

# 气候变化背景下中国沿海地区 灾害风险研究与应对思考

王 军<sup>1,2</sup>, 谭金凯<sup>1,3\*</sup>

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学上海城市公共安全研究中心, 上海 200241;  
3. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082)

**摘 要:**沿海地区是城市化水平较高的区域,在全球气候变化背景下,该地区极端天气气候事件频发,灾害风险日益加大,已严重制约了该地区社会经济的可持续发展。论文立足气候变化背景,探讨沿海地区灾害风险变化的新特点,认为:当前极端天气气候灾害的发生仍具较大的不确实性,气候与灾害在时空尺度上呈现多样性变化特征,各气象灾害风险存在较大差异性,灾害系统构成要素也更加复杂。鉴于气候变化给沿海地区灾害风险研究带来新的挑战,文章提出在气候变化背景下,沿海地区灾害风险系统的构建应关注灾害的时空尺度变化、多灾种灾害的协同效应、城市化与气候变化,并构建了基于气候变化背景下的灾害风险系统框架。最后,为提升气候变化背景下我国沿海地区灾害风险应对能力建设,提出以下建议:注重灾害防御系统的多样化、注重灾害防御系统的稳健性、实现多灾种灾害信息的共享、强化承灾主体的自恢复能力、加强灾害风险分担与转移能力建设、逐步适应气候变化背景下的极端天气与自然灾害。

**关键词:**气候变化;城市化;灾害风险评估;风险系统结构;沿海城市

2019年第9号超强台风“利奇马”于8月10日登陆浙江台州一带,并北上纵穿浙江、江苏、山东、辽宁等省区,造成了严重的社会经济损失。据应急管理部统计,该台风共造成9省市约1402.4万人受灾,56人死亡,14人失踪,1.5万间房屋倒塌,农作物受灾面积113.7万 $\text{hm}^2$ ,直接经济损失高达515.3亿元<sup>①</sup>。“利奇马”是气候变化背景下典型的极端天气事件,其主要特点是:台风风力超强,在近70多年登陆浙江的台风中排名第三;台风降水极大,浙江省共23个站点累积降雨量超过500 mm;影响范围极广,从华东到华北、渤海,甚至东北地区均受到影响;破坏力超大,沿海地区遭受暴雨、内涝、地质灾

害等影响,工农业损失惨重。“利奇马”给我们带来了深刻的教训和沉重的启示,提高气候变化背景下中国沿海地区灾害风险的科学认识迫在眉睫。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告表明,1880—2012年的100多年里,全球地表平均气温上升了0.85 $^{\circ}\text{C}$ ,在此背景下,全球各地自然灾害事件与极端天气事件频发、自然生态系统受到威胁、人类生存及经济发展受到严峻挑战<sup>[1]</sup>。中国是受全球气候变化影响的敏感区和脆弱区,也是极端天气气候事件发生最为频繁的国家之一<sup>[2]</sup>。中国气象局气候变化中心发布的《中国气候变化蓝皮书(2019)》指出:中国极端天气气候事件

收稿日期:2020-06-22;修订日期:2020-11-23。

**基金项目:**国家社会科学基金重大项目(18ZDA105);国家重点研发计划项目(2018YFC1508803);国家自然科学基金项目(41971199, 42001182)。[**Foundation:** Major Program of National Social Science Foundation of China, No. 18ZDA105; National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC1508803; National Natural Science Foundation of China, No. 41971199 and 42001182.]

**第一作者简介:**王军(1975—),男,陕西汉中,教授,博士生导师,主要从事沿海城市灾害风险评估与风险管理研究。

E-mail: jwang@geo.ecnu.edu.cn

**\*通信作者简介:**谭金凯(1990—),男,广西贵港人,博士后,主要从事深度学习和人工智能预报研究。E-mail: indicator@sina.cn

① 数据来源于<http://news.weather.com.cn/2019/08/3228731.shtml>。

**引用格式:**王军, 谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考[J]. 地理科学进展, 2021, 40(5): 870-882. [Wang Jun, Tan Jinkai. Understanding the climate change and disaster risks in coastal areas of China to develop coping strategies. Progress in Geography, 2021, 40(5): 870-882.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.05.013

趋多趋强,气候风险水平呈上升趋势<sup>[3]</sup>。中国海岸线漫长,沿海地区社会经济、基础设施等高度密集,使得该地区成为极端天气灾害发生的高风险区。受到“自然变率”以及“人类活动”的叠加影响,沿海地区自然灾害的形成机制、演化规律、时空特征、损失影响的深度和广度等均呈现出新的变化,灾害风险评估和风险应对日趋严峻。

在气候变化和极端灾害的应对措施方面,当前国际社会的工作重点已转为“灾害风险管理和气候变化适应”,如2005年联合国世界减灾大会达成的《兵库行动框架》,提出从战略和行动上加强灾害风险和推进气候变化适应;2010年哥本哈根世界气候大会《联合国气候变化框架公约》更是制定了具体的适应气候变化行动框架。中国也不断加强灾害风险评估和管理、强化适应气候变化的能力,如2013年和2016年国家发展和改革委员会等分别制定并发布了《国家适应气候变化战略(发改气候[2013]2252号)》和《城市适应气候变化行动方案(发改气候[2016]245号)》,以推进中国城市地区适应气候变化的能力,提升典型城市适应气候变化治理水平,促进社会经济的可持续发展<sup>[4-5]</sup>。

