中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 10 期: 3321 ~ 3332
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

全球多时间尺度复合高温干旱增加

张义桐[1], 郝增超[1*], 陈阳[2], 庞宇婷[1], Vijay P. SINGH[3]

1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875
2. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081
3. Department of Biological and Agricultural Engineering and Zachry Department of Civil and Environmental Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA
* 通讯作者, E-mail: haozc@bnu.edu.cn

收稿日期: 2024-12-11; 收修改稿日期: 2025-08-10; 接受日期: 2025-08-29; 网络版发表日期: 2025-09-24
国家自然科学基金项目(42271024)资助

摘要 复合高温干旱事件是指同时或者相继发生的高温和干旱事件, 可对自然系统和人类社会造成比单一事件更大的影响. 复合高温干旱事件的演变研究通常关注特定时间尺度, 而对于不同时间尺度上的变化缺乏系统认识. 本文基于欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据(ERA5)和第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)模拟数据, 分析了历史时期(1951~2014年)和未来时期(2015~2100年)全球多时间尺度复合高温干旱事件的变化特征. 结果表明, 在历史时期, 周、月、季和年尺度的复合高温干旱事件频率均增加(相对变化分别为31.73%、65.15%、92.27%和184.63%). 此外, 历史时期四个时间尺度的复合高温干旱事件空间范围一致增加(趋势分别为1.16%/十年、1.84%/十年、2.26%/十年和3.38%/十年). 上述复合高温干旱事件频率及空间范围的变化可归因于人为影响. 在选定的26个气候区域, 东非(EAF)、东亚(EAS)、南欧/地中海(MED)、撒哈拉(SAH)、东南亚(SEA)和西非(WAF)在历史时期多个时间尺度上的复合高温干旱频率或空间范围增加更为突出. 在未来共享社会经济路径(SSP)2-4.5情景下, 不同时间尺度复合高温干旱事件的频率和空间范围将进一步增加, 特别在亚马逊(AMZ)、MED、巴西东北部(NEB)、南非(SAF)、澳大利亚南部/新西兰(SAU)以及南美洲西海岸(WSA)等区域的增加更为突出. 本文结果有助于制定适应策略以应对未来变暖背景下不同时间尺度极端事件的威胁.

关键词 复合高温干旱, 热旱, 复合型极端事件, 极端气候

1 引言

复合高温干旱事件, 简称热旱事件, 通常指高温和干旱两种极端事件同时或相继发生的情况, 已引起广泛关注(Ridder等, 2020; Zscheischler等, 2020; Hao等, 2022; Lesk等, 2022; 周佰铨等, 2024). 这些极端事件对自然系统和人类社会带来比单一极端事件更大的挑战(Raymond等, 2020; van Vliet等, 2023; 郝增超和陈阳, 2024; Yao等, 2024; 熊少堂等, 2024). 例如, 2022年, 欧洲、北美和中国的大片地区遭遇了极端干旱和热浪事件, 导致水资源枯竭、农作物减产、能源生产减少以及陆地生态系统退化(Hao等, 2023; Schumacher等, 2024). 随着全球变暖, 复合高温干旱事件预计发生更加频繁且影响范围更广(Sarhadi等, 2018; Hao等, 2022;

中文引用格式: 张义桐, 郝增超, 陈阳, 庞宇婷, Singh V P. 2025. 全球多时间尺度复合高温干旱增加. 中国科学: 地球科学, 55(10): 3321–3332, doi: 10.1360/N072024-0363
英文引用格式: Zhang Y, Hao Z, Chen Y, Pang Y, Singh V P. 2025. Increases in global hot droughts across multiple timescales. Science China Earth Sciences, 68(10): 3189–3199, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1680-4

© 2025 《中国科学》杂志社

Tripathy等, 2023). 因此, 认识全球变暖背景下复合高温干旱事件的变化对于应对其负面影响至关重要.

干旱发展的时间尺度可以从几周到几十年不等(Vicente-Serrano等, 2013; Pendergrass等, 2020). 虽然目前极端高温的研究通常在短期时间尺度上(如热浪), 但也有研究在月、季节乃至更长时间尺度上探讨了其变化和物理机制(Barriopedro等, 2023; Domeisen等, 2023; 孙颖等, 2025; 张楷文等, 2025). 因此, 这两种极端事件可能在不同的时间尺度上同时发生(即复合高温干旱事件), 并对不同部门带来多样的影响(Su等, 2020; Brunner等, 2021; Mukherjee等, 2023). 例如, 干旱可能在候或者周尺度上迅速发展, 且与热浪同时发生, 温度升高和饱和水气压差(VPD)的增加会在较短时间内迅速消耗土壤水分, 导致植被或生态系统的水分胁迫(Christian等, 2021; Qing等, 2022; Yuan等, 2023). 此外, 复合高温干旱事件也可能在月或者季节尺度上发展, 如果未能采取有效灌溉措施, 该事件将严重影响农业生产(Lesk等, 2022). 此外, 长期干旱(如多年连旱)如果与高于正常水平的温度同时发生, 可能会消耗地下水, 影响水资源, 导致树木死亡(Matusick等, 2018; Gazol和Camarero, 2022; Hammond等, 2022; Zhao等, 2025). 即使对于单一部门, 复合高温干旱事件的影响在不同时间尺度上也会有所不同. 例如, 对于野火, 在短期时间尺度上, 天气变率可能是特大火灾(VLFs)发生的关键因素, 尤其是在非森林生态区; 而在次季节或更长的时间尺度上, 长期的水分压力与森林生态区特大火灾的发生密切相关(Barbero等, 2014). 因此, 应对不同时间尺度复合高温干旱事件的影响需要系统分析其在气候变暖背景下的演变规律.

研究表明历史时期全球许多区域复合高温干旱事件呈现增加趋势, 气候预估结果表明未来复合高温干旱事件会进一步增加(Alizadeh等, 2020; Hao等, 2022; De Luca和Donat, 2023). 这些研究大多集中在特定的时间尺度上, 这可能导致由于事件定义(或其他因素)不同而造成变化规律上的差异. 由于复合高温干旱事件在不同时间尺度上的影响各不相同(Zscheischler等, 2020; Hao等, 2022), 评估多个时间尺度复合高温干旱事件的变化对于指导适应性措施至关重要. 然而, 目前对于全球不同时间尺度复合高温干旱事件变化的系统性评估相对有限, 这阻碍了对气候变化背景下复合高温干旱事件风险的认识.

