

# 复合极端事件及其危险性评估研究进展

方建<sup>1,2</sup>, 陶凯<sup>1,2</sup>, 牟莎<sup>1,2</sup>, 方佳毅<sup>3</sup>, 杜士强<sup>4</sup>

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 3. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 杭州 311121; 4. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234)

**摘要:**近年来频发的极端天气气候事件引起了广泛关注,其灾害过程往往源自多个因素的相互作用,给区域安全和风险防范带来诸多挑战。论文结合文献计量,在系统梳理复合极端事件相关研究的基础上,重点阐述了复合极端事件的概念内涵、类型特征和主要驱动因素,并归纳了复合事件时空关联分析和危险性评估的主要方法。结果表明:①近年来研究的事件类型丰富多样,不同时空关联、不同要素组合类型事件的研究不断涌现;②研究内容体系日益完善,概念特征、关联关系、成因机制和危险性评估的研究持续推进;③研究技术手段不断发展,以Copula为核心的联合概率统计建模实现由二维向多维、由静态向动态发展,以耦合水文水动力学模型和海洋模式为代表的数值模拟精细度不断提高。但在部分重难点问题方面仍需进一步深入研究,包括时间继发型和空间异地型复合事件复杂时空关联结构的诊断建模,天气系统、大尺度环流因子和人类活动多因素对复合事件综合影响的研究,复合事件危险性情景及多维联合概率分析等。此外,未来亟需探究气候变化下复合事件边缘分布和关联结构的非平稳变化及其对复合事件风险的影响。

**关键词:**极端天气气候事件;复合极端事件;时空关联关系;驱动因素;危险性评估

近年来,在全球变化背景下,包括暴雨洪涝、干旱热浪等在内的极端天气气候事件频发,造成严重的人员伤亡和财产损失,给全球和区域社会经济发展带来严峻威胁<sup>[1]</sup>。如何科学认识极端事件的发生演变规律和风险特征,对于有效应对和管理极端事件、保障社会经济稳定与可持续发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。

研究表明,极端气象气候水文灾害往往不是由单一事件导致的,而是源自多个因素或多个事件过程的时空耦合和相互作用,形成复合事件<sup>[3]</sup>。传统的极端事件风险评估和管理主要聚焦于单一要素过程,而忽视了多要素之间的时空关联性,往往低估事件可能造成的危害,难以准确刻画极端事件的真实风险水平<sup>[4-5]</sup>。多要素、多过程关联关系的复杂性给复合极端事件的风险分析带来诸多挑战,成为

当前气象气候水文和灾害风险科学领域亟待解决的重要科学问题<sup>[6]</sup>。

为更精准地认识和管理极端气象气候水文灾害风险,迫切需要不断丰富和深化对极端事件复杂内涵的理解,全面系统地研究复合极端事件的特征、机理和影响。IPCC《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, SREX)中首次较系统地对复合事件的定义、类型等进行了总结和介绍<sup>[7]</sup>。在此推动下,近年来关于复合极端事件的研究不断增加。IPCC第六次评估报告结合最新的研究进展对全球复合极端事件进行了更详细的评估,并强调复合极端事件研究对减轻全球气候变化的

收稿日期 2022-07-29;修订日期:2022-11-21。

基金项目:国家自然科学基金项目(42077441, 42001096)。[Foundation: National Natural Sciences Foundation of China, No. 42077441 and 42001096.]

第一作者简介:方建(1988—),男,安徽安庆人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为全球变化与灾害风险。

E-mail: fj20061028@126.com

引用格式:方建,陶凯,牟莎,等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3): 587-601. [Fang Jian, Tao Kai, Mu Sha, et al. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment. Progress in Geography, 2023, 42(3): 587-601.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.03.014

影响至关重要<sup>[8-9]</sup>。

在此背景下,本文聚焦复合极端事件中最典型的复合极端天气气候事件及其相关联的灾害,对近10年来国内外相关研究进行系统梳理,从概念内涵、类型特征、时空关联、驱动因素及危险性等方面对复合极端事件的研究进展进行归纳总结,并对未来研究方向进行展望,从而有利于推动复合极端事件的研究,增进对极端事件过程机理的认识,为采取更加有效的措施应对全球气候变化和防范极端灾害风险提供科学依据。

## 1 复合极端事件的概念、类型

### 1.1 复合极端事件的概念与特征

近年来,随着对各类极端事件和灾害过程机理认识的深入,由多个要素、多种过程导致的灾害现象引起越来越多的关注。在灾害风险领域,提出了多灾种、灾害链、灾害遭遇等概念以区分单灾种过程<sup>[10-11]</sup>。在气象气候水文领域,IPCC<sup>[7]</sup>管理极端事件的特别报告中提出了复合事件的概念,并将其定义为:① 2个或以上极端事件同时或相继发生的现象,② 放大事件影响的极端事件的组合,③ 多个事件的组合,各个事件本身可能并不极端,但当它们组合起来会造成极端影响。此外,Leonard等<sup>[6]</sup>将复合事件定义为统计上具有关联性的多个变量或事件导致的极端影响。Hao等<sup>[12]</sup>进一步将复合极端事件的定义总结为3个方面特征:极端影响、多个变量或事件、统计关联性。Zscheischler等<sup>[3]</sup>将复合极端事件定义为引起社会或环境风险的多个致灾因子或驱动因子的组合。该定义更切合IPCC SREX报告中提出的极端事件与灾害风险的评估框架,且指明了复合事件驱动因子可能是不同时空尺度的天气气候过程、变量和现象,内涵更为广泛。IPCC第六次评估报告中采用了此定义<sup>[8]</sup>。

复合极端事件是天气气候系统和自然灾害系统复杂性的一种表现形式,其与多灾种、灾害链、灾害遭遇等概念具有密切联系,也存在一定差异。广义的多灾种是指在特定地区内所有使该地区遭受损失的相关灾害的总和<sup>[13]</sup>。考虑灾害过程之间的关联联系和系统复杂性特征,史培军等<sup>[14]</sup>将灾害间关系类型划分为3大类:灾害群、灾害链和灾害遭遇。其中:灾害群是指灾害在空间上群聚、时间上群发的现象,灾害间的相互关系可以忽略,是狭义

上的多灾种<sup>[14]</sup>;灾害链是由于一种灾害发生而引起一系列灾害发生的现象,灾害链中的各个灾害之间存在直接因果关系;灾害遭遇是由2种或2种以上本源上没有因果关系的灾害事件遭遇发生,扩大灾害影响的现象<sup>[11]</sup>。从概念上,复合事件与多灾种、灾害链、灾害遭遇都描述多个事件或灾害共同或相互作用的现象。但多灾种通常忽略灾害间的关系,泛指区域所有灾害的总和;灾害链则强调灾害间的直接因果关系;而灾害遭遇强调灾害同时或相继的遭遇发生,与复合事件较为接近,但复合事件研究事件间的时空关联关系更为多样,其内涵比灾害遭遇更为丰富。另一方面,复合事件还包含多个事件或驱动因子本身并不极端,但其组合造成极端影响的现象,这与强调多个灾害事件(本身极端)的多灾种、灾害链和灾害遭遇也存在差异。

### 1.2 复合极端事件类型分类

目前对于复合极端事件有多种分类方法。根据气象水文过程和变量的组合进行分类,可以将复合事件分为:① 气温与降水组合,如高温—干旱(hot-dry)、低温—湿润(cold-wet)、低温—干旱(cold-dry)、高温—湿润(hot-wet);② 与强风有关的组合,如强风—高温—火灾事件、强风—暴雨事件;③ 与气旋有关的风暴—洪—潮遭遇的沿海复合洪水事件;④ 洪涝多过程组合事件,如上下游及干支流洪水遭遇、前期降水—土壤湿度—暴雨遭遇、暴雨空间遭遇、强降雪—融雪—强降雨组合等。由于不同气象水文变量存在多种组合可能,难以全面概括,同时该分类未能揭示气象水文过程之间的时空关联关系。

根据不同事件因子之间的关系,Zscheischler等<sup>[15]</sup>将复合事件分为前期条件(preconditioned)、多变量(multivariate)、时间复合(temporally compounding)和空间复合(spatially compounding)4种类型。其中,前期条件型事件主要关注产生和放大致灾因子影响的前期气象气候条件;多变量型复合事件主要指多个致灾因子在同一个地区同时发生造成极端影响的现象;时间复合型事件指受同一气象因子驱动或随机产生的,同一地区多个致灾因子相继发生造成极端影响的现象;空间复合型事件主要指在一定时间范围内,空间上多个不同位置遭受相同或不同致灾因子的破坏,放大灾害影响的现象。该分类方法较为系统地概括了复合事件的类型特征,体现了复合事件的多样性和复杂性,得到了较为广泛