近年来,众多学者围绕沿海地区的气候变化、灾害风险评估和风险管理等开展了大量系统性研究工作<sup>[6-10]</sup>,但仍存在两方面不足:一是在灾害的构成要素中,更多关注危险性、脆弱性和暴露度等内在因素和灾害风险,而忽略“气候变化”“城市化”这2个关键外在因素的风险胁迫,使灾害风险研究主要停留在静态风险视角,而非动态风险视角;二是以往的危害风险研究侧重于单一灾种、多承灾体的灾害风险,但气候变化背景下更应关注多灾种、复杂承灾体的灾害风险,并且各灾害风险在时间和空间尺度上的演化特征也值得重点考虑。因此,本文将全面梳理国内外相关研究成果,系统分析气候变化背景下中国沿海地区灾害风险的新特点,对气候变化背景下灾害风险系统内涵进行探讨,总结近年来沿海地区主要灾害风险的研究框架、理论和方法,以期提出科学的风险应对措施。

## 1 气候变化的表现形式及其与极端天气事件的联系

### 1.1 气候变化的主要表现形式

在人类活动与自然变率的共同作用下,未来气

候在其状态空间上(时空尺度)的变化仍具有较大的“不确定性”。这种不确定性在时间尺度上表现为气候变量(或极端天气)的持续时长和振动周期,在空间尺度上则更表现为该气候变量的波及范围大小和受影响区域的多样性。IPCC特别报告认为<sup>[1]</sup>,气候变化主要呈现3种形式的变化:均值变化、方差变化、均值和方差变化(图1a~1c)。其中,均值变化表现为气候变量在原来基础上实现整体偏移并保持分布曲线的正态性,该变化不改变极端天气事件(分布曲线的尾部)的频率,但改变气候变量的整体分布水平,从而需要在整体上提高防灾减灾的层次;方差变化表现为气候变量出现较大程度的波动,但其均值在整体状态空间上几乎保持一致,该变化容易增加极端天气事件发生的概率,从而针对极端天气的防范工作需要更高的要求;均值和方差变化表现为气候变量的分布曲线呈偏态分布,其形状参数(均值)、位置参数(方差)都发生改变,该情形将同时改变极端天气发生的频率和强度量级。另外,本文认为“分布函数变化”也是气候变化的一种形式(图1d),即气候变量分布曲线由原来的“正态分布”转变为“指数分布”,该变化往往导致某极端天气的持续增加,而与之相反的极端天气持续减少。例如,在气候变化背景下,极端高温的日数持续增加,而极端低温的日数减少。相对而言,气候变化以前3种变化为主,但不排除最后一种“极端”情况的发生。

### 1.2 气候变化与极端天气事件的联系

气候变化在其状态空间上呈现的4种变化形式是造成极端天气事件增多的主要机制。具体而言,由自然变率与人类活动共同作用导致的气候变化,是造成某些极端天气气候事件频发、自然灾害强度加大的可能原因<sup>[12-14]</sup>。气候变化的机理非常复杂,“自然变率”是影响气候变化的内在系统性因子,而“人类活动”则是影响气候变化的另一重要因子,至于如何量化这两方面因素对气候变化的影响、实现对气候变化归因检测,是目前科学家们关注的问题。从统计学角度分析,一些极端天气发生的频率和强度的确与气候变化有关,比如2015年发生在欧洲、南亚、东南亚、中国、澳大利亚等地的高温热浪,都因气候变化而变得更加剧烈。然而,能否将极端天气事件与气候变化建立必然的联系,目前科学界尚未形成统一的结论。IPCC特别评估报告也指出,在温室气体持续排放背景下,全球极端高温事