本文利用欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据(ERA5)和第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)模式模拟数据, 探讨了全球陆地不同时间尺度复合高温干旱事件的变化. 首先, 基于ERA5数据分析了历史时期复合高温干旱事件频率和空间范围在不同时间尺度上的变化. 然后, 通过CMIP6模式模拟数据对历史变化特征进行了归因分析. 最后, 对未来不同时间尺度复合高温干旱事件变化进行了预估并比较了26个地区变化强度的排名, 以识别气候变化背景下复合高温干旱事件的热点区域.

2 数据和方法

2.1 气象数据

本文使用了ERA5再分析数据和CMIP6模式模拟数据, 通过温度和降水计算了复合高温干旱事件在周、月、季和年四个时间尺度上的变化. 本文采用空间分辨率为0.25°×0.25°的ERA5日尺度与月尺度降水与温度数据作为观测资料, 用于1951~2014年历史时期(与CMIP6模式的历史模拟时段保持一致)的分析. 此外, 本文还采用了CMIP6模式模拟数据, 包括1951~2014年的全强迫和自然强迫(ALL和NAT)模拟, 以及2015~2100年不同共享社会经济路径(SSPs)下的未来预估数据(包含SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景, 详见网络版附表S1). 本文重点分析并展示了SSP2-4.5情景下的结果, 该情景为中等温室气体排放情景, 其辐射强迫将在2100年稳定在4.5W/m^{2}水平. 由于CMIP6不同模式的原始模拟分辨率存在差异, 本文将所有模式模拟数据统一重采样至2°×2°分辨率. 同样地, ERA5数据也进行了相同分辨率的网格化处理. 基于ERA5数据, 我们剔除了年均降水量低于0.5mm/天的区域(Sheffield等, 2012).

2.2 复合高温干旱事件的定义

本文中复合高温干旱事件定义为同时发生的高温和干旱事件. 基于日尺度降水及温度数据, 本文通过累加(或平均)获取了周尺度数据, 同时基于月尺度降水及温度数据, 通过累加(或平均)获取了季节尺度和年尺度数据, 以此研究不同时间尺度的复合高温干旱事件. 对于每个时间尺度, 以1961~1990年作为基准期, 通过累积降水和平均温度百分位数阈值识别干旱和高

温事件(IPCC, 2012). 根据以往的研究(Wang和Yuan, 2018; Zhuang等, 2024), 本文基于降水的第30百分位数来定义干旱事件阈值, 基于温度的第70百分位数定义高温事件阈值. 例如, 在周时间尺度上, 计算七天的总降水量和平均温度, 然后对每周数据分别计算阈值(一年共52周), 具体来说, 基于30年基准期内的每周数据(共30个样本), 分别计算降水和温度的阈值. 此外, 本文还使用降水和温度的第10/90百分位数作为另一组阈值评估不同时间尺度复合高温干旱事件的变化情况.

2.3 复合高温干旱事件的变化

本文在格点上识别周、月、季和年尺度上复合高温干旱事件, 通过计算未来时期(2037~2100年)与历史时期(1951~2014年)复合高温干旱事件发生次数的差值, 再除以历史时期的发生次数, 确定了复合高温干旱事件频率的相对变化. 这种方法同样用于计算两个历史时期(1951~1982年和1983~2014年)之间的频率相对变化. 复合高温干旱事件的空间范围定义为每个时间尺度上受到复合高温干旱事件影响的格点百分比, 并通过Mann-Kendall趋势检验来估计这一趋势. 以月尺度空间范围为例, 首先计算每个格点一年(12个月)复合高温干旱事件的总发生次数, 再除以12得到该格点年内复合高温干旱事件的发生比例, 随后通过计算所有格点发生比例的平均值来确定每年的空间范围.

2.4 热点区域的识别

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(SREX)定义的26个区域(网络版附图S1), 本文对复合高温干旱事件的频率和空间范围变化进行了区域排序分析. 在历史和未来两个时期, 本文重点关注每个区域在四个时间尺度上复合高温干旱事件频率和空间范围的变化, 并比较了这26个区域的排名. 排名靠前的区域变化水平较高, 被认定为热点区域(至少在三个时间尺度上排名前五的区域).

3 结果

3.1 历史时期复合高温干旱事件的变化

1951~1982年与1983~2014年间全球陆地复合高温干旱事件频率的相对变化如图1(图S2)所示. 结果显示, 在周、月、季和年尺度上, 复合高温干旱事件的频率普遍增加(平均增幅分别为31.73%、65.15%、92.27%和184.63%). 此外, 不同时间尺度的复合高温干旱事件空间范围显著扩大, 如图2(图S3)所示. 从1951年到2014年, 周、月、季和年尺度复合高温干旱事件的空间范围均呈现上升趋势, 趋势分别为1.16%/十年、1.84%/十年、2.26%/十年和3.38%/十年. 值得注意的是, 20世纪90年代以来, 趋势发生了显著变化(表S2). 例如, 在1991年至2014年间, 四个时间尺度上的空间范围趋势(分别为2.73%/十年、3.95%/十年、4.68%/十年和6.11%/十年)超过了1951年至2014年的趋势. 在26个区域中, 大多数地区观测到了复合高温干旱事件频率的增加和空间范围的上升趋势(图S4和S5), 表明历史时期内复合高温干旱事件总体呈增加趋势.

四个时间尺度复合高温干旱事件在26个区域频率相对变化和空间范围趋势的排名如图3所示. 在频率相对变化方面, 东非(EAF)、南欧/地中海(MED)、撒哈拉(SAH)、东南亚(SEA)和西非(WAF)等地区排名较高, 这些地区的频率在多个时间尺度上均增加(频率增加的热点区域). 相比之下, 北美中部(CNA)等地区的排名较低, 其频率变化在某些时间尺度有所下降, 如图1所示. 在空间范围方面, EAF、东亚(EAS)、SAH和WAF在四个时间尺度上均表现出较高的排名, 表明这些地区的复合高温干旱事件空间范围在四个时间尺度均有所增加. 相反, 澳大利亚北部(NAU)和CNA等地区排名较低, 意味着这些地区的复合高温干旱事件风险低于其他地区. 值得注意的是, 在某些地区, 如中亚(CAS)、中美洲/墨西哥(CAM)和北美西部(WNA), 四个时间尺度的频率变化或空间范围趋势排名存在显著差异. 例如, CAS在年尺度上的频率变化排名较高, 但在周尺度上排名较低. 这些结果表明了复合高温干旱事件频率变化和空间范围趋势的区域排名在一定程度上与时间尺度有关.

