



评述

地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望

郝增超¹, 陈阳^{2*}

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国家重点实验室, 北京 100081

* 通讯作者, E-mail: ychen@cma.gov.cn

收稿日期: 2023-03-31; 收修改稿日期: 2023-08-09; 接受日期: 2023-10-08; 网络版发表日期: 2024-01-04

国家自然科学基金项目(批准号: 42271024)和中国气象科学研究院科技发展基金项目(编号: 2023KJ015)资助

摘要 复合极端事件对社会、经济和生态所造成的影响相较于各事件独立发生时更为严重, 这类事件已成为近10年来地球科学领域的研究热点之一. 气候变化背景下许多复合极端事件频发、强发, 极端事件间的组合形式也呈现出新特点, 对科学研究和防灾应对提出了更高的要求 and 更严峻的挑战. 本文在地球系统多圈层相互作用的视角下系统梳理了多类高影响复合极端事件的定义、机理、变化、归因、预估等方面的研究现状; 探讨了复合极端事件研究在数据需求、机理分析、模型模拟、归因预估、风险评估和适应应对等方面的挑战及可能的解决方案; 进一步展望了该领域未来可能的发展趋势和急需多学科、多部门联合攻关的重点研究内容. 在气候变化重塑极端事件类型的背景下, 科学研究、防灾减灾和应对气候变化工作均需从传统单一极端事件视角向复合极端事件视角转变, 对研究对象、思路和方法进行全方位的革新. 本文对复合极端事件研究领域的发展和多学科领域的交叉合作将起到一定的促进作用.

关键词 极端事件, 复合极端事件, 气候变化及风险, 多圈层相互作用

1 引言

极端天气气候事件是自然灾害的驱动因子之一, 对自然生态系统和社会经济造成巨大破坏, 一直以来都是气象、水文、海洋、生态、经济等多学科的研究重点. 在全球变暖背景下, 热浪、强降水、干旱等极端事件呈现出增多、变强的趋势. 与此同时, 极端事件之间的时空联系也变得更加紧密, 组成并发或者继发的复合极端事件(后文简称复合事件, IPCC,

2012; Hao等, 2013; Leonard等, 2014; Zscheischler等, 2018). 复合事件造成的影响更为严重, 发生机理和变化规律也更为复杂, 已成为气候科学及相关领域的前沿科学问题和重大科学挑战之一, 多个国家和国际组织将其列为防灾减灾和应对气候变化的工作重点. 中国的决策部门和科学界也意识到了应对新型极端事件的迫切性和必要性: 《“十四五”国家综合防灾减灾规划》明确指出近年来中国多灾种集聚特征日益凸显; 《国家适应气候变化战略2035》强调亟须发展复

中文引用格式: 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(2): 360–393, doi: [10.1360/SSTe-2023-0060](https://doi.org/10.1360/SSTe-2023-0060)

英文引用格式: Hao Z, Chen Y. 2024. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the Earth System perspective. Science China Earth Sciences, 67(2): 343–374, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1201-y>

合型灾害预测预警技术, 提升气候风险管理和综合防灾减灾能力。

不同学科关注复合事件的侧重点不同, 给出了差异化和多样化的事件定义。在气候学领域, 2012年政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告中首次正式给出了复合事件的明确定义(IPCC, 2012): “(1) 同时或相继发生的两个或两个以上极端事件, (2) 极端事件与能够放大其影响的背景条件的组合, 或(3) 各事件本身不极端, 但组合后的事件在统计意义上或影响方面极端。”组成复合事件的各分量可以是同一类事件(聚集发生)也可以是不同类型的极端事件。后续研究主要从变量间相关性和复合事件对影响的放大效应等角度对该定义进行调整和优化(Leonard等, 2014; Zscheischler等, 2018)。Zscheischler等(2018)将定义泛化为“导致社会或环境风险的多种驱动因素和/或风险的组合”, 并强调了各分量之间不一定存在物理或统计上的依存关系, 该定义最终被IPCC第六次评估报告(AR6)所采用(IPCC, 2021)。依据成灾机理, 复合事件可大致可归为“先决条件”、“多变量”、“时间复合”和“空间复合”四类(Zscheischler等, 2020), 它们之间还可能进一步交叉、重叠组成更为复杂的“时-空复合事件”(Reichstein等, 2022; Hao等, 2023)。

其他领域也从不同的角度关注极端事件或者灾种间的叠加, 有时还会进一步考虑自然灾害与战争、疾病大流行、金融危机等黑天鹅事件叠加形成的系统性风险提出类似的概念, 常用“同时”、“级联”、“累积”、“复杂”等词语描述(Gill和Malamud, 2014; Tilloy等, 2019; Kruczkiewicz等, 2021; IPCC, 2022; Drakes和Tate, 2022)。本文中复合事件的定义与IPCC AR6保持一致(IPCC, 2021), 即变量(单个或多个)、时序、空间同步性等要素复合对自然和社会系统带来重大影响或者风险的事件(Hao, 2022)。目前, 复合事件研究已扩展到了地球科学的多个圈层。如一些学者发现陆地干旱/热浪与海洋热浪并发事件源于次季节尺度的海-陆-气相互作用(Herrera-Estrada和Diffenbaugh, 2020; Barriopedro等, 2023), 又如2022年夏季川渝地区高温-干旱-林火-洪涝复合事件中更是涉及大气、陆面、植被、水文等多圈层过程。复杂的多圈层相互作用对复合事件的科学研究和风险管理提出了更高的要求(Hao等, 2023)。

在过去的近十年间, 复合事件研究在驱动因素、

观测事实、检测归因、未来预估及影响评估等方面取得了明显进展。但相较于各类极端事件内容丰富的综述论文, 针对复合事件的综述仍十分匮乏, 多侧重于对某特定类型或特定区域的回顾(Messori等, 2021; Gruber等, 2021; Gissing等, 2022; Hao等, 2022; Libonati等, 2022)。目前仍缺乏地球系统多圈层相互作用视角下的包含事件定义及影响、机理、变化与归因、预估、不足和挑战等方面的全貌性总结和展望。该综述将首先简介复合事件研究方法; 其次, 基于研究相对丰富的、认识较为清晰的大气、水文、海洋复合事件, 系统总结当前的科学认识, 并讨论事件中可能涉及的多圈层相互作用过程; 最后, 探讨复合事件研究面临的挑战以及未来可能的发展方向。由于篇幅限制和作者知识的局限性, 本文的引用难免存在挂一漏万的缺陷。

2 复合事件研究方法简述

复合事件在方法学上与单一变量极端事件的最大差别在于需要考虑多变量间时-空依存关系的重要作用, 这就要求方法设计在多维空间(Multidimensional)展开, 且需要更大的样本量。Copula多元分布模型是多变量复合事件概率估计的最常用方法(Hao等, 2022); 时间复合事件可用Ripley's K函数(Barton等, 2016)、事件巧合率分析(Donges等, 2016)以及Cox回归方程(Mallakpour等, 2017)等方法拟合并估计其概率; 非均一隐式马尔科夫链(Hughes等, 1999)和复杂网络算法(Boers等, 2019)可用于估计空间复合事件的概率。对于复合事件机理研究, 可以基于逻辑回归模型、泊松回归模型等统计方法, 也可以通过数值模型(因子控制试验或敏感性试验)来量化单个驱动因子和多因子协同作用(Wehrli等, 2019; Schumacher等, 2022)。对于涉及自然系统与社会系统相互作用的复合事件, 可以采用社会-物理耦合模型(包括适应性路径、故事线与情景预设、压力测试等)评估在既定假设下极低概率事件未来发生的可能性、强度及影响(Raymond等, 2020a; Rising等, 2022)。

3 大气科学领域复合事件

由于环流异常、辐射强迫等大气动力和热力过

程, 热浪、低温、干旱、高湿、强风、大雨等事件可能以某种形式聚集发生. 本节主要介绍以大气圈层中变量为主组成的复合事件, 包括复合高温、干旱高温、湿热、干冷和湿冷事件, 以及复合风雨事件等, 其组合方式和涉及的圈层如图1所示.

3.1 复合高温事件

3.1.1 定义及影响

复合高温事件通常定义为在同一日内白天和夜间接连发生极端高温现象, 是一类典型的由同类事件集聚构成的时间复合事件(Chen和Zhai, 2017a). 当白天高温在夜间得不到缓解时, 造成的健康负担更重, 致死率更高(Wang J等, 2021; He等, 2022). 高温持续至夜间还会使得山火更难扑灭, 这是因为夜间温度下降-可燃物湿度上升的特点为控制山火蔓延提供关键窗口期(Balch等, 2022); 火灾造成的空气污染可进一步加剧热浪的健康影响(Vitolo等, 2019). 该类事件还可能对农业、生态系统以及电力部门等产生负面影响, 但仍待量化.

3.1.2 发生机制

日间高温一般与反气旋环流形势有关(盛行下沉气流, 空气绝热增温), 伴随着向下短波辐射增加(云量减少、水汽减少); 而夜间高温主要与云和对流层低层异常充足的水汽造成的向下长波辐射增加有关. 鉴于这些已有认识, 有研究从环流和辐射相结合的角度认为这些条件的组合可能导致复合高温(Li等, 2021; Luo M等, 2022a). 实际上这样简单地整合并无法全面解释复合高温事件的发生和延续: 有利于暖日发生的晴空天气会增强夜间地表的辐射冷却, 不利于暖夜的发生; 有利于暖夜发生的偏湿条件削弱太阳辐射, 不利于白天高温的出现(安宁和左志燕, 2021). 陆-气相互作用及其与边界层过程的耦合提供了另一种可能的物理解

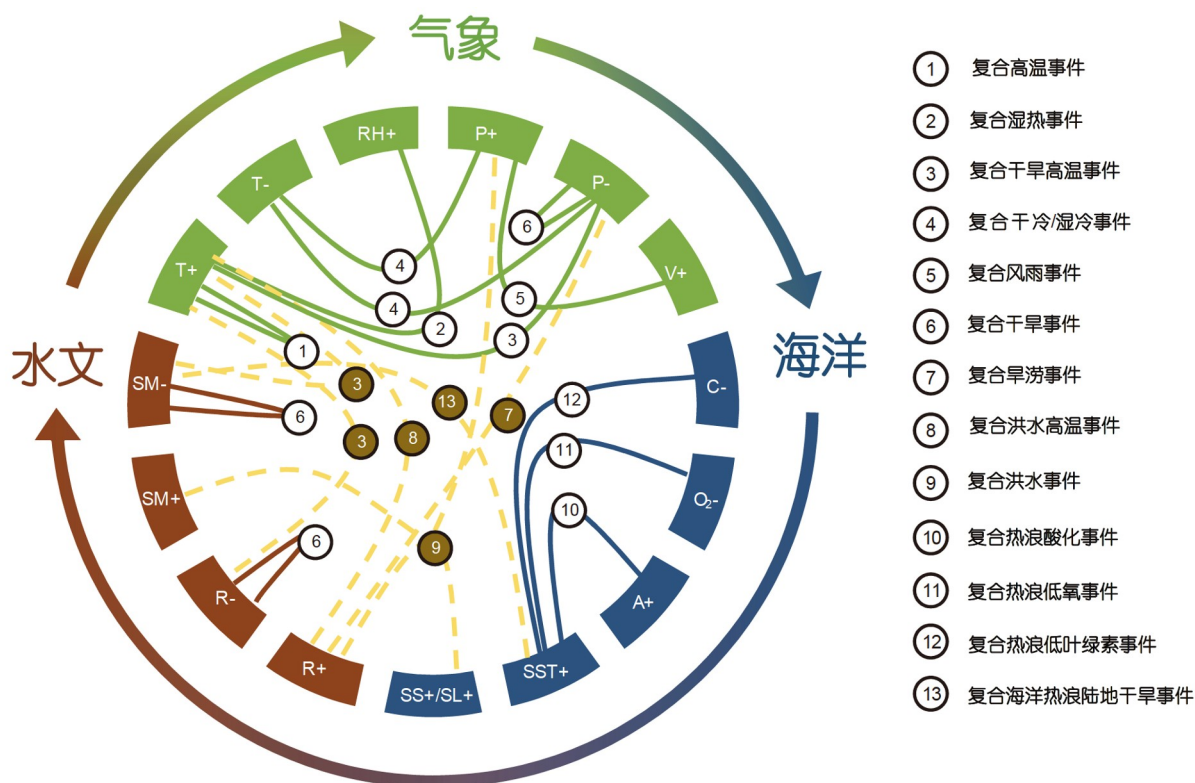


图1 气象、水文、海洋领域典型复合事件的组成示意图

P, 降水; T, 气温; RH, 相对湿度; V, 风速; SM, 土壤水含量; R, 径流; SS, 风暴潮; SL, 海平面; SST, 海表温度; A, 酸性; O₂, 含氧量; C, 叶绿素. 图中“+”代表正异常, “-”代表负异常. 不同学科、不同领域定义干旱和洪涝时可能考虑降水、土壤水含量或径流等多种变量. 每个数字序号代表一类文中总结的复合事件, 其包含的变量由线连接(涉及多个领域的复合事件变量由虚线连接), 各类事件名称见图注

释: 白天高温使得大气边界层高度升高, 促进其与自由大气之间的暖-干空气夹卷混合和边界层热量的积累和延续; 平流和夹卷过程又增加了大气需水量, 下垫面进一步变干, 致使较强的陆气能量交换一直持续至夜间, 更高效地加热夜间浅薄的残留层(Black等, 2004). 在较为湿润的地区, 白天下垫面受热后的蒸(散)发加剧有利于水汽在边界层中积累(Ford和Schoof, 2017), 有利于在下午至傍晚形成低云(Xu等, 2022), 削弱夜间的辐射冷却. 因此, 复合高温是大气-水循环(平流和蒸发)-陆面过程相互作用的产物, 但大尺度环流-区域陆气交互-局地边界层夹卷过程的综合天气学概念模型仍有待建立.

3.1.3 历史变化、归因及未来预估

复合高温在全球许多区域呈现快速增长趋势. 如中国区域的复合高温事件频率增加、持续时间变长以及影响面积扩大(Chen和Li, 2017; Chen和Zhai, 2017a; Ma和Yuan, 2021). 而在灌溉强度较强的区域, 如中国华北和北美西部, 此类事件变化幅度很小甚至可能出现显著减少趋势(Wang J等, 2020a). 城市地区的复合高温事件增长速度快于乡村地区(安宁和左志燕, 2021; Liao W等, 2021; Ma和Yuan, 2021; Shi Z等, 2021; Wu S等, 2021b), 城市面积扩张造成的城市热岛效应贡献了这一变化的30%左右(Wang J等, 2021). 就北半球尺度平均而言, 1960 年到 2012 年期间复合高温事件的频率增长趋势约为1.03天/10年, 强度趋势为0.28°C/10年(Wang J等, 2020a), 其中人为温室气体排放是最主要的贡献因子.

未来复合高温事件在全球多个地区可能进一步增加, 包括印度(Mukherjee和Mishra, 2018)、中国(Su和Dong, 2019; Wang J等, 2020b; Xie等, 2022)、瑞士(Vaghefi等, 2022)及全球/半球尺度(Chen Y等, 2019; Wang J等, 2021; Ma等, 2022). 预计到2100年, 北半球夏季复合高温事件的发生频率将增加8倍(与2012年相比), 成为北半球夏季最常见的高温类型(Wang J等, 2020a), 导致多个地区暴露于此类事件的人口增长数倍(Ma和Yuan, 2021; Xie等, 2022).

3.2 复合湿热事件

3.2.1 定义及影响

复合湿热事件一般定义为较高的相对湿度与高温

同时发生的事件, 是一类典型的各事件本身可能不极端但组合起来造成极端影响的多变量复合事件. 人体舒适度取决于气温、相对湿度、风速、辐射等变量. 与单纯高温相比, 多个变量的复合对健康的负面影响可能更大(Matthews, 2018; Wang P等, 2021): 人体可通过出汗等方式有效降低体表温度, 但较高的湿度会阻碍汗液蒸发, 从而使人体不舒适性加剧最终导致疾病甚至死亡. 湿度-温度相结合的指标也通常称为热应力指数, 考虑不同的湿-温结合形式、指数中温度和湿度的不同权重以及指数所适用的领域和环境, 常用的热应力指数主要包括表观温度、湿球温度或者湿球黑球温度、酷热指数等. 上述指标大多有明确的关键阈值表征其对人体健康和户外活动的影响程度. 如湿球温度超过31°C, 户外劳作将变得困难; 如超过35°C, 汗液蒸发降温机制将失效, 加剧死亡风险.

3.2.2 发生机制

温度和湿度之间存在基本的物理联系, 即温度升高, 空气中能容纳的水汽越多, 饱和水汽压增加, 相对湿度越小. 从天气学成因来说, 湿热条件一般与来自洋面上的大尺度水汽输送有关(Buzan和Huber, 2020; Ha等, 2022; Luo M等, 2022b). 由于该复合事件指标较多, 基于不同指标识别的极端湿热事件机理也略有不同. 如对于湿球温度极端事件, 一些学者分析了其与局地水分效应以及大尺度环流的关系(Lin和Yuan, 2022; Speizer等, 2022), 研究表明极端湿球温度天数在沿海地区的频率更高, 海温变化或者ENSO等因子与极端湿球温度天数密切相关(Speizer等, 2022).

复合湿热环境还与陆表状况密切相关. 一方面土壤水分缺失可增强陆气相互作用进而造成升温, 另一方面土壤水分缺失导致湿度降低(Wouters等, 2022), 二者对热应力的净影响有待进一步评估. 灌溉以及植树造林等措施可以增加蒸发从而成为应对高温和干旱的重要手段(Thierry等, 2020). 然而, 这些措施同时增加了空气的相对湿度, 有可能增加极端湿热事件的发生频次和强度, 这在一些严重依赖灌溉的地区和未来更暖的时段尤为明显(Kang和Eltahir, 2018; Mishra等, 2020; Wouters等, 2022). 上述机理解释表明复合湿热事件的发生主要涉及大气动力过程、海-气和陆-气相互作用等热力过程.

3.2.3 历史变化、归因及未来预估

在过去几十年间, 全球多数地区的复合湿热事件呈现显著增加趋势(Li D等, 2020; Raymond等, 2020b; Rogers等, 2021; Huang等, 2022; Speizer等, 2022), 其中气温升高是主因。归因分析也表明温室气体强迫造成的平均变暖对复合湿热事件增长贡献最大(Li等, 2017)。但具体到区域尺度的归因, 灌溉、土地利用改变、气溶胶等区域特有强迫的贡献及其与大尺度强迫的比较仍有待量化。大量研究针对城市地区复合湿热事件开展趋势分析, 并量化城市化对复合湿热事件增长的贡献。如中国城区的复合湿热事件频率及强度的增长一般快于郊区, 意味着城市“热岛”和“干岛”效应对观测到的复合湿热事件变化的净贡献为正(Luo和Lau, 2018; Wang Y等, 2019; Luo和Lau, 2021; Wang P等, 2021)。但这种净效应在处于较为干燥和中等湿润气候态的城市中也可能转为负(Zhang K等, 2023)。由于温度持续升高以及城市化的发展, 未来复合湿热事件将呈增加趋势(Im等, 2017)。进一步考虑人口的增长, 未来全球暴露于复合湿热事件的人口也将增加(Freychet等, 2022; Li D等, 2020), 所造成的劳动力损失将对经济造成不可忽视的影响(Borg等, 2021)。

尽管目前研究关于复合湿热事件增长的定性结论较为一致, 但所量化的增长幅度很有可能被低估了, 这主要是由于所使用的相对湿度数据(观测和再分析, 包括站点观测、ERA-5、CN05.1和HadISDH等)的严重非均一性造成的。以中国地区为例, 由于人工观测向自动观测的转变(集中发生在2000~2005年)导致前后两个时段的数据出现明显的(可能多个)断点, 自动观测的湿度普遍低于人工观测值, 造成使用未均一化的原始观测数据给出夸大的变干趋势, 导致对复合湿热事件频次和强度增长的显著低估。这很有可能是一个被忽视的全球现象, 并可能经由模式评估、订正和约束等方式传导并放大至预估时段, 亟待引起足够重视(Li等, 2023)。

3.3 复合干旱高温事件

3.3.1 定义及影响

复合干旱高温事件一般定义为同一地点高温与干旱同时发生(也可称为复合高温干旱事件或者热旱事件), 是一种典型的多变量复合事件。两种极端事件均

可能对农业、生态系统、能源、水资源、野火、人体健康造成严重影响, 二者叠加发生会使得这些领域多重承压。由于干旱类型多样(包括气象、农业、水文以及社会经济干旱等类型), 定义复合干旱高温事件的指标也不同, 如大气科学领域一般基于气象干旱(降水)和高温来定义, 而水文科学领域则考虑多个干旱类型, 如农业(土壤水)、水文干旱(径流量)等(Feng等, 2023)。复合干旱高温事件的研究相对较多, 相关综述总结也较为丰富, 详细内容可参考(Hao等, 2022), 本节仅作简要介绍。

3.3.2 发生机制

干旱和高温事件存在一定的内在联系, 其背后共性的驱动因子包括反气旋环流、陆-气相互作用, 以及大尺度海温异常模态激发出的大气遥相关等。具体而言, 反气旋环流引起的下沉绝热增温、云量和降水减少、入射辐射增多是导致二者复合的直接物理原因(Zscheischler和Seneviratne, 2017; Wu X等, 2021b)。同时, 土壤水分缺失导致蒸发减少, 感热增加, 增强下垫面对大气的加热效率, 这种干对热的反馈过程仅需要1~2天即可完成(Mukherjee等, 2023); 而高温促进蒸发, 进一步导致土壤水分减少, 上述反馈使复合干旱高温事件持续发展(Miralles等, 2019)。其他一些陆面条件, 包括海冰和雪盖消退等(Li等, 2018; Yao等, 2022), 也可能引发复合干旱高温事件。可见, 复合干旱高温事件主要涉及大气动力-热力过程以及陆-气反馈过程。

3.3.3 历史变化、归因及未来预估

已有大量研究对复合干旱高温事件不同特征(持续时间、强度、开始时间等)在全球及国家/区域尺度的历史变化进行了评估, 揭示了这类复合事件总体上呈现增加的趋势(Hao等, 2022)。复合干旱高温事件的归因研究也相对丰富, 一些学者探究了观测到的事件变化与环流、陆气反馈、遥相关因子以及人类活动的关系(Mukherjee等, 2022; Wu X等, 2022; Zhang等, 2022; Zscheischler和Lehner, 2022)。值得指出的是, 模式间较为一致的复合干旱高温事件增多变强主要是由模拟的极端高温事件大幅增加所主导, 更多地反映了一般性变暖的普遍影响(即平均态)。如果采用时间滑动的非静态气候态来识别干旱和高温事件以更加突出高温和干旱之间反馈或耦合强度的变化(即变率), 其

增长幅度要较之使用固定历史时期作为气候态识别出的事件小得多(Bevacqua等, 2022; Stevenson等, 2022). 基于不同气候模式的预估结果表明未来全球复合干旱高温事件将呈增加趋势(Hao等, 2022; Feng等, 2023; Jha等, 2023).