的认可和应<sup>[16-17]</sup>。值得注意的是,该分类体系不存在硬性边界,在实际案例中,一次复合事件可能同时满足几种分类条件。如2011年美国得克萨斯州夏季的干热事件,既可以划分为多变量事件,也可以划分为前期条件型事件。这种分类的软边界(soft boundary)为复合事件的研究和灾害管理带来一定的不便。

时空关联关系是复合事件的基本特征,为进一步聚焦致灾因子发生的时空关系,可以从时间和空间2个维度对复合事件进行类型划分。时间上包括多个致灾因子同时同步发生和连续相继发生2种类型,空间上包括多个事件过程同地发生和异地发生2种类型,由此可组合成4种类型(表1)。时空同步型与多变量事件类似,指复合事件的多个致灾因子或多个灾害同时出现在同一地点,如风暴潮—暴雨—河流洪水多个极端过程同时发生造成沿海复合洪水<sup>[18-19]</sup>。同地继发型为复合事件的不同致灾因子或多个灾害先后出现在同一地点,包括前述时间复合型和前期条件型,如前期降水—土壤饱和与暴雨遭遇,产生极端洪水灾害<sup>[20]</sup>,以及暴雨洪涝后继发高温热浪等<sup>[21-22]</sup>。异地同发型指复合事件的不同致灾因子或多个灾害同时出现在不同地点,如多地同时发生洪水,或不同地区同时发生干旱造成粮食危机,此类事件会给灾害应对和应急管理带来更大的挑战。异地—继发型指在不同时间不同地点出现的多个致灾因子或多个灾害共同导致极端事件的类型,如2016年美国路易斯安娜州南部的多条河流

先后发生洪水,导致出现超历史最高水位的极端洪水<sup>[23]</sup>。该分类方法聚焦事件之间的时空关系,采取统一的分类体系,在分类边界上更加明晰。

## 2 复合极端事件文献计量研究

选取2013—2021年时段,以“compound extremes”或“compound event”为关键词,在Web of Science核心库中进行检索,筛选后得到256篇契合主题的文献。对每篇文献的发表年份、研究区、研究主题、研究事件类型和对象进行梳理统计,结果如图1所示。

从发文量来看,2013年(2012年IPCC SREX报告发布以来)复合极端事件的研究开始涌现,2017年之后相关文献的发表数量快速增长。从研究区域来看,全球尺度和视角的研究较多,占21%;各大洲中,亚洲、欧洲、北美洲的研究最多,分别占23%、22%和26%;区域尺度的研究主要集中于美国、中国、澳大利亚、英国等地,非洲和南美洲地区的研究相对较少。从事件类型来看,大部分研究聚焦同发型复合事件(占87%),继发型研究相对较少。从研究对象来看,现有研究主要集中于干热复合事件和雨—洪—潮沿海复合洪水事件(分别占36%和27%),湿热、湿冷事件,强风相关复合事件和昼夜持续高温事件也有一定比例的研究(4%~5%),而其他类型(包括内陆复合洪水、暴雨洪水—热浪复合事件)的研究相对较少。从研究主题来看,文献主要

表1 复合极端事件类型分类、特征及案例  
Tab.1 Classification, characteristics and cases of compound extreme events

类型	特征描述	案例	文献
时空同步型	复合事件的多个致灾因子同时出现在同一地点	高温—干旱(干热复合)	[24-26]
		低温—冷冻(湿冷复合)	[27-28]
		河流洪水与风暴潮复合	[18]
		强降水与强风复合	[29-31]
		强降水与风暴潮复合	[32-33]
		台风、暴雨、风暴潮、洪水等多碰头	[31]
同地—继发型	复合事件的不同致灾因子先后出现在同一地点	前期高土壤湿度与后期强降水复合	[20,34]
		前期森林火灾与后期强降水复合	[35]
		日间极端高温与夜间极端高温复合	[36-37]
		旱涝急转	[38]
异地—同发型	复合事件的不同致灾因子同时出现在不同地点	不同地区同时发生干旱造成粮食危机	[39-40]
		大气遥相关或大气阻塞系统影响下不同地区同时发生极端天气事件	[41-42]
异地—继发型	复合事件的致灾因子在不同时间出现在不同地点	不同支流及上下游暴雨洪水的相继发生	[23,43]



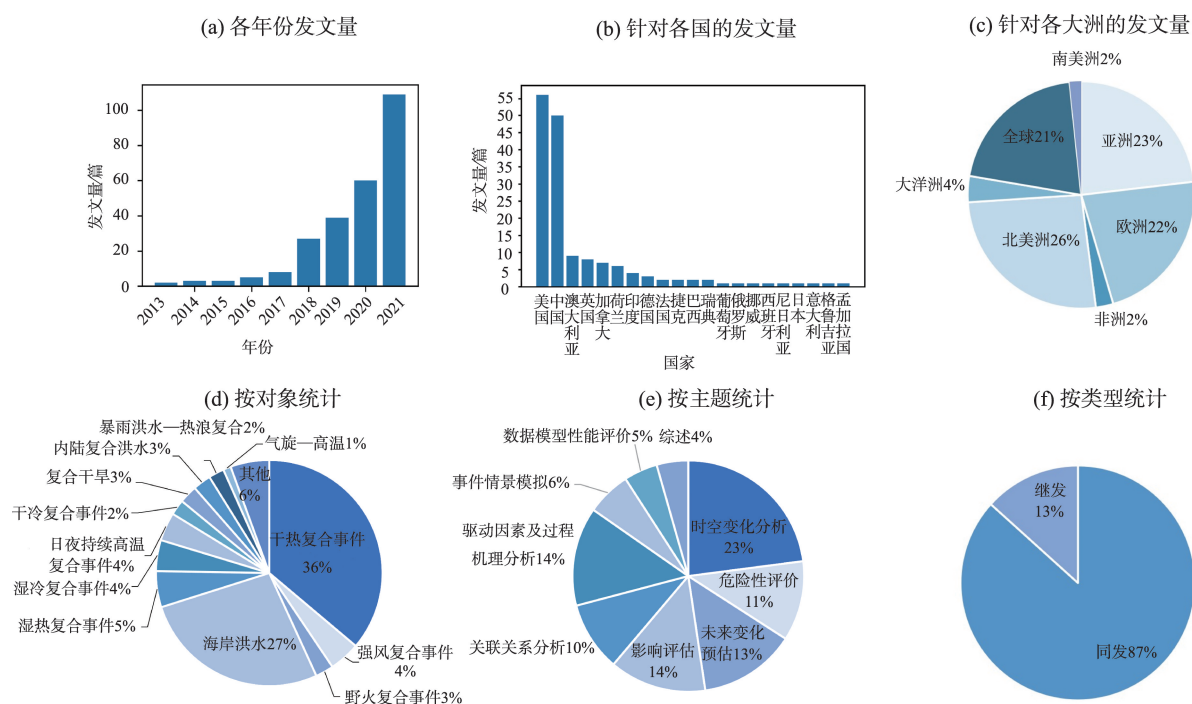


图1 2013—2021年复合极端事件研究文献分布统计

Fig.1 Statistics of the publications on compound extreme events during 2013–2021

涵盖研究综述、时空变化分析、关联关系分析、影响评估、危险性评估、未来变化预估、驱动因素及过程机理分析、事件情景模拟和数据模型性能评价等9种类型;其中时空变化的研究文献最多(23%),驱动因素、影响评估和未来变化预估的研究近年来增加明显,成为复合极端事件研究的重要趋势。

### 3 复合极端事件时空关联关系诊断及建模

时空关联关系(dependence)指复合事件中各致灾因子之间经验的或由确定物理过程控制的时空相依关系,是定义复合事件的重要特征<sup>[6]</sup>。若不考虑各致灾因子之间的关联关系会低估复合事件发生的风险,给灾害风险管理带来更多的不确定性<sup>[5]</sup>。复合极端事件致灾因子间时空关联关系的诊断建模是复合事件研究的重要内容,其常用方法包含以下几个方面。

#### 3.1 相关系数

##### 3.1.1 Kendall 相关系数

Kendall 相关系数是描述复合事件各因子相关性的常用指标,也是复合事件联合分布相关结构建

模的重要参数<sup>[44]</sup>。它从等级排序的角度对两组序列的相关程度进行刻画,与传统 Pearson 相关系数相比,更适合于非线性、非正态分布的变量。