3.2 人为因素对复合高温干旱事件的影响

CMIP6全强迫模拟显示, 1983~2014年相比于1951~1982年复合高温干旱事件的频率普遍增加, 与观测结果基本一致(虽然不同区域复合高温干旱事件频率变化幅度存在明显差异)(图S6). 此外, 在历史时期, 全强迫模拟显示复合高温干旱事件的空间范围在

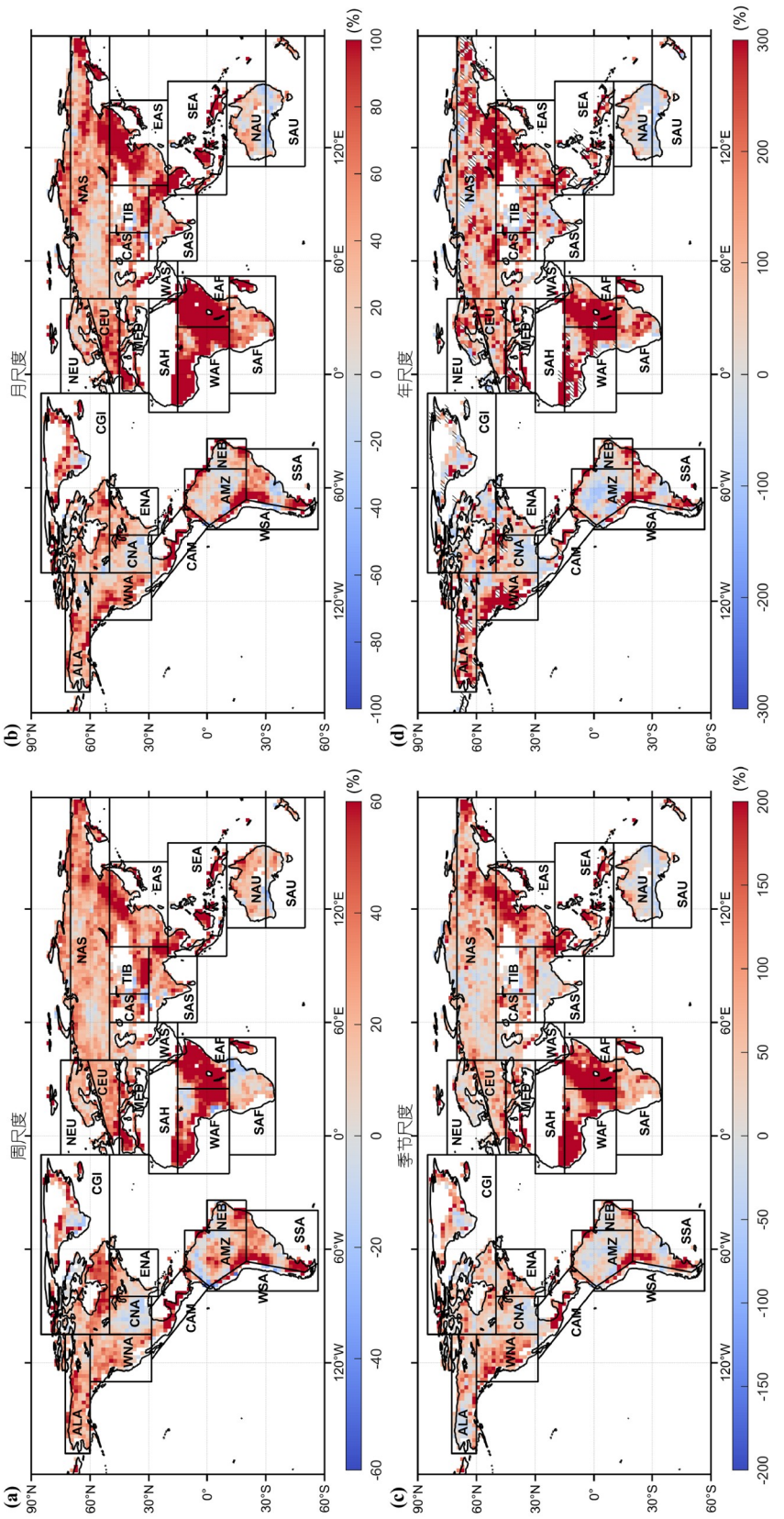


图 1　历史时期全球复合高温干旱事件频率的相对变化

基于ERA5数据1951~1982年与1983~2014年间全球复合高温干旱事件频率的相对变化. (a) 周尺度; (b) 月尺度; (c) 季节尺度; (d) 年尺度. 黑色斜线表示在第一个时期(1951~1982年)未发生复合高温干旱事件的区域