3.4 复合干冷/湿冷事件

3.4.1 定义及影响

复合干冷事件一般表现为较为干燥的气象条件和低温事件叠加发生, 有时还会伴有大风, 形成风寒效应. 冬季中国北方寒潮天气的本质就是复合干冷事件, 严重影响人体健康和社会经济发展(Du等, 2020). 同时, 复合干冷事件还会造成严重的生态影响, 如发生在中高纬度地区的复合干冷事件会对植被生产力造成负面的协同效应(Li J等, 2022), 同时会在一些沙源地造成严重沙尘暴的爆发, 进一步影响局地 and 下游地区的空气质量(Yin等, 2022).

复合湿冷事件一般定义为降水(雨、雪)偏多和极端低温同时发生的事件. 当低温天气与降水一起出现时, 容易导致断电、道路和电线结冰、霜冻害或冰冻害等, 对人体健康、交通出行、农业生产都会造成严重的影响(Houston和Changnon, 2007; Llasat等, 2014; Qian等, 2014; Vajda等, 2014; Seeherman和Liu, 2015; Markantonis等, 2022). 在冬季, 冻雨、降雪等天气过程常伴随着复合湿冷事件(De Luca等, 2020a, 2020b). 例如2008年初中国南方地区出现大范围的“低温雨雪冰冻”复合事件严重影响了交通运输、电力设备、农业生产、群众生活, 表明当时的基础设施设计未能充分考虑此类复合事件对影响的放大效应. 另外, 复合湿冷事件对植被或者生态系统生产力也会产生负面影响(Chen W等, 2019; Vogel等, 2021; Li J等, 2022).

3.4.2 发生机制

复合干冷事件主要是由大气动力过程驱动, 常与中高纬度冷空气向南快速推进有关. 如 Stewart等(2012)研究表明加拿大大草原地区复合干冷事件主要由来自北方的冷平流导致. 2017~2018年冬季北京经历了一场破纪录的长历时干旱, 期间正值拉尼娜和北极涛动负相位, 异常大气环流使寒潮席卷华北地区, 在水汽输送严重不足条件下, 形成了一次典型的干冷事件(Du等, 2020).

冬季的复合湿冷事件同样与大气环流异常紧密相关, 常伴随着活跃的低压天气系统及冷暖空气的持续交汇(如锋面系统), 也包括了水汽输送和相变过程(翟盘茂等, 2017). 例如, 在地中海东部地区塞浦路斯低压常带来寒潮和强降水, 导致复合湿冷事件(De Luca等, 2020a; Hochman等, 2020). 上述提到的2008年初中国低温雨雪冰冻发生在拉尼娜背景下, 欧亚地区持续的异常环流条件使冷暖气流在中国南方地区交汇, 使对流层中低层形成强烈的逆温层和局地经向环流支(Deng等, 2012).

3.4.3 历史变化、归因及未来预估

大部分复合干冷事件的演变研究与其他复合事件同时开展. 在全球和区域尺度上, 自20世纪50年代以来, 全球大部分地区观测到复合干冷事件减少的趋势(Beniston, 2009; Hao等, 2013), 但在局部地区有一定的增加趋势, 如在青藏高原等少数地区(Zhou和Liu, 2018), 但当地稀缺且质量欠佳的观测数据也可能是造成这种增长趋势的重要原因之一.

全球变暖背景下, 尽管低温天气明显减少, 伴随低温的强降水(降雪)天气却未必减少, 存在较大的区域差异(De Luca等, 2020a; Hochman等, 2020). 自20世纪50年代以来, 复合湿冷事件在全球大部分地区呈现减少趋势(Wu等, 2019; Guntu和Agarwal, 2021), 但美国东部和中国部分地区有增加趋势(Hao等, 2013; Wu Y等, 2021).

在未来持续升温的背景下, 复合干冷和湿冷事件总体呈现减少趋势. 基于CMIP5或者CMIP6的模拟结果表明未来复合干冷事件在全球范围内会减少(Wu Y等, 2021), 区域尺度上也以减少为主(Beniston, 2009). 但在特定区域和特定季节复合干冷事件(如青海-西藏地区, 冬季)和复合湿冷事件(欧洲部分地区和中国东部, 冬季)未来发生频率也可能增加(Sedlmeier等, 2016; Zhou和Liu, 2018).

虽然目前对复合干冷和湿冷事件频次以减少为主的变化特征认识较为一致, 但对这两类与冷事件有关的复合事件的强度变化认识仍存在较大争议. 近年来虽然打破纪录的暖事件频频发生但同时破纪录的冷事件也似乎越发频繁地在世界各地出现, 如在亚洲(Ma和Zhu, 2019)和美国(Bolinger等, 2022), 其背后的物理机制是否与北极放大效应有关尚无定论(IPCC, 2021);

与此同时, 由变暖造成的大气持水能力的增加以及海洋蒸发加剧造成的水汽输送增强, 冬季降雨甚至降雪都可能出现增强甚至破纪录的情况(Trenberth等, 2015). 尽管基于温度-降水(湿度)的联合分布来定量估计该二类复合事件的强度(重现期)及其变化在理论上和实践上均不存在障碍, 但目前仍很少见到这方面的工作.

3.5 复合风雨事件

3.5.1 定义及影响

复合风雨一般定义为同时同地发生的强风和强降雨事件, 属于多变量复合事件的一种. 大风是一种典型的致灾性天气, 严重威胁基础设施安全, 造成经济损失和人员伤亡; 风雨相伴将进一步危及陆面、航海及空中交通安全、加速电网以及房屋的损坏、加大救灾难度(Martius等, 2016; Li D等, 2022). 另外, 对于沿海或者三角洲地区, 当风暴和强降水同时发生时, 导致风暴潮、强海浪与暴雨洪涝相叠加, 低洼地区发生严重洪水的可能性陡增(Wahl等, 2015; Bevacqua等, 2019). 目前对这种复合强风强降雨事件的研究主要关注小时尺度(Martius等, 2016; Messmer和Simmonds, 2021)到日尺度(Ridder等, 2020; Ridder等, 2022).

3.5.2 发生机制

复合风雨事件的发生机制主要涉及气旋、锋面、大气河以及地形等因素(Ridder等, 2020; Li D等, 2022). 气旋系统本身就是强风和强降水的载体. 研究表明中纬度地区的复合风雨事件一般与温带气旋有关(Raveh-Rubin和Wernli, 2015; Catto和Dowdy, 2021; Owen等, 2021), 在热带地区及部分亚热带地区, 复合风雨事件主要与热带气旋有关(Martius等, 2016; Raveh-Rubin和Wernli, 2016; Messmer和Simmonds, 2021). 大量研究关注复合风雨事件的气候态特征和空间分布, 并分析了全球及区域尺度不同的气旋驱动机制及事件的季节性差异(Martius等, 2016; Messmer和Simmonds, 2021; Owen等, 2021; Zscheischler等, 2021). 另外, 大气河也是中国中西部以及中南半岛西北部等地复合风雨事件的重要驱动因素(Waliser和Guan, 2017; Li D等, 2022). 地形因素也可影响复合风雨事件的发生和强度(Martius等, 2016; Raveh-Rubin和Wernli, 2016). 此类事件主

要受大气动力过程驱动, 部分案例中(如与大气河有关的事件)来自洋面上水汽的输送及凝结潜热的反馈作用也不容忽视.

3.5.3 历史变化、归因及未来预估

由于风速和降水数据严重的非均一性, 目前对复合风雨事件的历史演变研究相对较少, 结论信度不高, 仅在个别地区有较为系统的研究, 如伊比利亚半岛、中国. 伊比利亚半岛的复合风雨极端事件自2005年起发生频率增加(Hénin等, 2021), 中国区域复合风雨事件表现为在2011~2018年间较弱~中等强度的事件显著增多(Zhang Y等, 2021b). 由于绝大多数用于归因分析的全球模式分辨率较粗, 无法精确解析强风、极端降水等局地性较强的事件及当地复杂地形的强迫作用, 对事件背后的物理驱动因子(如气旋, 大气河)等刻画能力也十分有限, 目前复合风雨事件的归因研究并不多见. 在全球变暖的背景下, 全球复合风雨事件未来总体呈现一定增长趋势. 在低排放情景下, 全球复合风雨事件的重现期变化相对较小, 但在高排放情景下, 复合风雨事件的发生概率增加明显(Batibeniz等, 2023; Ridder等, 2022). 目前在区域尺度上的复合风雨事件预估研究相对有限, 基于CMIP6模式的预估分析表明未来复合风雨事件在多个地区呈现增加趋势, 包括中国东南沿海区域(Meng等, 2023)、加拿大及维多利亚湖地区(Jeong等, 2020; Van de Walle等, 2021)以及北大西洋、东亚、南亚等沿海区域(Yaddanapudi等, 2022). 在算力允许的情况下, 使用动力降尺度预估或聚焦某10~20年片段的对流解析(convection-permitting)模式预估可以大幅提高复合风雨事件预估的精细程度和准确性. 尽管可用于复合风雨事件分析的多变量统计分析方法已较为成熟, 但无论在历史变化还是预估分析中, 较少研究区分并量化风、雨各自的变化及其耦合关系的变化对此类复合事件的影响, 未来这方面研究需进一步加强以确定主导的致灾因素(Li D等, 2022). 天气系统对变暖响应的不确定性是准确模拟复合风雨事件的主要制约因素, 也是归因和预估不确定性的主要来源.

3.6 小结

本节主要讨论大气科学领域中的复合事件, 其定义、类型、当前认识和不足如表1所示. 总的来说, 与

表 1 大气科学领域典型复合事件的定义、类型、当前认识和不足

事件	定义及类型	物理机制	变化	不足
复合高温事件	同一日内白天和夜间接连发生极端高温现象, 时间复合型	反气旋环流-辐射结合, 陆气相互作用及边界层过程	多数区域呈现快速增长趋势, 未来继续增加	大尺度环流-区域陆气交互-局地边界层夹卷协同过程有待厘清
复合湿热事件	较高的相对湿度与高温同时发生, 多变量复合型	反气旋环流, 大尺度水汽输送		相对湿度数据非均一问题严重, 尚未引起足够重视, 影响评估准确性
复合干旱高温事件	高温与干旱同时发生, 多变量复合型	反气旋环流以及陆-气反馈, 部分事件涉及植被动态过程	全球总体上发生频率增加, 由极端高温增长主导	(1) 对于干旱指数的选择敏感; (2) 模式对陆-气反馈过程等模拟能力不足
复合干冷和湿冷事件	干燥或者湿润的气象条件和低温事件叠加发生, 多变量复合型	中高纬度冷空气向南快速推进, 活跃的低压天气系统、大范围冷暖空气持续交汇	总体上呈减少趋势, 局部地区、特定季节增加	(1) 缺乏温-湿结合的回归期量化分析; (2) 事件强度变化不确定性较大; (3) 与北极放大效应的关系不明
复合风雨事件	同时同地发生的强风和强降雨事件, 多变量复合型	气旋、锋面、大气河以及地形等因素	总体增加, 区域变化差别较大	(1) 局地性强, 观测和模拟数据分辨率较低, 影响事件提取; (2) 风-雨观测数据质量欠佳; (3) 主导天气系统多样, 且对气候变化响应高度不确定

高温有关的复合事件呈现增加趋势, 与冷事件有关的复合事件呈现减少趋势。尽管上述事件主要由大气圈层的变量组成, 但一些复合事件的形成机理也涉及水、陆地等圈层的过程(图1)。同一类复合事件也可以从不同圈层视角进行解读, 如对于复合干旱高温事件, 大气科学领域注重反气旋和陆-气的能量交换, 而水文科学领域则侧重于分析不同类型的干旱在水循环中的传递以及土壤水-高温的反馈机制。

4 水文科学领域

干旱和洪涝是最受关注也是研究最多的两类水文极端事件。当干旱在多地同时发生时, 形成空间复合事件; 当不同类型洪水(海岸洪水、河流洪水以及内洪)在某地同时发生时, 形成多变量复合事件; 干旱与洪涝事件可能在短时间内快速转换, 形成时间复合事件; 洪涝与高温事件相继发生也构成时间复合事件。

4.1 复合干旱事件

4.1.1 定义及影响

复合干旱事件是指多地近乎同时发生的干旱事件, 是一种典型的空间复合型事件。其影响主要体现在两方面, 一方面是可能导致多地粮食同时减产, 威胁粮食安全, 造成粮价波动(Anderson等, 2019)。不同地区产量损失本可通过进口填补, 但当全球多个主要粮食产

区同时干旱造成粮食减产时, 上述补偿机制就会失效(Anderson等, 2019; Mehrabi和Ramankutty, 2019; Tor-eti等, 2019; Gaupp等, 2020)。另一方面, 对于严重依赖水力发电的地区, 复合干旱会导致多座水库持续低位运行, 造成发电能力大幅下降影响区域电力安全, 2022年川渝地区就见证了复合干旱对电力系统的重大影响(Hao等, 2023)。

4.1.2 发生机制

复合干旱事件一般由大尺度大气波活动驱动, 如表现为纬向波数为5~7的大气罗斯贝波可以将北半球多个主要粮食产区恰好同时置于高压脊下, 形成持久的少雨干旱天气(Kornhuber等, 2020)。此外, 有利的海气相互作用模态亦可以通过激发大气遥相关波列促进此类事件的发生(Singh等, 2021b)。气候变化可致全球多地干旱发生概率增加, 因此也对多地同时发生干旱起到一定贡献(Singh等, 2022)。

4.1.3 历史变化、归因及未来预估

复合干旱事件的演变规律研究相对较少(Liu等, 2015; Wei等, 2020; Singh等, 2021b), 这可能与要求事件同时满足在时序中的极端性和较广的空间范围导致样本量过小有关。复合干旱的归因研究更为有限, 如何定量描述这类事件, 模式能否准确再现动力因素和/或有利海温异常模态主导下的区域干旱同步性均存在不

小挑战(Verschuur等, 2021; Zscheischler和Lehner, 2022; Mondal等, 2023). Verschuur等(2021)研究表明气候变化使2007年莱索托-南非(二者互为主要粮食进口贸易伙伴)同时发生干旱事件的可能性升高, 对当地的粮食安全构成威胁. 一些复合干旱事件发生的同时, 相同地区也会发生空间复合热浪, 人类活动已被证实使得这类空间复合热浪的发生概率增加数倍(Vogel等, 2019; Rogers等, 2022), 这可能是人类活动影响复合干旱的一种重要途径, 但尚未有研究将空间复合热浪的归因拓展至复合干旱. 预估分析表明复合干旱事件在全球多个粮食产区发生可能性将增加(Qi等, 2022; Singh等, 2022), 造成主要粮食产区同时减产的风险增大(Gaupp等, 2019).

4.2 复合旱涝事件

4.2.1 定义及影响

复合旱涝事件, 有时又称“旱涝急转”、“涝旱急转”, 指干旱与洪涝在一段时间内相继发生的事件, 是一类典型的时间复合事件. 这种相对立的极端水文事件接连发生(如相邻年份/季节/月份)增加了水资源管理的难度(Raymond等, 2020a), 并对农业生产(Brida等, 2013; Parry等, 2013)、河流和湖泊水质(Loecke等, 2017; Kragh等, 2020)造成负面影响. 如2012年发生在英国的复合旱涝事件先造成部分地区粮食减产, 夏季过量降雨非但未能缓解前期干旱的影响, 迅速形成的湿涝条件反而进一步导致作物根系腐烂, 加剧了作物减产的情况(Parry等, 2013). 就先旱后涝的顺序而言, 前期的干旱易使得土壤板结, 植被受损甚至死亡以至于植被吸水蓄水能力减弱, 使得紧随而来的强降水对地表的冲刷作用增强, 更易形成地表径流而致洪. 一些简易指数被用来初步刻画旱涝交替的现象, 如旱涝共存指数及长周期旱涝急转指数(Wu等, 2006)、日尺度旱涝急转指数(Shan等, 2018)等.

在定义该类事件时, 描述洪涝最常用的变量是降水; 除了同期强降水外, 前期的降水或融雪造成的土壤饱和对洪涝形成亦有重要贡献(Merz等, 2022), 因此该复合事件中的“涝”, 有时也考虑土壤湿度. 从事件定义的时间尺度而言, 包括日尺度(Weber等, 2020; Das等, 2022)、月尺度(Ansari和Grossi, 2022; Liu等, 2022)、季节尺度(He和Sheffield, 2020)和年尺度(Christian等, 2015; Raymond等, 2022; Swain等, 2018;

Wahl等, 2020), 不同尺度的事件对应的影响也各异. 在定义此类事件时, 尤其需要注意事先厘清事件的致灾过程. 强降水以不同的形式呈现, 如短时极强降水或持续性降水, 对前期干旱影响的缓解或加重程度有明显差异(Hoover等, 2022). 另外, 在一些定义中简单采用超过较低阈值的降水(如单日降水的95百分位甚至更低)来表征涝或湿润状态, 识别出的强降水可能起到缓解前期干旱的作用(Chen和Wang, 2022; Cheng和Liu, 2022), 而非造成旱涝影响叠加和放大. 未来可以应用水文模型、卫星遥感的淹没数据、水文观测数据(如地表径流量)或充分考虑前期降水对土壤湿度影响的加权方案等更好地衡量和表征“涝”以提高旱涝事件定义的准确性及其与影响的关联性.

4.2.2 发生机制

干旱和洪涝的时间和空间尺度均有显著差别: 干旱事件短则持续数周, 长则持续多年甚至十年以上, 影响范围广; 而洪水事件一般由小时至日尺度的极端降水直接驱动(Dong等, 2011). 对于同一地点的旱涝转换, 可能在短短几小时内发生, 因此复合旱涝事件的发生机制往往与干旱和极端降雨的驱动机制相联系(Yang等, 2013), 可能与环流突变(如急流位置、强度)和大气遥相关位相转换有关(Chen和Zhai, 2017b; Tan等, 2023), 也可能仅是偶然先后发生. 如对于美国东南部地区, 偶然来袭的热带气旋可以带来极端降雨, 缓解旱情之余还可能进一步引发洪涝(Kam等, 2013; Maxwell等, 2013). 类似地, 大气河登陆及地形对其的抬升效应也可能与复合旱涝事件有关(Swain等, 2018). 此外, 气候变暖背景下一些对流极端降水事件强度增强, 对流系统对当地水汽消耗加剧, 相邻两次极端降水间的持续干日变长的特点也有利于涝和旱的频繁交替(Chen, 2020; Dai等, 2020). 综上, 这类事件机理较为复杂, 不同成因的旱涝事件及其转换可能涉及大气、水文和陆面过程, 甚至包括冰雪圈过程(融雪致洪)和生物圈过程(干旱影响植被蓄水能力).