##### 3.1.2 尾部相关系数

由于各极端事件可能存在一定的尾部相关性,复合事件研究中也采用一些尾部相关指标进行描述。Wahl 等<sup>[33]</sup>使用尾部相关系数发现美国沿海很多城市风暴潮和降水相关性的增加都是由于上尾部分事件同时出现增加导致的。此外,Vignotto 等<sup>[29]</sup>和 Zscheischler 等<sup>[30]</sup>使用 Kullback-Leibler (K-L)散度研究了双变量降水和强风复合事件的尾部相关结构,证明了其在研究复合极端事件相关关系时的适用性。K-L 散度主要通过计算2个极值分布之间的差别来判断二者的尾部相关性,它还可以拓展到更多变量的研究中<sup>[30]</sup>。

#### 3.2 似然乘法因子 (likelihood multiplication factor, LMF)

为研究复合事件驱动因子间的关联关系对复合事件发生概率的影响,Ridder 等<sup>[45]</sup>提出了 LMF 指标,将其定义为观测到的复合事件发生的经验概率( $P_{\text{actual}}$ )与假定各致灾因子完全独立时复合事件发生概率( $P_{\text{indep}}$ )的比值:

$$P_{\text{indep}} = P(\text{hazard } X) \times P(\text{hazard } Y) = \frac{\sum_i X}{\text{ndays}} \times \frac{\sum_i Y}{\text{ndays}} \quad (1)$$

$$P_{\text{actual}} = P(X \cap Y) = \frac{W}{\text{ndays}} \quad (2)$$

$$\text{LMF} = \frac{P_{\text{actual}}}{P_{\text{indep}}} \quad (3)$$

式中:  $\sum_i X$  和  $\sum_i Y$  分别为事件  $X$  和  $Y$  出现的天数,  $W$  为复合事件出现的天数,  $\text{ndays}$  为总天数。LMF  $\in [0, \infty)$ , 若两个事件完全不相相关, 则 LMF=1; 若 2 个事件呈正相关, 则 LMF>1, 且随相关性增强趋向正无穷; 若 2 个事件呈负相关, 则  $0 < \text{LMF} < 1$ 。

Zscheischler 等<sup>[5]</sup>用 LMF 证明了气候变量之间的相关性会直接影响复合极端事件发生的可能性, 并且发现在未来气候变暖的背景下, 气温与降水之间相关性的增强会进一步增加极端干热事件发生的概率。Ridder 等<sup>[45]</sup>将全球 27 种复合事件致灾因子的 LMF 分布与观测到的复合事件发生的热点区域进行了比较, 发现二者高度重合, 表明致灾因子之间的相关性对复合事件发生有显著影响。LMF 从事件独立与实际发生差异的角度, 便捷地实现了对复合事件相关性的刻画, Zscheischler 等<sup>[5]</sup>和 Ridder 等<sup>[45]</sup>的研究结果表明, 若忽略复合事件之间的相关性, 可能会误判其风险。

### 3.3 基于 Copula 的建模

Copula 函数是由 Sklar<sup>[46]</sup>在 1959 年提出的一种对多变量之间相关关系进行建模分析的工具。由于其具有很高的灵活性, 在金融和水文等领域得到广泛的应用。

根据 Sklar 定理<sup>[46]</sup>, 假设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为  $n$  个随机变量, 其边缘分布分别为  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , 联合分布为  $H(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 则存在一个 Copula 函数  $C$ , 使得

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (4)$$

由 Sklar 定理可知, Copula 函数可以对各变量的任意边缘分布进行建模并构建其联合分布, 通过基于 Copula 的联合概率建模可有效揭示变量间的相依结构<sup>[47]</sup>。

Hao 等<sup>[48]</sup>对多变量研究中使用的 Copula 函数进行了梳理。常用的 Copula 函数有 Gaussian、Student's  $t$ 、Archimedean 函数族等。其中 Archimedean 函数族包括 Frank、Gumbel、Clayton 等。不同的函数族有不同的性质。Gaussian、Frank 和  $t$  Copula 表现对称相关。当需要对变量的尾部相关进行建模

时, 需要用到非 Gaussian Copula。其中, Frank Copula 适用于上下尾对称时的尾部相关, Clayton Copula 适用于下尾部相关, Gumbel Copula 适用于上尾部相关<sup>[48-49]</sup>。

近年来, Copula 函数在水文、灾害领域的应用逐渐增多。夏军等<sup>[50]</sup>用 Copula 描述了前期累加降水量和帕默尔干旱指数以及洪峰流量之间的相关结构; 刘章君等<sup>[51]</sup>对 Copula 函数在水文领域中具体的应用方向进行了介绍; François 等<sup>[52]</sup>借助 Copula 函数分别对历史时期和未来情景下的复合洪水的边缘分布和相依性进行建模, 分析了在不同情景下可能影响复合洪水出现时间的因素。

在 3 个及以上变量的研究中, 普通的二维 Copula 难以直接应用, 此时需要将变量两两组合进行分析, 构建高维联合分布<sup>[53]</sup>。而 Vine Copula 可以将多变量结构分解为多个双变量 Copula 的组合, 克服了传统双变量 Copula 向高维拓展的局限, 具有很高的灵活性, 近年来在多维复合事件研究中的应用不断增加<sup>[54]</sup>。

### 3.4 时空网络建模

复合事件多致灾因子间在时间和空间上存在复杂的耦合关联关系, 从而呈现出一定的网络特性, 可以通过网络建模的方法进行抽象研究。常见的方法包括贝叶斯网络、复杂网络模型等。贝叶斯网络 (Bayesian network) 是一种基于贝叶斯概率的有向无环图模型 (directed acyclic graph), 网络图中节点代表随机变量并通过有向边进行连接, 有向边通过条件概率表征变量间的因果关系或条件依赖关系<sup>[55]</sup>。贝叶斯网络在刻画随机变量相依关系和事件过程的级联风险方面有广泛的应用, 近年来也应用于复合事件风险的研究。Couasnon 等<sup>[56]</sup>结合高斯 Copula 构建了贝叶斯网络模型, 对美国休斯顿海湾地区洪潮复合洪水进行了模拟研究; Naseri 等<sup>[57]</sup>利用基于 Copula 的贝叶斯网络模型, 评价了美国沿海地区极端降水和高潮位复合洪水的相依关系、概率风险和不确定性特征。

复杂网络 (complex network) 是系统科学中的重要概念和理论, 借助复杂网络的关联特性, 可对极端事件的空间结构进行刻画和分析。Boers 等<sup>[58]</sup>基于复杂网络理论提出事件同步性的方法和指标, 揭示了全球极端降水的遥相关特征和格局; de Michele 等<sup>[59]</sup>以观测站点为节点对构建了干湿二值化的降水网络, 研究了欧洲和北美降水的空间关联

结构。李双双等<sup>[60-61]</sup>通过复杂网络建模,研究了2008年中国南方低温雨雪冰冻灾害的演化过程和京津冀地区干旱热浪复合灾害的时空网络特征。时空网络建模的方法可以系统全面地描述复合事件多因子间的关联关系,尤其在空间复合和时间继发关系的研究方面具有显著的优势,但在复合事件大数据样本的抽象建模、网络统计特性与物理机理耦合等方面还需要更多的研究。

4 复合极端事件驱动及影响因素分析

复合极端事件常表现为降水、气温、风速、河流径流等气象水文要素的异常,往往与特定的天气系统或大气环流形势密切相关,构成复合事件的驱动因素(表2)。Ridder等<sup>[45]</sup>分析了全球27种复合事件的主要驱动因素,发现各类型复合事件分布的区域和季节差异主要是由不同天气系统导致的。Zhang等<sup>[62]</sup>对复合干热事件、湿热事件、干冷事件、湿冷事件和复合洪水事件的大气驱动因子及物理机制进行了较为系统的综述。

一般而言,强风—暴雨相关复合事件的主要驱动因素包括热带气旋、大气河流、极端温带气旋等<sup>[63-65]</sup>。热带地区主要与热带气旋相关,而中高纬度地区则主要受锋面系统和温带气旋影响<sup>[66]</sup>。如欧洲风暴潮相关复合事件主要与大规模低压系统(温带气旋)带来的大面积持续强风有关,而北美东部强降水—强风复合事件常受低压和锋面系统影响<sup>[67-68]</sup>。同时,气旋和大气阻塞系统的相互作用常导致持续的风暴潮复合洪水<sup>[69]</sup>。大气河流形成的强烈水汽输送带,往往也会带来极端的降水和大风<sup>[70]</sup>。Waliser等<sup>[71]</sup>研究发现,全球40%的海岸线上,约40%~75%的极

端大风和降水事件与大气河流的登陆有关。内陆强降水和极端径流形成的复合洪水事件主要受降水因素主导,与形成强降水的多种天气系统有关,如大气河流、锋面系统、季风系统、低纬度地区的热带气旋和中小尺度强对流性天气系统等<sup>[45]</sup>。