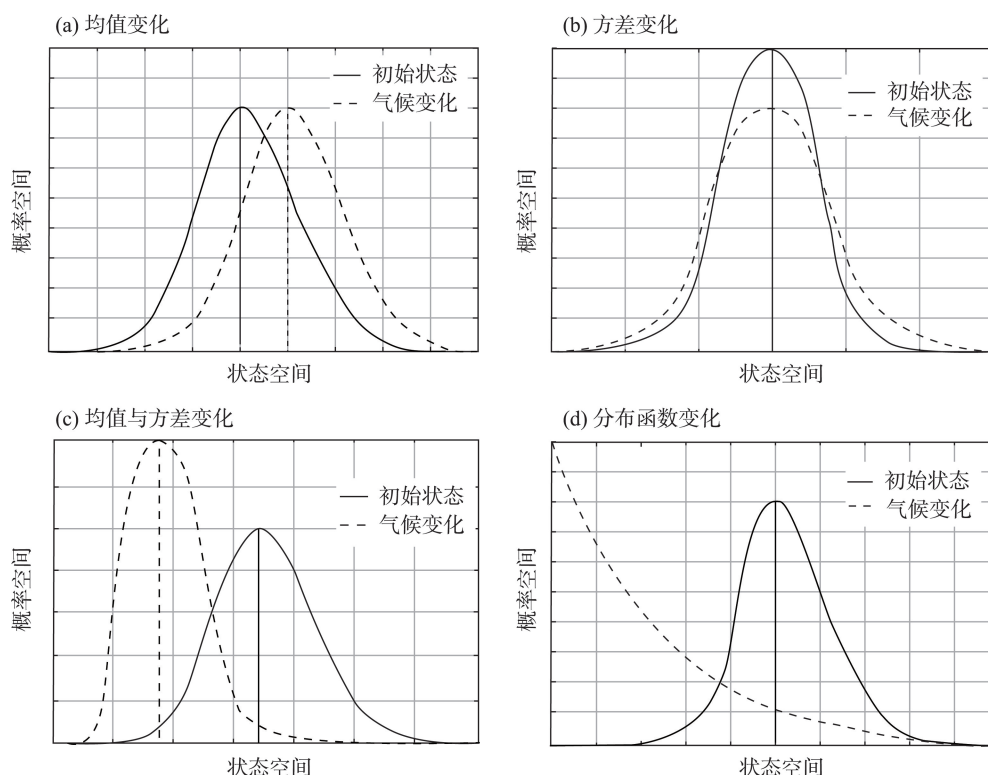


图1 气候变化的4种表现形式

Fig.1 The four modes of climate change

件的频数也只是以“较高的信度”增加,高温天气“可能”变得更热<sup>[11]</sup>。目前普遍的观点认为,人类活动导致的温室气体浓度持续上升,“温室效应”持续增强,这是造成全球变暖的重要驱动力<sup>[12-14]</sup>,也为部分极端天气事件的发生提供了重要的孕灾环境,例如:气温升高会导致大气变暖,有利于保持水分和能量,也为暴风雨、台风和龙卷风等极端天气事件提供了能量和物质来源。除此之外,科学家们通过观测数据和国际气候比较计划模式也检测到人类活动对极端天气事件的影响,但如何量化人类活动贡献率,单次极端天气事件的原因如何,仍然是目前研究的难点。总之,气候变化中“人类活动”这一影响因子,造成了全球变暖,这是导致部分极端天气事件增多、灾害风险加大的主要原因。

## 2 气候变化背景下沿海地区灾害及灾害风险的特点

### 2.1 极端天气气候灾害的不确定性

未来气候变化情景主要由全球气候数值模式试验得到。目前世界各国研究机构开发的气候模

式(GCM)在一定程度上具有模拟全球气候的能力,但由于模型本身动力降尺度过程中存在系统误差,模型对大气和海洋、大气和地表、海洋上层与深层之间的通量、水气交换等过程的模拟仍具有较大不确定性,从而导致各模式的预估结果存在较大差异。同时,温室气体排放也是驱动气候变化的重要因子,未来情景下对气候进行预估要充分考虑社会经济、资源环境、人口分布、土地利用等非气候要素的变化,这些要素的不确定性也会导致各模式对未来极端天气气候的预估存在较大不确定性。根据IPCC特别评估报告<sup>[11]</sup>,全球气温仍以升高为主,其中高温热浪发生的时长、强度、频率有很大可能会增加;尚无足够的证据表明热带气旋总频数、持续时间、强度将增加,但热带气旋降水、最大强度有很大可能会增加;有较高的信度认为全球极端高温事件将增加,受相应影响的地区将增多,而极端低温事件总体将呈下降趋势。由此可见,气候变化背景下,对预估各极端天气气候灾害的总体趋势、频数、持续时间及强度,仍存在不确定性。

### 2.2 气候变化下灾害的多样性

受人类活动和自然强迫的共同作用,地球正经



历着以变暖为主要特征的变化,主要表现为气候特征信号均值和方差发生改变,受此影响,地球系统的大气环流特征、水热迁移状况、极地海冰覆盖、海平面升降等变化明显。根据气候变化的长期分布模态,可将其风险概括为趋势性风险、波动性风险和极端天气气候事件风险<sup>[15]</sup>。同时,气候变化的趋势和波动也呈现出具有递增、递减或水平变化等特征<sup>[16]</sup>。例如,至20世纪末,尽管全球地表及海洋温度均有较高信度的升高,但在某些年际内,却有不同的变化趋势<sup>[11]</sup>。受此影响,沿海地区的暴雨内涝、干旱、高温热浪、强台风、洪水、风暴潮等极端天气气候事件发生频繁。

### 2.3 灾害风险的差异性

IPCC 特别评估报告中构建了由极端气候事件、脆弱性、暴露度等组成的灾害风险分析框架<sup>[11]</sup>。暴露度是指灾害系统中各承灾体如人口、经济产业、基础设施等暴露于灾害危险中<sup>[17]</sup>;脆弱性是指承灾体易于受到自然灾害的破坏、伤害或损伤,体现各承灾体对灾害的承受能力。根据灾害学理论,极端天气气候事件需要作用在承灾体脆弱性、暴露度的基础之上才会形成灾害。承灾体的暴露度与脆弱性主要由一个国家或地区的经济发展水平决定<sup>[18]</sup>。通常而言,经济发达的国家或地区在防