4.2.3 历史变化、归因及未来预估

已有研究基于不同定义评估各区域历史时期复合旱涝事件的演变, 包括美国(Christian等, 2015; McKinnon和Deser, 2021)、印度(Das等, 2022)、中国(Fang和Lu, 2023)及全球(Chen和Wang, 2022). 这些研究表明在

全球多个地区(包括美国大平原、欧洲及中国)数十年来复合旱涝事件发生频率呈现增长趋势(Christian等, 2015; He和Sheffield, 2020; Qiao等, 2022), 在季风区和极地地区尤甚(Tan等, 2023), 这可能与这些地区降水变率增大有关(Zhang W等, 2021a). 未来的复合旱涝事件的发生概率全球总体呈现增加趋势, 部分区域呈现一定减少趋势(Cheng和Liu, 2022; Zhang B等, 2021; Raymond等, 2022). 一些区域尺度的未来预估研究也指明复合旱涝事件可能在美国加州(Swain等, 2018)、非洲(Weber等, 2020)、中国(Chen等, 2020)及印度(Das等, 2022)等地区变得更加频繁, 但是存在明显的季节性差异(Swain等, 2018; Chen等, 2020; Persad等, 2020; Das等, 2022). 但由于旱涝指标选择的差异性、模式对于干旱和洪涝(包括致洪强降水)模拟能力有限, 对复合旱涝事件的预估结果往往也伴随着较大的不确定性, 信度较低.

对于此类事件的归因, 无论是长期变化还是高影响事件的归因均要求模式不仅能较准确地刻画旱、涝事件本身还需要对二者之间的转换特征有一定再现能力, 这牵涉到不同时空尺度动力要素的转折和不同圈层之间的复杂相互作用, 目前用于归因分析的大多数模式对这种复杂的动力学过程及其对变暖的响应描述能力十分有限, 不确定性很大. 因此针对此类事件的定量归因分析较少, 结论仍不明确.

4.3 复合洪水高温事件

4.3.1 定义及影响

复合洪水(极端降雨)与高温事件定义为洪水和高温事件在较短的间隔(一般数天)内相继发生, 属于时间复合类型. 其对灾害的放大效应主要体现在洪水导致基础设施受损(电力设施、房屋等), 在尚未完全恢复时热浪来袭, 增加了受灾地区面对高温的暴露度和脆弱性. 一个典型案例是2018年7月日本广岛经历了洪涝和高温在一周内相继发生, 导致300多人死亡及巨大经济损失(Wang S S Y等, 2019). 此类事件中的洪涝可基于多日加权的极端降雨指标近似表征(Chen等, 2021), 也可直接基于径流数据刻画(Zhang和Villarini, 2020; Gu等, 2022; Zhou等, 2023). 考虑到热带气旋在造成洪涝的同时也带来大风天气, 对基础设施的破坏性更大也更难恢复, 一些学者以热带气旋作为载体类似定义热带气旋-热浪复合事件(Matthews等, 2019;

Feng等, 2022; Wu J等, 2022).

另有一些研究采用相反的顺序, 即高温在前, 强降水或洪涝在后, 来定义此类事件(Wu S等, 2021a; You和Wang, 2021; Ning等, 2022), 或不区分二者顺序(Weber等, 2020; Raymond等, 2022). 在这样的定义中, 如果后续发生的强降水并不致灾, 仅是统计意义上的极端(如超过某中等强度阈值), 其对前期高温可能起到缓解作用, 二者的组合本质为一种自然的周期性天气波动, 不代表真正的高影响复合事件. 只有在证明前期的极端高温使得后续的强降水或洪水发生概率增加或强度增强的前提下, 如在美国中部平原(Zhang和Villarini, 2020)和中国长江中下游地区(Chen等, 2022a), 这样的定义顺序才符合复合事件定义的基本原则.

4.3.2 发生机制

极端高温和极端降雨(洪水)两类事件之间可能存在一定的物理联系, 也可能是偶然组合在一起. 就先高温后洪水的顺序而言, 极端高温事件发生时可以增加低层大气层结的不稳定性, 积累对流能量, 导致大气可持水量增加, 当有利于强降水的天气系统移动到刚刚发生过热浪的下垫面时, 强降水发生概率增加或强度增强(Fowler等, 2021; You和Wang, 2021; Sauter等, 2023). 就先洪水后高温顺序的事件而言, 极端降水(洪水)加剧了对局地水汽的消耗, 后续容易形成晴空少云天气, 利于高温的发生(Dai, 2020); 影响季风区的次季节扰动波列也可导致洪水(气旋)和高温(反气旋)的快速交替(Chen和Zhai, 2017b); 对于有热带气旋参与的事件, 热带气旋尤其是强热带气旋过境后往往在对流层中层形成残留的暖心结构, 激发对流层中高层形成高压脊, 其导致的下沉绝热增温及稳定的大气边界层结构也有利于后续高温的发生(Parker等, 2013). 可见这类事件可能与大气的动力、热力过程以及洋面过程(水汽输送、次季节振荡、台风等)有关.

4.3.3 历史变化、归因及未来预估

揭示复合极端洪水高温事件的历史及未来变化和原因面临数据和方法的挑战(Chen等, 2021; Liao Z等, 2021). 即便采用较低阈值(如第90百分位)来识别洪水和高温, 洪水和高温事件在一周内相继发生仍然是小概率事件, 在2000年之前仅有十分之一的中国国土面

积上偶然出现过类似的组合, 但之后极端高温事件的频繁发生使得此类事件迅速增长了5~10倍(Chen等, 2021). 对于此类事件的归因而言, 同样由于样本量的限制, 尚无能力使用传统的指纹法进行检测归因分析, 但可用场检验方法区分一定空间范围内观测到的变化与随机变率的差异(Chen等, 2021). 样本过少及事件组合的随机性也使得传统事件归因的方法难以给出人类活动对复合洪水高温高影响个例影响的准确估计(Min等, 2022). 借助超大样本集合模拟, 相关研究指出50年一遇的洪水和50年一遇的高温在一周之内的组合在过去2000多年中从未在中国地区出现过, 但未来这种组合出现的可能性增加, 尤其在东南人口稠密地区(Liao Z等, 2021). 基于CMIP5/CMIP6模式的预估研究也表明, 未来全球复合洪水高温事件总体上呈增加趋势(Gu等, 2022; Zhou等, 2023).

4.4 沿海地区复合洪水事件

4.4.1 定义及影响

沿海地区复合洪水通常定义为海岸洪水、河流洪水以及内洪(降水超过区域排水能力导致的内涝灾害)同时发生的现象, 这是对沿海地区及河口三角洲威胁很大的一种多变量复合事件. 2017年哈维飓风导致的美国德州等地的洪水就是一次典型复合洪水事件: 热带气旋带来风暴潮, 与区域强降雨叠加, 导致超过1250亿美元经济损失(Valle-Levinson等, 2020; Huang等, 2021). 降雨与风暴潮在全球许多区域常呈现正相关关系, 包括美国(Wahl等, 2015)、欧洲(Svensson和Jones, 2004)、澳大利亚(Zheng等, 2014)、中国(Fang等, 2021), 忽视这种依存关系可能低估沿岸洪灾风险(Bevacqua等, 2017; Moftakhari等, 2017; Couasnon等, 2020). 沿岸复合洪涝可能由多种气象、水文、海洋变量间的组合导致(Ward等, 2018; Hendry等, 2019; Eilander等, 2020; Ghanbari等, 2021; Pirani和Najafi, 2022), 包括河道径流(降雨)与风暴潮、河道径流(降雨)和海平面、海浪与风暴潮、海浪与海平面、海浪和风速等.

4.4.2 发生机制

沿海地区复合洪水主要与极端水位有关(由平均海平面、天文潮、风暴潮、风浪组成)(Idier等, 2019; Qiu J等, 2022; Jafarzadegan等, 2023). 河口海岸水位上涨一般由两种机制导致(Wu W等, 2021a): 一是由于上游流

域或者集水区强降雨导致下游河道流量增加、水位升高, 该过程主要由气象要素(主要是降雨的强度、时间、分布等)以及流域下垫面特征(地形、植被、土壤含水量等)决定; 二是与天文潮汐和天气过程有关(如热带气旋或温带气旋可导致风暴潮和强波浪), 该过程主要涉及天文潮汐活动及风暴潮动力学(海洋水位升高的幅度、时间等). 鉴于复合洪水中水文水动力、天文、天气、海洋系统间的复杂耦合过程, 准确模拟降雨-径流-潮汐-风暴潮的组合(如时间、强度等)是厘清复合洪水事件发生机制的重要前提(Sampurno等, 2022).

从天气系统来说, 热带气旋、温带气旋以及大气河是复合洪水事件的重要驱动因素(Zhang W等, 2021b). 此类事件发生机理与低气压系统有关系(van den Hurk等, 2015), 如热带气旋常伴随着强风以及丰沛的水汽传输, 容易引发强降雨(高径流)与风暴潮(高海平面)的同时出现, 导致或者加剧沿海地区复合洪水(Gori等, 2020; Lai等, 2021; Camus等, 2022). 研究表明, 美国沿海地区的极端降雨和风暴潮复合多与热带气旋有关, 而欧洲沿海地区的事件一般由温带气旋主导(Paprotny等, 2020; Lai等, 2021; Gori等, 2022). 另外, 登陆的大气河也是复合洪水事件的重要驱动因素(Ridder等, 2018). 沿海地区复合洪水(或者变量之间的相关性)还受到区域水文条件(降雨径流过程)和河口特征等因素影响(Zheng等, 2013; Zheng等, 2017; Wu等, 2018; Hao和Singh, 2020).

4.4.3 历史变化、归因及未来预估

现有的复合洪水研究重点关注物理机制及分布特征, 对其历史演变特征分析较少. 目前历史变化的研究仅在个别区域开展(如美国), 如研究表明1900~2012年期间美国沿海地区复合洪水事件呈增加趋势(Wahl等, 2015). 由于复合洪水的变化涉及多类洪涝灾害各自的变化及其之间关系的变化, 且此类事件多发生在局地到区域尺度上, 并包括气象、水文、海洋、陆地甚至天文等不同圈层的过程, 这对归因所用模式在物理过程的模拟能力、分辨率及多类模式之间的耦合和嵌套等方面要求很高, 目前对此类事件变化的归因能力十分有限, 鲜有定量归因成果. 未来气候变暖可能导致海平面进一步上升以及环流的改变, 并可能导致风暴潮、降水、径流等因素的同时变化进而影响复合洪水事件. 全球尺度的复合洪水预估研究表明其发生频率

未来总体呈增加趋势(Bevacqua等, 2020b), 其中海平面上升以及风暴气候态的改变均可能导致此类复合事件频率的改变(Gori等, 2022). 一些区域尺度预估线索指出未来复合洪水事件在多个国家或地区呈现增加趋势, 包括美国(Ghanbari等, 2021; Gori等, 2022)、欧洲(Bevacqua等, 2019)等. 由于空间尺度、时段选取、研究工具以及复合洪水事件构成方法不同(如基于降水或者径流), 复合洪水事件未来预估存在较大的不确定性(Ganguli等, 2020).

4.5 小结

水文科学领域的典型复合事件总结见表2. 尽管本节中的事件被划分为水文领域的复合事件, 几乎每一类事件中大气环流的触发作用都不容忽视, 部分事件还涉及陆面过程、海洋过程等, 呈现出典型的多圈层特征. 另外, 相同的事件名称在不同圈层中可能指代不同的复合类型. 如本节重点介绍了空间复合干旱事件, 但是当不同类型干旱在同一地区同时或相继发生(Hao等, 2018; Muthuvel等, 2023), 抑或同一类型干旱事件在一定时段内反复影响同一地区(Thalheimer等, 2022)也可称为复合干旱事件, 其类型归属可为多变量(先决条件)和时间复合型. 值得指明的是, 此处的复合干旱与上文提及的复合高温干旱在事件类型、发生机制、空间尺度及影响方面均存在明显差异(表1, 表2). 在变化研究方面, 水文领域的复合事件共同面临样本量小、信噪比低、模型模拟能力有限的问题, 致使历史变化和归因研究较难开展、认识有限、结论信度低.

5 海洋科学领域

前期大部分复合事件研究主要围绕大气圈、水圈、岩石圈(陆面)开展, 近几年与海洋相关的复合事件逐渐受到关注, 主要表现为海洋热浪、酸化、低氧、低营养等极端事件两种或多种同时发生. Bouwer等(2022)系统回顾了目前海洋复合事件在定义、变化、模拟和机理等方面取得的进展. 海洋复合事件中海洋热浪(持续数天至数月的海水表层温度异常升高)是关键驱动因子, 可导致珊瑚白化、海草密度降低、海藻林生物量或者生产力下降等, 严重威胁海洋生态系统和生物多样性, 重挫区域渔业(Holbrook等, 2019; Smale等, 2019; Cheung等, 2021; Le Grix等, 2022). 历史时期几乎所有海盆海洋热浪均呈现显著增加趋势(Oliver等, 2021), 且在未来可能进一步增加(Frölicher等, 2018; Guo等, 2022). 本节主要介绍海洋复合事件相关概念、现象和可能影响, 由于此类事件往往涉及大气、海洋、生物等圈层的复杂相互作用, 考虑篇幅限制, 在此暂不对机理和归因展开介绍.

5.1 复合海洋热浪酸化事件

一些研究发现过去三十年热带珊瑚礁生态系统中的白化事件增加可能与海洋热浪直接相关. 同时, 由海洋吸收过量CO₂导致的海洋酸化也可能使珊瑚礁面临死亡风险(IPCC, 2019). 显而易见, 两种极端事件同时发生对海洋生物和生态系统将产生更为严重的影响(Burger等, 2022). 过去数十年复合海洋热浪和酸化事

表 2 水文科学领域典型复合事件的定义、类型、当前认识和不足

事件	定义及类型	物理机制	变化	不足
复合干旱事件	多地近乎同时发生的干旱事件, 空间复合型	(1) 大尺度罗斯贝波; (2) 有利的海气相互作用模态	历史变化研究少, 未来可能增加	(1) 样本少; (2) 动力过程主导导致模式模拟能力有限
复合旱涝事件	干旱与洪涝在一段时间内相继发生, 时间复合型	(1) 环流突变; (2) 遥相关位相转换; (3) 降水时间分布不均匀性加强	总体呈增加趋势, 部分地区减少	(1) 模式对旱涝水文事件模拟不确定性较大; (2) 旱涝指标多样导致结论差异大
复合洪水高温事件	洪水和高温事件在较短的间隔内相继发生, 时间复合型	(1) 热浪期间不稳定能量的积累; (2) 季风区的次季节振荡波列; (3) 热带气旋动力-热力扰动	总体呈增加趋势, 主要与极端高温增多有关	(1) 机理分析较少、事件间的物理联系不明确; (2) 所选指标与影响联系不够紧密; (3) 样本量过低、不易模拟
复合洪水事件	海岸洪水、河流洪水以及内洪同时发生的现象, 多变量复合型	主要与热带气旋、温带气旋以及大气河等因素有关	研究较少, 个别区域增加	多尺度、多系统、多圈层水文过程较难模拟

件呈现显著增加趋势(Gruber等, 2021). 随着气候变暖, 未来复合海洋热浪和酸化事件对珊瑚礁等海洋生态的影响可能进一步加剧(Burger等, 2022; Klein等, 2022).

5.2 复合海洋热浪低氧事件

海水中的氧气含量对渔业和生态系统至关重要, 全球变暖可能导致海洋溶解氧的损失(或称脱氧, deoxygenation), 同时海洋变暖导致的海洋层化(stratification)进一步放大了这种现象, 往往会减少从海洋表层到深层的氧气供应, 对海洋生态系统构成巨大威胁(Shepherd等, 2017; Li G等, 2020; Gruber等, 2021). 海洋热浪与低氧同时发生可能对某些海洋生物造成毁灭性影响. Samuel等(2019)通过实验评估了海洋热浪和低氧对绿鲍的综合影响, 发现在过热和低氧的协同影响下, 绿鲍呼吸频率显著下降. 海洋热浪、酸化以及低氧等极端事件可能进一步叠加, 被定义为三重复合事件(Gruber等, 2021), 其演变和影响有待进一步评估.

5.3 复合海洋热浪低叶绿素事件

海洋浮游植物对于海洋生物多样性具有重要作用, 是水生食物网的基础, 其生物量常用总叶绿素色素浓度来推断(Boyce等, 2010). 海洋热浪与低叶绿素紧密联系(Noh等, 2022), 两种事件常同时发生产生严重的影响. 典型的案例如发生在2013年至2015年间东北太平洋的海洋热浪伴随着春季和夏季的叶绿素水平较低, 造成海洋生态系统生产力低下, 海鸟死亡、鲸鱼和海狮搁浅等(Cavole等, 2016; Piatt等, 2020; Le Grix等, 2021). Le Grix等(2021)基于卫星资料首次给出了全球海洋高温与低叶绿素复合事件的发生、持续时间等特征以及它们的变化趋势, 发现赤道太平洋、阿拉伯海和南极洲周围等地是该类复合事件发生的热点区域. 海洋变暖导致的层化加强使透光层养分供应减少, 从而使海洋净生产力降低(Behrenfeld等, 2006). 预估表明21世纪全球海洋净生产力将呈现下降趋势(Kwiatkowski等, 2020), 未来复合海洋热浪与低叶绿素事件的发生频率有可能升高.

5.4 复合海洋热浪陆地干旱事件

陆地干旱严重影响供水和农业生产, 而海洋热浪可能严重威胁渔业生产, 临近区域的陆地干旱和海洋热浪同时发生可能对区域社会经济及生态系统带来比

二者单独发生时更为严重的影响. 这方面典型案例包括2013~2014年南美洲东部最严重的干旱以及南大西洋西部的极端海洋热浪(Rodrigues等, 2019)以及2013~2016年加州干旱以及东北太平洋海洋热浪事件(Shi H等, 2021). Rodrigues等(2019)分析发现2012~2014年期间南美洲严重干旱和南大西洋海洋热浪背后的共同驱动因子为印度洋和太平洋的热带对流引发的大气阻塞高压形势. 海洋热浪发生期间, 海洋表面蒸发加剧, 在没有额外降水补充的情况下, 海表“相对偏干”的空气被输送到陆地上, 可以引发或加剧陆地干旱(Herrera-Estrada和Diffenbaugh, 2020). 气候变暖背景下该类复合事件未来在诸如加州-东北太平洋的一些区域可能呈现增加趋势(Shi H等, 2021). 目前对复合海洋热浪-陆地干旱的驱动因素理解仍十分初步, 演变特征研究依旧缺乏, 对海区的选择具有明显的偏向性. 考虑到其巨大的社会经济和生态影响, 未来需要加强这种复合事件的研究.

5.5 小结

海洋科学领域的典型复合事件的定义、类型、当前认识以及不足如表3所示. 本节介绍的几类复合事件均与海洋热浪有关, 涉及的圈层主要包括海洋、大气以及生物圈(从影响的角度). 目前海洋中除海表温度外的大部分变量观测数据时长较短、空间覆盖范围有限. 同时相关的物理过程仍有待阐明, 模式对关键过程模拟能力亟待提高. 这些不足导致目前海洋复合事件的历史变化、归因及未来预估研究远远少于其他圈层的复合事件, 相应的科学认识也极为有限. 海洋极端事件与陆地极端事件组合成的复合事件有望成为未来的研究热点.

6 挑战与未来展望

虽然近年来各圈层复合事件研究均取得了明显进展, 但从单一极端事件研究向复合事件研究的跨越依然面临很大的挑战, 可以说其中的每一个关键步骤都需要依靠新认识、新理论、新方法、新工具来进行重构(图2). 本小节将从数据、物理过程、模式模拟、检测归因、未来预估、影响及适应等方面逐一介绍当前复合事件研究中存在的共性问题 and 遇到的新挑战, 并尝试给出可能的解决方案, 最后展望未来发展方向(表4).

