时间和空间上同时传播和演变, 表现出时空连续性的特点(Luo等, 2024)。因此, 追踪极端热量的传播轨迹对于理解热浪的演变行为显得极为重要(Quinting和Reeder, 2017; Röthlisberger和Papritz, 2023)。近年来, 虽然越来越多的研究关注热浪的时空模式和驱动因素(Liu等, 2024; Nie等, 2024), 但外源热浪在区域热浪变化中的作用在很大程度上被忽视(Lo等, 2021; Luo等, 2022a, 2022b; Quinting和Reeder, 2017)。此外, 评估气候变暖背景下外源热浪未来变化的趋势, 确定热浪事件加剧的缓解措施同样至关重要。

考虑到热浪在空间和时间上都表现出传播特征(Gu等, 2025; Luo等, 2024), 多种三维追踪方法被开发, 其中包括三维连通分量(CC3D)标记算法、拉格朗日追踪算法、大气河检测算法和DBSCAN聚类算法等, 这些方法可以通过追踪极端气候事件(例如时空连续热浪), 达到捕捉它们的时空演变和传播行为的目的(Gu等, 2025; Guan等, 2023; Liu和Zhou, 2023; Mondal和Mishra, 2021; Wang等, 2023; Zhang等, 2024)。当前研究多集中已经发生的特定事件捕捉热浪的发生发展和消亡, 或从特定区域内探究热浪的迁移轨迹及其特征变化(Luo等, 2022a; Schumacher等, 2019)。在过去的40年中, 连续大型热浪的持续时间变得更久, 传播距离更长, 传播速度更慢, 这些变化已被归因于人为强迫信号(Luo等, 2024)。澳大利亚和美国都发现连续时空热浪影响的区域处于扩张趋势, 热浪危害大幅增加(Keellings和Moradkhani, 2020)。中国作为全球最大的发展中国家, 不仅是受天气相关灾害影响最严重的国家之一, 还是人口热暴露日益增加的地区(Nie等, 2024), 中国的时空连续极端气

候事件的变化也逐渐引起关注。这一点正是本研究的关注重点。此外, 现有研究在理解热浪和外源热浪时空模式背后的原因方面仍存在空白, 而外源热浪在重新塑造热浪风险方面的作用也尚不明确, 进一步推动了本研究的开展。

以往的研究主要集中于区域热浪的内部动态变化, 很少关注外部驱动因素对区域热浪事件的贡献(Luo等, 2022a, 2024; Lyon等, 2019; Wu等, 2024)。最近的一项研究从三维时空角度提出了“外源”事件的概念, 首次揭示并强调了外源干旱对中国的广泛影响(Wang等, 2023)。本研究将这一概念应用于热浪, 定义外源热浪并评估其对中国热浪风险的贡献。

本研究采用拉格朗日轨迹追踪方法, 追踪了大规模连续热浪的起源和传播路径, 识别了中国的外源热浪事件, 探讨了外源热浪的时空模式特征及其变化, 量化了人为强迫和自然变率对外源热浪事件变化的相对贡献。最后, 预估了不同的共享社会经济路径(SSPs)发展下的中国外源热浪事件的未来变化, 评估了在不同全球温升水平(GWLs)下外源热浪事件的人口和经济的暴露度变化, 尤其关注了《巴黎协定》中提到的1.5和2 °C温升目标下的不同影响。本研究旨在加深对全球变暖背景下中国人口和经济受外源热浪影响的认识, 并为评估外源热浪对全球各地区热浪动态的影响提供了理论框架, 为缓解日益加剧的热浪影响提供了重要见解。

2 数据和方法

2.1 观测数据与模式数据

2.1.1 ERA5再分析数据集

ERA5再分析数据集是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析产品的最新版本(Hersbach等, 2020), 因其具有较好的精度而被广泛认可。本研究从ERA5再分析数据集中获取了1979–2021年期间的每小时气温数据, 并将每小时数据处理聚合为日尺度数据, 空间分辨率为0.25°×0.25°。

2.1.2 CMIP6模式数据

全球气候模式是研究未来气候极端变化的主要工具。本研究使用了第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)(Eyring等, 2016)输出的逐日气温数据(网络版附表S1)。历史强迫模拟试验数据包括同时考虑了人类活动和自然外强迫的历史气候模拟试验(ALL)、仅自然强迫模拟试验(NAT)、仅温室气体强迫模拟试验(GHG)、仅人为气溶胶强迫模拟试验(AER)和仅人为强迫模拟试验(ANT)。

未来预估数据采用共享社会经济路径SSP245和SSP585情景试验。

仅自然强迫模拟试验、仅温室气体强迫模拟试验和仅人为气溶胶强迫模拟试验三个强迫模拟试验来源于CMIP6子计划中的检测归因模式比较计划(DAMIP)。历史气候全强迫模拟试验反映了历史观测真实情况的人为强迫(温室气体排放、人为气溶胶排放等)和自然强迫(太阳辐照度、平流层气溶胶等),也就是常用的历史气候模拟(Historical)。仅自然强迫模拟试验代表了仅具有太阳活动、火山喷发等自然强迫的历史时期,仅温室气体强迫模拟试验代表了仅具有温室气体排放强迫的历史时期,仅人为气溶胶强迫模拟试验代表了仅具有人为气溶胶排放强迫的历史时期,ANT-only代表了具有温室气体排放、人为气溶胶排放和臭氧等人为强迫的历史时期。

SSP245和SSP585未来情景模拟试验来自CMIP6子计划中的情景模式比较计划(ScenarioMIP),该子计划提供了不同共享社会经济路径(SSPs)和代表性浓度路径(RCPs)相结合的不同发展路径下的预估结果。SSP245和SSP585未来情景模拟试验分别代表中等强迫的可持续发展道路和高强迫的化石燃料开发可持续发展道路。

考虑到CMIP6气候模式的分辨率较粗且不一致和精度不确定性,首先使用双线性插值对CMIP6数据进行空间降尺度,并以ERA5再分析数据为基准,应用经验累积密度函数(ECDF)匹配进行偏差校正,提升模式数据精度,最后将模式数据输出为 0.5° 的空间分辨率(Wang等, 2023)。此外,为评估CMIP6模式数据的不确定性,采用bootstrapping方法对CMIP6模式数据的输出结果进行了10000次重采样,以确定多模式集合结果的95%置信区间。

2.2 未来社会经济的网格化预测数据

为了研究未来外源热浪事件的社会经济暴露度(GDP暴露度和人口暴露度),本研究使用了中国的人口和经济未来预测数据集(Huang等, 2019)。这两个数据集同时考虑了中国政府发布的二孩生育政策以及不同的SSP共享社会路径发展情景,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间长度为2010–2100年。

2.3 时空连续热浪事件的识别追踪及外源热浪事件的判定

时空连续热浪事件被定义为基于日均气温格网数据,通过拉格朗日追踪算法追踪的在时间维度上具有重叠网格单元的连续热浪聚类团(Herrera-Estrada和Diffenbaugh, 2020; Wang等, 2023)。连续热浪聚类团被定义为高于

95%温度阈值的连续网格单元区域,且面积大于10000 km^2 。95%温度阈值是基于1981–2010年期间的每日气温15天滚动窗口计算所得。需要注意的是,热浪事件是三维(经度、纬度、时间)连续的热浪聚类团,必须持续至少三天。