灾减灾中可以投入更多的人力、物力和财力,抵御灾害风险的措施也更加科学有效。而发展中国家或地区的防灾减灾手段相对匮乏,灾害风险管理体制尚不完善,导致承灾体脆弱性较高,灾害风险也较高。

### 2.4 灾害系统的复杂性

沿海地区是“海—陆”交互作用敏感地带,受地形、大气环流、季风气候、水汽交换等影响,该地区的复合型自然灾害发生频繁。一般地,多种致灾因子常伴随出现,形成具有多致灾因子的灾害链。例如,受台风影响,沿海地区极易形成强降水,进而引发城市洪水、内涝等灾害。另外,气候变化是受自然变率和人类活动(尤其是快速城市化的沿海地区)的共同影响,随着温室气体浓度持续增加,全球变暖、极地冰川和冻土融化导致海平面上升,水资源分布失衡,进而引发海岸侵蚀、海水入侵、土地盐碱化、海水倒灌、湿地生态退化等缓发性自然灾害。同时,海平面上升进一步扩大了风暴潮的淹没范围,严重影响着沿海地区经济社会活动<sup>[19]</sup>。此外,海平面上升叠加地面沉降,沿海地区的滨海湿地、红树林、珊瑚礁等生态系统将受到破坏,其抵御自然灾害的能力也相应减弱,沿海地区“灾害群、灾害链”的发生将显著增加(图2)。

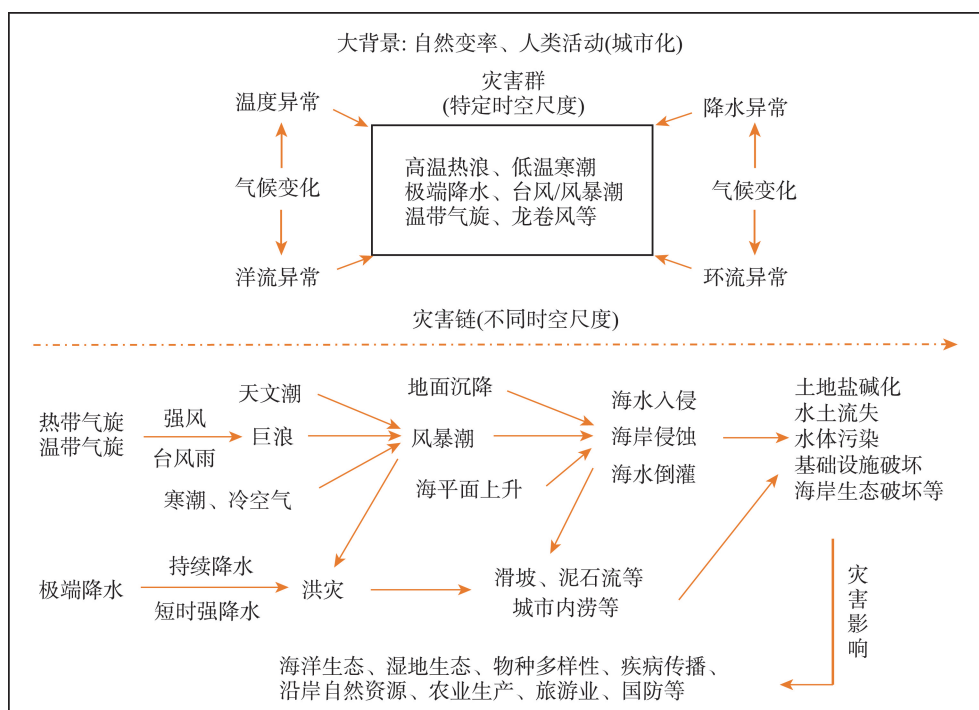


图2 中国沿海地区“灾害群、灾害链”示意图

Fig.2 Illustration of "disaster cluster" and "disaster chain" in coastal areas of China

### 3 气候变化背景下的灾害风险系统结构研究

#### 3.1 气候变化对灾害风险系统研究带来的挑战

梳理和总结国内外对灾害风险系统结构的相关研究,本文进一步强调气候变化这一关键影响因素,分别从3个视域重新思考其结构。

第一,孕灾环境。在以往的灾害风险结构中,孕灾环境作为灾害产生的初始条件,并作用于致灾因子、承灾体上,从而形成灾害。气候变化进一步改变了孕灾环境在时空尺度上的分布特征,具有典型的“诱导机制”。例如,持续的全球变暖将导致全球尺度的水热转移、季风环流、洋流等固有的结构发生改变,从而影响各种灾害的发生频率、趋势和波及范围。同时,沿海地区是“海—陆—空”交互作用的敏感地带,受地形、洋流、季风、人类活动等综合影响明显,而气候变化进一步加速这些要素的恶化,为多灾害(如台风、风暴潮、洪水等)的同步发生提供了有利的孕灾条件。