对高温干旱复合事件物理机制的研究较为丰富,影响其发生的天气系统包括副热带高压、阻塞高压、大气静稳事件、大气长波振荡等。在副热带高压控制下,气流下沉增温导致持续的高温少雨,是造成东亚地区干热复合事件的重要原因<sup>[72]</sup>。阻塞高压和大气静稳模式使大气保持稳定少变,抑制对流运动和水汽输送,降低降水发生概率<sup>[73]</sup>。Screen等<sup>[74]</sup>研究发现北半球中纬度地区极端天气事件常伴随对流层中层显著增强的大气长波振荡,且大气长波的增强会增加北美中西部、欧洲和中亚地区干旱热浪的发生概率。高温干旱复合事件通常还受到区域陆气耦合反馈作用的影响。例如下垫面的干旱将降低蒸发蒸腾作用,增加大气饱和水汽压差,导致植被气孔关闭,蒸腾进一步减弱,抑制降水的发生;同时蒸发蒸腾减弱将增强地面接收的太阳辐射和感热通量,进一步增加地表温度<sup>[75]</sup>。此外,干旱引起的地表反照率变化也可能加剧热浪<sup>[76]</sup>。

冬季冷湿复合事件主要受强降雪系统和冷锋系统影响,如极地涡旋南下伴随冷锋系统往往给北美等高纬地区带来严重的暴雪,冷涡系统常给中国东北地区造成低温冷害和持续阴雨灾害。而冷干事件主要受冬季干冷空气的寒潮事件影响。

除特定的天气系统,复合极端事件的形成变化还受到大尺度环流因子的影响。在全球,研究发现,厄尔尼诺增强了南亚、东南亚、澳大利亚、南美

表2 常见复合事件类型及其驱动和影响因素

Tab.2 Types of common compound extreme events and their driving and influencing factors

复合事件类型	相关天气系统/驱动因素/物理机制
强降水与风暴潮/强风	热带气旋、大气河流、极端温带气旋、锋面系统、海平面上升
内陆暴雨洪涝	大气河流、锋面系统、季风、强对流风暴和热带气旋
高温与干旱	阻塞高压、大气静稳模式、副热带高压、高压脊、大气长波振荡、陆气耦合反馈作用
高温与湿润	高温增强大气持水能力(Clapeyron-Clausius 方程),增加大气湿度
低温与干旱	干冷空气的寒潮、冷高压、极涡
低温与湿润	暴雪和冷锋系统、极涡、冷涡
日间—夜间持续高温	城市化、异常的反气旋、稳定的大气层结
高温热浪—暴雨洪水	高温增加感热通量和水汽辐合、增强大气不稳定性 and 暴雨强度
高温干旱森林火灾	大气阻塞(高温、干旱)、异常反气旋(强风)、陆气耦合反馈作用



北部和北美南部温度与降水之间的负相关关系,增加了这些地区干热复合事件发生的可能性<sup>[12,77]</sup>。Wu等<sup>[78]</sup>评估了大尺度环流因子对中国夏季干热复合事件的影响,发现大西洋年代际振荡(AMO)、北大西洋涛动(NAO)、太平洋年代际振荡(PDO)和ENSO的影响最为显著;Zhang等<sup>[79]</sup>分析了2019年澳大利亚高温干旱和森林火灾的海温异常,发现中太平洋厄尔尼诺和印度洋偶极子(IOD)强正向振荡的组合是该复合极端事件的重要驱动因素;Wu等<sup>[80]</sup>用海洋气候模式研究了ENSO对澳大利亚沿海极端降水和风暴潮关联关系的影响,发现拉尼娜期间大部分地区暴雨和风暴潮的关联关系会增强,增加复合洪水风险。

此外,人类活动对复合极端事件的时空变化也有重要的影响。Ma等<sup>[81]</sup>利用全球3401个气象站观测数据,对比分析了城市和农村地区日夜持续高温复合事件的特征,发现受城市热岛效应影响,城市地区复合高温事件频率、强度和持续时间均高于农村地区,且变化更为显著。在中国,Wang等<sup>[82]</sup>通过归因分析发现人为温室气体排放和城市化对日间—夜晚复合高温事件频率变化存在显著影响,两者贡献分量分别达0.51 d/10 a和1.63 d/10 a;Luo等<sup>[83]</sup>发现城市化加剧了中国东部城市地区的复合高温胁迫(高温+高湿度),城市化在极端高温胁迫频率变化中的贡献占到近30%。此外,在全球气候变化背景下,海平面上升叠加地面沉降导致海岸洪水重现期变化,也构成沿海复合洪水的重要影响因素<sup>[84-85]</sup>。

总体而言,复合极端天气气候事件通常与多种不利气象条件组合的长期稳定维持有关,其形成机制复杂多样,受到大尺度环流形势、中尺度天气系统和区域尺度陆气耦合天气过程等多方面的影响。同时人类活动在不同尺度也有不同的影响,进一步增加了其机理过程的复杂性。复合事件不同驱动因子的相互作用及不利条件组合形成的物理机制和随机特性还需要更全面更深入的研究。

## 5 复合极端事件危险性评估

危险性评估是支撑极端事件风险防范的重要基础,传统针对单变量极端事件的评估方法很多并不适用于复合事件,因此,有研究提出或改进了针对多变量复合事件的危险性评估方法。

### 5.1 基于超越概率和重现期的频率分析方法

#### 5.1.1 “且”“或”联合重现期

重现期是研究极端事件强度—频率关系最常用的方法,它表示统计上2次同等强度的极端事件发生的平均时间间隔。针对多变量复合事件,常利用Copula函数构建联合分布,并根据研究需要选择合适的联合重现期,包括“且”重现期和“或”重现期2种情景类型<sup>[86]</sup>。“且”重现期指2个一定强度的极端事件同时出现的水文期,“或”重现期为2个变量中至少一个变量为极端值时的水文期<sup>[87]</sup>。

以 $C(F_X(x), F_Y(y))$ 表示Copula分布函数, $\mu$ 为年取样频率,则变量 $X$ 和 $Y$ 的“或”重现期 $T_{or}$ 为:

$$T_{or} = \frac{1}{P(X > x \cup Y > y)} = \frac{\mu}{1 - C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (5)$$

“且”重现期 $T_{and}$ 为:

$$T_{and} = \frac{1}{P(X > x \cap Y > y)} = \frac{\mu}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (6)$$

研究三变量乃至更多变量事件的重现期时,可利用Vine Copula构建高维联合分布模型,将“且”“或”重现期扩展到高维<sup>[54]</sup>。

变量 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 的“或”重现期为:

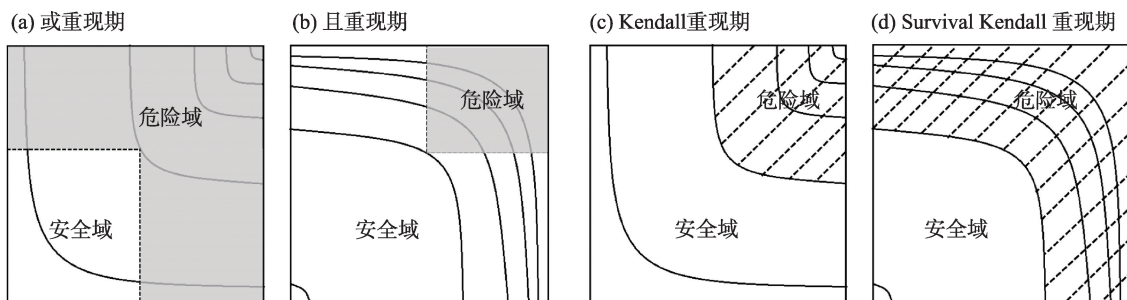
$$T_{or} = \frac{1}{P(X > x \cup Y > y \cup Z > z)} = \frac{\mu}{1 - C(F_X(x), F_Y(y), F_Z(z))} \quad (7)$$

变量 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 的“且”重现期为:

$$T_{and} = \frac{1}{P(X > x \cap Y > y \cap Z > z)} = \frac{\mu}{1 - F_X(x) - F_Y(y) - F_Z(z) + C(F_X(x), F_Y(y), F_Z(z))} \quad (8)$$

#### 5.1.2 Kendall重现期和Survival Kendall重现期

“且”“或”重现期中具有相同重现期的不同事件组合有着不同的安全域和危险域,存在低重现期的危险域无法完全覆盖高重现期危险域的问题(图2),可能导致不同防御标准下危险事件识别混乱<sup>[88-89]</sup>。对此,有学者提出了Kendall重现期和Survival Kendall重现期,又称二次重现期。在Kendall和Survival Kendall重现期情景下,相同重现期的事件具有相同的危险域和安全域,且不同重现期事件的危险域不重合,从而解决了“且”“或”重现期存在的问题<sup>[86,89]</sup>。