表 3 洋科学领域典型复合事件的定义、类型、当前认识及不足

事件	定义及类型	物理机制	变化	不足
复合海洋热浪酸化事件	海洋热浪与酸化同时发生, 多变量复合型	温室气体的辐射强迫和化学过程		
复合海洋热浪低氧事件	海洋热浪与低氧同时发生, 多变量复合型事件	变暖导致的层化加强	历史及未来可能增加	(1) 物理机制研究仍处于起步阶段;
复合海洋热浪低叶绿素事件	海洋热浪与低叶绿素同时发生, 多变量复合型	海洋暖化、层化、透光性变差		(2) 海温外生物圈变量观测较少;
复合海洋热浪陆地干旱事件	临近区域的陆地干旱和海洋热浪同时发生, 空间复合型	反气旋环流、海-陆间水汽输送		(3) 历史变化、归因及未来预估研究严重缺乏

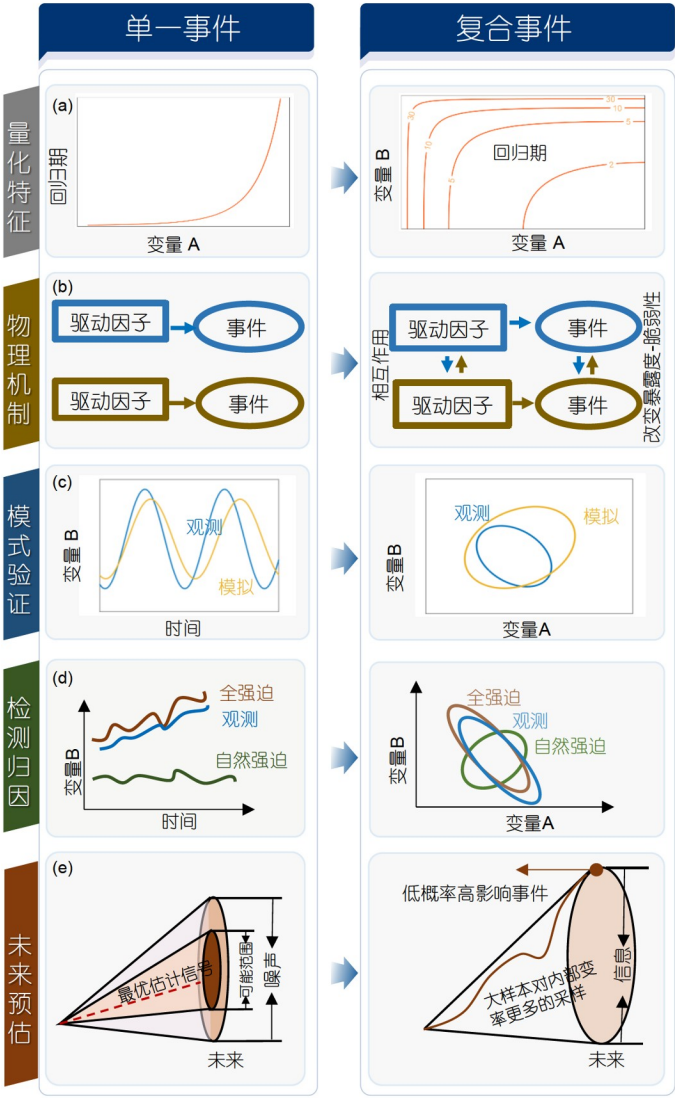


图 2 复合事件与单一事件研究方法比较

相较于单一变量极端事件, 复合极端事件研究中, (a) 统计拟合和关键特征量化(以回归期为例)需在多维空间上考虑变量间依存关系; (b) 机理分析需考虑不同事件驱动因子之间的相互作用, 以及事件间的时空联系对暴露度和脆弱性的改变; (c) 模式评估和订正需综合考虑对各变量本身边缘分布和变量联合分布的模拟能力和模拟偏差; (d) 归因研究需量化各强迫因子对各变量本身特征的变化以及变量间关系变化的影响; (e) 预估研究需充分考虑外强迫和内部变率的协同影响、更重视低概率-高影响事件(罕见强度、新组合形式等)出现的可能性

6.1 数据

6.1.1 分辨率及序列长度

复合事件研究需要多个圈层的数据具有较好的时空一致性, 然而不同圈层变量的观测手段、观测时长、数据后处理方式以及发布形式等均存在明显差异, 有时难以做到很好地匹配。如研究陆地生态系统-土壤湿度-高温干旱-山火-泥石流复合事件时(Agha-Kouchak等, 2020), 植被状态、山火和泥石流的数据无论是在空间覆盖还是时间跨度均远不及温度和降水等气象数据完整, 这使得可研究时段大幅缩短, 样本量极低, 难以得出稳定可靠的统计估计。又如死亡数据的统计时段通常为0到24点, 而中国的温度观测数据往往从前一日20时到当日20时统计最高及最低温度, 造成“先高温-后死亡”的因果对应关系错位(Wang J等, 2021)。高分辨率数据的缺乏严重限制了复合事件的观测研究: 复合事件的发生涉及小时~年代际多时间尺度, 同时可能存在较大的空间异质性, 为了更好地刻画复合事件的时空分布以及演变特征, 需要较高时空分辨率的观测数据。但是目前除了降雨和温度等常规气象观测, 气象、水文、海洋数据总体上在时空精细程度上难以满足复合事件研究需求。卫星遥感数据作为一种

有益补充, 已经应用于一些复合事件的研究(Woolway等, 2021)。但由于卫星传感器的替换升级等因素, 遥感数据存在明显的非均一问题, 且时长较短。常规气象水文观测数据同样面临相似的非均一问题(Li等, 2023), 不但影响事件识别, 还会误导对变量间依存关系的判断和影响的量化。

复合事件与单一事件研究的最大区别之一在于变量维度的提升, 这不可避免地要求使用更长的序列对复合事件进行分析(图2)。即便是具有数十年至百年的连续观测的气象数据, 在数量上仍不能满足对低概率复合事件的准确统计描述和量化(Bevacqua等, 2023; Liao Z等, 2021)。使用有限长度的数据在复合事件变量间的相关性分析、联合概率及回归期估计方面会带来很大误差(Muis等, 2016; Zscheischler等, 2018; Hao和Singh, 2020)。如基于HANZE数据库(Paprotny等, 2018), 欧洲国家1870~2016年期间所有1564场洪水中, 复合洪水仅为23次(占比为1.5%)(Paprotny等, 2020), 目前常规观测的风暴潮或者径流等数据集的长度难以实现对如此低概率的复合洪水特征的准确估计。

为了解决数据缺测、空间覆盖有限、不同数据集之间变量物理一致性差以及序列长度不足等问题, 一

表 4 复合事件研究面临的挑战及未来展望

主题	挑战	展望
数据	观测数据时-空分辨率不足、长序列匮乏	地面观测、再分析、卫星观测、模型模拟等多源数据融合
	影响数据难获取、与气象水文等数据匹配度低	(1) 多学科交叉合作 (2) 构建并使用诸如EM-DAT等影响数据库
物理机制	复合事件机理诊断方法体系尚未形成、传统单一驱动因子对应单一事件的视角造成认知偏差	从多圈层、多时空尺度相互作用的全面视角理解驱动因子间、极端事件间的时-空耦合和演进过程
	事件机理复杂, 涉及的要素、阈值、过程、组合等多样化、因果关系难以确定	(1) 通过数值模型设计因子控制试验; (2) 借助人工智能或者机器学习等新方法
模型评估、检测 归因、未来预估	多变量联合模拟评估指标和方法有待发展、偏差订正技术仍不成熟	研发能够兼顾单变量边缘分布和多变量联合分布模拟效果的评估指标和订正新技术
	传统趋势归因和事件归因方法可用性大幅降低	(1) 将多变量指标融合进单一指标; (2) 采用“故事线”等条件归因技术; (3) 借助经过业务检验的集合预报模式开展归因分析
	有限集成员模拟对复合事件取样不足, 低估或忽视内部变率作用	采用初值扰动大样本集合对内部变率和外强迫的组合进行充分取样, 重视低概率事件和罕见组合形式未来出现的可能性
影响、风险、 适应	定量化影响研究较少	从影响出发, 采用自下而上的视角定义和分析事件
	复合风险及级联影响的定量化评估少	充分考虑事件的时空复合对灾害、暴露度和脆弱性的综合影响
	适应性措施仍主要针对单一极端事件制定	(1) 加强多致灾因子、跨领域、跨区域风险传递的适应性措施设计; (2) 建立多部门联动的复合事件预警机制

一个重要手段是利用数值模型模拟数据或者再分析重建数据扩展样本。如研究复合洪水事件需依靠水文模型模拟的径流、水动力学模型模拟的风暴潮等数据(Bevacqua等, 2020a)。特别是对于大陆尺度或者全球尺度的复合事件研究, 基于物理过程的模型模拟数据、再分析数据或者陆面同化数据是弥补观测数据不足的重要手段(Ridder等, 2020; Batibeniz等, 2023), 目前已经广泛应用于不同复合事件的评估。如海洋模型模拟的高分辨率海平面高度数据已应用于全球尺度复合洪水事件的研究中(Muis等, 2016; Ikeuchi等, 2017; Voudoukas等, 2018; Bevacqua等, 2020b)。

6.1.2 低概率-高影响复合事件数据需求

由于缺乏应对经验, 历史上从未发生甚至被认为不可能发生的“黑天鹅”事件往往造成灾难性后果, 因此评估其未来风险尤为重要(Bouwer等, 2022; Lin等, 2020)。实现这一目标将在普通复合事件研究对数据需求的基础上数据量继续扩张几倍甚至数百倍。这种情况下, 单一模式初值扰动大样本集合模拟是一种重要手段(Deser等, 2020; Mankin等, 2020; Bevacqua等, 2023), 其每个模式可以提供数十个模拟成员, 意味着在某种气候状态下可以有几百至数千年的历史模拟可供取样。目前全球共有7个模式中心提供了这样的模拟集合, 组成了Single Model Initial-Condition Large Ensembles(SMILEs)(Deser等, 2020), 该数据集已经应用于复合事件的评估(Swain等, 2018; Tang等, 2022; Bevacqua等, 2022)。各模式中心也在不断更新其强迫情景(Wyser等, 2021), 并不断扩大集合成员数量(Lin等, 2022)。值得一提的是, 正在如火如荼开展的单一强迫大样本集合多模式比较计划(LESFMIP)为我们提供了一个更加细致、深入理解低概率复合事件多年代际变化成因和未来风险的宝贵机会(Smith等, 2022)。

6.1.3 影响数据

定义复合事件需要从事件影响出发, 判断事件时空复合是否造成了更为严重的经济、社会、生态等影响(Zscheischler等, 2020), 即“自下而上(bottom-up)”的视角(Leonard等, 2014)。这就使得复合事件研究需要结合影响领域的的数据, 如死亡人数、经济损失等。在实际操作中由于影响数据往往较难获取, 目前对复合事件的识别和提取仍严重依赖于统计学定义, 即通过“自上

而下(top-down)”的视角假设超过特定阈值的事件组合会造成严重影响, 但实际情况并不一定如此, 且该方法中阈值的选择具有高度主观性。自然科学领域和社会人文领域以及相关政府机构和部门(如民政、疾控、电力和水利部门等)需要加强合作来解决这一问题。目前在全球灾害统计方面有一些较为成熟的数据库需要更好地加以利用, 如Emergency Events Database(EM-DAT)提供了全球1900年以来的灾害数据, 可用于复合事件的影响分析(Tschumi和Zscheischler, 2019)。

6.2 物理过程

6.2.1 复合事件的链式演进过程

对复合事件物理过程的诊断和理解是目前该领域的薄弱环节, 多数研究侧重复合事件的统计特征、变化及可能影响, 但对事件的物理过程理解并不深刻。相较于单一变量极端事件机理诊断, 复合事件的机理分析尤其需要以多时空尺度、多圈层相互作用的视角审视事件孕育、发生、传导和互馈全链条过程: 不仅要充分理解某一种极端本身的发生机理, 还需要“向前看”分析之前发生的极端事件对该事件的激发、加强或抑制作用(图2), 同时还需要“向后看”, 厘清该事件的发生对局地 and 更大尺度的热力(如下垫面状态)-动力(如大气环流)条件的改变, 以及由此造成的对后续事件特征和致灾潜力的影响。对复合事件机理的深刻理解不仅是提升预报预警能力的科学基础, 也为发展更有针对性的模式评估和订正技术以及设计归因和预估方法提供理论依据。

已有的针对单一变量极端事件的机理认识对部分类型复合事件的机理分析有一定借鉴意义: 对热浪期间陆-气相互作用的理解可以较好地解释复合干旱高温的成因(Miralles等, 2019); 关于ENSO通过激发全球大气遥相关从而对某地的天气气候产生影响的理解可以用来解释ENSO背景下全球范围内的空间复合事件(IPCC, 2021; Wang B等, 2022)。相比之下, 带有预设条件的复合事件和时间复合事件各分量之间的物理联系更为隐蔽、较难预判: 如前期较为湿润的土壤对后续的强降水是否具有激发和加强作用从而使得二者组合造成严重洪涝尚不清楚(Merz等, 2022); 又如山火-强降水-泥石流复合事件中各分量间是否存在物理联系也没有明确答案(Touma等, 2022)。对于更为复杂的时空复合事件, 更需要从气候系统甚至地球系统的整体

视角理解整个事件的演进过程。举例而言, 气候变暖导致的春季“早绿”使得植被对土壤水分的消耗加剧, 造成复合高温干旱事件更容易在夏季发生且强度更强, 反而使得夏季植被缺水、干燥, 甚至死亡, 为后续秋季山火的发生和蔓延提供了干热天气和充足的可燃物(Lian等, 2020; Zhang Y等, 2021a; Gloege等, 2022)。因此, 想要准确理解秋季山火燃烧强度和面积, 需要回溯整个过程, 精准把握跨季节的大气-植被-土壤之间的相互作用。但现有的极端事件机理分析大多数仅关注到链式演进过程中的某一环节, 导致对复合事件的机理认识不够全面和准确。

6.2.2 关键阈值、过程和组合的判别

机理分析中的一个重要内容是提取能够触发多个事件时空复合的典型环流型(包括环流突变特征)和重要变量的关键阈值。如高空急流位置和强度的突变模式可导致洪涝和热浪相继发生(Wang S S Y等, 2019); 又如, 即便在一些湿润地区, 当土壤湿度降至一定阈值以下同样可以激发气温对下垫面能量分配的超强响应, 进而触发高温和干旱的异常联动(Dirmeyer等, 2021); 类似地, 当前期的气象、水文条件使得空气干燥度(VPD)到达某一阈值时, 野火风险就会接近一种“临界”状态, 之后发生概率大幅(非线性)增加(Clarke等, 2022)。对这些关键过程、关键阈值的凝练和提取对预报和预警具有重要的指导意义, 也是检验模型预报能力的重要依据。

通过气候、水文、陆面模型来设计一些因子控制试验(factorial experiments)是厘清事件和过程之间因果关系的一种有效手段(Wehrli等, 2019)。为了更好地模拟不同变量在多个时间尺度及空间范围的相互作用, 多圈层耦合的地球系统模式是重要的分析工具。地球系统模式在传统气候模式基础上进一步纳入植被以及生物地球化学过程, 能够更好地模拟多圈层相互作用过程及其对天气和气候的影响, 能够兼顾存在物理联系的和偶然组合的复合事件导致灾害的过程(Raymond等, 2022)。但目前地球系统模式在时空分辨率和复杂的天气、气候和水文动力要素及过程再现能力等方面的不足仍然制约着其在复合事件机理分析中的应用。

由于复合事件样本量小, 现有的机理诊断以个例分析为主。但复合事件涉及的多变量异常时空组合具有多样性, 通过典型个例分析得出的结论未必具有普

适性。同时, 人类社会经济活动对复合事件可能的影响进一步增加了其机理研究的复杂性。人工智能或者机器学习等新方法为解决上述问题从而凝练复合事件物理过程概念模型和提取预报信号提供了一条可能出路(Zhang W等, 2021c; Jiang等, 2022; Sampurno等, 2022; Yu等, 2022)。但需注意复合事件的小样本量可能会使得基于大数据方法的适用性和准确性受到影响。

6.3 模型评估、检测归因和未来预估

6.3.1 模型评估与偏差订正

传统单一变量极端事件模型评估主要关注对变量平均值、变率、统计分布和长期趋势模拟的准确性。除此之外, 复合事件模型评估还需要评估模型是否准确把握不同变量、不同事件之间的时空依存关系(图2)。当前复合事件的模型评估仍是该研究领域的重大挑战之一: 一方面是由于观测数据有限难以提供一些低概率复合事件统计特征真值; 另一方面也和缺乏有效的评估方法和指标有关(Zscheischler等, 2021)。尤其是对于涉及多个系统的复合事件, 其模型模拟评估需要针对多个变量或者过程组合展开。如对于复合洪水事件, 需要准确模拟气候系统、水文和水动力系统, 以及相关的海洋过程, 这方面的综合评估工作相对缺乏(Paprotny等, 2020)。

复合事件变量间相依性的模拟评估已在月、季节尺度有一些尝试, 多采用各类相关系数(皮尔逊、斯皮尔曼、肯德尔)作为量化指标。但在与影响更加密切的更短时间尺度上以及更极端的变量区间的模拟评估需要进一步加强。如对于复合风雨事件, 需要评估小时尺度或者日尺度的强风-强降雨模拟效果。在评估多变量联合分布总体模拟效果基础上, 还需要评估多变量各自极值区间(即尾端分布)的依存关系的模拟效果(如极端降水-极端温度、风暴潮-极端降雨、风暴潮-极端径流等相依特征)(Paprotny等, 2020; Zscheischler等, 2021)。除了简单相关系数, 多变量概率分布以及KL散度(Kullback-Leibler divergence)等指标也可用于对比复合事件模拟和观测的差异(Ridder等, 2021; Zscheischler等, 2021; Zhang等, 2022; Zscheischler和Lehner, 2022)。

模拟偏差订正是改进模拟效果、提升模式可用性、减小模拟误差的重要手段。在单一变量模拟偏差订正基础上, 复合事件偏差订正需尤其注意订正过程

可能对变量间的物理一致性和依存关系造成(无意)的破坏, 如对某(些)变量取得较好订正效果的同时, 对其他变量的模拟较未订正前反而变差, 或打破二者内在的物理/统计关系. 这就要求我们研发针对多变量协同订正的新技术. 在多变量偏差订正前, 需要先对模拟误差的主要来源进行初步判断, 即主要误差来源于各变量边缘分布模拟偏差还是取决于变量间的联合分布模拟偏差(Villalobos-Herrera等, 2021). 近年来考虑变量相依结构的多变量联合偏差订正方法(MBC)发展迅速, 目前较为成熟的技术包括转移累计概率分布(Michelangelo等, 2009), 分布和依存关系的秩重采样技术(Vrac, 2018), 动态最优转移订正(Robin等, 2019), 多维概率密度函数订正(Cannon, 2018), 多维分位数映射(Cannon, 2016)等, 已经被应用复合事件及其影响的模拟偏差订正(Guo等, 2020; Meng等, 2022).

对于可将多个变量融入一个指数的复合事件, 如湿-热指数和火险天气指数, 偏差订正时选择先逐一变量订正再计算指数还是直接对复合指数进行订正取决于订正目的和所采用方法的优缺点(Casanueva等, 2018; Qiu L等, 2022). 基本的原则是, 当指数中各变量对复合事件影响的重要性相当且均有明确的关键阈值时(如温度和湿度对人体健康的影响)(Mora等, 2017), 建议采用逐一变量订正技术, 避免直接对复合指数订正时由于各分量间的内在负相关关系导致的误差相抵消从而对模式性能和所模拟的事件性质的误判(García-Díez等, 2015; Casanueva等, 2019).

6.3.2 检测归因

极端事件归因是过去20多年间气候科学领域发展最快的分支之一, 其回答的科学问题是: 在一定的统计显著水平下, 不同强迫因子对极端事件长期变化或某次(类)高影响事件的贡献(Otto, 2017), 重点量化自然强迫因子(火山喷发等)和人类活动外强迫因子(温室气体、气溶胶等)对极端事件的影响(归因问题), 并回答其是否显著有别于气候系统内部变率的影响(检测问题).

长期变化的检测归因多基于“最优指纹法”(Tett等, 1999). 该方法也可以应用于复合事件变化的检测归因分析, 如用于复合高温(Wang J等, 2020a)、复合湿热事件(Li C等, 2020)、干旱高温事件(Li W等, 2022). 但对于更为复杂的类型, 如洪涝-高温事件, 由于发生概率

极低、不易用单一指标来表征事件、模式对事件间依存关系模拟能力有限等限制, 最优指纹法的适用性大大降低. 具体到区域尺度上复合事件变化的检测归因, 目前对城市化、灌溉、大面积退耕还林/毁林、气溶胶等区域尺度特有强迫的影响考虑甚少, 这与指纹法的方法设计(主要考虑大尺度强迫)和归因模式中对区域过程的描述缺失有关, 亟须研发更完整的方法框架和更精细的单因子强迫试验提高区域尺度复合事件变化的归因能力(Wang J等, 2021; Smith等, 2022).