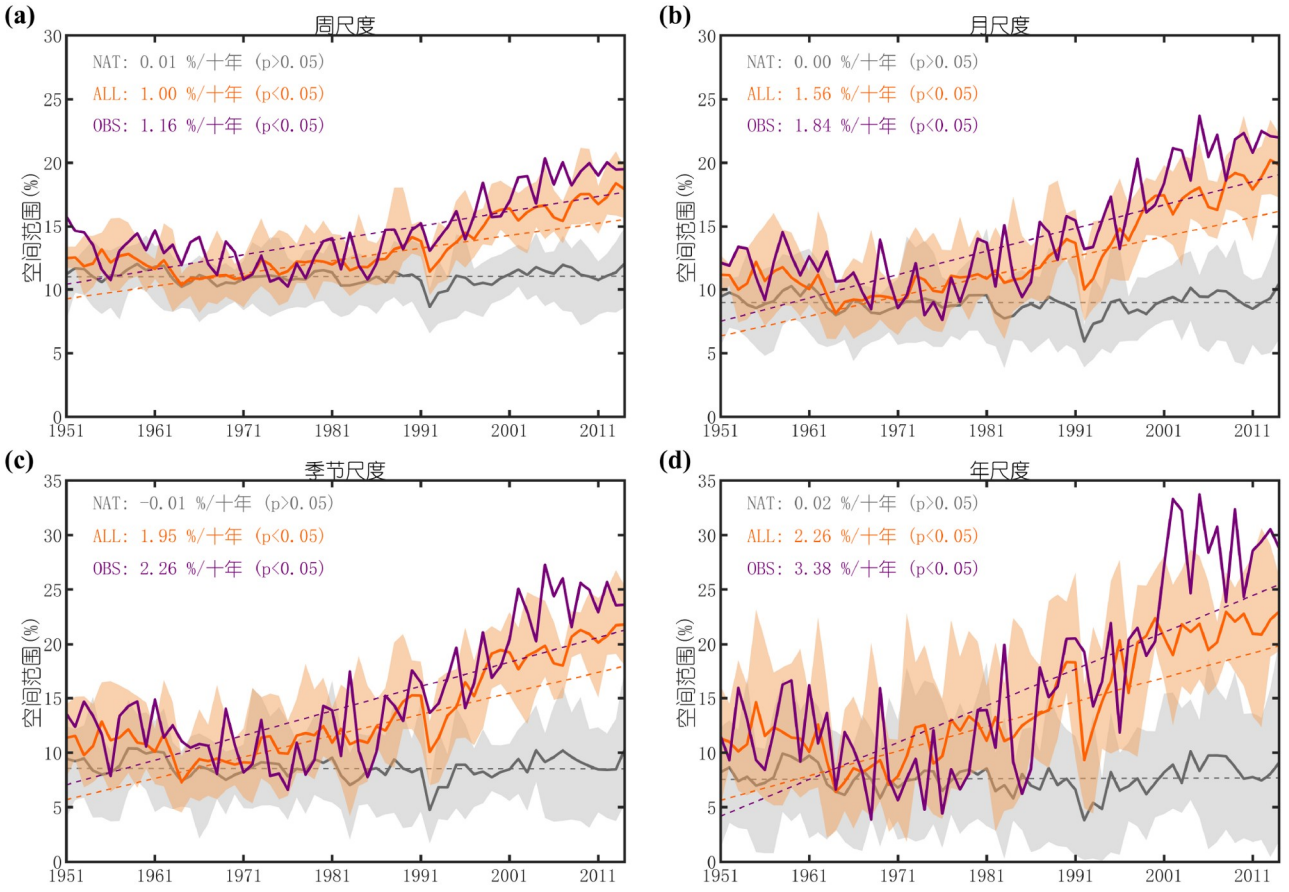


图 2　历史时期全球复合高温干旱事件空间范围的变化趋势

基于ERA5(OBS)、CMIP6全强迫模拟(ALL)和CMIP6自然强迫模拟(NAT)的1951~2014年间全球复合高温干旱事件空间范围的趋势变化. (a) 周尺度; (b) 月尺度; (c) 季节尺度; (d) 年尺度. 不同时间尺度的趋势单位为%/十年

不同时间尺度上呈增加的趋势(图2), 这与观测结果基本吻合. 例如, 全强迫模拟显示的空间范围变化趋势分别为1.00%/十年、1.56%/十年、1.95%/十年和2.26%/十年, 这些趋势与观测结果非常接近. 另外, 全强迫实验也较好地模拟出了20世纪90年代以来复合高温干旱事件空间范围显著增加的特征.

然而, CMIP6自然强迫模拟的复合高温干旱事件频率变化与基于ERA5得到的事件增加趋势存在明显差异(图S7), 且自然强迫模拟的空间范围趋势在周、月、季和年尺度上变化并不明显(分别为0.01%/十年、0.00%/十年、−0.01%/十年和0.02%/十年). 这些结果与ERA5(及全强迫模拟)存在显著差异. 这表明自然强迫并不是复合高温干旱事件变化的主要驱动因子; 与之相对应, 人为因素在驱动复合高温干旱事件增加方面起着重要作用. 对于26个区域, 不同时间尺度复合高温干旱事件的归因结果较为一致(图S4和S5). 总体而言, 基于观测和模拟(ALL, NAT)的复合高温干旱事件变化, 人为强迫增加了四个时间尺度复合高温干旱事件发生的可能性.

3.3　未来复合高温干旱事件的变化预估

本文进一步评估了未来2037~2100年与历史1951~2014年全球复合高温干旱事件的相对变化(图4a、4c、4e和4g). 结果显示, 大多数区域四个时间尺度的复合高温干旱事件的频率预计会增加, 周、月、季和年尺度的增加幅度分别为85.26%、96.93%、70.59%和33.31%. 在区域上, 南美洲北部、非洲南部和欧洲等地区在未来(2037~2100年)不同时间尺度复合高温干旱事件频率预计会更高(图4a、4c、4e和4g), 某些高纬度地区的年尺度复合高温干旱事件频率有所