发生在中国的时空连续热浪事件被分为外源热浪事件、内源热浪事件以及其他热浪事件。外源热浪事件被定义为起源于中国境外并迁移到中国境内,且覆盖面积至少达100000 km^2 的时空连续热浪事件。内源热浪则是在中国境内起源、发展并结束的热浪聚类团。内源热浪被定义为每个时间步长的热浪聚类团在中国境内覆盖面积至少达100000 km^2 的时空连续热浪事件。不符合上述两种情况的时空连续热浪事件被归类为其他热浪事件。其他热浪事件包括但不限于:(1)起源于中国境内但在境外消散的热浪;(2)起源于境外并传播到中国境内但覆盖面积不足100000 km^2 的热浪;(3)同时影响中国境内和境外地区的时空连续热浪事件。总热浪事件定义为外源热浪事件、内源热浪事件以及其他热浪事件的总和。

由于全球变暖和破纪录气候极端事件发生概率的增加,95%分位数阈值无法准确捕捉和反映更为强烈的热浪事件(Fischer等, 2021; Vogel等, 2020)。因此,对未来的热浪进行分析时,定义了温度超过95%阈值加一倍标准差的时空连续热浪事件为时空连续严重热浪事件(Woolway等, 2021)。该标准差由1981–2010年期间的每日温度15天滚动窗口计算所得。此外,本研究还引入了表征时空连续热浪特征的五个指标:频率、暴露度、空间范围、累积热量和强度(附表S2)。

2.4 归因检测分析

在进行归因检测分析之前,本研究基于Kolmogorov-Smirnoff test比较了观测值和ALL全强迫模拟的外源热浪的分布情况,以确保模式模拟能够充分捕捉到事实气候中观测到的热浪行为(Laufkötter等, 2020; Woolway等, 2022)。为了量化人类驱动因素对单次破纪录事件的外源热浪的相对贡献,本文引入了PR(概率比)和FAR(可归因风险比例)来评估人类活动对外源热浪的相对贡献(Chiang等, 2021; Laufkötter等, 2020; Ma等, 2020; Zhang等, 2023)。PR代表了在历史气候全强迫、仅温室气体强迫和仅人为气溶胶强迫下相对于仅自然强迫模拟试验的外源热浪事件的变化。FAR是通过比较事实气候和反事实模拟气候中某一类事件的频率而获得的归因诊断,可以测量归因水平并描述人为气候变化导致的极端事件风险比例(Allen, 2003; Fischer和Knutti, 2015; Stott等, 2004),代表了人为气候变化对外源热浪事件的

贡献(Ma等, 2020)。本研究使用暴露度作为外源热浪极端值的衡量标准。PR和FAR的计算方式如下:

$$\begin{aligned} PR &= \frac{P_{ALL/GHG/AER}}{P_{NAT}} \\ FAR &= 1 - \frac{1}{PR} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, P 为特定强迫条件下外源热浪的暴露度。

正则化最优指纹法(ROF)已广泛用于气候变化的检测归因分析(Ribes等, 2013)。假设存在基于无噪声模型的响应模式, 标准检测模型如下(Gu等, 2019; Ribes等, 2013):

$$Y = \sum_{i=1}^m x_i \beta_i + \varepsilon = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

式中, Y 表示经过滤波的 n 维观测向量, 充分反映了观测变量的时空变化。 X 是气候模式模拟的不同强迫情景的响应信号, m 是不同强迫情景的数量, ε 是 Y 的内部变率。考虑到采样的不确定性, 使用最小二乘法估计比例因子 β 调整指纹回归的幅度, 使其与观测结果最佳匹配。上述所有情况均通过了残差一致性检验, 表明模式模拟的变率与观测结果之间具有良好的一致性(Allen和Stott, 2003)。

2.5 全球温升水平的定义

本研究分析了相较于1975–2014年期间(定义为当前气候条件), 中国外源热浪事件在不同全球温升水平的变化和影响。自工业化革命后, 人类活动的影响加剧了全球变暖, 2015年气候变化大会通过的《巴黎协定》提出了“将全球温升水平保持在相对于工业化前水平 2°C 以内, 并努力控制在 1.5°C 以内”的目标(Matthews和Wynes, 2022; Russo等, 2019; Schleussner等, 2016)。据此, 本研究选取1850–1900年作为参考时间段来代表工业化前时期的气候状况(Wang等, 2020, 2023, 2025; Zhang等, 2018), 进而计算全球平均气温达到不同温升水平的11年时间段(附表S3)。

2.6 社会经济暴露度的定义

为评估热浪可能对社会造成的不利影响程度, 本研究基于人口和国内生产总值(GDP)等暴露因子和热浪暴露度对社会经济暴露度进行了量化表征(Russo等, 2019; Wang等, 2023; Zhang等, 2023)。社会经济暴露度分为人口暴露度和经济暴露度, 由以下公式给出计算方式:

$$E_i = P_i \times D \quad (i = \text{population, GDP}) \quad (3)$$

式中, E 表示社会经济(人口/GDP)暴露度, P 代表暴露因子, D 表示外源热浪暴露度, i 表示人口数量或GDP。

2.7 可避免影响的定义

本研究中引入了可避免影响(AI)指标来量化将全球变暖限制在 1.5°C 而不是 2.0°C 可以避免的影响(Wang等, 2020, 2023, 2025; Zhang等, 2018; Zhang等, 2023), 使用以下公式量化 1.5°C 温升水平相对于 2.0°C 温升水平可避免的影响:

$$AI = \frac{C2.0 - C1.5}{C2.0} \times 100\% \quad (4)$$

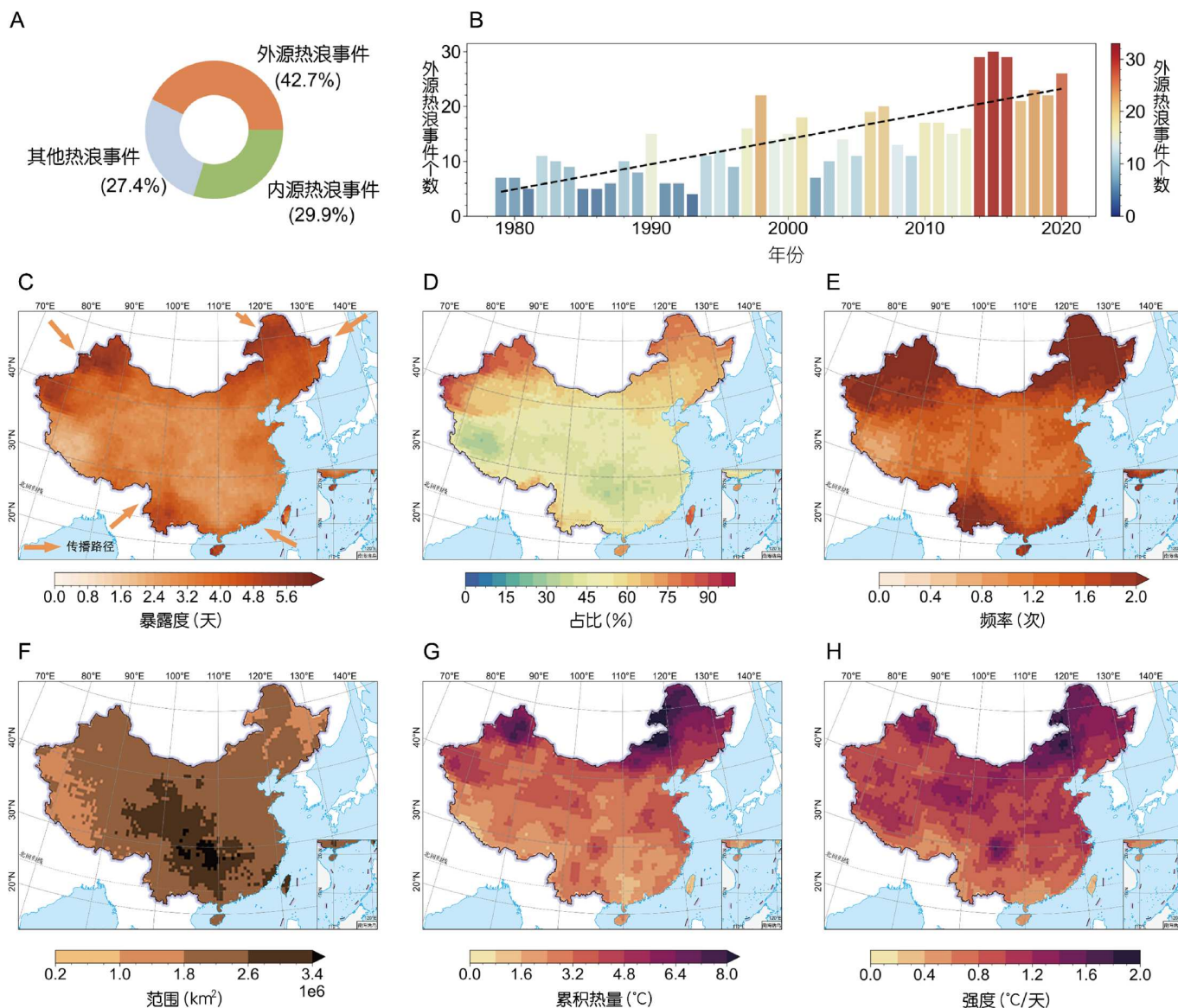
式中, AI为可避免的影响, $C1.5$ 和 $C2.0$ 表示 1.5 和 2.0°C 温升水平时的指标(如热浪暴露度、人口暴露度和GDP暴露度)相对于历史参考期的变化率。如果可避免影响的百分比值为正, 则意味着限制额外 0.5°C 变暖将带来积极影响。

3 结果分析

3.1 过去40年中国外源热浪事件的变化

通过拉格朗日追踪法追踪时空连续热浪事件的轨迹, 识别出1979–2020年期间共计1360个三维时空连续热浪事件, 其中外源热浪事件有581个, 内源热浪事件有406个, 其他类型热浪事件有373个(图1A)。外源热浪事件、内源热浪事件和其他类型热浪事件分别占总热浪事件的42.7%, 29.9%和27.4%。在影响中国的热浪事件中, 外源热浪事件是最主要的类型, 近一半的热浪事件被归因于中国外部热浪的输送侵袭。1979–2020年间中国总热浪事件以7.27个/10年的速率增加(网络版附图S1A), 外源热浪事件以4.35个/10年的速率呈现显著上升(图1B), 内源热浪事件以0.71个/10年的速率增加(附图S1B)。外源热浪事件和内源热浪事件的增长率存在显著差异, 外源热浪事件的增长幅度远大于内源热浪事件。从各类型占比来看, 外源热浪事件的比例呈现显著上升趋势(4.31%/10年, $p < 0.01$), 而内源热浪的占比则显著下降(−3.94%/10年, $p < 0.01$)(附图S1C)。以上结果表明时空连续热浪在中国的增长速度越来越快, 并逐渐从内源类型转向外源类型。进一步对比2000年前后的中国外源热浪发现, 1979–2000年中国外源热浪事件平均每年9.2个, 2001–2020年中国外源热浪增长至平均每年18.05个, 几乎翻了一番, 这种显著增长的现象表明外源热浪事件对中国的影响日益加剧, 凸显了外源热浪事件对热浪暴露度和风险的贡献不断增加。

基于上述追踪到的581条外源热浪事件轨迹, 使用K-Means聚类方法划分了五条主要传播路径(图1C, 附图S2)。西线起源于大西洋高纬度地区, 向东延伸穿过欧洲, 随后影响中亚, 最终抵达中国西北部。北线始于俄



审图号：GS京(2025)2604号

图1 1979–2020年期间中国外源热浪分布特点。(A) 外源热浪、内源热浪和其他热浪事件占总热浪事件的比例。(B) 外源热浪事件数量的逐年时间序列。填充颜色变化表示外源性热浪事件的数量变化。(C) 外源热浪暴露度的空间分布以及外源热浪的主要传播路径。(D) 外源热浪暴露度占总热浪暴露度比例的空间分布。(E) 外源热浪频率的空间分布。(F) 外源热浪平均范围的空间分布。(G) 外源热浪累积热量的空间分布。(H) 外源热浪强度的空间分布

罗斯中部，向南传播穿过蒙古，主要影响中国北方的干旱地区，包括内蒙古自治区和黑龙江省。东线起源于北太平洋，向西传播，影响中国东北部和东部沿海地区。东南线始于东太平洋低纬度地区，向西推进，主要影响中国东南部和南部地区。西南线起源于印度洋，向东北方向迁移，最终抵达中国西南部。

1979–2020年，中国总热浪暴露度平均每年6.3天(附图S3)，并以2.11天/10年的速率显著增长(附图S4)。外源热浪对中国所有地区都有影响，中国西北部、东北、和

东南部(特别是沿海地区)的暴露度较高(图1C)。外源热浪暴露度平均每年3.49天，伴随着外源热浪事件的增加，中国外源热浪暴露度也以1.42天/10年的速率呈现显著增长趋势($p < 0.01$)(图2A)。从占比角度看，外源热浪暴露度占总热浪暴露度的54.9%(图1D)，表明中国平均每年暴露在外源热浪事件下的日数占总热浪日数的一半以上。同时，外源热浪的频率和累积热量分别为总热浪频率和累积热量贡献了50.3%和59.4%(附图S5)。这些统计结果突出了外源热浪在塑造中国热浪动态变化中的重要作用，