第二,致灾因子。致灾因子的量化要素包括位置、时间、强度和频率等。当致灾因子到达或超过人类和自然生态系统的承受能力时,才会形成灾害。气候变化对致灾因子具有典型的“催化效应”。具体而言,当致灾因子产生时,气候变化往往能同时扩大致灾因子的影响范围、持续时间、强度和发生频率等。气候变化的“催化机制”对致灾因子的影响是全方位、多尺度、多层次的,诸如海表面温度的持续升高,最终受影响的致灾因子有:台风强度增大、移速加快,降水强度和降水日数增加,高温热浪频率增加,洪水峰值增加等。同时,各致灾因子在动态变化的孕灾环境中相互制约、相互影响,受致灾因子影响的范围、持续时间、强度等级也会进一步扩大,最终将会引发“次生灾害”和“衍生灾害”。

第三,气候变化与城市化。沿海地区人口数量的不断增加和社会经济水平的快速提高,加快了城市化进程。气候变化与城市化两者具有“互反馈机制”。一方面,快速城市化深刻改变了人类赖以生存的下垫面结构,城市用地增加,森林、农业、湿地生态等非城市用地减少,城市绿化覆盖率降低,城市自然排涝能力降低,能源和物资消耗增加,生态环境破坏,水体污染、城市噪音污染、工业固体污染

等问题严重,城市化过程中的“热岛”“干岛”“湿岛”“雨岛”“污浊岛”等加剧。同时,城市化和城市消费过程中产生大量温室气体,加剧全球变暖。因此,快速城市化打破了地球生态系统平衡,是造成气候变化的直接推动力,既加剧了生态系统中各种孕灾环境的恶化,又扩大了各种致灾因子的影响。另一方面,气候变化对城市化具有反作用力:气候变化加剧了城市的“五岛”效应,其影响波及城市生态环境、基础设施、资源和能源、工农业生产、居民生活、发展规划等,更深层次地削弱了城市可持续发展能力。因此,亟需从根本上找出科学的方法改变“气候变化—城市化”这2个系统之间的“恶性循环”。

#### 3.2 构建气候变化背景下灾害风险系统结构需关注的问题

第一,灾害的时空尺度变化。自然灾害兼具“自然属性”和“社会属性”。在气候变化背景下,其构成要素(孕灾环境、致灾因子、承灾体等)在灾害的形成过程中具有典型的“时空效应”,主要包括:灾害的孕灾环境由局部或区域尺度、季节尺度的特征转为全球尺度、年代际尺度的特征,诸如三圈环流、ENSO事件等(气候变化的“诱导机制”);致灾因子由单一的、静态的、瞬时的转为动态的、持续的多灾种灾害,灾害影响范围也由局部拓展为全局(气候变化的“催化机制”);承灾体遭受的潜在损失取决于社会经济、人居模式、管理和体制等因素,由以往静态的、局部的、瞬时的、单一的损失逐步转为动态的、全局的、持续的、多层次的损失。上述各灾害要素的“时空效应”变化是在气候变化作用下共同发生的,各变化之间相互关联,但也存在自身的演化规律。

第二,多灾种灾害的协同效应。在灾害风险评估和管理体系里,将灾害发生、演化及后续响应等各阶段的信息进行规范整合,形成一整套完整且普适性强的风险评估框架和风险管理范式,能给受灾地区提供相对稳定、可靠的防灾减灾技术支持。但在气候变化背景下,“灾害群”和“灾害链”等发生愈加显著,各孕灾环境复杂多变,各致灾因子之间互相联结、互相对立、互相促进、互相制约,多灾种的协同效应明显,导致其造成的损失远远大于各单一灾种的简单累加。以往的灾害风险研究通常针对单一灾种、单承灾体,气候变化下则更应注重探讨具有普适性高、覆盖面广、互动性强的多灾种综合

风险评估,这也是今后灾害风险研究的重要发展方向之一。

第三,关注城市化与气候变化的共同影响。气候变化与快速城市化交织在一起并形成“恶性循环”,使得大城市遭受多灾种灾害风险的威胁不断增大,这将严重制约城市的可持续发展。气候变化是人类活动和气候自然变率的共同结果,气候自然变率虽然不可逆,但通过科学降低城市化发展进程、减少人为干预,能在一定程度上减缓城市化和气候变化“恶性循环”带来的后果。在开展城市灾害风险评估研究时,应把“城市化”渗入到灾害风险系统构成的基本要素中,从而为城市“灾前预警、灾中响应、灾后重建”提供重要的理论依据。

### 3.3 气候变化灾害风险系统的构建

综上分析,本文提出气候变化背景下的灾害风险系统结构(图3)。该系统主要由“孕灾环境( $E_n$ )”“致灾因子危险性( $H$ )”“承灾体暴露度( $E_x$ )”“承灾体脆弱性( $V$ )”“防灾减灾水平( $C$ )”5个基本要素组成。其主要假设为:整个系统最初始的动力源自于“自然变率”和“人类活动”的协同作用,整个气候空间在此作用下按顺时针方向运转。其中“城市化”为“人类活动”的最重要表现形式,而“气候空间”为总测度为1的概率空间, $E_n$ 为“气候空间”的一个子空间。在正常情况下,系统内部各要素均保持稳定状态,4个空间 $H$ 、 $V$ 、 $E_x$ 、 $C$ 则处于不相交的状态,此时并无灾害产生。一旦自然变率发生振动异常或人类活动突然加剧,气候变量在其状态空间(兼时间