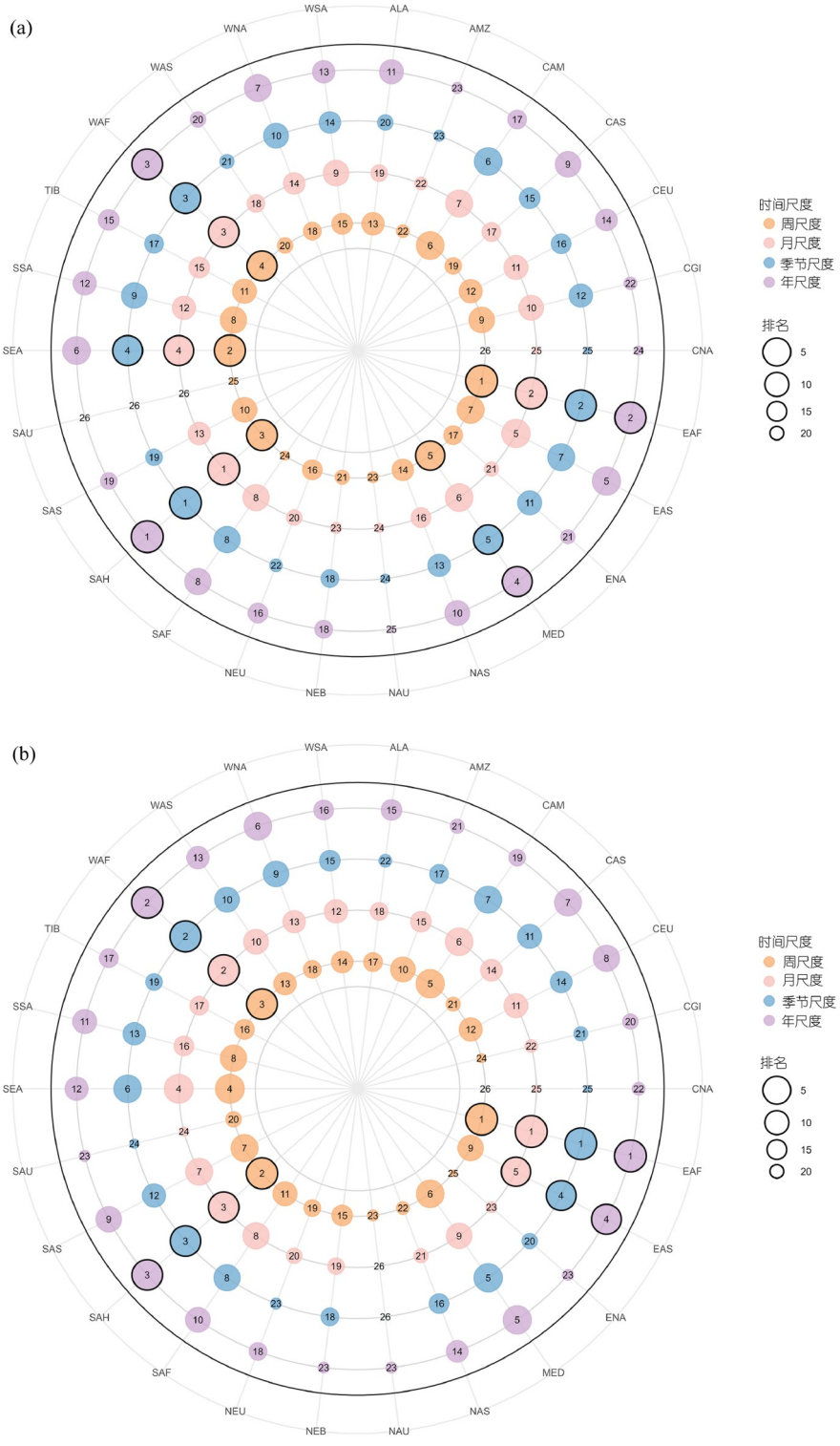


图 3　历史时期全球复合高温干旱事件变化的区域排名

基于ERA5数据的1951~2014年期间26个IPCC SREX区域不同时间尺度复合高温干旱事件(a)频率相对变化的排名及(b)空间范围趋势的排名. 排名越高, 表示该区域的频率相对变化或空间范围趋势的数值越高. 黑色圆圈区域表示该区域的排名至少在三个时间尺度上位列前五

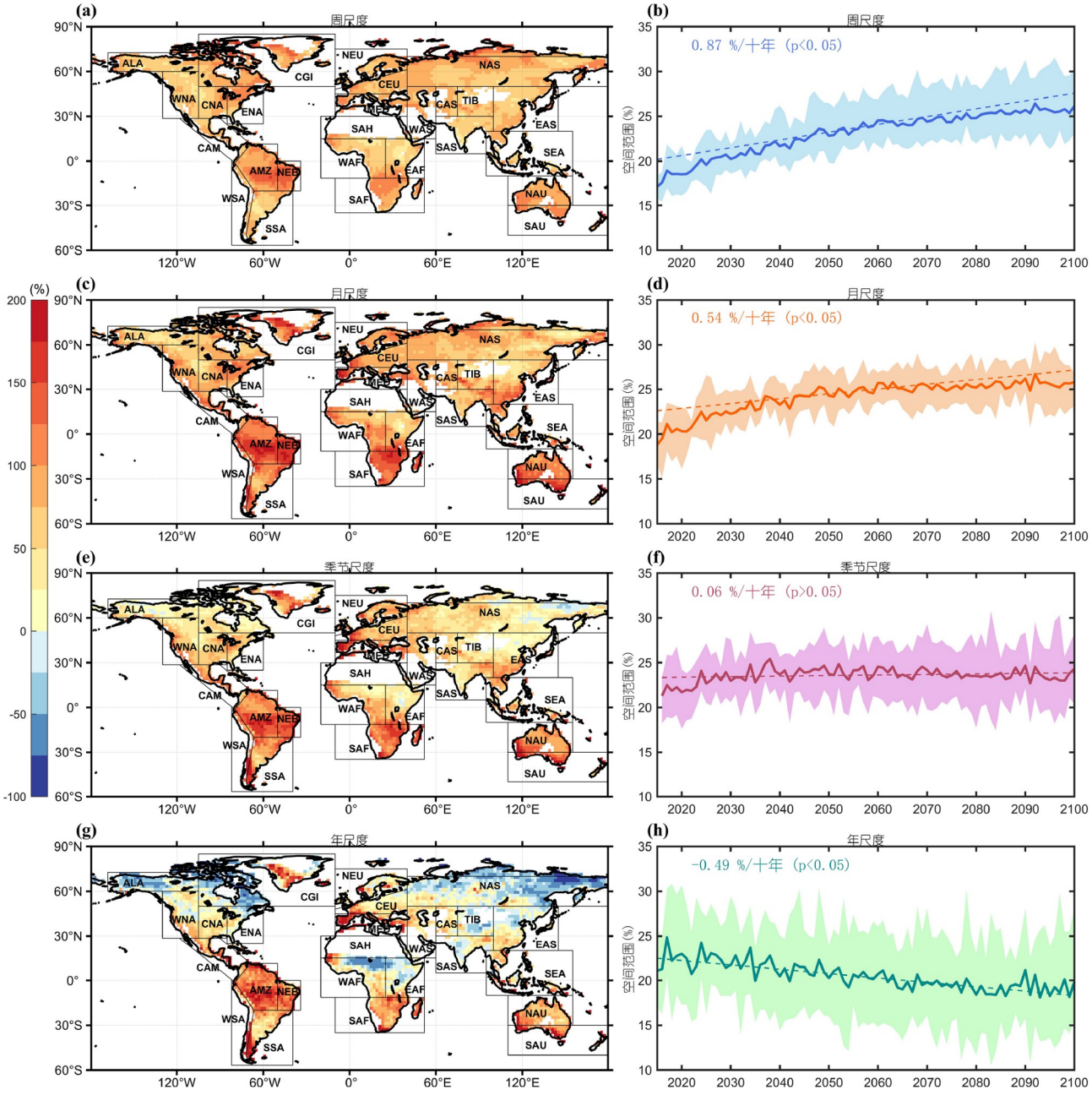


图 4　未来时期全球复合高温干旱事件频率和空间范围的变化

SSP2-4.5情景下2037~2100年与历史1951~2014年全球不同时间尺度复合高温干旱事件频率的相对变化和2015~2100年空间范围的趋势变化. (a, b) 周时间尺度; (c, d) 月时间尺度; (e, f) 季节时间尺度; (g, h) 年时间尺度. 不同时间尺度的趋势单位为%/十年

下降(图4g). 此外, 从2015年到2100年, 全球范围内多个时间尺度复合高温干旱事件空间范围预计会扩大(除年尺度外)(图4b、4d、4f和4h). 周、月、季和年尺度复合高温干旱事件空间范围的趋势分别0.87%/十年、0.54%/十年、0.06%/十年和−0.49%/十年(周、月和年尺度上显著). 年尺度上复合高温干旱事件频率和空间范围的减少可能与未来预估的年降水量增加有关(IPCC, 2021).