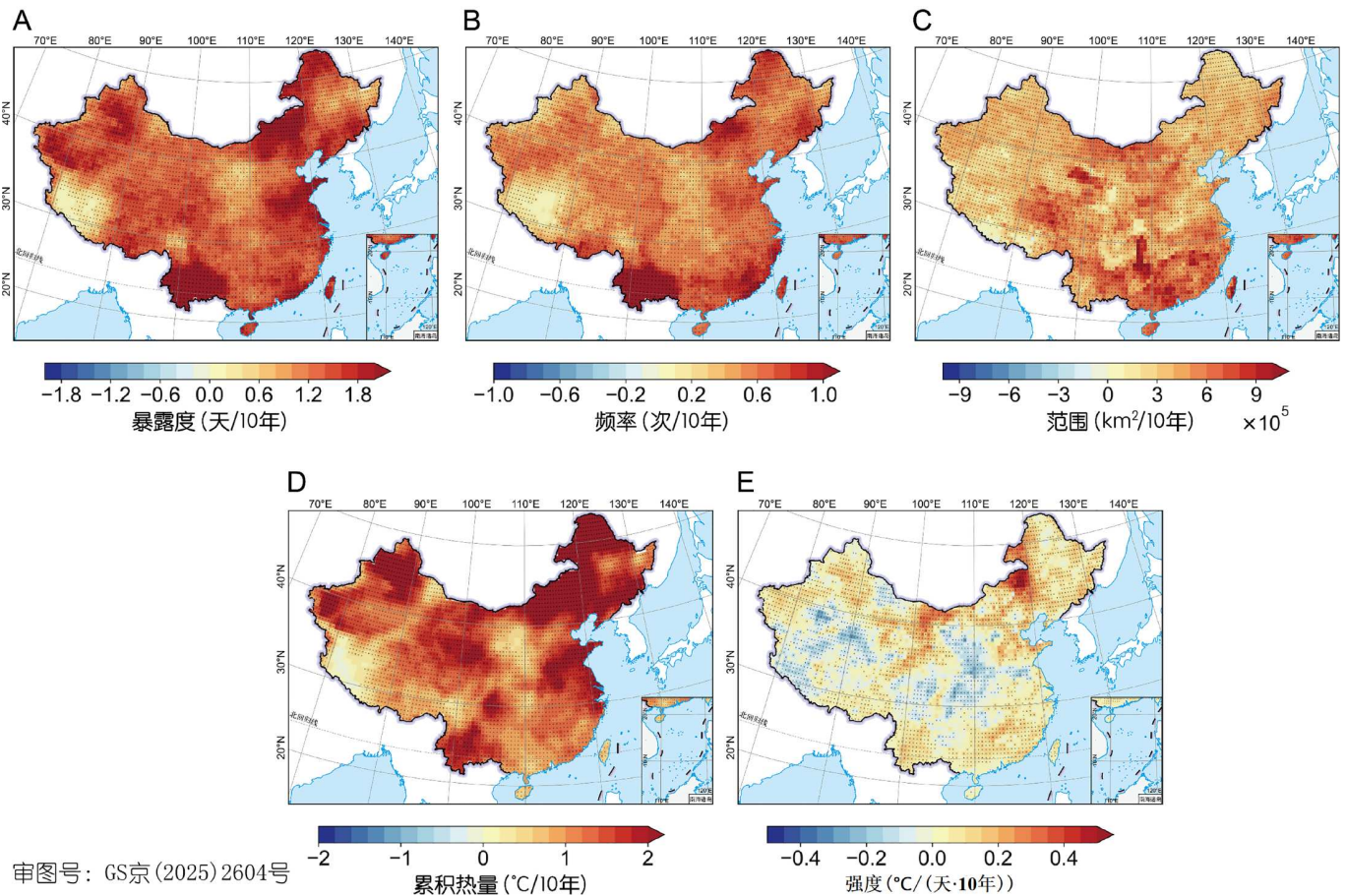


图2 1979–2020年期间中国外源热浪指标趋势变化。(A) 外源热浪暴露度趋势的空间分布。(B) 外源热浪频率趋势的空间分布。(C) 外源热浪平均范围趋势的空间分布。(D) 外源热浪累积热量趋势的空间分布频率。(E) 外源热浪强度趋势的空间分布。打点区域表示该趋势通过了5%显著性水平统计检验

并强调了它们对区域热浪暴露和强度的深刻影响。

外源热浪频率呈现出中间低四周高的空间分布模态,平均每年发生1.59次外源热浪事件,中国边境地区呈现较高的外源热浪频率,尤其包括内蒙古东北部和黑龙江省在内的东北区域、新疆在内的西北干旱区以及云南、广西、广东和福建的南方区域(图1E)。外源热浪平均空间范围($2.24 \times 10^6 \text{ km}^2$)的空间分布规律与频率相反,呈现中间高四周低的特点(图1F)。累积热量和强度的空间分布相似(图1G),具有北高南低的特点,累积热量平均为 3.5°C ,热浪强度平均为 $1.00^\circ\text{C}/\text{天}$ (图1H)。

与暴露度一样,中国外源热浪的频率、影响范围、累积热量呈现一致的增长趋势,并且是全国性的行为。具体而言,外源热浪频率的增长率为每10年0.60次,平均范围的增长率为每10年 $5.32 \times 10^5 \text{ km}^2$,累积热量的增长率为每10年 1.39°C ,强度的增长率为每10年 $0.03^\circ\text{C}/\text{天}$ (图2)。反观外源热浪强度,出现了大面积减小的区域,主要集中在中部、青藏高原区域以及部分西北干旱区。

内源热浪事件也对整体热浪事件有所贡献。与外源热浪不同的是,内源热浪主要影响中国的中部、西南和青藏高原区域。相对于外源热浪,内源热浪的各项特征指标数值更小。例如,内源热浪的暴露度和频率平均每年仅1.20天和0.68次,增长速率也较小($0.06 \text{ 天}/10 \text{ 年}$ 和 $0.04 \text{ 次}/10 \text{ 年}$),增长速度较大的区域位于内陆中部。中国南方(广东省、广西壮族自治区等)的内源热浪暴露度、频率和累积热量则逐年减少(附图S6和S7)。

3.2 人为气候变化导致的外源热浪加剧

为了更好地理解人为强迫对中国外源热浪发生的影响,本文展示了1979–2014年期间历史全强迫、仅温室气体强迫和仅人为气溶胶强迫相比仅自然强迫情景下,外源热浪暴露度的概率比(图3A–3C)。全强迫集合模拟很好地反映了人为和自然强迫的综合效应下的可归因风险(Zhang等, 2022),分析结果表明外源热浪PR和FAR的最佳估计值分别为1.47(1.25–1.57)和0.32(0.30–0.33)。温室