注:灰色部分及斜线阴影部分为危险域,白色部分为安全域。曲线为不同重现期的等值线。

图2 不同重现期情景安全域和危险域示意图

Fig.2 Illustration of the safe and hazardous areas of bivariate extreme events under different recurrence scenarios

Kendall 重现期  $T_K$  可表示为:

$$T_K = \frac{\mu}{1 - K_C(t)} \quad (9)$$

Survival Kendall 重现期  $T_{SK}$  为:

$$T_{SK} = \frac{\mu}{1 - \bar{K}_C(t)} \quad (10)$$

式中:  $K_C(t)$  为 Kendall 分布函数,  $\bar{K}_C(t)$  为 Survival Kendall 函数,  $\mu$  为年取样频率。

### 5.1.3 条件重现期

对多变量复合事件,在某些情况下需要根据部分变量情况推测其余变量的可能分布,此时可以结合条件概率,计算条件重现期<sup>[54]</sup>。

$X$ 在给定 $Y$ 和 $Z$ 条件下的重现期为:

$$T_{X|Y \leq y, Z \leq z} = \frac{\mu}{1 - \frac{C(F_X(x), F_Y(y), F_Z(z))}{C(F_Y(y), F_Z(z))}} \quad (11)$$

$X, Y$ 在给定 $Z$ 条件下的重现期为:

$$T_{X, Y|Z \leq z} = \frac{\mu}{1 - \frac{C(F_X(x), F_Y(y), F_Z(z))}{C(F_Z(z))}} \quad (12)$$

式中:  $\mu$  为年取样频率,  $C(F_X(x), F_Y(y), F_Z(z))$  为  $X, Y$ 和 $Z$ 的三维 Copula 函数。

借助该方法,可以对不同变量组合条件下其余变量的可能情况进行模拟。如 Bevacqua 等<sup>[90]</sup>利用 Vine Copula 构建了意大利 Ravenna 地区复合洪水的三维和五维条件分布模型,模拟了不同上游河流水文和下游海水位条件下的河流洪水情况;Li 等<sup>[24]</sup>构建了中国新疆地区标准化降水蒸散指数,标准化温度指数和 NDVI 的条件分布,评估了新疆地区植被对不同极端干热情景的响应。

### 5.1.4 年可靠度(average annual reliability, AAR)

使用联合重现期进行复合事件危险性评价时,

同一重现期设计值可对应无数种组合情景,给防灾减灾工程设计带来困难<sup>[91]</sup>。同时,在气候变化影响下,复合事件的发生概率不断变化,描述静态风险的重现期难以适用于非平稳条件下的研究<sup>[92]</sup>。为满足多变量非平稳情况下风险研究的需要,Read 等<sup>[93]</sup>提出了年可靠度(AAR)指标,用以表达工程项目周期内未失效的概率,其定义如下:

$$AAR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (13)$$

式中:  $p_i$  为极端事件在第  $i$  年超越设计指标的概率,  $n$  为总年份。

非平稳条件下复合极端事件的研究常结合时变 Copula 与 AAR。如 Jiang 等<sup>[91]</sup>结合时变 Vine Copula、条件概率和 AAR 计算了平稳、非平稳条件以及不同灾害情景下中国西江流域的水文设计值。Xu 等<sup>[92]</sup>结合时变 Copula 和 AAR 对中国海河流域极端降水强度和降水量双变量非平稳风险进行了评估。

基于超越概率和重现期的频率分析方法可有效揭示复合事件的复杂概率特征,其中,“且”、“或”、Kendall 和 Survival Kendall 重现期刻画了不同情景的联合概率;条件重现期适用于根据部分变量情况推测其余变量可能分布的情况;AAR 方法可以对气候变化等非平稳条件下的极端事件概率风险进行评估。考虑复合事件的极端性,上述基于概率的方法需要有较长序列的观测数据,同时不同取样方法和分布型的选取也会带来一定的不确定性。

## 5.2 基于数值模拟的情景分析方法

除了基于联合概率分布的强度—频率分析,也有研究从复合事件致灾过程情景模拟的角度开展危险性评价。这类研究主要针对沿海“雨—洪—潮”复合洪水以及内陆河流上下游和干支流遭遇洪



水,结合水文模型、水动力学模型、海浪和风暴潮海洋模式等多种数值模型,对不同遭遇情景下的洪水演进过程和淹没特征进行模拟分析。如王璐阳等<sup>[94]</sup>考虑了风暴增水、极端暴雨、天文高潮、上游洪水和波浪等因素,使用大气—海洋—陆地相耦合的一体化风暴洪水淹没模拟方法,对上海市风、暴、潮、洪多灾种并发的复合极端风暴洪水的演进和淹没特征进行了模拟;Saharia等<sup>[95]</sup>结合 Copula 和条件概率与水文模型,模拟了不同下游水位条件下,上游河流径流的变化,并进行了不同遭遇情景下的淹没模拟。与单过程事件相比,复合洪水的情景分析需要涉及多个过程多类模型的耦合模拟。方佳毅等<sup>[88]</sup>对沿海复合洪水数值模拟的模型类型、模型耦合方式和特征进行了较为系统的梳理总结。

基于数值模拟的分析方法可有效刻画复合事件的致灾过程和致灾情景。近年来复合洪水模拟的相关模型不断发展,其中的水文模型从集总式发展到半分布式和分布式,日益丰富,水动力学模型从一维向二维、三维不断扩展,海洋数值模式的模拟精细度也在不断提高,模型耦合方式从单向型向松散耦合型和紧密耦合型发展。但当前研究仍存在一定挑战,如多模型耦合建模过程复杂,运算量大,模拟的精细度和计算及时间成本之间的矛盾需要更优的协调策略;此外对复合因子相互作用过程刻画不足以及模型耦合程度有限导致模拟不确定性累积,也需要进一步改进。

## 6 研究展望与结论

### 6.1 未来研究展望

近年来复合极端事件的研究取得了较为显著的进展,但其更深入的研究仍面临一系列挑战,建议未来研究可在以下几个方面进行深化。

(1) 相比时空同步发生的复合事件,时间上相继发生的复合事件研究相对较少,其不同致灾因子之间存在不同时间尺度的复杂关联关系,现有研究缺乏有效的诊断手段,通常忽略致灾因子不同时间间隔(time lag)的影响<sup>[19,96]</sup>,给复合事件的判定和分析带来一定误差。此外,空间复合事件会对区域应对能力带来严峻挑战,但当前研究也比较欠缺,对空间上不同位置极端事件相互影响的认识较为有限。因此,未来应加强复合事件案例数据库的建设和积累,丰富时间继发型和空间复合型事件的研究,

深化不同时空尺度多致灾因子耦合作用的认识,结合事件过程和影响,优化时空尺度选取方法,实现对复合极端事件的精准刻画。

(2) 近年来,在气候变化和人类活动的影响下,各类气候水文因子的非平稳变化引起广泛关注<sup>[97]</sup>。复合极端事件,除单变量边缘分布,变量间的关联关系也会受气候变化影响而出现一定的变化,从而引起复合事件风险的复杂变化(图3)。受长序列数据和模型方法的限制,目前对于多变量复合事件时变风险的研究十分有限。Sarhadi等<sup>[98]</sup>结合贝叶斯估计、蒙特卡罗模拟和动态 Copula 模型,构建了多变量时变风险分析框架,对气候变化下多变量极端事件的非平稳变化进行了一定的探索。未来,利用长序列观测或模拟数据,结合时变 Copula 对复合事件进行时变风险分析和变化归因将成为一个重要的研究方向。