尺度和空间尺度)上将发生4种形式的变化:均值变化、方差变化、均值和方差变化、分布函数变化。其中,只需某一种形式的变化直接作用于 $E_n$ 空间上,即导致孕灾环境恶化,这是产生灾害的“必要”条件。同时,显著的气候变化对灾害的其他几个要素 $H$ 、 $V$ 、 $E_x$ 均具有“增加机制”的作用,表现为:致灾因子 $H$ 变得严重,使得 $H$ 空间逐步向外扩大;承灾体脆弱水平增大,使得 $V$ 空间也向外扩大;承灾体暴露度提高,从而 $E_x$ 空间也向外扩展。相反,气候变化对防灾减灾水平 $C$ 则具有“削减机制”,剧烈的气候变化能进一步降低承灾体的防灾减灾水平, $C$ 的空间则逐渐缩小。在气候变化的“增加机制”和“削减机制”的共同影响下, $H$ 、 $V$ 、 $E_x$ 、 $C$ 等4个空间产生动态变化并形成一个“交集”,即说明有灾害发生。灾害的风险大小( $R$ )由交集的面积来量化(图3中阴影部分)。

区别于一般的“空间”概念,本系统中描述“气候变化”这一“事件”的测度为“概率”,因此整个气候空间实际上代表着一个“概率空间”。该事件在概率空间存在4种变化形式(图1),并且在时间尺度和空间尺度上进行积分,因此系统中风险 $R$ 的大小(面积)实际上代表着所有灾害风险的概率值,这与以往的灾害研究中“以频率代替概率”有明显的改进。另外,该系统中各灾害要素与各概率空间形成“一一对应”关系,详细描绘各灾害要素随着气候变化的动态变化,从而能更直观地解释导致多灾种灾害发生的条件是什么、气候变化下各灾害要素如何变化及它们的相互影响,以及多灾种灾害风险大小如何量化这几个关键问题。

## 4 沿海地区气候变化背景下灾害风险评估的主要步骤和方法

传统的灾害风险理论认为,灾害系统是孕灾环境、致灾因子、承灾体构成的地球表层变异系统,由灾害造成的实际损失、破坏则称为灾情,是3个子系统相互作用的产物<sup>[20]</sup>。气候变化下的灾害风险,可以理解为由未来情景的气候变化导致的极端天气气候事件、灾害事件等发生而造成社会经济或自然生态系统的可能损失,其基本要素包括气候变化对系统的不利影响及损失发生的可能性<sup>[21]</sup>。气候变化灾害风险评估是指对气候变化下的灾害风险进

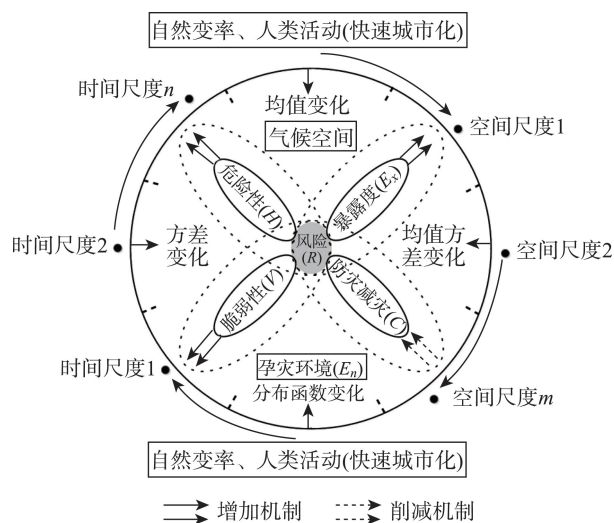


图3 气候变化背景下灾害风险系统的结构

Fig.3 Framework of disaster risk under climate change



行定量、定性分析和评估的过程,其分析的主体是人类社会、自然环境以及各社会经济活动,其最终目的是制定有效的防灾减灾措施,实现未来气候变化情景下的灾害风险综合防范。

由于各种灾害的时空分布不均匀,致灾因子各异,以及灾情损失与一定的社会属性有关联,目前灾害研究领域对于气候变化背景下灾害风险预估的步骤、理论和方法尚未形成统一的框架。此外,就气候变化和自然灾害而言,虽然很多学者对两者的研究均取得深入认识,但如何将两者有机统一起来,目前仍缺乏深入探讨,其主要原因在于两者对于承灾体的影响在时空尺度、影响程度、影响范围、评估方法等都有差异<sup>[22]</sup>。IPCC 特别评估报告建立了由极端气候事件、脆弱性、暴露度三者构成的灾害风险分析的主要框架<sup>[11]</sup>,这也是目前学界广泛采用的研究方案。