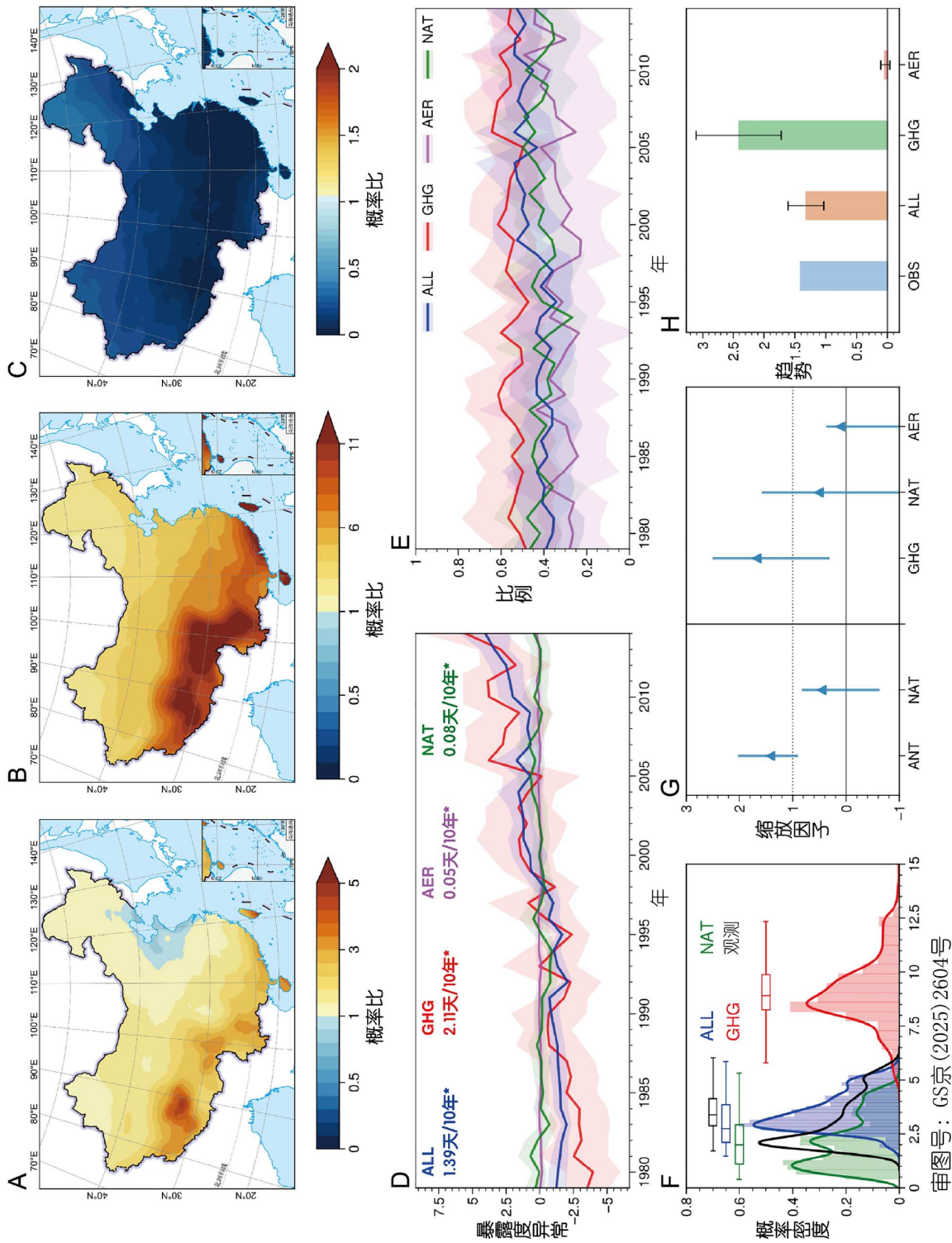


图3 中国外源热浪暴露变化的检测与归因。(A) 历史全强迫模拟试验下外源性热浪暴露的概率比。(B) 仅温室气体强迫模拟试验下外源性热浪暴露的概率比。(C) 仅人为气溶胶强迫模拟试验下外源性热浪暴露的概率比。(D) 1979-2014年期间观测与CMIP6模拟的外源热浪暴露度异常时间序列。(E) 1979-2014年期间观测与CMIP6模拟的外源热浪暴露度占总热浪暴露比例的时间序列。(F) 观测资料和在历史全强迫、仅温室气体强迫、仅气溶胶强迫、仅自然强迫模拟试验下外源热浪暴露度的空间概率密度分布。(G) 通过双信号分析得出的人为和自然强迫以及通过三信号分析得出的温室气体、气溶胶和自然强迫在外源性热浪中的最优缩放因子估计值及其95%置信区间。(H) 单信号最优估计得到的历史全强迫、温室气体强迫、人为气溶胶强迫和自然强迫对外源热浪趋势(天/10年)的贡献, 误差线表示5%-95%置信区间

气体和人为气溶胶作为历史上驱动气候变化的两种主要人为强迫因子(Gu等, 2025; Liu等, 2022; Ma等, 2020; Shi等, 2023; Xie等, 2013)。在仅人为气溶胶强迫的情景下, 外源热浪发生的概率小于仅自然强迫情景, 也无法检测到气溶胶强迫会导致外源热浪的发生概率明显增加的信号。而在仅温室气体强迫条件下, 中国全域发生外源热浪的概率呈现一致增加的现象, 尤其在青藏高原和中国南部。由温室气体导致的人为气候变化使登陆热浪发生的概率增加4.50(3.77–5.42)倍, 其中约78%(76%–81%)的事件责任可归因于人类影响。相似的规律也能在外源热浪的频率、强度、累计热量和范围指标上发现。

历史全强迫多模式集成模拟很好地捕捉到中国外源热浪的上升趋势(1.39天/10年, $p < 0.01$)。相反的, 仅自然强迫模拟的多模式集成结果无法复现历史全强迫下的上升趋势, 只能显示出微小上升趋势(0.08天/10年, $p < 0.01$), 仅温室气体强迫模拟试验则显示出显著的上升趋势(2.11天/10年, $p < 0.01$)。仅人为气溶胶强迫模拟试验显示外源热浪暴露度呈现显著的微小下降趋势(0.05天/10年, $p < 0.01$), 表明气溶胶在缓解与外源热浪相关的风险方面发挥了作用(图3D, 3E)。通过比较不同强迫状态下的外源热浪暴露度空间的概率密度分布发现, 与观测结果相比, 历史全强迫的模拟结果与观测到的空间分布非常接近, 但略微高估总体暴露度。在仅温室气体强迫条件下, 中国外源热浪暴露度明显增加, 这表明更频繁、持续、广泛和严重的外源热浪与温室气体排放为主的人为气候变化相关, 尤其是在青藏高原、中国西南部和中国南部, 暴露度较仅自然强迫情景下分别增长了15.64、12.11和8.39天。

最后我们报告了最优指纹法的分析结果, 证实了人类活动在外源热浪事件趋势变化中的关键作用(图3G)。来自双信号分析的人为强迫和自然强迫缩放因子的估计结果表明, 可以检测到人为强迫信号, 而无法检测到自然强迫信号。对于三信号分析, 当同时考虑温室气体、气溶胶和人为强迫信号时, 只能检测到温室气体强迫信号。气溶胶信号在历史时期相对于自然变异性的可检测性较低, 而较低的气溶胶信号可能是由于空气污染的缓解, 气溶胶的增加会直接影响地表辐射强迫变化, 进而对地球有降温效应(Mahowald, 2011), 也可能与温室气体和气溶胶强迫结果之间的强烈共线性有关(Jones等, 2013)。我们还估计了由历史全强迫以及温室气体强迫、气溶胶强迫和自然强迫成分引起的外源热浪暴露度增加趋势(图3H)。观察到全国平均外源热浪增加了约1.41天, 其中历史全强迫分别导致1.32天(95%置信区间,