对于高影响个例的归因, 传统事件归因方法仍具有可用性, 应用时的总体思路是可以将复合事件通过指标转化为单一事件的归因, 比较事件概率或强度在仅有自然强迫试验中(Historical Nat)和包括所有外强迫试验中(Historical All)的差异从而得到定量归因结论. 该思路常用于同时、同地发生的多变量复合事件类型(Wang S等, 2021; Wang和Sun, 2022). 对于更为复杂(时间、空间复合)的复合事件归因, 其面临的方法学挑战更加严峻, 从事件定义(极端性估计)、模式评估及订正(见上)、归因指标体系构建、定量归因和结果的解读等步骤均需要面向事件时空复合的特性进行重构(图2). 就事件定义而言, 如果包含多类不同事件(变量不同、单位不同、时空尺度不同、依存关系不明), 分析中无法简单构建事件强度指标, 也就无法进行回归期的估计. 高影响事件往往对应着较低的概率, 复合事件更是如此, 即便能够构建指标体系来量化其回归期, 统计拟合方法的误差将会极大(Bercos-Hickey等, 2022). 无法准确量化事件统计特征并定义归因对象, 后续的归因分析也就无从谈起. 传统的量化归因指标体系, 包括概率比(PR)或者可归因风险比(FAR)的构建并未考虑事件之间的依存关系对事件概率估计的影响, 需要进行完善和拓展(Zscheischler和Lehner, 2022); 另一种思路是通过条件概率的思路构建量化指标, 进而通过多维概率分布的方式比较在有人类活动和没有人类活动试验下的概率差别(Chiang等, 2021; Squire等, 2021). 在进行概率或强度差别量化时, 如果在自然强迫试验下没有识别到类似观测中的复合事件(事件本身概率极低或模式未能正确把握事件间的时-空联系), 将会导致我们做出“没有人类活动强迫, 此类事件不会发生”的夸大结论; 即便在自然强迫试验中偶然出现了类似事件, 得到的定量归因结论也会伴随较大的不确定性区间, 使得归因结论面向决

策者和大众的可用性、可解释性和可信度大幅降低。

一种基于事件发展过程的“故事线”条件归因方法有望同时解决复合事件概率低、事件特征难以描述和量化、模式对物理过程再现能力有限、事件动力条件对气候变化响应高度不确定、归因结论物理可解释性差等系列问题。该方法的基本思路是通过限定临近事件发生前的边界条件和初始条件,在不同的试验中“给定”统一的、真实的大尺度动力条件保证事件发生,通过扰动气候系统的热力状态来对比有无人类活动背景下,人类活动通过对气候系统热力状态的改变所产生的对事件发生与否和强度的影响(Hoerling等, 2013; Trenberth等, 2015; Shepherd, 2016)。该方法成功应用于机理复杂的台风/飓风事件极端降水(Patricola和Wehner, 2018; Reed等, 2022),局地-区域尺度的短时强降水(Matte等, 2022)和季风区区域持续性强降水(Wang J等, 2022),及动力过程复杂的“雨-热同期”空间复合事件(Wang J等 2023),破纪录的大范围高温干旱事件(Bercos-Hickey等, 2022)。该方法的优势在于:(1) 不需事先选择阈值,可以讨论历史上未发生过的破纪录事件或全新的事件组合形式;(2) 时空尺度可根据需要灵活可选;(3) 可以讲清人类活动对每一个关键物理环节的影响程度;(4) 可以进一步考虑非气候要素,如城市化、地形、海岸工程。这些优点使得该方法非常适合复杂动力条件驱动的、涉及自然条件与人文条件相互作用的复合事件归因(Wang J等, 2022)。该方法的缺点在于其限制了不确定性最大的动力条件对变暖的响应,生成的各集合成员之间并非完全独立样本,暂不太适用于事件概率的归因。随着动力条件对变暖响应的理论、观测和模拟的发展,未来这一归因框架有望进一步完善,从而对复合事件归因进行更完整的回答(Lloyd和Oreskes, 2018; Shepherd, 2016)。当预报、预测业务中常用的数值预报模式对复合事件表现出较好的再现能力时,可以充分利用模式物理过程清晰、预报集合成员多的优点,实现复合事件的准实时“故事线”概率归因(Leach等, 2021),这将是未来复合事件归因的一个重要发展方向。

6.3.3 未来预估

复合事件预估研究与传统预估面临类似的挑战,主要包括由排放情景,模式敏感性以及气候系统内部变率带来的预估不确定性。对于复合事件预估而言,

传统模式有限集合成员模拟(如CMIP)对气候内部变率模态的取样不足极易低估未来风险,尤其对于多事件随机组合形成的复合事件更是如此(Liao Z等, 2021)。在同等变暖条件下,气候系统内部变率的不同展现形式可以调制复合事件出现与否、出现时间、出现区域、强度和频次的变化速度。因此在复合事件的预估分析中,尤其是对低概率-高影响复合事件而言,内部变率不应视为预估中的“噪声”,而应视为与外强迫“信号”同等重要的有用信息(图2)(Mankin等, 2020)。上文中介绍的单一模式初值扰动大样本集合(SMILEs)是解决这一问题的有力工具,也是未来复合事件预估的重要发展方向(Zhou和Liu, 2018; Singh等, 2021a; Bevacqua等, 2022, 2023)。

为了减少极端事件预估的不确定性,各类约束预估方法成为近年来预估领域的研究热点,主要包括模式优选、多模式加权、基于归因结论的约束、涌现约束等方案(周佰铨和翟盘茂, 2021)。在复合事件预估应用上述方案,对用于建立约束关系的观测数据质量、数量、物理过程的理解、模式性能要求更高,因此各类约束方案是否适用于复合事件预估仍有待商榷。上文中提及的故事线归因方法也可进一步拓展到预估时段,回答在相似的动力条件下额外的变暖将对复合事件的发展过程和强度造成多大影响,相关结论可用作“压力测试(stress test)”、基础设施维护和升级以及防灾减灾政策制定的前瞻性科学建议(Bercos-Hickey等, 2022; Wang J等, 2022)。

6.4 影响、风险及适应

6.4.1 影响评估

复合事件研究的发展历程不过十余年时间,虽然已在定义及变化等方面取得了一定的进展,但是由于不同领域、部门和学科之间的数据壁垒等原因,目前复合事件对公共卫生、水资源、社会经济、农业生产、基础设施、生态系统等领域的定量化影响评估仍进展缓慢。同时,由于以往研究中对高影响事件“复合性”意识不足,可能对事件性质造成了一些误判,夸大了单一变量极端事件的影响,而忽视了多个事件之间的时-空复合特征的重要作用。因此十分有必要重新审视以往造成巨大人员伤亡和经济损失的事件性质,进而更加准确地识别和提取致灾因子及其组合。尽管复合事件研究兴起之初就一直提倡定义事件时需以影响

为中心(Zscheischler等, 2018), 但是由于影响数据缺乏等原因, 实际应用中从影响出发识别事件的研究较少(Bevacqua等, 2021; Culley等, 2021), 大部分方法还是先基于事件组合的统计学特征识别复合事件, 再设法确定类似的组合曾造成或可能造成重大影响. 这样从上而下的定义方式容易忽视复合事件变量间组合的多样性, 尤其是不太极端的事件组合造成极端影响的情况(van der Wiel等, 2020).

为了更好认识复合事件及其影响, 未来可以结合可公开获取的可信影响数据, 如EM-DAT, 对复合事件的影响进行量化分析(Tschumi和Zscheischler, 2019). 另外, 在建立复合事件与影响关系的同时, 传统研究经常基于统计学上的阈值, 未来可以采用基于影响指标来确定复合事件的阈值(Gaupp等, 2020); 或基于高影响历史事件, 回溯相应的气象和水文等自然条件同时兼顾当地脆弱性和暴露度的独特性, 给出合理的阈值或阈值组合(Ben-Ari等, 2018; Kreibich等, 2022).

需要有清醒认识的是并不是所有事件组合到一起都会增强放大彼此的影响: 一些事件本身与其他事件在动力热力本质上有互斥性导致一种事件发生概率增加的同时另一种事件概率相应减少, 从而降低二者叠加的可能性和影响(Hillier等, 2020); 另有一些事件的影响是相互缓解、相互抵消的(Harley等, 2022); 一些独有的系统暴露于某类极端事件后增强了其适应性, 抵御下一次类似强度的同类极端事件的能力明显增强, 也使得由这类事件组成的时间复合事件对该系统的影响不增反降(Chen等, 2022b).

6.4.2 风险

随着复合事件频率、强度的增长, 自然系统和人类社会的暴露度和脆弱性也呈现增加趋势, 这将导致复合事件的风险增加(风险定义为灾害、暴露度和脆弱性的组合, IPCC, 2022). 与复合事件相对应的是复合风险, 多个事件或者致灾因子同时影响生态系统和社会经济系统时可能造成风险的叠加和传递, 形成复合风险或者级联风险(IPCC, 2022). 但是目前对复合风险及级联影响的量化研究相对较少.

在复合事件风险评估方面, 当前研究聚焦在复合灾害本身, 在暴露度方面也有一些进展, 但是综合考虑危险性、暴露度和脆弱性的定量研究相对较少(Zhang Y等, 2023). 除了深化对复合事件的危险性和

暴露度的研究, 需要特别加强对脆弱性以及风险的量化研究. 不同承灾体对同时发生或者相继发生的极端事件的脆弱性研究逐步得到重视(de Ruiter等, 2020), 如针对澳大利亚大堡礁连续暴露于2016和2017年的海洋热浪后表现出的脆弱性的研究(Hughes等, 2019); 又如昼夜复合高温事件对人体健康影响需要考虑人口的年龄、性别、工作环境和类型对暴露度和脆弱性的调制作用(He等, 2021; Luo L等, 2022). 另外, 除了继续深化多个事件导致的复合致灾因子的研究, 还需要加强对多种风险同时或者相继发生导致的系统风险的认识(Simpson等, 2021; IPCC, 2022). 如复合高温干旱导致粮食安全风险、能源安全风险和水安全风险, 三者叠加可能会超出部分脆弱地区所能承受的上限, 造成严重后果(Hao等, 2023). 另外, 复合致灾因子对自然系统或者社会系统的影响不仅仅是在同一时期, 其累积影响可能在相当长的时期内存在或者变化, 同时伴随着暴露度和脆弱性的演变(Formetta和Feyen, 2019). 如在一定时间内相继发生两种灾害, 短期来说, 首个灾害会导致暴露度的增加; 而从长期来看, 由于减灾措施的实施暴露度可能减少(de Ruiter等, 2020). 因此, 需要从动态的角度分析复合风险或者级联风险的特征及演变.

对复合风险的认识、评估和管理需将气候变化的影响考虑进来. 气候变化不仅能改变单个极端事件的频次、强度、影响范围等致灾要素, 还可以通过创造出新的事件组合形式或使得复合事件发生在非传统热点地区和频发时段(Wu等, 2022; Liao Z等, 2021; Chen等, 2019), 导致已有的针对单一或复合事件的应对措施失效. 这就要求在复合风险评估和管理中不仅要立足当地的历史事件和曾出现过的组合, 还需要放眼全国甚至全球和未来时段, 评估无论是在物理上还是统计上可能出现的新型复合事件在本地发生后可能造成的后果(Woo, 2021); 并更加重视处在风险分布尾端的极低概率的“黑天鹅”事件未来发生的可能性, 而非仅关注基于模式一致性预估得到的一般极端事件未来概率的大致变化(图2, McCollum等, 2020).

6.4.3 适应

目前对复合事件的经济、社会、生态影响评估相对较少, 导致对风险认识不清, 对适应性措施的研究和设计更少. 虽然在概念上对复合事件及在不同系统或

者区域的级联影响已经受到重视, 但是这些事件的实际影响特别是适应性对策研究相对缺乏, 且在大多数国家的减灾以及气候变化适应性策略中并未考虑(Bouwer等, 2022).

复合事件的适应性措施需要考虑多个致灾因子(或者变量、过程等), 并需要设计能够考虑跨领域、跨区域风险传递的联合应对方案. 首先, 复合事件对不同领域以及行业的影响往往是多个变量、过程或者灾种的共同作用导致, 这意味着在制定适应性措施时需要以多变量视角厘清时序中的先后关系和成灾过程中的主次关系. 建立复合事件的预测预警系统是减少复合事件影响的重要举措, 这需要将现有的分部门的、分灾种的监测和预警体系转变和拓展为多部门整合的、针对复合灾害的联合框架和机制. 如对于复合高温干旱对农业、水资源和能源影响, 需要气象、农业、水利、市政等部门联合应对. 由于复合事件及其风险的复杂性, 人类社会的适应性措施尤其是不当适应(maladaptation)可能导致新的风险(IPCC, 2022), 因此在风险评估中, 也需要考虑和评估应对措施实施后的得失(Simpson等, 2021). 最后, 复合事件及其复合风险的研究目前大多停留在定性描述或者理论研究层面, 需要加强适应性措施的定量研究和试点化效果评估.

7 结论

近年来出现的由多个(类)极端事件组合而成的复合事件对自然生态系统和人类经济社会造成了比单一事件更大的影响, 此类事件也因此受到学界、决策部门和大众的广泛关注, 并逐渐演变为多学科领域交叉的前沿科学问题. 本文旨在对近10年来复合事件的国内外研究进展进行较为系统地回顾, 总结归纳该领域当前研究的不足和挑战, 并提出可能的解决方案和未来可能的发展方向.

文中首先简要介绍了复合事件的基本概念和常用研究方法, 进一步具体总结了大气、水文、陆地和海洋过程主导下的典型复合事件的定义、影响、物理机制、归因以及预估等方面的研究进展. 虽然在文中这些事件被人为地划归到地球系统的不同圈层, 但实际上大多数事件涉及多圈层过程及相互作用. 现有研究对事件类型的选择具有明显的偏向性, 其中复合高温

干旱事件、复合湿热事件以及沿海复合洪水事件研究较为成熟和丰富, 其他类型复合事件的研究多处于起步阶段. 就事件构成而言, 与高(低)温相关的复合事件多呈现增加(减少)趋势, 变化中的信噪比较高, 检测归因结论信度较好; 而诸如复合旱涝等以水文事件为主体的复合事件变率大, 信噪比低, 变化的区域性和季节性特征突出, 检测归因难度较大, 结论信度低.

在已有认识基础上, 本文进一步细致梳理了复合事件研究在数据需求、物理机制、模型评估-检测归因-未来预估, 影响量化、风险评估和适应策略等方面的不足和挑战. 提出了需要长序列、高质量、高时空分辨率的观测和模拟数据; 以地球系统多圈层相互作用的视角认识复合事件的孕育、发生、传导和互馈完整过程; 完善和发展多变量联合模拟评估和订正技术; 研发基于物理过程的高影响复合事件归因方法; 采用超大样本集合模拟以充分考虑内部变率对复合事件变化的调制作用; 以多学科交叉结合的手段加强复合事件影响量化及风险评估从而有力支撑适应性措施的制定, 提高针对复合事件的科学认识和应对能力.

本综述对复合事件研究进展的回顾尚存多方面不足. 在事件类型上, 本文未能涵盖所有已经识别出的复合事件, 尤其是近年来新定义的但相关研究较少的事件, 如低径流量与高水温可能严重威胁鱼类种群(Liu等, 2018; Shi H等, 2021), 并对水力和火力发电造成不利影响. 同时, 文中重点关注2个变量或者灾种组成的复合事件, 对更为复杂的多灾种复合涉及较少, 如复合干-热-风事件(Tavakol等, 2020; Zhao等, 2022), 日本2018年6~9月相继发生强降雨-洪水-泥石流-热浪-热带气旋(de Ruiter等, 2020), 美国加利福尼亚州2012~2018年连续经历干旱(2012~2016)-强降雨及植被疯长(2016~2017)-干旱高温及山火(2017)-强降雨及泥石流(2018)(AghaKouchak等, 2020). 另外, 本文也未涉及地质领域、流行病学等相关灾害, 现实生活中这些因素也可以是构成复合事件的分量并可能引发系统性风险. 这些局限和不足并不妨碍本文起到抛砖引玉的作用, 为从事极端事件研究、防灾减灾政策制定、风险管理等领域的科研人员、决策者和其他利益相关方提供有益的视角.

致谢 衷心感谢北京师范大学冯思芳、吕柏颖在本文图表方面的帮助.

参考文献

- 安宁, 左志燕. 2021. 1961~2017年中国地区热浪的结构变化. *中国科学: 地球科学*, 51: 1214–1226
- 翟盘茂, 廖圳, 陈阳, 余荣, 袁宇锋, 陆虹. 2017. 气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述. *气象学报*, 75: 527–538
- 周佰铨, 翟盘茂. 2021. IPCC第六次气候变化评估中的气候约束预估方法. *气象学报*, 79: 1063–1070
- AghaKouchak A, Chiang F, Huning L S, Love C A, Mallakpour I, Mazdiyasn O, Moftakhari H, Papalexios S M, Ragno E, Sadeh M. 2020. Climate extremes and compound hazards in a warming world. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 48: 519–548
- Anderson W B, Seager R, Baethgen W, Cane M, You L. 2019. Synchronous crop failures and climate-forced production variability. *Sci Adv*, 5: eaaw1976
- Ansari R, Grossi G. 2022. Spatio-temporal evolution of wet-dry event features and their transition across the Upper Jhelum Basin (UJB) in South Asia. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 22: 287–302
- Balch J K, Abatzoglou J T, Joseph M B, Koontz M J, Mahood A L, McGlinchy J, Cattau M E, Williams A P. 2022. Warming weakens the night-time barrier to global fire. *Nature*, 602: 442–448
- Barton Y, Giannakaki P, von Waldow H, Chevalier C, Pfahl S, Martius O. 2016. Clustering of regional-scale extreme precipitation events in southern Switzerland. *Mon Weather Rev*, 144: 347–369
- 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
- Batibeniz F, Hauser M, Seneviratne S I. 2023. Countries most exposed to individual and concurrent extremes and near-permanent extreme conditions at different global warming levels. *Earth Syst Dynam*, 14: 485–505
- Behrenfeld M J, O'Malley R T, Siegel D A, McClain C R, Sarmiento J L, Feldman G C, Milligan A J, Falkowski P G, Letelier R M, Boss E S. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752–755
- Ben-Ari T, Boé J, Ciais P, Lecerf R, Van der Velde M, Makowski D. 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nat Commun*, 9: 1627
- Beniston M. 2009. Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophys Res Lett*, 36: L07707
- Bercos-Hickey E, O'Brien T A, Wehner M F, Zhang L, Patricola C M, Huang H, Risser M D. 2022. Anthropogenic contributions to the 2021 pacific northwest heatwave. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099396
- Bevacqua E, De Michele C, Manning C, Couasnon A, Ribeiro A F S, Ramos A M, Vignotto E, Bastos A, Blesić S, Durante F, Hillier J, Oliveira S C, Pinto J G, Ragno E, Rivoire P, Saunders K, van der Wiel K, Wu W, Zhang T, Zscheischler J. 2021. Guidelines for studying diverse types of compound weather and climate events. *Earth's Future*, 9: e2021EF002340
- 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
- Bevacqua E, Maraun D, Hobæk Haff I, Widmann M, Vrac M. 2017. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: Analysis of floods in Ravenna (Italy). *Hydrol Earth Syst Sci*, 21: 2701–2723
- Bevacqua E, Maraun D, Voudoukas M I, Voukouvalas E, Vrac M, Mentaschi L, Widmann M. 2019. Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Sci Adv*, 5: eaaw5531
- Bevacqua E, Voudoukas M I, Shepherd T G, Vrac M. 2020a. Brief communication: The role of using precipitation or river discharge data when assessing global coastal compound flooding. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 20: 1765–1782
- Bevacqua E, Voudoukas M I, Zappa G, Hodges K, Shepherd T G, Maraun D, Mentaschi L, Feyen L. 2020b. More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Commun Earth Environ*, 1: 47
- Bevacqua E, Zappa G, Lehner F, Zscheischler J. 2022. Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events. *Nat Clim Chang*, 12: 350–355
- Black E, Blackburn M, Harrison G, Hoskins B, Methven J. 2004. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 59: 217–223
- Boers N, Goswami B, Rheinwalt A, Bookhagen B, Hoskins B, Kurths J. 2019. Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. *Nature*, 566: 373–377
- Bolinger R A, Brown V M, Fuhrmann C M, Gleason K L, Joyner T A, Keim B D, Lewis A, Nielsen-Gammon J W, Stiles C J, Tollefson W, Attard H E, Bentley A M. 2022. An assessment of the extremes and impacts of the February 2021 South-Central U.S. Arctic outbreak, and how climate services can help. *Weather Clim Extrem*, 36: 100461
- Borg M A, Xiang J, Anikeeva O, Pisaniello D, Hansen A, Zander K, Dear K, Sim M R, Bi P. 2021. Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence. *Environ Res*, 195: 110781
- Bouwer L M, Cheong S M, Jacot Des Combes H, Frölicher T L, McInnes K L, Ratter B M W, Rivera-Arriaga E. 2022. Risk