图5展示了未来2037~2100年与1951~2014年相比26个区域复合高温干旱事件频率的相对变化排名以及

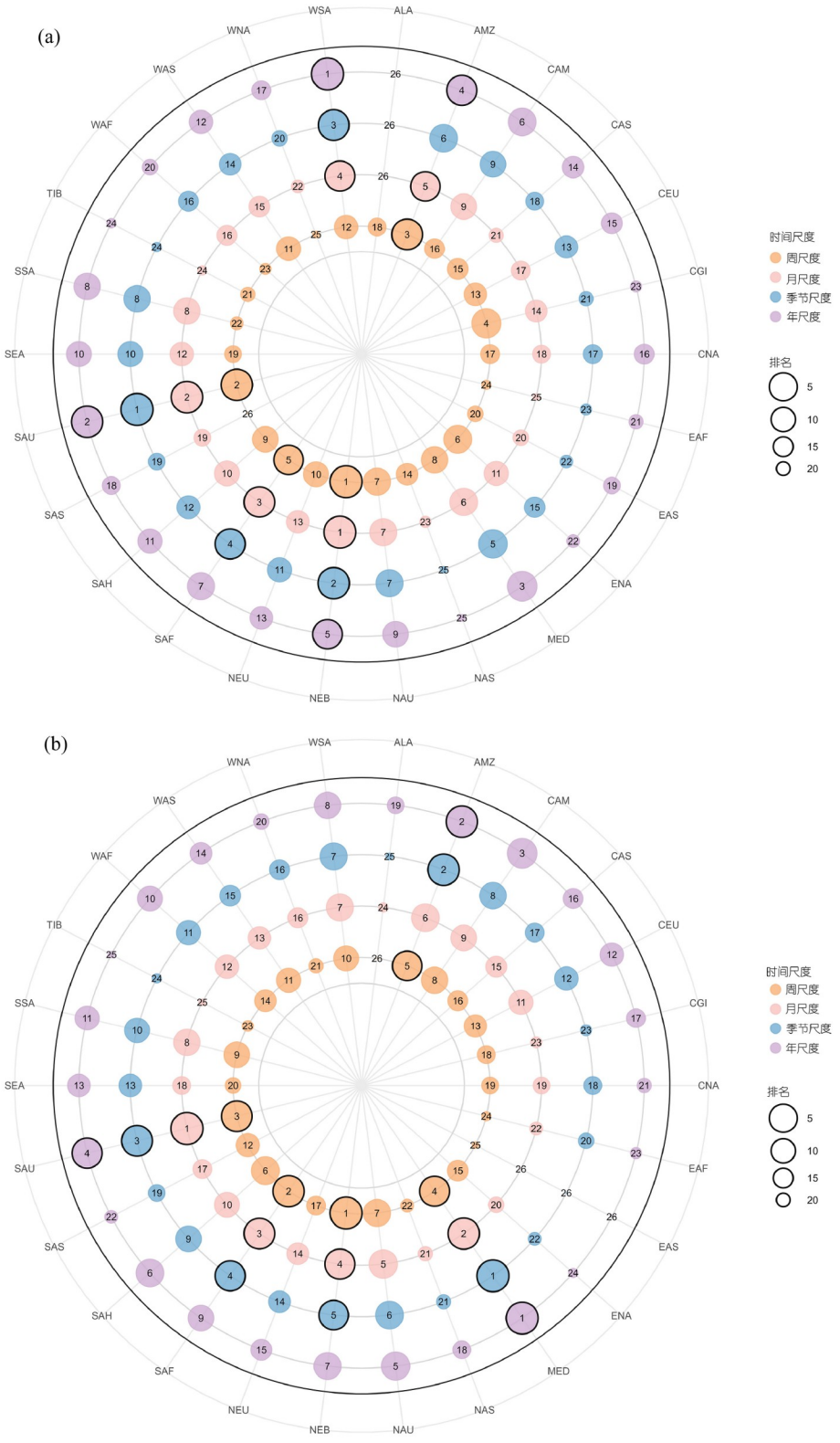


图 5　同图3, 但是为SSP2-4.5情景下全球复合高温干旱事件变化的区域排名

2015~2100年空间范围的趋势排名. 对于亚马逊(AMZ)、MED、巴西东北部(NEB)、南非(SAF)、澳大利亚南部/新西兰(SAU)和南美洲西海岸(WSA)等地区, 复合高温干旱事件的频率或空间范围变化在三个或四个时间尺度上均位列前五, 表明未来复合高温干旱事件在多个时间尺度上一致增加. 同时, 对于某些区域(如SAS), 复合高温干旱事件频率和空间范围变化的排名在不同时间尺度存在较大差异. 这些预估结果的差异表明, 有必要针对不同时间尺度的复合高温干旱事件进行分析, 以制定适合不同地区的应对策略.

通过对比SSP1-2.6和SSP5-8.5情景下复合高温干旱事件的变化(图S8~S13), 发现未来时期三个情景下复合高温干旱事件频率和空间范围总体上都有所增加. 从低排放情景(SSP1-2.6)到高排放情景(SSP5-8.5), 多个时间尺度上的频率和空间范围的增加程度更加显著(除了年尺度). 此外, 基于较高阈值水平(即第10/90百分位数)三个排放情景的结果(图S14~S16)也表明未来不同时间尺度复合高温干旱事件频率和空间范围增加.

4　讨论和结论

本文基于ERA5再分析数据和CMIP6模式模拟数据, 发现1951~2014年期间不同时间尺度的复合高温干旱事件均有所增加, 这主要归因于人为强迫的影响, 并预计未来这一趋势将持续. 尽管人们已认识到复合高温干旱事件的影响, 但本文的结果进一步强调, 在历史和未来时期多个时间尺度的复合高温干旱事件总体呈上升趋势, 且存在区域差异. 这意味着在极端事件(包括复合高温干旱事件)的模式评估、归因、预测/预估和影响研究中, 需要考虑时间尺度效应. 此外, 随着不同时间尺度的影响累积, 复合高温干旱事件可能对其他部门或区域产生级联影响(IPCC, 2022). 因此, 需要对跨时间尺度的极端事件进行持续跟踪, 以评估不同部门和区域复合高温干旱的影响或风险.

复合高温干旱事件的物理机制复杂(如大气环流和陆-气反馈), 其驱动因素随时间尺度的不同而变化. 在日到周时间尺度上, 复合高温干旱事件通常与反气旋环流(如阻塞现象)和土壤湿度-气温反馈有关(Seneviratne等, 2010; Miralles等, 2019). 在季节到年内时间尺度上, 海洋-大气模态(如厄尔尼诺-南方涛动)或陆-气相互作用起着关键作用(Zscheischler等, 2020; Domeisen等, 2023), 而在年际及多年时间尺度上, 缓慢变化的海面温度异常成为重要的驱动因素(Zscheischler等, 2020; Hao等, 2022). 虽然气候内部变率能够调制复合高温干旱事件在不同时间尺度上的变化幅度(Suarez-Gutierrez等, 2023), 但观测到的长期变化趋势在没有人为强迫影响的情况下不太可能发生, 这一点在以前的研究中得到了部分证实(主要是在季节或年时间尺度上)(Diffenbaugh等, 2015; Sarhadi等, 2018; Chiang等, 2022). 本文结果进一步表明, 在历史时期, 人为强迫在周、月、季和年尺度上增加了复合高温干旱事件发生的可能性.