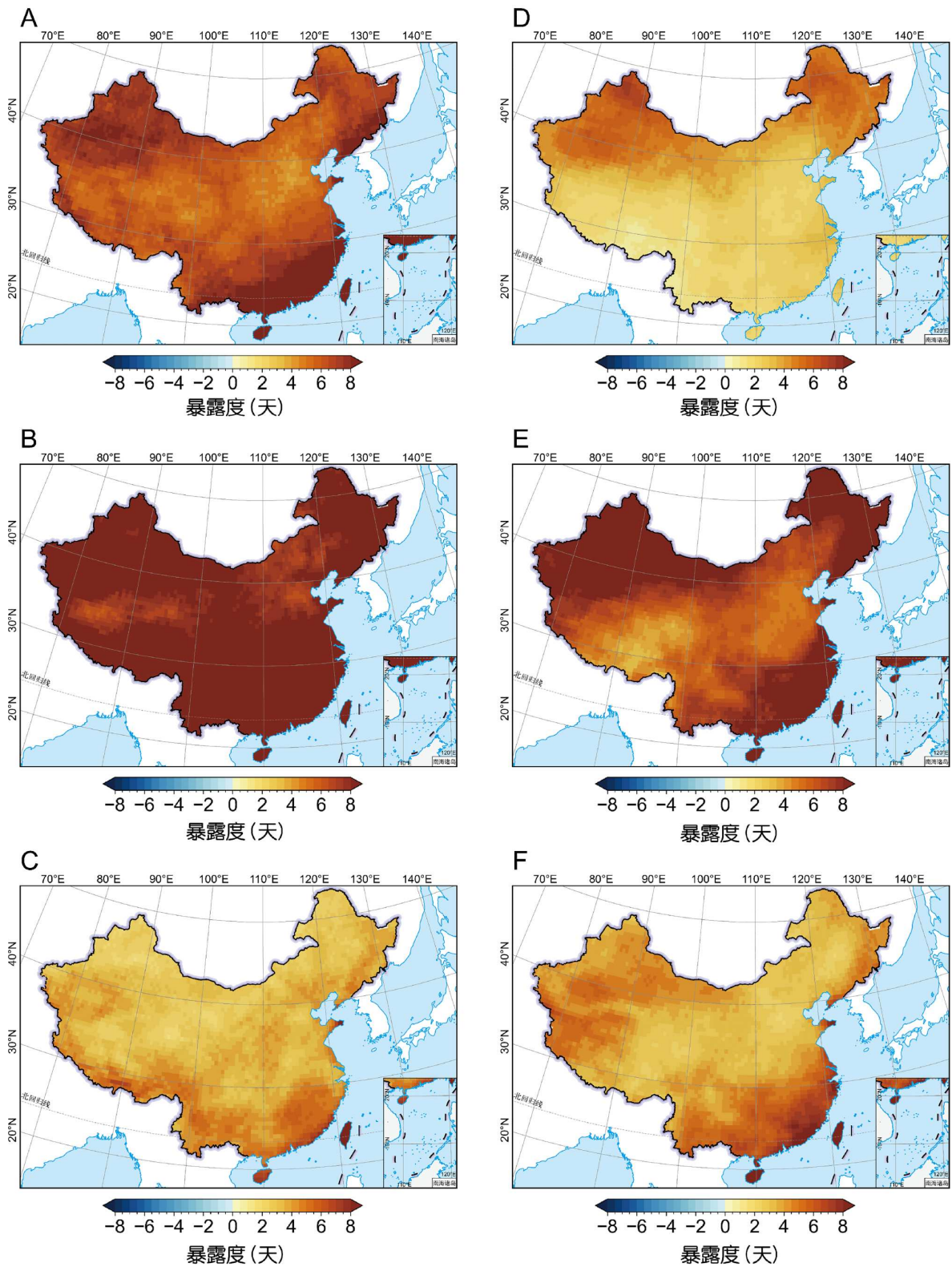
1.03–1.61天)和2.41天(1.72–3.11天)的增加。以上证据都表明人类活动产生的温室气体导致的气候变化是中国外源热浪加剧和占比升高的主要原因。

3.3 不同全球温升水平下未来外源热浪将急剧增加

未来中国热浪及其风险呈现进一步加剧趋势(Domeisen等, 2023)。外源热浪在几乎中国所有地区都呈现强劲增长态势。在SSP585排放情景下, 当升温幅度达到1.5 °C时, 与历史时期(1975–2014年)相比, 中国外源热浪暴露度将增加236.3%(223.4%–260.8%, 95%置信区间), 频率将增加188.3%(176.2%–195.0%), 累积热量将增加313.4%(292.5%–336.6%), 平均范围将增加98.5%(81.6%–115.7%)(附表S4)。中国外源热浪暴露度、频率和累积热量明显增长的区域主要集中在靠近中国边界的区域, 尤其新疆、内蒙古、东三省和东南沿海省份所在的区域(图4, 附图S8–S11)。预计达到2.0 °C变暖水平时的中国外源热浪变化情况较1.5 °C变暖水平时进一步加强, 与历史时期相比, 中国外源热浪暴露度、频率、累积热量和平均范围分别增加了374.8%(368.4%–389.1%)、217.6%(202.6%–235.2%)、518.5%(491.5%–540.1%)和1694.9%(1567.9%–1862.7%), 尤其平均范围增长了16倍之多(附表S4)。

仅使用历史时期定义的95%阈值不足以检测到未来更为极端的热浪现象(Woolway等, 2021), 因此我们引入了更严重的外源热浪事件, 即“外源严重热浪事件”, 并对比了外源严重热浪事件与普通外源热浪事件的差异。几乎所有的外源严重热浪事件的指标在未来不同变暖水平时的增长幅度更大, 不可持续的高排放SSP585情景放大了这种增幅。在SSP585排放情景下, 达到1.5 °C的全球变暖水平时, 外源严重热浪暴露度将增加401.5%(370.6%–450.2%), 而达到2.0 °C的全球变暖水平时, 外源严重热浪暴露度将增加933.7%(824.8%–1076.5%)(附表S5)。在所有指标中, 中国外源严重热浪平均范围的增长幅度最高。受影响的热点地区几乎覆盖整个中国, 尤其是西北、东北和东南部。这些发现显示了一个令人担忧的信号, 即中国未来遭受严重外源热浪的风险将显著增加。

在SSP585高排放情景下, 额外的0.5 °C温升将使得中国外源热浪的暴露度增加40.2%(31.1%–48.33%), 频率增加18.5%(11.5%–31.7%), 累积热量增加54.4%(37.8%–68.1%), 热浪影响范围扩大至原来的2.3倍(230.6%)(附表S4)。额外的0.5 °C变暖将导致青藏高原东南部、东北地区、中部地区和南方地区普遍出现强烈且广泛的外源热浪。在SSP245中排放情景下, 上述指标的空间变化模式



审图号：GS京(2025)2604号

图4 未来SSP585情景下在全球不同温升时中国外源热浪的暴露度变化。(A) 全球温升1.5 °C时与当前气候条件(1979–2014年)外源热浪暴露度的相对变化。(B) 全球温升2.0 °C时与当前气候条件外源热浪暴露度的相对变化。(C) 全球温升2.0 °C时与全球温升1.5 °C时外源热浪暴露度的相对变化。(D) 全球温升1.5 °C时与当前气候条件外源严重热浪暴露度的相对变化。(E) 全球温升2.0 °C时与当前气候条件外源严重热浪暴露度的相对变化。(F) 全球温升2.0 °C时与全球温升1.5 °C时外源严重热浪暴露度的相对变化

与SSP585情景基本一致(附图S12–S16)。当极端气候事件发生在人口稠密和/或农业地区时,其社会经济影响尤其严重(Zhou等, 2023)。伴随着未来高温现象将会变得更加频繁,未来预估的经济高速增长和人口规模变化使得中国的高温风险不容小觑,在高排放情景下中国人口面临的极端热浪暴露可能翻倍(Huang等, 2019),带来潜在的社会经济损失。更强热浪事件带来的风险增加,同样为适应行动带来了严峻挑战,凸显出制定科学缓解策略以应对致命热浪灾害的紧迫性(Domeisen等, 2023; Fischer等, 2021; Russo等, 2019)。随着全球变暖不断加剧,实现《巴黎协定》中限制全球温升目标的难度日益加大,未来气候趋势预计将更倾向于高排放情景的变化(Matthews和Wynes, 2022; Rogelj等, 2018)。这种形势将气候韧性政策推向前台,亟需采取行动来减缓极端热浪的影响(Domeisen等, 2023; Howarth和Robinson, 2024)。