- management and adaptation for extremes and abrupt changes in climate and oceans: Current knowledge gaps. *Front Clim*, 3: 785641
- Boyce D G, Lewis M R, Worm B. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466: 591–596
- Brida A B, Owiyo T, Sokona Y. 2013. Loss and damage from the double blow of flood and drought in Mozambique. *Int J Glob Warm*, 5: 514–531
- Burger F A, Terhaar J, Frölicher T L. 2022. Compound marine heatwaves and ocean acidity extremes. *Nat Commun*, 13: 4722
- Buzan J R, Huber M. 2020. Moist heat stress on a hotter Earth. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 48: 623–655
- Camus P, Haigh I D, Wahl T, Nasr A A, Méndez F J, Darby S E, Nicholls R J. 2022. Daily synoptic conditions associated with occurrences of compound events in estuaries along north Atlantic coastlines. *Intl J Climatol*, 42: 5694–5713
- Cannon A J. 2016. Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *J Clim*, 29: 7045–7064
- Cannon A J. 2018. Multivariate quantile mapping bias correction: An n-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim Dyn*, 50: 31–49
- Casanueva A, Bedia J, Herrera S, Fernández J, Gutiérrez J M. 2018. Direct and component-wise bias correction of multi-variate climate indices: The percentile adjustment function diagnostic tool. *Clim Change*, 147: 411–425
- Casanueva A, Kotlarski S, Herrera S, Fischer A M, Kjellstrom T, Schwierz C. 2019. Climate projections of a multivariate heat stress index: The role of downscaling and bias correction. *Geosci Model Dev*, 12: 3419–3438
- Catto J L, Dowdy A. 2021. Understanding compound hazards from a weather system perspective. *Weather Clim Extrem*, 32: 100313
- Cavole L M, Demko A M, Diner R E, Giddings A, Koester I, Pagniello C M, Paulsen M L, Ramirez-Valdez A, Schwenck S M, Yen N K, Zill M E, Franks P J S. 2016. Biological impacts of the 2013–2015 warm-water anomaly in the northeast Pacific: Winners, losers, and the future. *Oceanography*, 29: 273–285
- Chen H, Wang S. 2022. Accelerated transition between dry and wet periods in a warming climate. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099766
- Chen H, Wang S, Zhu J, Zhang B. 2020. Projected changes in abrupt shifts between dry and wet extremes over China through an ensemble of regional climate model simulations. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2020JD033894
- Chen W, Zhu D, Huang C, Ciais P, Yao Y, Friedlingstein P, Sitch S, Haverd V, Jain A K, Kato E, Kautz M, Lienert S, Lombardozzi D, Poulter B, Tian H, Vuichard N, Walker A P, Zeng N. 2019. Negative extreme events in gross primary productivity and their drivers in China during the past three decades. *Agric For Meteorol*, 275: 47–58
- Chen Y. 2020. Increasingly uneven intra-seasonal distribution of daily and hourly precipitation over eastern China. *Environ Res Lett*, 15: 104068
- Chen Y, Li Y. 2017. An inter-comparison of three heat wave types in China during 1961–2010: Observed basic features and linear trends. *Sci Rep*, 7: 45619
- Chen Y, Liao Z, Shi Y, Li P, Zhai P. 2022a. Greater flash flood risks from hourly precipitation extremes preconditioned by heatwaves in the Yangtze River Valley. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099485
- Chen Y, Liao Z, Shi Y, Tian Y, Zhai P. 2021. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961–2018. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL092549
- Chen Y, Vogel A, Wagg C, Xu T, Iturrate-Garcia M, Scherer-Lorenzen M, Weigelt A, Eisenhauer N, Schmid B. 2022b. Drought-exposure history increases complementarity between plant species in response to a subsequent drought. *Nat Commun*, 13: 3217
- Chen Y, Zhai P. 2017a. Revisiting summertime hot extremes in China during 1961–2015: Overlooked compound extremes and significant changes. *Geophys Res Lett*, 44: 5096–5103
- Chen Y, Zhai P. 2017b. Simultaneous modulations of precipitation and temperature extremes in southern parts of China by the boreal summer intraseasonal oscillation. *Clim Dyn*, 49: 3363–3381
- Chen Y, Zhou B, Zhai P, Moufouma-Okia W. 2019. Half-a-degree matters for reducing and delaying global land exposure to combined daytime-nighttime hot extremes. *Earths Future*, 7: 953–966
- Cheng L, Liu Z. 2022. Detectable increase in global land areas susceptible to precipitation reversals under the RCP8.5 scenario. *Earths Future*, 10: e2022EF002948
- Cheung W W L, Frölicher T L, Lam V W Y, Oyinlola M A, Reygondeau G, Sumaila U R, Tai T C, Teh L C L, Wabnitz C C C. 2021. Marine high temperature extremes amplify the impacts of climate change on fish and fisheries. *Sci Adv*, 7: eabh0895
- Chiang F, Greve P, Mazdhyasni O, Wada Y, AghaKouchak A. 2021. A multivariate conditional probability ratio framework for the detection and attribution of compound climate extremes. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL094361
- Christian J, Christian K, Basara J B. 2015. Drought and pluvial dipole events within the great plains of the United States. *J Appl Meteorol Climatol*, 54: 1886–1898
- Clarke H, Nolan R H, De Dios V R, Bradstock R, Griebel A, Khanal S, Boer M M. 2022. Forest fire threatens global carbon sinks and population centres under rising atmospheric water demand. *Nat Commun*, 13: 7161
- Couasnon A, Eilander D, Muis S, Veldkamp T I E, Haigh I D, Wahl T,

- Winsemius H C, Ward P J. 2020. Measuring compound flood potential from river discharge and storm surge extremes at the global scale. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 20: 489–504
- Culley S, Maier H R, Westra S, Bennett B. 2021. Identifying critical climate conditions for use in scenario-neutral climate impact assessments. *Environ Model Software*, 136: 104948
- Dai A, Rasmussen R M, Liu C, Ikeda K, Prein A F. 2020. A new mechanism for warm-season precipitation response to global warming based on convection-permitting simulations. *Clim Dyn*, 55: 343–368
- Das J, Manikanta V, Umamahesh N V. 2022. Population exposure to compound extreme events in India under different emission and population scenarios. *Sci Total Environ*, 806: 150424
- De Luca P, Messori G, Faranda D, Ward P J, Coumou D. 2020a. Compound warm-dry and cold-wet events over the Mediterranean. *Earth Syst Dynam*, 11: 793–805
- De Luca P, Messori G, Wilby R L, Mazzoleni M, Di Baldassarre G. 2020b. Concurrent wet and dry hydrological extremes at the global scale. *Earth Syst Dynam*, 11: 251–266
- de Ruiter M C, Couasnon A, van den Homberg M J C, Daniell J E, Gill J C, Ward P J. 2020. Why we can no longer ignore consecutive disasters. *Earths Future*, 8: e2019EF001425
- Deng D, Gao S, Du X, Wu W. 2012. A diagnostic study of freezing rain over Guizhou, China, in January 2011. *Quart J R Meteorol Soc*, 138: 1233–1244
- 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
- Dirmeyer P A, Balsamo G, Blyth E M, Morrison R, Cooper H M. 2021. Land-atmosphere interactions exacerbated the drought and heatwave over northern Europe during Summer 2018. *AGU Adv*, 2: e2020AV000283
- Dong X, Xi B, Kennedy A, Feng Z, Entin J K, Houser P R, Schiffer R A, L'Ecuyer T, Olson W S, Hsu K L, Liu W T, Lin B, Deng Y, Jiang T. 2011. Investigation of the 2006 drought and 2007 flood extremes at the southern great plains through an integrative analysis of observations. *J Geophys Res*, 116: D03204
- Donges J F, Schleussner C F, Siegmund J F, Donner R V. 2016. Event coincidence analysis for quantifying statistical interrelationships between event time series. *Eur Phys J Spec Top*, 225: 471–487
- Drakes O, Tate E. 2022. Social vulnerability in a multi-hazard context: A systematic review. *Environ Res Lett*, 17: 033001
- Du J, Wang K, Cui B, Jiang S, Wu G. 2020. Attribution of the record-breaking consecutive dry days in Winter 2017/18 in Beijing. *Bull Am Meteorol Soc*, 101: S95–S102
- Eilander D, Couasnon A, Ikeuchi H, Muis S, Yamazaki D, Winsemius H C, Ward P J. 2020. The effect of surge on riverine flood hazard and impact in deltas globally. *Environ Res Lett*, 15: 104007
- Fang B, Lu M. 2023. Asia faces a growing threat from intraseasonal compound weather whiplash. *Earths Future*, 11: e2022EF003111
- Fang J, Wahl T, Fang J, Sun X, Kong F, Liu M. 2021. Compound flood potential from storm surge and heavy precipitation in coastal China: Dependence, drivers, and impacts. *Hydrol Earth Syst Sci*, 25: 4403–4416
- Feng K, Ouyang M, Lin N. 2022. Tropical cyclone-blackout-heatwave compound hazard resilience in a changing climate. *Nat Commun*, 13: 4421
- Feng S, Hao Z, Zhang Y, Zhang X, Hao F. 2023. Amplified future risk of compound droughts and hot events from a hydrological perspective. *J Hydrol*, 617: 129143
- Ford T W, Schoof J T. 2017. Characterizing extreme and oppressive heat waves in Illinois. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 682–698
- Formetta G, Feyen L. 2019. Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. *Glob Environ Change*, 57: 101920
- Fowler H J, Lenderink G, Prein A F, Westra S, Allan R P, Ban N, Barbero R, Berg P, Blenkinsop S, Do H X, Guerreiro S, Haerter J O, Kendon E J, Lewis E, Schaer C, Sharma A, Villarini G, Wasko C, Zhang X. 2021. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 107–122
- Frölicher T L, Fischer E M, Gruber N. 2018. Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560: 360–364
- Freychet N, Hegerl G C, Lord N S, Lo Y T E, Mitchell D, Collins M. 2022. Robust increase in population exposure to heat stress with increasing global warming. *Environ Res Lett*, 17: 064049
- Ganguli P, Paprotny D, Hasan M, Güntner A, Merz B. 2020. Projected changes in compound flood hazard from riverine and coastal floods in northwestern Europe. *Earths Future*, 8: e2020EF001752
- García-Díez M, Fernández J, Vautard R. 2015. An RCM multi-physics ensemble over Europe: Multi-variable evaluation to avoid error compensation. *Clim Dyn*, 45: 3141–3156
- Gaupp F, Hall J, Hochrainer-Stigler S, Dadson S. 2020. Changing risks of simultaneous global breadbasket failure. *Nat Clim Chang*, 10: 54–57
- Gaupp F, Hall J, Mitchell D, Dadson S. 2019. Increasing risks of multiple breadbasket failure under 1.5 and 2°C global warming. *Agric Syst*, 175: 34–45
- Ghanbari M, Arabi M, Kao S C, Obeysekera J, Sweet W. 2021. Climate change and changes in compound coastal-riverine flooding hazard

- along the U.S. coasts. *Earths Future*, 9: e2021EF002055
- Gill J C, Malamud B D. 2014. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Rev Geophys*, 52: 680–722
- Gissing A, Timms M, Browning S, Crompton R, McAneney J. 2022. Compound natural disasters in Australia: A historical analysis. *Environ Hazards*, 21: 159–173
- Gloege L, Kornhuber K, Skulovich O, Pal I, Zhou S, Ciais P, Gentile P. 2022. Land-atmosphere cascade fueled the 2020 Siberian heatwave. *AGU Adv*, 3: e2021AV000619
- Gori A, Lin N, Xi D. 2020. Tropical cyclone compound flood hazard assessment: From investigating drivers to quantifying extreme water levels. *Earths Future*, 8: e2020EF001660
- Gori A, Lin N, Xi D, Emanuel K. 2022. Tropical cyclone climatology change greatly exacerbates US extreme rainfall-surge hazard. *Nat Clim Chang*, 12: 171–178
- Gruber N, Boyd P W, Frölicher T L, Vogt M. 2021. Biogeochemical extremes and compound events in the ocean. *Nature*, 600: 395–407
- Gu L, Chen J, Yin J, Slater L J, Wang H M, Guo Q, Feng M, Qin H, Zhao T. 2022. Global increases in compound flood-hot extreme hazards under climate warming. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL097726
- Guntu R K, Agarwal A. 2021. Disentangling increasing compound extremes at regional scale during Indian Summer monsoon. *Sci Rep*, 11: 16447
- Guo Q, Chen J, Zhang X J, Xu C Y, Chen H. 2020. Impacts of using state-of-the-art multivariate bias correction methods on hydrological modeling over North America. *Water Resources Res*, 56: e2019WR026659
- Guo X, Gao Y, Zhang S, Wu L, Chang P, Cai W, Zscheischler J, Leung L R, Small J, Danabasoglu G, Thompson L, Gao H. 2022. Threat by marine heatwaves to adaptive large marine ecosystems in an eddy-resolving model. *Nat Clim Chang*, 12: 179–186
- Ha K J, Seo Y W, Yeo J H, Timmermann A, Chung E S, Franzke C L E, Chan J C L, Yeh S W, Ting M. 2022. Dynamics and characteristics of dry and moist heatwaves over East Asia. *Npj Clim Atmos Sci*, 5: 49
- Hao Z. 2022. Compound events and associated impacts in China. *iScience*, 25: 104689
- Hao Z, AghaKouchak A, Phillips T J. 2013. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environ Res Lett*, 8: 034014
- 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
- 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: Characteristics, drivers, changes, and impacts. *Earth-Sci Rev*, 235: 104241
- Hao Z, Singh V P. 2020. Compound events under global warming: A dependence perspective. *J Hydrol Eng*, 25: 03120001
- Hao Z, Singh V P, Xia Y. 2018. Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects. *Rev Geophys*, 56: 108–141
- Harley M D, Masselink G, Ruiz de Alegria-Arzaburu A, Valiente N G, Scott T. 2022. Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise. *Commun Earth Environ*, 3: 1
- He C, Kim H, Hashizume M, Lee W, Honda Y, Kim S E, Kinney P L, Schneider A, Zhang Y, Zhu Y, Zhou L, Chen R, Kan H. 2022. The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: A modelling study. *Lancet Planet Health*, 6: e648–e657
- He G, Xu Y, Hou Z, Ren Z, Zhou M, Chen Y, Zhou C, Xiao Y, Yu M, Huang B, Xu X, Lin L, Liu T, Xiao J, Gong W, Hu R, Li J, Jin D, Qin M, Zhao Q, Yin P, Xu Y, Hu J, Zeng W, Li X, Chen S, Guo L, Huang C, Yang X, Ma W. 2021. The assessment of current mortality burden and future mortality risk attributable to compound hot extremes in China. *Sci Total Environ*, 777: 146219
- Hénin R, Ramos A M, Pinto J G, Liberato M L R. 2021. A ranking of concurrent precipitation and wind events for the Iberian peninsula. *Int J Climatol*, 41: 1421–1437
- He X, Sheffield J. 2020. Lagged compound occurrence of droughts and pluvials globally over the past seven decades. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL087924
- Hendry A, Haigh I D, Nicholls R J, Winter H, Neal R, Wahl T, Joly-Laugel A, Darby S E. 2019. Assessing the characteristics and drivers of compound flooding events around the UK coast. *Hydrol Earth Syst Sci*, 23: 3117–3139
- Herrera-Estrada J E, Diffenbaugh N S. 2020. Landfalling droughts: Global tracking of moisture deficits from the oceans onto land. *Water Resources Res*, 56: e2019WR026877
- Hillier J K, Matthews T, Wilby R L, Murphy C. 2020. Multi-hazard dependencies can increase or decrease risk. *Nat Clim Chang*, 10: 595–598
- Hochman A, Alpert P, Kunin P, Rostkier-Edelstein D, Harpaz T, Saaroni H, Messori G. 2020. The dynamics of cyclones in the twenty-first century: The Eastern Mediterranean as an example. *Clim Dyn*, 54: 561–574
- Hoerling M, Kumar A, Dole R, Nielsen-Gammon J W, Eischeid J, Perlwitz J, Quan X W, Zhang T, Pegion P, Chen M. 2013. Anatomy of an extreme event. *J Clim*, 26: 2811–2832
- Holbrook N J, Scannell H A, Sen Gupta A, Benthuyssen J A, Feng M, Oliver E C J, Alexander L V, Burrows M T, Donat M G, Hobday A

- J, Moore P J, Perkins-Kirkpatrick S E, Smale D A, Straub S C, Wernberg T. 2019. A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nat Commun*, 10: 2624
- Hoover D L, Hajek O L, Smith M D, Wilkins K, Slette I J, Knapp A K. 2022. Compound hydroclimatic extremes in a semi-arid grassland: Drought, deluge, and the carbon cycle. *Glob Change Biol*, 28: 2611–2621
- Houston T G, Changnon S A. 2007. Freezing rain events: A major weather hazard in the conterminous US. *Nat Hazards*, 40: 485–494
- Hu L. 2021. A global assessment of coastal marine heatwaves and their relation with coastal urban thermal changes. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL093260
- Huang J, Li Q, Song Z. 2022. Historical global land surface air apparent temperature and its future changes based on CMIP6 projections. *Sci Total Environ*, 816: 151656
- Huang W, Ye F, Zhang Y J, Park K, Du J, Moghimi S, Myers E, Pe'eri S, Calzada J R, Yu H C, Nunez K, Liu Z. 2021. Compounding factors for extreme flooding around Galveston Bay during Hurricane Harvey. *Ocean Model*, 158: 101735
- Hughes J P, Guttorp P, Charles S P. 1999. A non-homogeneous hidden markov model for precipitation occurrence. *J R Statistical Soc Ser C-Appl Stat*, 48: 15–30
- Hughes T P, Kerry J T, Connolly S R, Baird A H, Eakin C M, Heron S F, Hoey A S, Hoogenboom M O, Jacobson M, Liu G, Pratchett M S, Skirving W, Torda G. 2019. Ecological memory modifies the cumulative impact of recurrent climate extremes. *Nat Clim Change*, 9: 40–43
- Idier D, Bertin X, Thompson P, Pickering M D. 2019. Interactions between mean sea level, tide, surge, waves and flooding: Mechanisms and contributions to sea level variations at the coast. *Surv Geophys*, 40: 1603–1630
- Ikeuchi H, Hirabayashi Y, Yamazaki D, Muis S, Ward P J, Winsemius H C, Verlaan M, Kanae S. 2017. Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: Model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh. *J Adv Model Earth Syst*, 9: 1847–1862
- Im E S, Pal J S, Eltahir E A B. 2017. Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia. *Sci Adv*, 3: e1603322
- 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. 2019. IPCC special report on ocean and cryosphere in a changing climate. In: Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, Zhai P, Tignor M, Poloczanska E, Mintenbeck K, Alegria A, Nicolai M, Okem A, Petzold J, Rama B, Weyer N, eds. Cambridge: Cambridge University Press. 447–587
- 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 IPCC. 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
- Jafarzadegan K, Moradkhani H, Pappenberger F, Moftakhari H, Bates P, Abbaszadeh P, Marsooli R, Ferreira C, Cloke H L, Ogden F, Duan Q. 2023. Recent advances and new frontiers in riverine and coastal flood modeling. *Rev Geophys*, 61: e2022RG000788
- Jeong D I, Cannon A J, Morris R J. 2020. Projected changes to wind loads coinciding with rainfall for building design in Canada based on an ensemble of Canadian regional climate model simulations. *Clim Change*, 162: 821–835
- Jha S, Gudmundsson L, Seneviratne S I. 2023. Partitioning the uncertainties in compound hot and dry precipitation, soil moisture, and runoff extremes projections in CMIP6. *Earths Future*, 11: e2022EF003315
- Jiang S, Bevacqua E, Zscheischler J. 2022. River flooding mechanisms and their changes in Europe revealed by explainable machine learning. *Hydrol Earth Syst Sci*, 26: 6339–6359
- Kam J, Sheffield J, Yuan X, Wood E F. 2013. The influence of Atlantic tropical cyclones on drought over the eastern United States (1980–2007). *J Clim*, 26: 3067–3086
- Kang S, Eltahir E A B. 2018. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation. *Nat Commun*, 9: 2894
- Klein S G, Geraldi N R, Anton A, Schmidt-Roach S, Ziegler M, Czielski M J, Martin C, Rädecker N, Frölicher T L, Mumby P J, Pandolfi J M, Suggett D J, Voolstra C R, Aranda M, Duarte C M. 2022. Projecting coral responses to intensifying marine heatwaves under ocean acidification. *Glob Change Biol*, 28: 1753–1765
- Kornhuber K, Coumou D, Vogel E, Lesk C, Donges J F, Lehmann J, Horton R M. 2020. Amplified rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nat Clim Chang*, 10: 48–53
- Kragh T, Martinsen K T, Kristensen E, Sand-Jensen K. 2020. From drought to flood: Sudden carbon inflow causes whole-lake anoxia and massive fish kill in a large shallow lake. *Sci Total Environ*, 739: 140072