本文中的一些局限性需要进一步探讨. 由于样本量有限, 复合高温干旱事件的变化规律不可避免地存在不确定性, 尤其是在较长的时间尺度上. 这可以通过使用统计或动力学模型模拟来解决, 例如基于天气发生器(Brunner等, 2021)或单一模式初值扰动大样本集合(SMILEs)(Deser等, 2020; Bevacqua等, 2023). 此外, 本文评估了复合高温干旱事件的频率和空间范围, 而复合高温干旱事件的其他特征, 如持续时间、强度、发生时间和重现期, 未来可以进一步研究(Hao等, 2022; Tripathy等, 2023; Fan等, 2024; 周佰铨等, 2024). 在时间尺度方面, 本文关注了周、月、季和年尺度的变化, 在多年或十年的时间尺度也值得关注(Zhang等, 2020; Lesk和Anderson, 2021; Zhao等, 2025). 需要注意的是, 复合高温干旱事件的影响可能并不是由同一时间尺度的高温和干旱事件导致. 本文采用了相同时间尺度的降水和温度来研究复合高温干旱事件, 但不同时间尺度干旱和极端高温组合, 例如炎热夏季和长期干旱年份共同导致树木死亡(Matusick等, 2018; Gazol和Camarero, 2022), 在未来也应进行评估以了解其变化、影响或风险. 另外, 本文没有涉及复合高温干旱事件在不同时间尺度发生和变化的物理机制, 这需要进一步研究.

尽管存在一些局限性, 这项研究揭示了在气候变化背景下, 更温暖和干燥的周、月、季、年可能会成为常态. 未来不同时间尺度复合高温干旱事件增加的结果表明, 针对复合高温干旱事件的适应措施应根据时间尺度进行调整, 以减轻其对不同部门或系统的影响. 例如, 应对较短时间尺度复合高温干旱事件的措施包括加强早期预测预警系统等(Hao等, 2022; Barrio-

pedro等, 2023; Domeisen等, 2023), 而对于应对长期或更长时间尺度的影响, 推动可持续发展政策、促进气候变化减缓的国际合作和鼓励对未来不同排放情景下复合高温干旱事件的科学研究等措施至关重要. 高排放情景的复合高温干旱事件频率或者空间范围更突出的增加趋势凸显了减少温室气体排放的紧迫性. 随着复合高温干旱事件影响和风险评估的改进, 这项研究为实施定制化的适应措施以减轻该事件在不同时间尺度上的负面影响提供了有用信息. 本文结果有助于复合高温干旱事件的预防、准备、响应和恢复工作, 可支持不同地区的相关决策.

致谢 ERA5再分析数据的获取来源为https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home. 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/.

补充材料 本文的补充材料见网络版http://earthcn.sci-china.com. 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.

参考文献

郝增超, 陈阳. 2024. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望. 中国科学: 地球科学. 54: 360–393

孙颖, 王东阡, 张学斌. 2025. 中国气候变化检测归因研究进展. 气候变化研究进展, 21: 153–168

熊少堂, 赵铜铁钢, 郭成超, 田雨, 杨芳, 陈文龙, 陈晓宏. 2024. 我国各大流域复合高温干旱事件变化趋势与归因分析. 中国科学: 地球科学, 54: 83–96

张楷文, 战映旭, 左志燕, 步露蕾, 常美玉, 乔梁. 2025. 陆气耦合加剧未来昼夜同步极端高温风险. 中国科学: 地球科学, 55: 1306–1319

周佰铨, 翟盘茂, 廖圳. 2024. 2022年夏季青藏高原高温干旱复合事件的双变量归因. 中国科学: 地球科学, 54: 2152–2166

Alizadeh M R, Adamowski J, Nikoo M R, AghaKouchak A, Dennison P, Sadegh M. 2020. A century of observations reveals increasing likelihood of continental-scale compound dry-hot extremes. Sci Adv, 6: eaaz4571

Barbero R, Abatzoglou J T, Steel E A, K Larkin N. 2014. Modeling very large-fire occurrences over the continental United States from weather and climate forcing. Environ Res Lett, 9: 124009

Barriopedro D, García-Herrera R, Ordóñez C, Miralles D G, Salcedo-Sanz S. 2023. Heat waves: Physical understanding and scientific challenges. Rev Geophys, 61: e2022RG000780

Bevacqua E, Suarez-Gutierrez L, Jézéquel A, Lehner F, Vrac M, Yiou P, Zscheischler J. 2023. Advancing research on compound weather and climate events via large ensemble model simulations. Nat Commun, 14: 2145

Brunner M I, Gilleland E, Wood A W. 2021. Space-time dependence of compound hot-dry events in the United States: assessment using a multi-site multi-variable weather generator. Earth Syst Dynam, 12: 621–634

Chiang F, Greve P, Mazdiyasni O, Wada Y, AghaKouchak A. 2022. Intensified likelihood of concurrent warm and dry months attributed to anthropogenic climate change. Water Resour Res, 58: e2021WR030411

Christian J I, Basara J B, Hunt E D, Otkin J A, Furtado J C, Mishra V, Xiao X, Randall R M. 2021. Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. Nat Commun, 12: 6330

De Luca P, Donat M G. 2023. Projected changes in hot, dry, and compound hot-dry extremes over global land regions. Geophys Res Lett, 50: e2022GL102493

Deser C, Lehner F, Rodgers K B, Ault T, Delworth T L, DiNezio P N, Fiore A, Frankignoul C, Fyfe J C, Horton D E, Kay J E, Knutti R, Lovenduski N S, Marotzke J, McKinnon K A, Minobe S, Randerson J, Screen J A, Simpson I R, Ting M. 2020. Insights from Earth system model initial-condition large ensembles and future prospects. Nat Clim Chang, 10: 277–286

Diffenbaugh N S, Swain D L, Touma D. 2015. Anthropogenic warming has increased drought risk in California. Proc Natl Acad Sci USA, 112: 3931–3936

Domeisen D I V, Eltahir E A B, Fischer E M, Knutti R, Perkins-Kirkpatrick S E, Schär C, Seneviratne S I, Weisheimer A, Wernli H. 2023. Prediction and projection of heatwaves. Nat Rev Earth Environ, 4: 36–50

Fan X, Zhang Y, Shi K, Peng J, Liu Y, Zhou Y, Liu Y, Zhu Q, Song C, Wan R, Zhao X, Woolway R I. 2024. Surging compound drought-heatwaves underrated in global soils. Proc Natl Acad Sci USA, 121: e2410294121