为评估少温升0.5℃的缓解潜力,可避免影响指标被用于评估外源热浪暴露度和社会经济暴露度的可避免程度。在SSP245排放情景下,控制住额外的0.5℃变暖(温升1.5℃至温升2.0℃),可避免32.7%(23.1%–35.8%)的外源热浪暴露、27.9%(23.5%–31.5%)的人口暴露以及14.6%(13.1%–18.3%)的经济暴露。在SSP585情景下,额外减少0.5℃变暖可避免28.7%(23.7%–32.6%)的热浪暴露、39.79%(35.0%–43.2%)的人口暴露和31.3%(29.7%–33.7%)的经济暴露。若仅考虑外源严重热浪事件,这种避免影响还将进一步扩大。在SSP245排放情景下,可分别避免43.6%(40.0%–48.0%)的热浪暴露、33.7%(31.4%–36.8%)的人口暴露和30.3%(27.6%–33.6%)的经济暴露。在SSP585情景下,可避免49.5%(46.3%–54.6%)的热浪暴露、52.3%(46.3%–57.1%)的人口暴露和40.3%(37.9%–44.7%)的经济暴露。

我们的研究表明,在全球变暖的背景下,外源热浪对区域性热浪灾害风险的影响不容忽视。中国不断增强的外源热浪正在加剧极端气候事件带来的冲击与暴露,特别是在高变暖情景下。在全球温升1.5或2℃的未来世界中,中国面临的由于外源热浪引发的致命热浪灾害风险将进一步加剧,这一趋势传递出的信号足够令人警惕。外源热浪的频繁发生与区域致命热浪的风险上升紧密相关,强调了人类社会亟需强化适应与缓解策略,以应对不断加剧的热浪灾害。

4 结论与讨论

热浪对农业生产、人类健康和生态系统造成了显著威胁(Domeisen等, 2023)。目前,关于人为气候变化对热浪影响的研究尚未广泛涵盖外源热浪事件。然而,上

风向热源对热浪影响的研究受到越来越多的关注(Amaya等, 2020; Miralles等, 2014; White等, 2023)。本研究采用拉格朗日追踪方法,明确了中国热浪的上游源区,识别了时空连续热浪事件的主要空间传播路径。研究结果表明广泛且严重的外源热浪几乎影响了整个中国,热点区域主要集中在西北、东北和东南地区。

先前研究常常忽略对时空连续热浪的关注(Lo等, 2021; Luo等, 2024),多以气象站点或网格点为单位,聚焦于热浪的时空演变特征(Perkins-Kirkpatrick和Lewis, 2020),而针对三维时空连续热浪的动态过程研究十分有限。现有少数研究已经开始关注热浪事件的三维时空结构,但往往侧重于个别事件的发生、发展和消散过程,或仅分析热浪在特定区域内的迁移轨迹,对外源热浪的入侵与传播机制存在较多不足(Amaya等, 2020; Lo等, 2021; Luo等, 2022a, 2022b, 2024; Schumacher等, 2019; White等, 2023),限制了我们对外源热浪机制的深入理解。本文提出的外源与内源热浪事件的分类方法,实现了在现有热浪分类体系基础上的补充与拓展,为理解气候变化背景下的热浪响应提供了新的理论框架。

外源热浪的形成与传播常受到气候变率和大气环流模式的影响。华东及东北地区的外源热浪通常与西北太平洋副热带高压的西北向延伸与增强有关(Chen等, 2020; Gu等, 2025; Luo等, 2024)。在对流层中西北太平洋副热带高压的西北推进使得与热浪形成相关的高压系统向陆地推进,并通过湍流热通量与大气交换热量。与此同时,增强的陆向风将海洋热量输送至陆地,为热浪孕育了发生条件(Gu等, 2025; Luo等, 2022b)。西北和华北地区的外源热浪通常与阻塞型大气环流异常有关,其形成机制受罗斯贝波列的传播控制,由其向东的传播路径引导热量远距离传输(Luo等, 2020, 2024; Pfahl和Wernli, 2012)。

我们的研究还强调了控制额外温升的必要性,并强烈呼吁采取更有效的热浪缓解策略。如果未能及时采取行动,未来外源热浪的强度和频率将显著上升,进一步加剧对人类健康与自然生态系统的威胁。这类增强的热浪将波及更广泛的内陆地区,带来更为严重的社会和环境后果。因此,应对外源热浪对于实现全球可持续发展目标,以及减轻气候变化带来的影响具有重要意义。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责,详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

数据可用声明 ERA5再分析数据的获取来源为<https://doi>.

org/10.24381/cds.143582cf。第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)模拟结果的获取来源为<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>。未来预估的格网GDP和人口数据的获取来源为<https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.01683>。

参考文献

- Allen M. 2003. Liability for climate change. *Nature*, 421: 891–892
- Allen M R, Stott P A. 2003. Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, part I: Theory. *Clim Dyn*, 21: 477–491
- Amaya D J, Miller A J, Xie S P, et al. 2020. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave. *Nat Commun*, 11: 1903
- Ballester J, Quijal-Zamorano M, Méndez Turrubiates R F, et al. 2023. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nat Med*, 29: 1857–1866
- Cai W, Zhang C, Zhang S, et al. 2021. The 2021 China report of the Lancet Countdown on health and climate change: Seizing the window of opportunity. *Lancet Public Health*, 6: e932–e947
- Chen X, Zhou T, Wu P, et al. 2020. Emergent constraints on future projections of the western North Pacific Subtropical High. *Nat Commun*, 11: 2802
- Chiang F, Mazdiyasni O, AghaKouchak A. 2021. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity. *Nat Commun*, 12: 2754
- Domeisen D I V, Eltahir E A B, Fischer E M, et al. 2023. Prediction and projection of heatwaves. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 36–50
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*, 9: 1937–1958
- Fischer E M, Knutti R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat Clim Change*, 5: 560–564
- Fischer E M, Sippel S, Knutti R. 2021. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nat Clim Change*, 11: 689–695
- Fouillet A, Rey G, Laurent F, et al. 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int Arch Occup Environ Health*, 80: 16–24
- Gu X, Zhang Q, Li J, et al. 2019. Attribution of global soil moisture drying to human activities: A quantitative viewpoint. *Geophys Res Lett*, 46: 2573–2582
- Gu X, Jiang Z, Guan Y, et al. 2025. Frequent land-ocean transboundary migration of tropical heatwaves under climate change. *Nat Commun*, 16: 3400
- Guan Y, Gu X, Slater L J, et al. 2023. Increase in ocean-onto-land droughts and their drivers under anthropogenic climate change. *npj Clim Atmos Sci*, 6: 195
- Herrera-Estrada J E, Diffenbaugh N S. 2020. Landfalling droughts: Global tracking of moisture deficits from the oceans onto land. *Water Resour Res*, 56: e2019WR026877
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quart J R Meteorol Soc*, 146: 1999–2049
- Howarth C, Robinson E J Z. 2024. Effective climate action must integrate climate adaptation and mitigation. *Nat Clim Change*, 14: 300–301
- Huang J, Qin D, Jiang T, et al. 2019. Effect of fertility policy changes on the population structure and economy of China: From the perspective of the shared socioeconomic pathways. *Earth's Future*, 7: 250–265
- Jones G S, Stott P A, Christidis N. 2013. Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations. *J Geophys Res Atmos*, 118: 4001–4024
- Keellings D, Moradkhani H. 2020. Spatiotemporal evolution of heat wave severity and coverage across the United States. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL087097
- Laufkötter C, Zscheischler J, Frölicher T L. 2020. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science*, 369: 1621–1625
- Liu J, Feng X, Gu X, et al. 2022. Detection and attribution of human influence on the global diurnal temperature range decline. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL097155
- Liu J, Qi J, Yin P, et al. 2024. Rising cause-specific mortality risk and burden of compound heatwaves amid climate change. *Nat Clim Change*, 14: 1201–1209
- Liu Z, Zhou W. 2023. *Glo3DHydroClimEventSet(v1.0)*: A global-scale event set of hydroclimatic extremes detected with the 3D DBSCAN-based workflow (1951–2022). *Intl J Climatol*, 43: 7722–7744
- Lo S H, Chen C T, Russo S, et al. 2021. Tracking heatwave extremes from an event perspective. *Weather Clim Extremes*, 34: 100371
- Luo M, Ning G, Xu F, et al. 2020. Observed heatwave changes in arid northwest China: Physical mechanism and long-term trend. *Atmos Res*, 242: 105009
- Luo M, Lau N, Liu Z, et al. 2022a. An observational investigation of spatiotemporally contiguous heatwaves in China from a 3D perspective. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL097714
- Luo M, Wang X, Dong N, et al. 2022b. Two different propagation patterns of spatiotemporally contiguous heatwaves in China. *npj Clim Atmos Sci*, 5: 89
- Luo M, Wu S, Lau G N C, et al. 2024. Anthropogenic forcing has increased the risk of longer-traveling and slower-moving large contiguous heatwaves. *Sci Adv*, 10: ead11598
- Lüthi S, Fairless C, Fischer E M, et al. 2023. Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nat Commun*, 14: 4894
- Lyon B, Barnston A G, Coffel E, et al. 2019. Projected increase in the spatial extent of contiguous US summer heat waves and associated attributes. *Environ Res Lett*, 14: 114029
- Ma F, Yuan X, Jiao Y, et al. 2020. Unprecedented europe heat in June–July 2019: Risk in the historical and future context. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL087809
- Mahowald N. 2011. Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate. *Science*, 334: 794–796
- Matthews H D, Wynnes S. 2022. Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5 °C. *Science*, 376: 1404–1409
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century. *Science*, 305: 994–997
- Miralles D G, Teuling A J, van Heerwaarden C C, et al. 2014. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nat Geosci*, 7: 345–349
- MOEM, 2024. The Ministry of Emergency Management released the basic situation of natural disasters in China in 2022
- Mondal S, Mishra A K. 2021. Complex networks reveal heatwave patterns and propagations over the USA. *Geophys Res Lett*, 48: e2020GL090411
- Mora C, Dousset B, Caldwell I R, et al. 2017. Global risk of deadly heat. *Nat Clim Change*, 7: 501–506
- Murali G, Iwamura T, Meiri S, et al. 2023. Future temperature extremes threaten land vertebrates. *Nature*, 615: 461–467
- Nie G, Yang J, Zhang Y, et al. 2024. Duration of exposure to compound daytime-nighttime high temperatures and changes in population exposure in China under global warming. *Humit Soc Sci Commun*, 11: 1065
- Perkins-Kirkpatrick S E, Lewis S C. 2020. Increasing trends in regional heatwaves. *Nat Commun*, 11: 3357
- Pfahl S, Wernli H. 2012. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales. *Geophys Res Lett*, 39: 2012GL052261