- Kreibich H, Van Loon A F, Schröter K, Ward P J, Mazzoleni M, Sairam N, Abeshu G W, Agafonova S, AghaKouchak A, Aksoy H, Alvarez-Garretón C, Aznar B, Balkhi L, Barendrecht M H, Biancamaria S, Bos-Burginger L, Bradley C, Budiyo Y, Buytaert W, Capewell L, Carlson H, Cavus Y, Couasnon A, Coxon G, Daliakopoulos I, de Ruiter M C, Delus C, Erfurt M, Esposito G, François D, Frappart F, Freer J, Frolova N, Gain A K, Grillakis M, Grima J O, Guzmán D A, Huning L S, Ionita M, Kharlamov M, Khoi D N, Kieboom N, Kireeva M, Koutroulis A, Lavado-Casimiro W, Li H Y, LLasat M C, Macdonald D, Mård J, Mathew-Richards H, McKenzie A, Mejia A, Mendiondo E M, Mens M, Mobini S, Mohor G S, Nagavciuc V, Ngo-Duc T, Thao Nguyen Huynh T, Nhi P T T, Petrucci O, Nguyen H Q, Quintana-Seguí P, Razavi S, Ridolfi E, Riegel J, Sadik M S, Savelli E, Sazonov A, Sharma S, Sørensen J, Arguello Souza F A, Stahl K, Steinhäuser M, Stoelzle M, Szalińska W, Tang Q, Tian F, Tokarczyk T, Tovar C, Tran T V T, Van Huijgevoort M H J, van Vliet M T H, Vorogushyn S, Wagener T, Wang Y, Wendt D E, Wickham E, Yang L, Zambrano-Bigiarini M, Blöschl G, Di Baldassarre G. 2022. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, 608: 80–86
- Kruczkiewicz A, Klopp J, Fisher J, Mason S, McClain S, Sheekh N M, Moss R, Parks R M, Braneon C. 2021. Compound risks and complex emergencies require new approaches to preparedness. *Proc Natl Acad Sci USA*, 118: e2106795118
- Kwiatkowski L, Torres O, Bopp L, Aumont O, Chamberlain M, Christian J R, Dunne J P, Gehlen M, Ilyina T, John J G, Lenton A, Li H, Lovenduski N S, Orr J C, Palmieri J, Santana-Falcón Y, Schwinger J, Séférian R, Stock C A, Tagliabue A, Takano Y, Tjiputra J, Toyama K, Tsujino H, Watanabe M, Yamamoto A, Yool A, Ziehn T. 2020. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences*, 17: 3439–3470
- Lai Y, Li J, Gu X, Liu C, Chen Y D. 2021. Global compound floods from precipitation and storm surge: Hazards and the roles of cyclones. *J Clim*, 34: 8319–8339
- Leach N J, Weisheimer A, Allen M R, Palmer T. 2021. Forecast-based attribution of a winter heatwave within the limit of predictability. *Proc Natl Acad Sci USA*, 118: e2112087118
- Le Grix N, Zscheischler J, Laufkötter C, Rousseaux C S, Frölicher T L. 2021. Compound high-temperature and low-chlorophyll extremes in the ocean over the satellite period. *Biogeosciences*, 18: 2119–2137
- Le Grix N, Zscheischler J, Rodgers K B, Yamaguchi R, Frölicher T L. 2022. Hotspots and drivers of compound marine heatwaves and low net primary production extremes. *Biogeosciences*, 19: 5807–5835
- Leonard M, Westra S, Phatak A, Lambert M, van den Hurk B, McInnes K, Risbey J, Schuster S, Jakob D, Stafford-Smith M. 2014. A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Clim Change*, 5: 113–128
- Li C, Sun Y, Zwiers F, Wang D, Zhang X, Chen G, Wu H. 2020. Rapid warming in Summer wet bulb globe temperature in China with human-induced climate change. *J Clim*, 33: 5697–5711
- Li C, Zhang X, Zwiers F, Fang Y, Michalak A M. 2017. Recent very hot summers in northern hemispheric land areas measured by wet bulb globe temperature will be the norm within 20 years. *Earths Future*, 5: 1203–1216
- Li D, Chen Y, Messmer M, Zhu Y, Feng J, Yin B, Bevacqua E. 2022. Compound wind and precipitation extremes across the Indo-Pacific: Climatology, Variability, and drivers. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL098594
- Li D, Yuan J, Kopp R E. 2020. Escalating global exposure to compound heat-humidity extremes with warming. *Environ Res Lett*, 15: 064003
- Li G, Cheng L, Zhu J, Trenberth K E, Mann M E, Abraham J P. 2020. Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nat Clim Chang*, 10: 1116–1123
- Li H, Chen H, Wang H, Sun J, Ma J. 2018. Can Barents sea ice decline in spring enhance summer hot drought events over northeastern China? *J Clim*, 31: 4705–4725
- Li J, Bevacqua E, Chen C, Wang Z, Chen X, Myneni R B, Wu X, Xu C Y, Zhang Z, Zscheischler J. 2022. Regional asymmetry in the response of global vegetation growth to springtime compound climate events. *Commun Earth Environ*, 3: 123
- Li W, Jiang Z, Li L Z X, Luo J J, Zhai P. 2022. Detection and attribution of changes in Summer compound hot and dry events over northeastern China with CMIP6 models. *J Meteorol Res*, 36: 37–48
- Li X, Chen Y, Zhu Y, Shi Y, An N, Liao Z. 2023. Underestimated increase and intensification of humid-heat extremes across southeast China due to humidity data inhomogeneity. *Front Environ Sci*, 10: 1104039
- Li Y, Ding Y, Liu Y. 2021. Mechanisms for regional compound hot extremes in the mid-lower reaches of the Yangtze River. *Intl J Climatol*, 41: 1292–1304
- Lian X, Piao S, Li L Z X, Li Y, Huntingford C, Ciais P, Cescatti A, Janssens I A, Peñuelas J, Buermann W, Chen A, Li X, Myneni R B, Wang X, Wang Y, Yang Y, Zeng Z, Zhang Y, McVicar T R. 2020. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. *Sci Adv*, 6: eaax0255
- Liao W, Li D, Malyshev S, Shevliakova E, Zhang H, Liu X. 2021. Amplified increases of compound hot extremes over Urban Land in China. *Geophys Res Lett*, 48: e2020GL091252
- Liao Z, Chen Y, Li W, Zhai P. 2021. Growing threats from

- unprecedented sequential flood-hot extremes across China. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL094505
- Libonati R, Geirinhas J L, Silva P S, Monteiro dos Santos D, Rodrigues J A, Russo A, Peres L F, Narcizo L, Gomes M E R, Rodrigues A P, DaCamara C C, Pereira J M C, Trigo R M. 2022. Drought-heatwave nexus in Brazil and related impacts on health and fires: A comprehensive review. *Ann New York Acad Sci*, 1517: 44–62
- Lin P, Zhao B, Wei J, Liu H, Zhang W, Chen X, Jiang J, Ding M, Man W, Jiang J, Zhang X, Ding Y, Bai W, Jin C, Yu Z, Li Y, Zheng W, Zhou T. 2022. The Super-large Ensemble Experiments of CAS FGOALS-g3. *Adv Atmos Sci*, 39: 1746–1765
- Lin Q, Yuan J. 2022. Linkages between amplified quasi-stationary waves and humid heat extremes in northern hemisphere midlatitudes. *J Clim*, 35: 8245–8258
- Lin Y C, Jenkins S F, Chow J R, Biass S, Woo G, Lallemand D. 2020. Modeling downward counterfactual events: Unrealized disasters and why they matter. *Front Earth Sci*, 8: 575048
- Liu X, Luo Y, Yang T, Liang K, Zhang M, Liu C. 2015. Investigation of the probability of concurrent drought events between the water source and destination regions of China's water diversion project. *Geophys Res Lett*, 42: 8424–8431
- Liu Z, Chen X, Liu F, Lin K, He Y, Cai H. 2018. Joint dependence between river water temperature, air temperature, and discharge in the Yangtze River: The Role of the Three Gorges Dam. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 11938–11951
- Liu Z, Cheng L, Wang X, Lin K, Chen X, Zhao T, Tu X, Zhou P. 2022. A probabilistic framework for sequential drought-fluvial identification, probability estimation and prediction. *J Hydrol*, 612: 128115
- Llasat M C, Turco M, Quintana-Seguí P, Llasat-Botija M. 2014. The snow storm of 8 March 2010 in Catalonia (Spain): A paradigmatic wet-snow event with a high societal impact. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 14: 427–441
- Lloyd E A, Oreskes N. 2018. Climate change attribution: When is it appropriate to accept new methods? *Earths Future*, 6: 311–325
- Loecke T D, Burgin A J, Riveros-Iregui D A, Ward A S, Thomas S A, Davis C A, Clair M A S. 2017. Weather whiplash in agricultural regions drives deterioration of water quality. *Biogeochemistry*, 133: 7–15
- Luo L, Zeng F, Bai G, Gong W, Ren Z, Hu J, He G, Shi H, Lin Z, Liu T, Yin P, Qin M, Hou Z, Meng R, Zhou C, Dong X, Pingcuo Z, Xiao Y, Yu M, Huang B, Xu X, Lin L, Xiao J, Zhong J, Jin D, Li Y, Gama C, Xiong P, Xu Y, Lv L, Zeng W, Li X, Zhou M, Huang C, Ma W. 2022. Future injury mortality burden attributable to compound hot extremes will significantly increase in China. *Sci Total Environ*, 845: 157019
- Luo M, Lau N C. 2018. Increasing heat stress in urban areas of eastern China: Acceleration by urbanization. *Geophys Res Lett*, 45: 13060–13069
- Luo M, Lau N C. 2021. Increasing human-perceived heat stress risks exacerbated by urbanization in China: A comparative study based on multiple metrics. *Earths Future*, 9: e2020EF001848
- Luo M, Lau N C, Liu Z. 2022a. Different mechanisms for daytime, nighttime, and compound heatwaves in southern China. *Weather Clim Extrem*, 36: 100449
- Luo M, Wu S, Liu Z, Lau N C. 2022b. Contrasting circulation patterns of dry and humid heatwaves over southern China. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099243
- Ma F, Yuan X. 2021. More persistent summer compound hot extremes caused by global urbanization. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL093721
- Ma F, Yuan X, Wu P, Zeng Z. 2022. A moderate mitigation can significantly delay the emergence of compound hot extremes. *J Geophys Res-Atmos*, 127: e2021JD035427
- Ma S, Zhu C. 2019. Extreme cold wave over east Asia in January 2016: A possible response to the larger internal atmospheric variability induced by arctic warming. *J Clim*, 32: 1203–1216
- Mallakpour I, Villarini G, Jones M P, Smith J A. 2017. On the use of cox regression to examine the temporal clustering of flooding and heavy precipitation across the central United States. *Glob Planet Change*, 155: 98–108
- Mankin J S, Lehner F, Coats S, McKinnon K A. 2020. The value of initial condition large ensembles to robust adaptation decision-making. *Earths Future*, 8: e2012EF001610
- Markantonis I, Vlachogiannis D, Sfetsos A, Kioutsioukis I. 2022. Investigation of the extreme wet-cold compound events changes between 2025–2049 and 1980–2004 using regional simulations in Greece, *Earth Syst Dynam*, 13: 1491–1504
- Martius O, Pfahl S, Chevalier C. 2016. A global quantification of compound precipitation and wind extremes. *Geophys Res Lett*, 43: 7709–7717
- Matte D, Christensen J H, Feddersen H, Vedel H, Nielsen N W, Pedersen R A, Zeitzner R M K. 2022. On the potentials and limitations of attributing a small-scale climate event. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099481
- Matthews T. 2018. Humid heat and climate change. *Prog Phys Geogr*, 42: 391–405
- Matthews T, Wilby R L, Murphy C. 2019. An emerging tropical cyclone-deadly heat compound hazard. *Nat Clim Chang*, 9: 602–606
- Maxwell J T, Ortegren J T, Knapp P A, Soule P T. 2013. Tropical cyclones and drought amelioration in the gulf and southeastern coastal United States. *J Clim*, 26: 8440–8452
- McCollum D L, Gambhir A, Rogelj J, Wilson C. 2020. Energy

- modellers should explore extremes more systematically in scenarios. *Nat Energy*, 5: 104–107
- McKinnon K A, Deser C. 2021. The inherent uncertainty of precipitation variability, trends, and extremes due to internal variability, with implications for western US water resources. *J Clim*, 34: 9605–9622
- Mehrabi Z, Ramankutty N. 2019. Synchronized failure of global crop production. *Nat Ecol Evol*, 3: 780–786
- Meng Y, Hao Z, Feng S, Guo Q, Zhang Y. 2022. Multivariate bias corrections of CMIP6 model simulations of compound dry and hot events across China. *Environ Res Lett*, 17: 104005
- Meng Y, Hao Z, Zhang Y, Zhang X, Hao F. 2023. Projection of compound wind and precipitation extremes in China based on phase 6 of the coupled model intercomparison project models. *Intl J Climatol*, 43: 1396–1406
- Merz B, Basso S, Fischer S, Lun D, Blöschl G, Merz R, Guse B, Viglione A, Vorogushyn S, Macdonald E, Wietzke L, Schumann A. 2022. Understanding heavy tails of flood peak distributions. *Water Resources Res*, 58: e2021WR030506
- Messmer M, Simmonds I. 2021. Global analysis of cyclone-induced compound precipitation and wind extreme events. *Weather Clim Extrem*, 32: 100324
- Messori G, Bevacqua E, Caballero R, Coumou D, De Luca P, Faranda D, Kornhuber K, Martius O, Pons F, Raymond C, Ye K, Yiou P, Zscheischler J. 2021. Compound climate events and extremes in the midlatitudes: Dynamics, simulation, and statistical characterization. *Bull Am Meteorol Soc*, 102: E774–E781
- Michelangeli P A, Vrac M, Loukos H. 2009. Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophys Res Lett*, 36: L11708
- Min S K, Jo S Y, Seong M G, Kim Y H, Son S W, Byun Y H, Lott F C, Stott P A. 2022. Human contribution to the 2020 Summer successive hot-wet extremes in South Korea. *Bull Am Meteorol Soc*, 103: S90–S97
- Miralles D G, Gentile 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
- Mishra V, Ambika A K, Asoka A, Aadhar S, Buzan J, Kumar R, Huber M. 2020. Moist heat stress extremes in India enhanced by irrigation. *Nat Geosci*, 13: 722–728
- Moftakhari H R, Salvadori G, AghaKouchak A, Sanders B F, Matthew R A. 2017. Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114: 9785–9790
- Mondal S, K. Mishra A, Leung R, Cook B. 2023. Global droughts connected by linkages between drought hubs. *Nat Commun*, 14: 144
- Mora C, Dousset B, Caldwell I R, Powell F E, Geronimo R C, Bielecki C R, Counsell C W W, Dietrich B S, Johnston E T, Louis L V, Lucas M P, McKenzie M M, Shea A G, Tseng H, Giambelluca T W, Leon L R, Hawkins E, Trauernicht C. 2017. Global risk of deadly heat. *Nat Clim Change*, 7: 501–506
- Muis S, Verlaan M, Winsemius H C, Aerts J C J H, Ward P J. 2016. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nat Commun*, 7: 11969
- Mukherjee S, Ashfaq M, Mishra A K. 2020. Compound drought and heatwaves at a global scale: The role of natural climate variability-associated synoptic patterns and land-surface energy budget anomalies. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2019JD031943
- Mukherjee S, Mishra A K, Ashfaq M, Kao S C. 2022. Relative effect of anthropogenic warming and natural climate variability to changes in compound drought and heatwaves. *J Hydrol*, 605: 127396
- 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
- Mukherjee S, Mishra V. 2018. A sixfold rise in concurrent day and night-time heatwaves in India under 2°C warming. *Sci Rep*, 8: 16922
- Muthuvel D, Sivakumar B, Mahesha A. 2023. Future global concurrent droughts and their effects on maize yield. *Sci Total Environ*, 855: 158860
- Ning G, Luo M, Zhang W, Liu Z, Wang S, Gao T. 2022. Rising risks of compound extreme heat-precipitation events in China. *Intl J Climatol*, 42: 5785–5795
- Noh K M, Lim H G, Kug J S. 2022. Global chlorophyll responses to marine heatwaves in satellite ocean color. *Environ Res Lett*, 17: 064034
- Oliver E C J, Benthuyssen J A, Darmaraki S, Donat M G, Hobday A J, Holbrook N J, Schlegel R W, Sen Gupta A. 2021. Marine heatwaves. *Annu Rev Mar Sci*, 13: 313–342
- Otto F E L. 2017. Attribution of weather and climate events. *Annu Rev Environ Resour*, 42: 627–646
- Owen L E, Catto J L, Stephenson D B, Dunstone N J. 2021. Compound precipitation and wind extremes over Europe and their relationship to extratropical cyclones. *Weather Clim Extrem*, 33: 100342
- Paprotny D, Morales-Nápoles O, Jonkman S N. 2018. Hanzé: A pan-European database of exposure to natural hazards and damaging historical floods since 1870. *Earth Syst Sci Data*, 10: 565–581
- Paprotny D, Voudoukas M I, Morales-Nápoles O, Jonkman S N, Feyen L. 2020. Pan-European hydrodynamic models and their ability to identify compound floods. *Nat Hazards*, 101: 933–957
- Parker T J, Berry G J, Reeder M J. 2013. The influence of tropical cyclones on heat waves in southeastern Australia. *Geophys Res Lett*,

- 40: 6264–6270
- Parry S, Marsh T, Kendon M. 2013. 2012: From drought to floods in England and Wales. *Weather*, 68: 268–274
- Pathmeswaran C, Sen Gupta A, Perkins-Kirkpatrick S E, Hart M A. 2022. Exploring potential links between co-occurring coastal terrestrial and marine heatwaves in Australia. *Front Clim*, 4, doi: 10.3389/fclim.2022.792730
- Patricola C M, Wehner M F. 2018. Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 563: 339–346
- Persad G G, Swain D L, Kouba C, Ortiz-Partida J P. 2020. Inter-model agreement on projected shifts in California hydroclimate characteristics critical to water management. *Clim Change*, 162: 1493–1513
- Piatt J F, Parrish J K, Renner H M, Schoen S K, Jones T T, Arimitsu M L, Kuletz K J, Bodenstein B, García-Reyes M, Duerr R S, Corcoran R M, Kaler R S A, McChesney G J, Golightly R T, Coletti H A, Suryan R M, Burgess H K, Lindsey J, Lindquist K, Warzybok P M, Jahncke J, Roletto J, Sydeman W J. 2020. Extreme mortality and reproductive failure of common murrelets resulting from the northeast Pacific marine heatwave of 2014–2016. *PLoS ONE*, 15: e0226087
- Pirani F J, Najafi M R. 2022. Multivariate analysis of compound flood hazard across Canada's Atlantic, Pacific and great lakes coastal areas. *Earths Future*, 10: e2022EF002655
- Qi W, Feng L, Yang H, Liu J. 2022. Increasing concurrent drought probability in global main crop production countries. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL097060
- Qian X, Miao Q, Zhai P, Chen Y. 2014. Cold-wet spells in mainland China during 1951–2011. *Nat Hazards*, 74: 931–946
- Qiao Y, Xu W, Meng C, Liao X, Qin L. 2022. Increasingly dry/wet abrupt alternation events in a warmer world: Observed evidence from China during 1980–2019. *Intl J Climatol*, 42: 6429–6440
- Qiu J, Liu B, Yang F, Wang X, He X. 2022. Quantitative stress test of compound coastal-fluvial floods in China's Pearl River delta. *Earths Future*, 10: e2021EF002638
- Qiu L, Im E S, Min S K, Kim Y H, Cha D H, Shin S W, Ahn J B, Chang E C, Byun Y H. 2022. Direct and indirect application of univariate and multivariate bias corrections on heat-stress indices based on multiple regional-climate-model simulations. *Earth Syst Dynam*, 14: 507–517
- Raveh-Rubin S, Wernli H. 2015. Large-scale wind and precipitation extremes in the Mediterranean: A climatological analysis for 1979–2012. *Q J R Meteorol Soc*, 141: 2404–2417
- Raveh-Rubin S, Wernli H. 2016. Large-scale wind and precipitation extremes in the Mediterranean: Dynamical aspects of five selected cyclone events. *Q J R Meteorol Soc*, 142: 3097–3114
- 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. 2020a. Understanding and managing connected extreme events. *Nat Clim Chang*, 10: 611–621
- Raymond C, Matthews T, Horton R M. 2020b. The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Sci Adv*, 6: eaaw1838
- Raymond C, Suarez-Gutierrez L, Kornhuber K, Pascolini-Campbell M, Sillmann J, Waliser D E. 2022. Increasing spatiotemporal proximity of heat and precipitation extremes in a warming world quantified by a large model ensemble. *Environ Res Lett*, 17: 035005
- Reed K A, Wehner M F, Zarzycki C M. 2022. Attribution of 2020 hurricane season extreme rainfall to human-induced climate change. *Nat Commun*, 13: 1905
- Reichstein M, Riede F, Frank D. 2022. More floods, fires and cyclones —Plan for domino effects on sustainability goals. *Nature*, 592: 347–349
- Ridder N, de Vries H, Drijfhout S. 2018. The role of atmospheric rivers in compound events consisting of heavy precipitation and high storm surges along the Dutch coast. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 18: 3311–3326
- Ridder N N, Pitman A J, Ukkola A M. 2021. Do CMIP6 climate models simulate global or regional compound events skillfully? *Geophys Res Lett*, 48: e2020GL091152
- 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
- Ridder N N, Ukkola A M, Pitman A J, Perkins-Kirkpatrick S E. 2022. Increased occurrence of high impact compound events under climate change. *Npj Clim Atmos Sci*, 5: 3
- Rising J, Tedesco M, Piontek F, Stainforth D A. 2022. The missing risks of climate change. *Nature*, 610: 643–651
- Robin Y, Vrac M, Naveau P, Yiou P. 2019. Multivariate stochastic bias corrections with optimal transport. *Hydrol Earth Syst Sci*, 23: 773–786
- Rodrigues R R, Taschetto A S, Sen Gupta A, Foltz G R. 2019. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. *Nat Geosci*, 12: 620–626
- Rogers C D, Kornhuber K, Perkins-Kirkpatrick S E, Loikith P C, Singh D. 2022. Sixfold increase in historical northern hemisphere concurrent large heatwaves driven by warming and changing atmospheric circulations. *J Climate*, 35: 1063–1078
- Rogers C D W, Ting M, Li C, Kornhuber K, Coffel E D, Horton R M, Raymond C, Singh D. 2021. Recent increases in exposure to extreme humid-heat events disproportionately affect populated regions. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL094183
- Sampurno J, Vallaey S, Ardianto R, Hanert E. 2022. Integrated hydrodynamic and machine learning models for compound flooding