为更好地开展气候变化背景下沿海地区灾害风险评估,需明确几个问题:一是沿海地区导致灾害形成的可能因素是什么,以及这些因素的内在联系;二是各承灾体在时空上的暴露度如何;三是由灾害造成的可能损失的指标如何界定;四是如何构建基于危险性、脆弱性、暴露度、防灾减灾能力的风险评估范式,最终实现灾害综合风险评估。下文将重点阐述气候变化背景下沿海地区灾害风险评估的主要步骤及其方法原理(图4)。

#### 4.1 致灾因子识别及其危险性量化

在灾害系统中,致灾因子是由孕灾环境产生的异动因子,对人们生产生活、生命财产造成重大威胁的各种不利事件。致灾因子危险性是指各因子变化的程度,通常由各灾害的强度、频率、周期、持续时间、时空分布特点等来决定。一般而言,致灾因子强度越大,频率越高,发生周期越短,持续时间越长,其危险性就越大。气候变化背景下,沿海地区主要自然灾害包括暴雨内涝、高温热浪、台风、洪水、风暴潮、海啸等,相应地,其危险性可由暴雨降水均值与极值、高温持续时长、台风最大风速及登陆地点、洪水峰值与时长、风暴潮最大潮位、海啸波速等变量进行量化。致灾因子识别及其危险性量化,是开展灾害风险评估的前提。

当前灾害学研究常借助概率分布函数、Copula 函数、极值等方法,并假定致灾因子危险性服从一定的概率分布,描述致灾因子现阶段的危险性大小

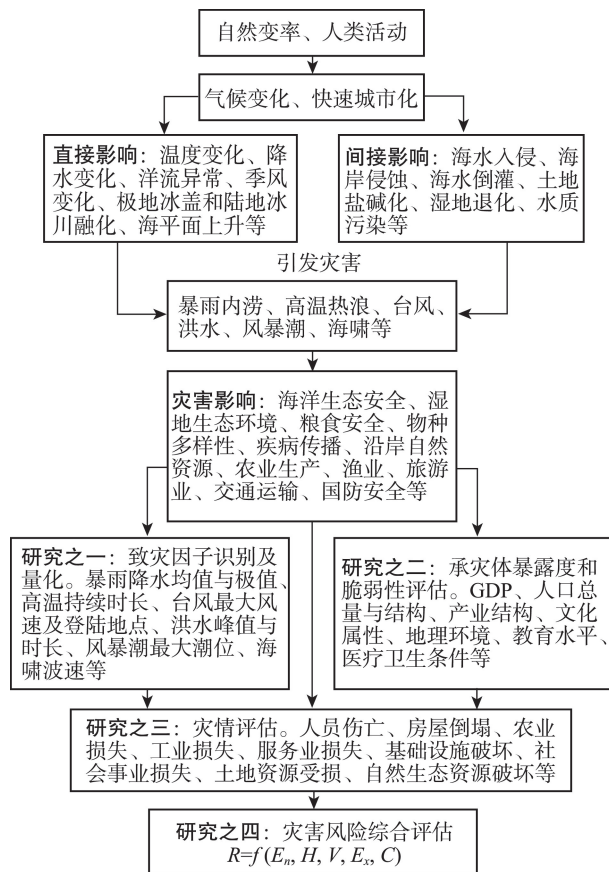


图4 气候变化背景下沿海地区灾害风险预估的主要步骤及其方法原理

Fig.4 Main steps and methods of coastal disaster risk assessment under climate change

并推测未来的危险性。其中,较常用的数学模型有皮尔逊-Ⅲ分布、Copula 函数、Gumbel 分布、非线性回归技术、时间序列分析等。然而,在大多数情况下,致灾因子的危险性在不同的时域、空间上有较大差异,其分布函数各异,因此对致灾因子的危险性评估需要考虑因子的不同时空属性。例如,登陆中国东南沿海的台风,在不同的季节、登陆地点分布存在差异。另外,考虑到致灾因子历史数据的不完备性,以及各致灾因子的非均一性、非连续性,部分研究尝试运用信息扩散理论<sup>[23]</sup>、马尔科夫链<sup>[24]</sup>、蒙特卡洛法<sup>[25]</sup>、模糊数学理论<sup>[26]</sup>、傅里叶变换及小波函数<sup>[27]</sup>等数学模型构建完整的灾害因子时间序列,但上述方法在一定程度上仍然缺乏对灾害过程的物理机制解释。

#### 4.2 承灾体暴露度和脆弱性评估

气候变化将导致更多的极端天气和气候事件,但这些事件是否能形成灾害,很大程度上取决于承

灾体的暴露度与脆弱性。灾害风险分析及风险管理的最终目标是减小承灾体的暴露度和脆弱性,提高应对各种极端灾害的不利影响<sup>[1]</sup>。对于灾害系统而言,通过探讨区域社会经济、基础设施、房屋建筑、资源环境等承灾体所处的潜在不利位置,进而量化承灾体的暴露度;而承灾体脆弱性则通过调查各承灾体受到灾害的破坏、伤害或损伤的倾向和趋势,以及其承受灾害的能力。因此,暴露度和脆弱性是动态的、多维度的,它们取决于区域经济、社会、地理、人口、文化、体制和管理因素,受财富和教育水平、残疾和健康状态,以及性别、年龄、阶层等其他社会和文化特点的影响<sup>[28]</sup>。