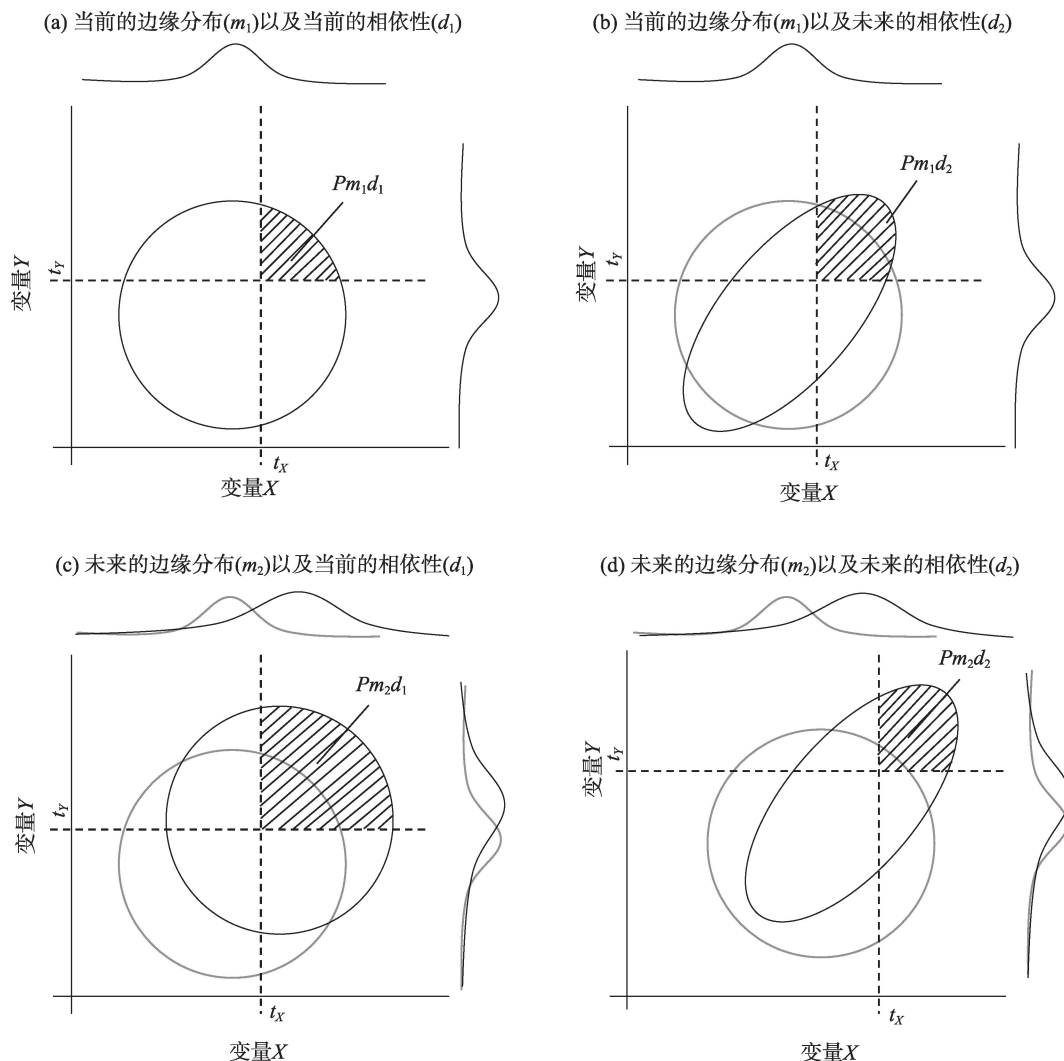
(3) 当前研究多从水文气象角度关注复合极端事件的发生过程及可能性,缺乏与风险评估和管理决策的有效衔接。复合极端灾害形成机制复杂,致灾组合具有较高的不确定性,同一概率水平下的不同事件组合可造成不同的影响,给风险评估与防范带来严峻挑战。传统基于事件概率和损失模拟自上而下的风险评估框架难以全面刻画真实的风险水平。对此,有学者提出自下而上基于故事线(story-line)的分析框架<sup>[3]</sup>,但仍难以在实际研究中有效应用。未来应进一步加强复合极端事件危险性评价与风险评估管理的衔接,通过多情景多模式的耦合模拟,优化危险性的表达方式,更全面地刻画复合事件的危险性特征;同时应进一步加强复合事件模式模拟、情景分析、概率组合等方面的不确定性分析,量化不同致灾组合的不确定性水平。

### 6.2 结论

近年来,复杂多过程的复合极端事件受到越来越多的关注,同时伴随全球变化和灾害风险科学的发展,对极端事件的认识不断加深,复合极端事件的研究不断丰富,取得了一系列的进展。

(1) 从研究对象来看,研究的事件类型越来越丰富,极端气温—降水—风—径流—风暴潮等不同要素组合,以及同发、继发、同地、异地不同组合类型的复合事件的研究不断涌现,极大地加深了对极端天气气候事件的认识,也丰富了多灾种和灾害复杂性的研究。

(2) 从研究内容体系来看,近年来复合极端事



注:灰色及黑色曲线分别表示变化前和变化后概率分布,阴影部分代表超过阈值的极端事件的组合; $P$ 代表极端事件发生的概率; $t_X$ 、 $t_Y$ 分别代表变量 $X$ 和变量 $Y$ 的阈值。

图3 边缘分布和相依结构变化对复合事件联合超越概率变化影响示意图<sup>[52]</sup>

Fig.3 Illustration for the influence of marginal distribution and dependence variations on joint exceedance probability

件的研究快速发展,初步建立了较为完整的研究体系。其中,复合事件概念和特征分类的理论研究逐步完善;时空关联关系的研究较为丰富,但在复杂相依结构(如复杂网络关系)方面还有待更深入的探究;事件成因及驱动因素的研究不断增加,但主要集中于事件过程的天气系统分析和大尺度环流因子的相关关系分析,对多因子相互作用机理及人类活动影响的研究相对不足;在复合极端事件评估方面,围绕基于联合概率的危险性分析和基于情景模拟的影响评估也开展了一定的研究。

(3) 从研究技术手段来看,刻画时空关联关系和多维联合概率的各类数理统计方法不断发展,其中以 Copula 模型为核心的联合概率建模得到越来越

广泛的应用,并实现了由二维向多维、由静态向动态建模的发展。此外,针对复合洪水,耦合水文模型、水动力学模型和海洋风暴潮模式的数值模拟方法也不断发展,模拟的精细度不断提高,在一定程度上满足了复合洪水过程模拟和淹没影响评价的需要。

未来应进一步加强时间继发性和空间复合型事件复杂时空关联关系的研究,深化不同时空尺度多致灾因子耦合作用的认识。同时,需要进一步深化气候变化背景下复合事件变化的归因研究,关注单变量边缘分布变化及相依结构变化对复合事件非平稳变化的影响。此外,未来应加强复合事件致灾组合情景刻画及不确定性的研究,推动复合事件危险性评价与风险评估管理的衔接。

## 参考文献(References)

- [1] Stott P. How climate change affects extreme weather events [J]. *Science*, 2016, 352: 1517-1518.
- [2] 吴绍洪, 高江波, 邓浩宇, 等. 气候变化风险及其定量评估方法 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 28-35. [Wu Shaohong, Gao Jiangbo, Deng Haoyu, et al. Climate change risk and methodology for its quantitative assessment. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 28-35.]
- [3] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, et al. Future climate risk from compound events [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.
- [4] Aghakouchak A, Cheng L Y, Mazdiyasni O, et al. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(24): 8847-8852.
- [5] Zscheischler J, Seneviratne S I. Dependence of drivers affects risks associated with compound events [J]. *Science Advances*, 2017, 3(6). doi: 10.1126/sciadv.1700263.
- [6] Leonard M, Westra S, Phatak A, et al. A compound event framework for understanding extreme impacts [J]. *WIREs Climate Change*, 2014, 5(1): 113-128.
- [7] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [8] IPCC. Summary for policymakers [M]// IPCC. *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [9] 余荣, 翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示 [J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 645-649. [Yu Rong, Zhai Panmao. Advances in scientific understanding on compound extreme events. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 645-649.]
- [10] Tilloy A, Malamud B D, Winter H, et al. A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships [J]. *Earth- Science Reviews*, 2019, 196. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102881.
- [11] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇 [J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 1-12. [Shi Peijun, Lv Lili, Wang Ming, et al. Disaster system: Disaster cluster, disaster chain and disaster compound. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 1-12.]
- [12] Hao Z C, Hao F H, Singh V P, et al. Quantifying the relationship between compound dry and hot events and El Niño- Southern Oscillation (ENSO) at the global scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 332-338.
- [13] Saarinen T F, Hewitt K, Burton I. The hazardousness of a place: A regional ecology of damaging events [J]. *Geographical Review*, 1973, 63: 134-136.
- [14] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践 [J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 6-17. [Shi Peijun. Theory and practice of disaster study. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(4): 6-17.]
- [15] Zscheischler J, Martius O, Westra S, et al. A typology of compound weather and climate events [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(7): 333-347.
- [16] Merz B, Blöschl G, Vorogushyn S, et al. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(9): 592-609.
- [17] Simpson N P, Mach K J, Constable A, et al. A framework for complex climate change risk assessment [J]. *One Earth*, 2021, 4(4): 489-501.
- [18] Ghanbari M, Arabi M, Kao S C, et al. Climate change and changes in compound coastal-riverine flooding hazard along the U.S. coasts [J]. *Earth's Future*, 2021, 9(5): e2021EF002055. doi: 10.1029/2021EF002055.
- [19] Dykstra S L, Dzwonkowski B. The role of intensifying precipitation on coastal river flooding and compound river-storm surge events, Northeast Gulf of Mexico [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(11): e2020WR029363. doi: 10.1029/2020WR029363.
- [20] Khatun A, Ganguli P, Bisht D S, et al. Understanding the impacts of predecessor rain events on flood hazard in a changing climate [J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(2): e14500. doi: 10.1002/hyp.14500.
- [21] Liao Z, Chen Y, Li W, et al. Growing threats from unprecedented sequential flood-hot extremes across China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(18): e2021GL094505. doi: 10.1029/2021GL094505.
- [22] You J W, Wang S. Higher probability of occurrence of hotter and shorter heat waves followed by heavy rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(17): e2021GL094831. doi: 10.1029/2021GL094831.
- [23] Vahedifard F, AghaKouchak A, Jafari N H. Compound hazards yield Louisiana flood [J]. *Science*, 2016, 353: 1374. doi: 10.1126/science.aai8579.
- [24] Li H W, Li Y P, Huang G H, et al. Quantifying effects of compound dry- hot extremes on vegetation in Xinjiang (China) using a vine-Copula conditional probability model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 311: 108658. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108658.
- [25] Wu X Y, Hao Z C, Hao F H, et al. Spatial and temporal variations of compound droughts and hot extremes in China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(2): 95. doi: 10.3390/atmos10020095.