Gazol A, Camarero J J. 2022. Compound climate events increase tree drought mortality across European forests. Sci Total Environ, 816: 151604

Hammond W M, Williams A P, Abatzoglou J T, Adams H D, Klein T, López R, Sáenz-Romero C, Hartmann H, Breshears D D, Allen C D. 2022. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. Nat Commun, 13: 1761

Hao Z, Hao F, Xia Y, Feng S, Sun C, Zhang X, Fu Y, Hao Y, Zhang Y, Meng Y. 2022. Compound droughts and hot extremes: Character-

istics, drivers, changes, and impacts. Earth-Sci Rev, 235: 104241

Hao Z, Chen Y, Feng S, Liao Z, An N, Li P. 2023. The 2022 Sichuan-Chongqing spatio-temporally compound extremes: A bitter taste of novel hazards. Sci Bull, 68: 1337–1339

IPCC. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: Field C B, Barros V, T F Stocker, eds. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pirani A, eds. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. In: Pörtner H, Roberts D C, Tignor M M B, eds. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

Lesk C, Anderson W. 2021. Decadal variability modulates trends in concurrent heat and drought over global croplands. Environ Res Lett, 16: 055024

Lesk C, Anderson W, Rigden A, Coast O, Jägermeyr J, McDermid S, Davis K F, Konar M. 2022. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. Nat Rev Earth Environ, 3: 872–889

Matusick G, Ruthrof K X, Kala J, Brouwers N C, Breshears D D, Hardy G E S J. 2018. Chronic historical drought legacy exacerbates tree mortality and crown dieback during acute heatwave-compounded drought. Environ Res Lett, 13: 095002

Miralles D G, Gentine P, Seneviratne S I, Teuling A J. 2019. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: State of the science and current challenges. Ann New York Acad Sci, 1436: 19–35

Mukherjee S, Mishra A K, Zscheischler J, Entekhabi D. 2023. Interaction between dry and hot extremes at a global scale using a cascade modeling framework. Nat Commun, 14: 277

Pendergrass A G, Meehl G A, Pulwarty R, Hobbins M, Hoell A, AghaKouchak A, Bonfils C J W, Gallant A J E, Hoerling M, Hoffmann D, Kaatz L, Lehner F, Llewellyn D, Mote P, Neale R B, Overpeck J T, Sheffield A, Stahl K, Svoboda M, Wheeler M C, Wood A W, Woodhouse C A. 2020. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. Nat Clim Chang, 10: 191–199

Qing Y, Wang S, Ancell B C, Yang Z L. 2022. Accelerating flash droughts induced by the joint influence of soil moisture depletion and atmospheric aridity. Nat Commun, 13: 1139

Raymond C, Horton R M, Zscheischler J, Martius O, AghaKouchak A, Balch J, Bowen S G, Camargo S J, Hess J, Kornhuber K, Oppenheimer M, Ruane A C, Wahl T, White K. 2020. Understanding and managing connected extreme events. Nat Clim Chang, 10: 611–621

Ridder N N, Pitman A J, Westra S, Ukkola A, Do H X, Bador M, Hirsch A L, Evans J P, Di Luca A, Zscheischler J. 2020. Global hotspots for the occurrence of compound events. Nat Commun, 11: 5956

Sarhadi A, Ausín M C, Wiper M P, Touma D, Diffenbaugh N S. 2018. Multidimensional risk in a nonstationary climate: Joint probability of increasingly severe warm and dry conditions. Sci Adv, 4: eaau3487

Schumacher D L, Zachariah M, Otto F, Barnes C, Philip S, Kew S, Vahlberg M, Singh R, Heinrich D, Arrighi J, van Aalst M, Hauser M, Hirschi M, Bessenbacher V, Gudmundsson L, Beaudoing H K, Rodell M, Li S, Yang W, Vecchi G A, Harrington L J, Lehner F, Balsamo G, Seneviratne S I. 2024. Detecting the human fingerprint in the summer 2022 western-central European soil drought. Earth Syst Dynam, 15: 131–154

Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Sci Rev, 99: 125–161

Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. 2012. Little change in global drought over the past 60 years. Nature, 491: 435–438

Su Y, Kern J D, Reed P M, Characklis G W. 2020. Compound hydrometeorological extremes across multiple timescales drive volatility in California electricity market prices and emissions. Appl Energy, 276: 115541

Suarez-Gutierrez L, Müller W A, Marotzke J. 2023. Extreme heat and drought typical of an end-of-century climate could occur over Europe soon and repeatedly. Commun Earth Environ, 4: 415

Tripathy K P, Mukherjee S, Mishra A K, Mann M E, Williams A P. 2023. Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events. Proc Natl Acad Sci USA, 120: e2219825120

van Vliet M T H, Thorslund J, Strokal M, Hofstra N, Flörke M, Ehalt Macedo H, Nkwasa A, Tang T, Kaushal S S, Kumar R, van Griensven A, Bouwman L, Mosley L M. 2023. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. Nat Rev Earth Environ, 4: 687–702

Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Beguería S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proc

Natl Acad Sci USA, 110: 52–57

Wang L, Yuan X. 2018. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought. Adv Atmos Sci, 35: 1478–1490

Yao Y, Fu B, Liu Y, Zhang Y, Ding J, Li Y, Zhou S, Song J, Wang S, Li C, Zhao W. 2024. Compound hot-dry events greatly prolong the recovery time of dryland ecosystems. Natl Sci Rev, 11: nwae274

Yuan X, Wang Y, Ji P, Wu P, Sheffield J, Otkin J A. 2023. A global transition to flash droughts under climate change. Science, 380: 187–191

Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, Kim H, Wang S Y S, Linderholm H W, Fang K, Wu X, Chen D. 2020. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. Science, 370: 1095–1099

Zhao X, Hao Z, Huang R, Feng A, Singh V P. 2025. Temporally compounding droughts at the global scale: Distribution, propagation, and projection. Glob Planet Change, 253: 104905

Zhuang Y, Fu R, Lisonbee J, Sheffield A M, Parker B A, Deheza G. 2024. Anthropogenic warming has ushered in an era of temperature-dominated droughts in the western United States. Sci Adv, 10: eadn9389

Zscheischler J, Martius O, Westra S, Bevacqua E, Raymond C, Horton R M, van den Hurk B, AghaKouchak A, Jézéquel A, Mahecha M D, Maraun D, Ramos A M, Ridder N N, Thiery W, Vignotto E. 2020. A typology of compound weather and climate events. Nat Rev Earth Environ, 1: 333–347

(责任编委: 左志燕)