- Philip S Y, Kew S F, van Oldenborgh G J, et al. 2022. Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021. *Earth Syst Dynam*, 13: 1689–1713
- Quinting J F, Reeder M J. 2017. Southeastern Australian heat waves from a trajectory viewpoint. *Mon Wea Rev*, 145: 4109–4125
- Ribes A, Planton S, Terray L. 2013. Application of regularised optimal fingerprinting to attribution. Part I: Method, properties and idealised analysis. *Clim Dyn*, 41: 2817–2836
- Rogelj J, Popp A, Calvin K V, et al. 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nat Clim Change*, 8: 325–332
- Röthlisberger M, Papritz L. 2023. Quantifying the physical processes leading to atmospheric hot extremes at a global scale. *Nat Geosci*, 16: 210–216
- Russo S, Sillmann J, Sippel S, et al. 2019. Half a degree and rapid socioeconomic development matter for heatwave risk. *Nat Commun*, 10: 136
- Schleussner C F, Rogelj J, Schaeffer M, et al. 2016. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat Clim Change*, 6: 827–835
- Schumacher D L, Keune J, van Heerwaarden C C, et al. 2019. Amplification of mega-heatwaves through heat torrents fuelled by upwind drought. *Nat Geosci*, 12: 712–717
- Shi J R, Wijffels S E, Kwon Y O, et al. 2023. The competition between anthropogenic aerosol and greenhouse gas climate forcing is revealed by North Pacific water-mass changes. *Sci Adv*, 9: eadh7746
- Stott P A, Stone D A, Allen M R. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432: 610–614
- Thompson V, Kennedy-Asser A T, Vosper E, et al. 2022. The 2021 western North America heat wave among the most extreme events ever recorded globally. *Sci Adv*, 8: eabm6860
- Vautard R, Cattiaux J, Happpé T, et al. 2023. Heat extremes in Western Europe increasing faster than simulated due to atmospheric circulation trends. *Nat Commun*, 14: 6803
- Vicedo-Cabrera A M, Scovronick N, Sera F, et al. 2021. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat Clim Chang*, 11: 492–500
- Vogel M M, Zscheischler J, Fischer E M, et al. 2020. Development of future heatwaves for different hazard thresholds. *J Geophys Res Atmos*, 125: e2019JD032070
- Wang G, Zhang Q, Yu H, et al. 2020. Double increase in precipitation extremes across China in a 1.5 °C/2.0 °C warmer climate. *Sci Total Environ*, 746: 140807
- Wang G, Zhang Q, Pokhrel Y, et al. 2023. Exogenous moisture deficit fuels drought risks across China. *npj Clim Atmos Sci*, 6: 217
- Wang G, Zhang Q, Woolway R I, et al. 2025. Warm-wetting and/or warm-drying tendency over Xinjiang, China? *J Hydrol*, 660: 133417
- Watts N, Amann M, Ayeb-Karlsson S, et al. 2018. The Lancet Countdown on health and climate change: From 25 years of inaction to a global transformation for public health. *Lancet*, 391: 581–630
- White R H, Anderson S, Booth J F, et al. 2023. The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021. *Nat Commun*, 14: 727
- Woolway R I, Jennings E, Shatwell T, et al. 2021. Lake heatwaves under climate change. *Nature*, 589: 402–407
- Woolway R I, Albergel C, Frölicher T L, et al. 2022. Severe lake heatwaves attributable to human-induced global warming. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL097031
- Wu S, Luo M, Liu Z, et al. 2024. Longer- and slower-moving contiguous heatwaves linked to El Niño. *Geophys Res Lett*, 51: e2024GL109067
- Xie S P, Lu B, Xiang B. 2013. Similar spatial patterns of climate responses to aerosol and greenhouse gas changes. *Nat Geosci*, 6: 828–832
- Zhang L, Zhao Y, Cheng T F, et al. 2024. Future changes in global atmospheric rivers projected by CMIP6 models. *J Geophys Res Atmos*, 129: e2023JD039359
- Zhang W, Zhou T, Zou L, et al. 2018. Reduced exposure to extreme precipitation from 0.5 °C less warming in global land monsoon regions. *Nat Commun*, 9: 3153
- Zhang X, Zhou T, Zhang W, et al. 2023. Increased impact of heat domes on 2021-like heat extremes in North America under global warming. *Nat Commun*, 14: 1690
- Zhang Y, Hajat S, Zhao L, et al. 2022. The burden of heatwave-related preterm births and associated human capital losses in China. *Nat Commun*, 13: 7565
- Zhou S, Yu B, Zhang Y. 2023. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change. *Sci Adv*, 9: eabo1638

(责任编辑: 陈文)