- [26] Zscheischler J, Fischer E M. The record-breaking compound hot and dry 2018 growing season in Germany [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 29: 100270. doi: 10.1016/j.wace.2020.100270.
- [27] De Luca P, Messori G, Faranda D, et al. Compound warm-dry and cold-wet events over the Mediterranean [J]. *Earth System Dynamics*, 2020, 11(3): 793-805.
- [28] Zhou P, Liu Z Y. Likelihood of concurrent climate extremes and variations over China [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(9): 94023. doi: 10.1088/1748-9326/aade9e.
- [29] Vignotto E, Engelke S, Zscheischler J. Clustering bivariate dependencies of compound precipitation and wind extremes over Great Britain and Ireland [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 32: 100318. doi: 10.1016/j.wace.2021.100318.
- [30] Zscheischler J, Naveau P, Martius O, et al. Evaluating the dependence structure of compound precipitation and wind speed extremes [J]. *Earth System Dynamics*, 2021, 12(1): 1-16.
- [31] 贺芳芳, 胡恒智, 董广涛, 等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估 [J]. *灾害学*, 2020, 35(4): 93-98, 134. [He Fangfang, Hu Hengzhi, Dong Guangtao, et al. Compound flooding simulation and prediction of future recurrence in Shanghai downtown area. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 93-98, 134. ]
- [32] Fang J Y, Wahl T, Fang J, et al. Compound flood potential from storm surge and heavy precipitation in coastal China: Dependence, drivers, and impacts [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(8): 4403-4416.
- [33] Wahl T, Jain S, Bender J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(12): 1093-1097.
- [34] Poschlod B, Zscheischler J, Sillmann J, et al. Climate change effects on hydrometeorological compound events over southern Norway [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 28: 100253. doi: 10.1016/j.wace.2020.100253.
- [35] Moftakhari H, AghaKouchak A. Increasing exposure of energy infrastructure to compound hazards: Cascading wildfires and extreme rainfall [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 104018. doi: 10.1088/1748-9326/ab41a6.
- [36] Li Y, Ding Y H, Liu Y X. Mechanisms for regional compound hot extremes in the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(2): 1292-1304.
- [37] Luo M, Lau N C, Liu Z. Different mechanisms for daytime, nighttime, and compound heatwaves in Southern China [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2022, 36: 100449. doi: 10.1016/j.wace.2022.100449.
- [38] 赵东升, 张家诚, 邓思琪, 等. 1960—2018年中国西南地区旱涝急转的时空变化特征 [J]. *地理科学*, 2021, 41(12): 2222-2231. [Zhao Dongsheng, Zhang Jiacheng, Deng Siqi, et al. Spatio-temporal characteristics of drought-flood abrupt alternation in the Southwest China from 1960 to 2018. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(12): 2222-2231. ]
- [39] Anderson W B, Seager R, Baethgen W, et al. Synchronous crop failures and climate-forced production variability [J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaaw1976. doi: 10.1126/sciadv.aaw1976.
- [40] Qi W, Feng L, Yang H, et al. Increasing concurrent drought probability in global main crop production countries [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(6): e2021GL097060. doi: 10.1029/2021GL097060.
- [41] Lau W K M, Kim K M. The 2010 Pakistan flood and Russian heat wave: Teleconnection of hydrometeorological extremes [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 392-403.
- [42] Steptoe H, Jones S E O, Fox H. Correlations between extreme atmospheric hazards and global teleconnections: Implications for multihazard resilience [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1): 50-78.
- [43] 孙永刚, 孟雪峰, 仲夏, 等. 河套气旋发展东移对一次北京特大暴雨的触发作用 [J]. *高原气象*, 2014, 33(6): 1665-1673. [Sun Yonggang, Meng Xuefeng, Zhong Xia, et al. Analysis of Hetao cyclone shifting eastward and producing rainstorm process in Beijing. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(6): 1665-1673. ]
- [44] Hao Z C, Singh V P. Compound events under global warming: A dependence perspective [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2020, 25(9): 3120001. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001991.
- [45] Ridder N N, Pitman A J, Westra S, et al. Global hotspots for the occurrence of compound events [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5956. doi: 10.1038/s41467-020-20502-8.
- [46] Sklar A. Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges [J]. *Publications de l'Institut de Statistique de L'Universite de Paris*, 1959, 8: 229-231.
- [47] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展 [J]. *水文*, 2008, 28(3): 1-7. [Guo Shenglian, Yan Baowei, Xiao Yi, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(3): 1-7. ]

- [48] Hao Z C, Singh V P. Review of dependence modeling in hydrology and water resources [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2016, 40(4): 549-578.
- [49] 冯介玲, 李宁, 刘丽, 等. 基于混合 Copula 模型的灾害相关结构分析: 以内蒙古中部强沙尘暴为例 [J]. *灾害学*, 2019, 34(3): 216-220, 226. [Feng Jieling, Li Ning, Liu Li, et al. Dependence analysis of disaster based on mixed Copula model: A case study of the severe dust storm disaster in central Inner Mongolia. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(3): 216-220, 226. ]
- [50] 夏军, 余敦先, 杜鸿. 气候变化影响下极端水文事件的多变量统计模型研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(6): 397-402. [Xia Jun, She Dunxian, Du Hong. The multi-variable statistical models of extreme hydrological events under climate change. *Climate Change Research*, 2012, 8(6): 397-402. ]
- [51] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 148-159. [Liu Zhangjun, Guo Shenglian, Xu Xinfa, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: A state-of-the-art review. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 148-159. ]
- [52] François B, Vrac M. Time of emergence of compound events: Contribution of univariate and dependence properties [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023, 23(1): 21-44.
- [53] 陈心池, 张利平, 闪丽洁, 等. 基于 Copula 函数的汉江中上游流域极端降雨洪水联合分布特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1425-1433. [Chen Xinchu, Zhang Liping, Shan Lijie, et al. Joint distribution of the extreme rainfall and flood for the upper-middle reaches of the Hanjiang River based on Copula function. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8): 1425-1433. ]
- [54] Tosunoglu F, Gürbüz F, İspirli M N. Multivariate modeling of flood characteristics using Vine Copulas [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(19): 459. doi: 10.1007/s12665-020-09199-6.
- [55] Weber P, Medina-Oliva G, Simon C, et al. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, 25(4): 671-682.
- [56] Couasnon A, Sebastian A, Morales-Nápoles O. A Copula-based Bayesian network for modeling compound flood hazard from riverine and coastal interactions at the catchment scale: An application to the Houston ship channel, Texas [J]. *Water*, 2018, 10(9): 1190. doi: 10.3390/w10091190.
- [57] Naseri K, Hummel M A. A Bayesian Copula-based non-stationary framework for compound flood risk assessment along US coastlines [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 128005. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128005.
- [58] Boers N, Goswami B, Rheinwalt A, et al. Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections [J]. *Nature*, 2019, 566: 373-377.
- [59] de Michele C, Meroni V, Rahimi L, et al. Dependence types in a binarized precipitation network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(23): e2020GL090196. doi: 10.1029/2020GL090196.
- [60] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋, 等. 2008 年中国南方低温雨雪冰冻灾害网络建模及演化机制研究 [J]. *地理研究*, 2015, 34(10): 1887-1896. [Li Shuangshuang, Yang Saini, Liu Xianfeng, et al. Network modeling and dynamic mechanisms of the severe cold surge, ice-snow events, and frozen disasters in Southern China in 2008. *Geographical Research*, 2015, 34(10): 1887-1896. ]
- [61] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 面向非过程的多灾种时空网络建模: 以京津冀地区干旱热浪耦合为例 [J]. *地理研究*, 2017, 36(8): 1415-1427. [Li Shuangshuang, Yang Saini, Liu Xianfeng. Spatiotemporal network modeling in concurrent heat waves and droughts in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region, China. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1415-1427. ]
- [62] Zhang W, Luo M, Gao S, et al. Compound hydrometeorological extremes: Drivers, mechanisms and methods [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9. doi: 10.3389/feart.2021.673495.
- [63] Colle B A, Booth J F, Chang E K M. A review of historical and future changes of extratropical cyclones and associated impacts along the US east coast [J]. *Current Climate Change Reports*, 2015, 1(3): 125-143.
- [64] Danard M B, Dube S K, Gönner G, et al. Storm surges from extra-tropical cyclones [J]. *Natural Hazards*, 2004, 32(2): 177-190.
- [65] Lin N, Marsooli R, Colle B A. Storm surge return levels induced by mid-to-late-twenty-first-century extratropical cyclones in the Northeastern United States [J]. *Climatic Change*, 2019, 154(1): 143-158.
- [66] Martius O, Pfahl S, Chevalier C. A global quantification of compound precipitation and wind extremes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(14): 7709-7717.
- [67] Do H X, Westra S, Leonard M, et al. Global-scale prediction of flood timing using atmospheric reanalysis [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(1): e2019WR024945. doi: 10.1029/2019WR024945.
- [68] Dowdy A J, Catto J L. Extreme weather caused by concur-