- prediction in a data-scarce estuarine delta. *Nonlin Processes Geophys*, 29: 301–315
- Samuel C L, Norma Yolanda H S, Salvador Emilio L C, Pedro C H, Felipe De Jesús A V, María Teresa S. 2019. Survival and respiration of green abalone (*Haliotis fulgens*) facing very short-term marine environmental extremes. *Mar Freshw Behav Phy*, 52: 1–15
- Sauter C, White C J, Fowler H J, Westra S. 2023. Temporally compounding heatwave-heavy rainfall events in Australia. *Intl J Climatol*, 43: 1050–1061
- Schumacher D L, Hauser M, Seneviratne S I. 2022. Drivers and mechanisms of the 2021 pacific northwest heatwave. *Earths Future*, 10: e2022EF002967
- Sedlmeier K, Mieruch S, Schädler G, Kottmeier C. 2016. Compound extremes in a changing climate—a Markov chain approach. *Nonlin Processes Geophys*, 23: 375–390
- Seeherman J, Liu Y. 2015. Effects of extraordinary snowfall on traffic safety. *Accid Anal Prev*, 81: 194–203
- Shan L, Zhang L, Song J, Zhang Y, She D, Xia J. 2018. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and the relationship with ENSO. *J Geogr Sci*, 28: 1039–1058
- Shepherd J G, Brewer P G, Oeschies A, Watson A J. 2017. Ocean ventilation and deoxygenation in a warming world: Introduction and overview. *Phil Trans R Soc A*, 375: 20170240
- Shepherd T G. 2016. A common framework for approaches to extreme event attribution. *Curr Clim Change Rep*, 2: 28–38
- Shi H, García-Reyes M, Jacox M G, Rykaczewski R R, Black B A, Bograd S J, Sydeman W J. 2021. Co-occurrence of California drought and northeast Pacific marine heatwaves under climate change. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL092765
- Shi Z, Xu X, Jia G. 2021. Urbanization magnified nighttime heat waves in China. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL093603
- Simpson N P, Mach K J, Constable A, Hess J, Hogarth R, Howden M, Lawrence J, Lempert R J, Muccione V, Mackey B, New M G, O'Neill B, Otto F, Pörtner H O, Reisinger A, Roberts D, Schmidt D N, Seneviratne S, Strongin S, van Aalst M, Totin E, Trisos C H. 2021. A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth*, 4: 489–501
- Singh H, Najafi M R, Cannon A J. 2021a. Characterizing non-stationary compound extreme events in a changing climate based on large-ensemble climate simulations. *Clim Dyn*, 56: 1389–1405
- Singh J, Ashfaq M, Skinner C B, Anderson W B, Mishra V, Singh D. 2022. Enhanced risk of concurrent regional droughts with increased ENSO variability and warming. *Nat Clim Chang*, 12: 163–170
- Singh J, Ashfaq M, Skinner C B, Anderson W B, Singh D. 2021b. Amplified risk of spatially compounding droughts during co-occurrences of modes of natural ocean variability. *Npj Clim Atmos Sci*, 4: 7
- Smale D A, Wernberg T, Oliver E C J, Thomsen M, Harvey B P, Straub S C, Burrows M T, Alexander L V, Benthuyse J A, Donat M G, Feng M, Hobday A J, Holbrook N J, Perkins-Kirkpatrick S E, Scannell H A, Sen Gupta A, Payne B L, Moore P J. 2019. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nat Clim Chang*, 9: 306–312
- Smith D M, Gillett N P, Simpson I R, Athanasiadis P J, Baehr J, Bethke I, Bilge T A, Bonnet R, Boucher O, Findell K L, Gastineau G, Gualdi S, Hermanson L, Leung L R, Mignot J, Müller W A, Osprey S, Otterå O H, Persad G G, Scaife A A, Schmidt G A, Shigama H, Sutton R T, Swingedouw D, Yang S, Zhou T, Ziehn T. 2022. Attribution of multi-annual to decadal changes in the climate system: The large ensemble single forcing model intercomparison project (LESFMP). *Front Clim*, 4: 955414
- Speizer S, Raymond C, Ivanovich C, Horton R M. 2022. Concentrated and intensifying humid heat extremes in the IPCC AR6 regions. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL097261
- Squire D T, Richardson D, Risbey J S, Black A S, Kitsios V, Matear R J, Monselesan D, Moore T S, Tozer C R. 2021. Likelihood of unprecedented drought and fire weather during Australia's 2019 megafires. *Npj Clim Atmos Sci*, 4: 64
- Stevenson S, Coats S, Touma D, Cole J, Lehner F, Fasullo J, Otto-Bliesner B. 2022. Twenty-first century hydroclimate: A continually changing baseline, with more frequent extremes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119: e2108124119
- Stewart R E, Bonsal B R, Harder P, Henson W, Kochtubajda B. 2012. Cold and hot periods associated with dry conditions over the Canadian prairies. *Atmosphere-Ocean*, 50: 364–372
- Su Q, Dong B. 2019. Projected near-term changes in three types of heat waves over China under RCP4.5. *Clim Dyn*, 53: 3751–3769
- Svensson C, Jones D A. 2004. Dependence between sea surge, river flow and precipitation in south and west Britain. *Hydrol Earth Syst Sci*, 8: 973–992
- Swain D L, Langenbrunner B, Neelin J D, Hall A. 2018. Increasing precipitation volatility in twenty-first-century California. *Nat Clim Change*, 8: 427–433
- Tan X, Wu X, Huang Z, Fu J, Tan X, Deng S, Liu Y, Gan T Y, Liu B. 2023. Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions. *Nat Commun*, 14: 2796
- Tavakoli A, Rahmani V, Harrington Jr. J. 2020. Probability of compound climate extremes in a changing climate: A copula-based study of hot, dry, and windy events in the central United States. *Environ Res Lett*, 15: 104058
- Tang Z, Yang T, Lin X, Li X, Cao R, Li W. 2022. Future changes in the

- risk of compound hot and dry events over China estimated with two large ensembles. *PloS ONE*, 17: e0264980
- Tett S F B, Stott P A, Allen M R, Ingram W J, Mitchell J F B. 1999. Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 399: 569–572
- Thalheimer L, Choquette-Levy N, Garip F. 2022. Compound impacts from droughts and structural vulnerability on human mobility. *iScience*, 25: 105491
- Thiery W, Visser A J, Fischer E M, Hauser M, Hirsch A L, Lawrence D M, Lejeune Q, Davin E L, Seneviratne S I. 2020. Warming of hot extremes alleviated by expanding irrigation. *Nat Commun*, 11: 290
- Tilloy A, Malamud B D, Winter H, Joly-Laugel A. 2019. A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth Sci Rev*, 196: 102881
- Toreti A, Cronie O, Zampieri M. 2019. Concurrent climate extremes in the key wheat producing regions of the world. *Sci Rep*, 9: 5493
- Touma D, Stevenson S, Swain D L, Singh D, Kalashnikov D A, Huang X. 2022. Climate change increases risk of extreme rainfall following wildfire in the western United States. *Sci Adv*, 8: eabm0320
- Trenberth K E, Fasullo J T, Shepherd T G. 2015. Attribution of climate extreme events. *Nat Clim Change*, 5: 725–730
- Tschumi E, Zscheischler J. 2019. Countrywide climate features during recorded climate-related disasters. *Clim Change*, 158: 593–609
- Vaghefi S A, Muccione V, Neukom R, Huggel C, Salzmann N. 2022. Future trends in compound concurrent heat extremes in Swiss cities—an assessment considering deep uncertainty and climate adaptation options. *Weather Clim Extrem*, 38: 100501
- Vajda A, Tuomenvirta H, Juga I, Nurmi P, Jokinen P, Rauhala J. 2014. Severe weather affecting European transport systems: The identification, classification and frequencies of events. *Nat Hazards*, 72: 169–188
- Valle-Levinson A, Olabarrieta M, Heilman L. 2020. Compound flooding in Houston-Galveston Bay during Hurricane Harvey. *Sci Total Environ*, 747: 141272
- Van de Walle J, Thiery W, Brogli R, Martius O, Zscheischler J, van Lipzig N P M. 2021. Future intensification of precipitation and wind gust associated thunderstorms over Lake Victoria. *Weather Clim Extrem*, 34: 100391
- van den Hurk B, van Meijgaard E, de Valk P, van Heeringen K J, Gooijer J. 2015. Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environ Res Lett*, 10: 035001
- van der Wiel K, Selden F M, Bintanja R, Blackport R, Screen J A. 2020. Ensemble climate-impact modelling: Extreme impacts from moderate meteorological conditions. *Environ Res Lett*, 15: 034050
- Verschuur J, Li S, Wolski P, Otto F E L. 2021. Climate change as a driver of food insecurity in the 2007 Lesotho-South Africa drought. *Sci Rep*, 11: 3852
- Villalobos-Herrera R, Bevacqua E, Ribeiro A F S, Auld G, Crocetti L, Mircheva B, Ha M, Zscheischler J, De Michele C. 2021. Towards a compound-event-oriented climate model evaluation: A decomposition of the underlying biases in multivariate fire and heat stress hazards. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 21: 1867–1885
- Vitolo C, Di Napoli C, Di Giuseppe F, Cloke H L, Pappenberger F. 2019. Mapping combined wildfire and heat stress hazards to improve evidence-based decision making. *Environ Int*, 127: 21–34
- Vogel J, Paton E, Aich V. 2021. Seasonal ecosystem vulnerability to climatic anomalies in the Mediterranean. *Biogeosciences*, 18: 5903–5927
- Vogel M M, Zscheischler J, Wartenburger R, Dee D, Seneviratne S I. 2019. Concurrent 2018 hot extremes across northern hemisphere due to human-induced climate change. *Earths Future*, 7: 692–703
- Vousdoukas M I, Mentaschi L, Voukouvalas E, Verlaan M, Jevrejeva S, Jackson L P, Feyen L. 2018. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat Commun*, 9: 2360
- Vrac M. 2018. Multivariate bias adjustment of high-dimensional climate simulations: The rank resampling for distributions and dependences (R^2 D^2) bias correction. *Hydrol Earth Syst Sci*, 22: 3175–3196
- Wahl E R, Hoell A, Zorita E, Gille E, Diaz H F. 2020. A 450-year perspective on California precipitation “flips”. *J Clim*, 33: 10221–10237
- Wahl T, Jain S, Bender J, Meyers S D, Luther M E. 2015. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nat Clim Change*, 5: 1093–1097
- Waliser D, Guan B. 2017. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nat Geosci*, 10: 179–183
- Wang B, Lee M Y, Xie Z, Lu M, Pan M. 2022. A new Asian/North American teleconnection linking clustered extreme precipitation from Indian to Canada. *Npj Clim Atmos Sci*, 5: 90
- Wang D Q, Sun Y. 2022. Effects of anthropogenic forcing and atmospheric circulation on the record-breaking wet bulb heat event over southern China in September 2021. *Adv Clim Change Res*, 13: 778–786
- Wang J, Chen Y, Liao W, He G, Tett S F B, Yan Z, Zhai P, Feng J, Ma W, Huang C, Hu Y. 2021. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities. *Nat Clim Chang*, 11: 1084–1089
- Wang J, Chen Y, Nie J, Yan Z, Zhai P, Feng J. 2022. On the role of anthropogenic warming and wetting in the July 2021 Henan record-shattering rainfall. *Sci Bull*, 67: 2055–2059
- Wang J, Chen Y, Tett S F B, Yan Z, Zhai P, Feng J, Xia J. 2020a.

- Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nat Commun*, 11: 528
- Wang J, Chen Y, Tett S F B, Stone D, Nie J, Feng J, Yan Z, Zhai P, Ge Q. 2023. Storyline attribution of human influence on a record-breaking spatially compounding flood-heat event. *Sci Adv*, 9: eadi2714
- Wang J, Feng J, Yan Z, Chen Y. 2020b. Future risks of unprecedented compound heat waves over three vast urban agglomerations in China. *Earths Future*, 8: e2020EF001716
- Wang P, Luo M, Liao W, Xu Y, Wu S, Tong X, Tian H, Xu F, Han Y. 2021. Urbanization contribution to human perceived temperature changes in major urban agglomerations of China. *Urban Clim*, 38: 100910
- Wang S, Huang J, Yuan X. 2021. Attribution of 2019 extreme Spring-early Summer hot drought over Yunnan in southwestern China. *Bull Am Meteorol Soc*, 102: S91–S96
- Wang S S Y, Kim H, Coumou D, Yoon J H, Zhao L, Gillies R R. 2019. Consecutive extreme flooding and heat wave in Japan: Are they becoming a norm? *Atmos Sci Lett*, 20: e933
- Wang Y, Chen L, Song Z, Huang Z, Ge E, Lin L, Luo M. 2019. Human-perceived temperature changes over south China: Long-term trends and urbanization effects. *Atmos Res*, 215: 116–127
- Ward P J, Couasnon A, Eilander D, Haigh I D, Hendry A, Muis S, Veldkamp T I E, Winsemius H C, Wahl T. 2018. Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries. *Environ Res Lett*, 13: 084012
- Weber T, Bowyer P, Rechid D, Pfeifer S, Raffaele F, Remedio A R, Teichmann C, Jacob D. 2020. Analysis of compound climate extremes and exposed population in Africa under two different emission scenarios. *Earths Future*, 8: e2019EF001473
- Wehrli K, Guillod B P, Hauser M, Leclair M, Seneviratne S I. 2019. Identifying key driving processes of major recent heat waves. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 11746–11765
- Wei X, Zhang H, Singh V P, Dang C, Shao S, Wu Y. 2020. Coincidence probability of streamflow in water resources area, water receiving area and impacted area: Implications for water supply risk and potential impact of water transfer. *Hydrol Res*, 51: 1120–1135
- Woo G. 2021. A counterfactual perspective on compound weather risk. *Weather Clim Extrem*, 32: 100314
- Woolway R I, Kraemer B M, Zscheischler J, Albergel C. 2021. Compound hot temperature and high chlorophyll extreme events in global lakes. *Environ Res Lett*, 16: 124066
- Wouters H, Keune J, Petrova I Y, van Heerwaarden C C, Teuling A J, Pal J S, Vilà-Guerau de Arellano J, Miralles D G. 2022. Soil drought can mitigate deadly heat stress thanks to a reduction of air humidity. *Sci Adv*, 8: eabe6653
- Wu J, Chen Y, Liao Z, Gao X, Zhai P, Hu Y. 2022. Increasing risk from landfalling tropical cyclone-heatwave compound events to coastal and inland China. *Environ Res Lett*, 17: 105007
- Wu S, Chan T O, Zhang W, Ning G, Wang P, Tong X, Xu F, Tian H, Han Y, Zhao Y, Luo M. 2021a. Increasing compound heat and precipitation extremes elevated by urbanization in south China. *Front Earth Sci*, 9: 636777
- Wu S, Wang P, Tong X, Tian H, Zhao Y, Luo M. 2021b. Urbanization-driven increases in summertime compound heat extremes across China. *Sci Total Environ*, 799: 149166
- Wu W, McInnes K, O'Grady J, Hoeke R, Leonard M, Westra S. 2018. Mapping dependence between extreme rainfall and storm surge. *JGR Oceans*, 123: 2461–2474
- Wu W, Westra S, Leonard M. 2021a. Estimating the probability of compound floods in estuarine regions. *Hydrol Earth Syst Sci*, 25: 2821–2841
- Wu X, Hao Z, Hao F, Zhang X. 2019. Variations of compound precipitation and temperature extremes in china during 1961 -2014. *Sci Total Environ*, 663: 731–737
- Wu X, Hao Z, Hao F, Zhang X, Singh V P, Sun C. 2021b. Influence of large-scale circulation patterns on compound dry and hot events in China. *J Geophys Res-Atmos*, 126: e2020JD033918
- Wu X, Hao Z, Zhang Y, Zhang X, Hao F. 2022. Anthropogenic influence on compound dry and hot events in China based on Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *Intl J Climatol*, 42: 4379–4390
- Wu Y, Miao C, Sun Y, AghaKouchak A, Shen C, Fan X. 2021. Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of monthly temperature and precipitation. *GeoHealth*, 5: e2021GH000390
- Wu Z, Li J, He J, Jiang Z. 2006. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid-and lower reaches of the Yangtze River. *Geophys Res Lett*, 33: L05813
- Wyser K, Koenig T, Fladrich U, Fuentes-Franco R, Karami M P, Kruschke T. 2021. The SMHI large ensemble (SMHI-LENS) with EC-Earth3.3.1. *Geosci Model Dev*, 14: 4781–4796
- Xie W, Zhou B, Han Z, Xu Y. 2022. Substantial increase in daytime-nighttime compound heat waves and associated population exposure in China projected by the CMIP6 multimodel ensemble. *Environ Res Lett*, 17: 045007
- Xu R, Li Y, Teuling A J, Zhao L, Spracklen D V, Garcia-Carreras L, Meier R, Chen L, Zheng Y, Lin H, Fu B. 2022. Contrasting impacts of forests on cloud cover based on satellite observations. *Nat Commun*, 13: 670
- Yaddanapudi R, Mishra A, Huang W, Chowdhary H. 2022. Compound

- wind and precipitation extremes in global coastal regions under climate change. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL098974
- Yang S, Wu B, Zhang R, Zhou S. 2013. Relationship between an abrupt drought-flood transition over mid-low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intraseasonal oscillation over mid-high latitudes of East Asia. *Acta Meteorol Sin*, 27: 129–143
- Yao H, Zhao L, Shen X, Xiao Z, Li Q. 2022. Relationship between Summer compound hot and dry extremes in China and the snow cover pattern in the preceding Winter. *Front Earth Sci*, 10: 834284
- Yin Z, Wan Y, Zhang Y, Wang H. 2022. Why super sandstorm 2021 in north China? *Natl Sci Rev*, 9: nwab165
- You J, Wang S. 2021. Higher probability of occurrence of hotter and shorter heat waves followed by heavy rainfall. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL094831
- Yu Y, Mao J, Wullschlegel S D, Chen A, Shi X, Wang Y, Hoffman F M, Zhang Y, Pierce E. 2022. Machine learning-based observation-constrained projections reveal elevated global socioeconomic risks from wildfire. *Nat Commun*, 13: 1250
- Zhang B, Wang S, Zscheischler J. 2021. Higher probability of abrupt shift from drought to heavy rainfall in a warmer world, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-940109/v1>
- Zhang K, Cao C, Chu H, Zhao L, Zhao J, Lee X. 2023. Increased heat risk in wet climate induced by urban humid heat. *Nature*, 617: 738–742
- Zhang W, Furtado K, Wu P, Zhou T, Chadwick R, Marzin C, Rostron J, Sexton D. 2021a. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Sci Adv*, 7: eabf8021
- Zhang W, Luo M, Gao S, Chen W, Hari V, Khouakhi A. 2021b. Compound hydrometeorological extremes: Drivers, mechanisms and methods. *Front Earth Sci*, 9: 673495
- Zhang W, Murakami H, Khouakhi A, Luo M. 2021c. Editorial: Compound climate extremes in the present and future climates: Machine learning, statistical methods and dynamical modelling. *Front Earth Sci*, 9: 807224
- Zhang W, Villarini G. 2020. Deadly compound heat stress-flooding hazard across the central United States. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL089185
- Zhang Y, Hao Z, Zhang X, Hao F. 2022. Anthropogenically forced increases in compound dry and hot events at the global and continental scales. *Environ Res Lett*, 17: 024018
- Zhang Y, Hao Z, Zhang Y. 2023. Agricultural risk assessment of compound dry and hot events in China. *Agric Water Manage*, 277: 108128
- Zhang Y, Keenan T F, Zhou S. 2021a. Exacerbated drought impacts on global ecosystems due to structural overshoot. *Nat Ecol Evol*, 5: 1490–1498
- Zhang Y, Sun X, Chen C. 2021b. Characteristics of concurrent precipitation and wind speed extremes in China. *Weather Clim Extrem*, 32: 100322
- Zhao H, Zhang L, Kirkham M B, Welch S M, Nielsen-Gammon J W, Bai G, Luo J, Andresen D A, Rice C W, Wan N, Lollato R P, Zheng D, Gowda P H, Lin X. 2022. U.S. winter wheat yield loss attributed to compound hot-dry-windy events. *Nat Commun*, 13: 7233
- Zheng F, Leonard M, Westra S. 2017. Application of the design variable method to estimate coastal flood risk. *J Flood Risk Manage*, 10: 522–534
- Zheng F, Westra S, Leonard M, Sisson S A. 2014. Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk. *Water Resources Res*, 50: 2050–2071
- Zheng F, Westra S, Sisson S A. 2013. Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone. *J Hydrol*, 505: 172–187
- Zhou P, Liu Z. 2018. Likelihood of concurrent climate extremes and variations over China. *Environ Res Lett*, 13: 094023
- Zhou J, Wu C, Yeh P J F, Ju J, Zhong L, Wang S, Zhang J. 2023. Anthropogenic climate change exacerbates the risk of successive flood-heat extremes: Multi-model global projections based on the inter-sectoral impact model intercomparison project. *Sci Total Environ*, 889: 164274
- Zscheischler J, Lehner F. 2022. Attributing compound events to anthropogenic climate change. *Bull Am Meteorol Soc*, 103: E936–E953
- 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
- Zscheischler J, Naveau P, Martius O, Engelke S C, Raible C. 2021. Evaluating the dependence structure of compound precipitation and wind speed extremes. *Earth Syst Dynam*, 12: 1–16
- Zscheischler J, Seneviratne S I. 2017. Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Sci Adv*, 3: e1700263
- Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, Seneviratne S I, Ward P J, Pitman A, AghaKouchak A, Bresch D N, Leonard M, Wahl T, Zhang X. 2018. Future climate risk from compound events. *Nat Clim Change*, 8: 469–477

(责任编辑: 王会军)