- rent cyclone, front and thunderstorm occurrences [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40359. doi: 10.1038/srep40359.
- [69] Booth J F, Narinesingh V, Towey K L, et al. Storm surge, blocking, and cyclones: A compound hazards analysis for the Northeast United States [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2021, 60(11): 1531-1544.
- [70] Ridder N, de Vries H, Drijfhout S. The role of atmospheric rivers in compound events consisting of heavy precipitation and high storm surges along the Dutch coast [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(12): 3311-3326.
- [71] Waliser D, Guan B. Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(3): 179-183.
- [72] Liu Q, Zhou T J, Mao H T, et al. Decadal variations in the relationship between the western Pacific subtropical high and summer heat waves in East China [J]. Journal of Climate, 2019, 32(5): 1627-1640.
- [73] Horton D E, Skinner C B, Singh D, et al. Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(8): 698-703.
- [74] Screen J A, Simmonds I. Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(8): 704-709.
- [75] Miralles D G, Gentile P, Seneviratne S I, et al. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: State of the science and current challenges [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2019, 1436(1): 19-35.
- [76] Teuling A J, Seneviratne S I. Contrasting spectral changes limit albedo impact on land-atmosphere coupling during the 2003 European heat wave [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(3). doi: 10.1029/2007GL032778.
- [77] Feng S F, Hao Z C. Quantitative contribution of ENSO to precipitation- temperature dependence and associated compound dry and hot events [J]. Atmospheric Research, 2021, 260: 105695. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105695.
- [78] Wu X Y, Hao Z C, Hao F H, et al. Influence of large-scale circulation patterns on compound dry and hot events in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(4): e2020JD033918. doi: 10.1029/2020JD033918.
- [79] Zhang W J, Mao W, Jiang F, et al. Tropical indo-Pacific compounding thermal conditions drive the 2019 Australian extreme drought [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(2): e2020GL090323. doi: 10.1029/2020GL090323.
- [80] Wu W Y, Leonard M. Impact of ENSO on dependence between extreme rainfall and storm surge [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(12): 124043. doi: 10.1088/1748-9326/ab59c2.
- [81] Ma F, Yuan X. More persistent summer compound hot extremes caused by global urbanization [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(15): e2021GL093721. doi: 10.1029/2021GL093721.
- [82] Wang J, Chen Y, Liao W L, et al. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(12): 1084-1089.
- [83] Luo M, Lau N C. Increasing heat stress in urban areas of eastern China: Acceleration by urbanization [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(23): 13060-13069.
- [84] Moftakhari H R, Salvadori G, AghaKouchak A, et al. Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding [J]. PNAS, 2017, 114(37): 9785-9790.
- [85] Ward P J, Couasnon A, Eilander D, et al. Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(8): 084012. doi: 10.1088/1748-9326/aad400.
- [86] Salvadori G, Durante F, De Michele C, et al. A multivariate Copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities [J]. Water Resources Research, 2016, 52(5): 3701-3721.
- [87] 陈子荣, 施伟勇, 路剑飞. 波高周期联合分布四种重现水平对比分析 [J]. 热带海洋学报, 2018, 37(4): 18-23. [Chen Zishen, Shi Weiyong, Lu Jianfei. Comparative analysis on four recurrence levels of joint distribution of wave height and period. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(4): 18-23. ]
- [88] 方佳毅, 殷杰, 石先武, 等. 沿海地区复合洪水危险性研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 317-328. [Fang Jiayi, Yin Jie, Shi Xianwu, et al. A review of compound flood hazard research in coastal areas. Climate Change Research, 2021, 17(3): 317-328. ]
- [89] 黄强, 陈子荣. 基于二次重现期的多变量洪水风险评估 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 352-360. [Huang Qiang, Chen Zishen. Multivariate flood risk assessment based on the secondary return period. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 352-360. ]
- [90] Bevacqua E, Maraun D, Hobæk Haff I, et al. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-Copula constructions: Analysis of floods in Ravenna (Italy) [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6): 2701-2723.
- [91] Jiang C, Xiong L H, Yan L, et al. Multivariate hydrologic design methods under nonstationary conditions and application to engineering practice [J]. Hydrology and Earth



- System Sciences, 2019, 23(3): 1683-1704.
- [92] Xu P C, Wang D, Wang Y K, et al. Time-varying Copula and average annual reliability-based nonstationary hazard assessment of extreme rainfall events [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126792. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126792.
- [93] Read L K, Vogel R M. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6381-6398.
- [94] 王璐阳, 张敏, 温家洪, 等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 546-555. [Wang Lu-yang, Zhang Min, Wen Jiahong, et al. Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai. *Advances in Water Science*, 2019, 30(4): 546-555. ]
- [95] Saharia A M, Zhu Z D, Atkinson J F. Compound flooding from lake seiche and river flow in a freshwater coastal river [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126969. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126969.
- [96] Hendry A, Haigh I D, Nicholls R J, et al. Assessing the characteristics and drivers of compound flooding events around the UK coast [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(7): 3117-3139.
- [97] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: Whither water management? [J]. *Science*, 2008, 319: 573-574.
- [98] Sarhadi A, Ausin M C, Wiper M P. A new time-varying concept of risk in a changing climate [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35755. doi: 10.1038/srep35755.

## Progress of research on compound extreme event and hazard assessment

FANG Jian<sup>1,2</sup>, TAO Kai<sup>1,2</sup>, MU Sha<sup>1,2</sup>, FANG Jiayi<sup>3</sup>, DU Shiqiang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, School of Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China; 4. School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** In recent years, the frequent extreme weather and climate events have attracted wide attention. Their disastrous process often stems from the interaction of multiple factors, which brings many challenges to regional security and risk prevention. Starting from a bibliometric analysis, this article systematically reviewed the progress of research on compound extreme events by focusing on the conceptual features, classification, and driving factors of such events, and summarizing the main methods for the spatial-temporal dependance analysis and hazard assessment of compound events. The review found that: 1) The research on compound extreme events has developed rapidly in recent years, and the types of events studied have become increasingly rich and diverse. 2) The research system has been established and increasingly improved, with significant advance in the research on the conceptual characteristics, dependance, causative mechanism, and risk assessment. 3) The research techniques were constantly evolving. Statistical modeling for joint probability based on Copula has developed from two-dimensional to multidimensional, and from static to dynamic; the precision of numerical simulations represented by the coupled hydrological-hydrodynamic and ocean models has been continuously improved. But further in-depth studies are still needed, especially for some key and difficult problems, such as diagnosing and modeling the complex dependance structure of temporally and spatially compounding events, the synthetic effect of weather system, large-scale circulation and human activity impact on the formation of compound events, hazard scenarios and multidimensional joint probability analysis of compound events, and so on. In addition, it is urgent to explore the non-stationary changes of the marginal distribution and dependance structure of compound events under climate change and their impact on the risk of compound events in the future.

**Keywords:** extreme weather/climate events; compound extreme events; spatio-temporal dependance; drivers; hazard assessment