量化承灾体暴露度和脆弱性常采用基于指标的方法。不同灾种,量化指标也各异。例如,有研究以广东各市GDP和人口总数作为暴露度,以人均可支配收入、人口抚养比、人口性别比、第三产业占比、人均病床数作为脆弱性指标,建立广东省台风风险评估模型<sup>[29]</sup>。还有研究将承灾体脆弱性分为人口安全易损性和资产易损性,分别用因灾直接经济损失比加以表征<sup>[30]</sup>。除此之外,一些常用的暴露性指标还包括人口密度、GDP密度、固定资产投资、社会消费品零售总额、工业产值密度、人口结构,脆弱性指标包括地方财政收入、城镇居民纯收入、自然灾害生活救助支出、社会服务单位数、医疗机构病床数等<sup>[31]</sup>。

#### 4.3 灾情损失的界定和评估

根据传统的灾害风险理论,灾情是在孕灾环境中,由致灾因子危险性、承灾体暴露度和脆弱性综合作用的产物,4个条件缺一不可。广义的灾情通常包括各种灾害主体的发生情况及其造成的各种不利影响和损失,狭义的灾情主要指灾害造成的各种损失。从灾害发生的时间上,灾情评估可分为灾前预评估、灾中应急评估、灾后综合评估<sup>[32]</sup>;从灾害发生的范围上,可分为点评估和区域评估。开展灾情的界定和评估工作是进行灾害风险分析和管理的必要前提。20世纪70年代以来,欧美和日本等国家开始重视灾情数据的收集和影响评估工作,并制定了相关的减灾法规,形成对灾情的调查、整理、统计、评估等整套工作,为防灾减灾提供了重要支撑。其中,美国联邦应急管理署(FEMA)等开发了HAZUS MH(Multi-Hazard)工具,可用于飓风、洪水、地震的危险性评估和损失预测。20世纪90年代以

来,随着全球气候持续变暖,中国进入新的灾害多发期,具有灾害种类多、发生次数频繁、灾害强度大、多灾种并发等特征,灾情的统计和评估工作也相应有序开展。为此,国家应急管理部于2020年正式启动了第一次全国自然灾害综合风险普查工作,而灾情信息收集就是其中的重要内容。

灾情损失可分为灾害造成的直接经济损失和间接经济损失。其中直接经济损失主要评价指标有人员伤亡、房屋倒塌、非住宅房受损、农业损失、工业损失、公共基础设施破坏、社会事业损失、居民财产损失、土地资源受损、自然资源破坏等。直接经济损失评估方法主要包括:基于历史灾害灾情统计、基于承灾体脆弱性评估、现场调查法、基于遥感和GIS技术、基层统计上报、经济学法等。除此之外,一些常用的数理统计方法常作为灾情评估的辅助手段。例如,借助回归技术,建立历史致灾因子与承灾体、灾情统计数据的关系,进而对未来的灾害进行预估<sup>[33]</sup>;或借助致灾因子的分布函数模拟其超越概率,探讨相应的灾情分布<sup>[34]</sup>;也有部分研究应用信息扩散技术生成各灾害不同等级的统计灾情数据<sup>[23]</sup>。间接经济损失的定义范围较为宽泛,目前尚无统一的标准。但一般认为,间接经济损失包括社会系统中的经济产业、人居生活、社会服务业、自然生态环境资源等,在其“生产、发展、消费、维护、重置”等运行过程中因遭受灾害而产生的损失。间接经济损失在总损失中往往占有较高的比例,其特点是具有显著的滞后性、隐蔽性、混沌性、传导性,也因此导致中国对间接经济损失的评估工作还不够重视、对其影响机制缺乏有效的评估工具。当前灾害管理研究中对间接经济损失的评估方法主要包括:Harrod-Domar的经济增长模型<sup>[35]</sup>、投入产出模型<sup>[36]</sup>、一般均衡模型<sup>[37]</sup>等。Harrod-Domar的经济增长模型计算机简单,但缺乏对灾害局部损失的精细刻画;投入产出模型计算过程详细精确,但仍难以反映“投入”和“产出”的非线性关系;一般均衡模型有上述2个模型的优点,但对数据及计算过程要求较高,效率还有待提高。总体而言,科学高效的灾情评估工作尤其是对间接经济损失评估,是进行灾害风险管理必不可少的环节。

#### 4.4 灾害风险综合评估

灾害综合风险评估是实施灾害风险管理、制定防灾减灾措施的核心步骤。开展气候变化背景下



灾害风险的评估工作主要分为4个步骤:明确各灾害主体致灾因子的危险性,探讨各承灾体的暴露度和脆弱性,调查统计各灾害灾情损失情况,建立灾害综合风险评估框架模型。因此,大多数灾害学研究成果表明,灾害的综合风险指数应该是由致灾因子、承灾体暴露度和脆弱性、灾情损失情况三者组合函数。另外,部分研究将孕灾环境、防灾减灾能力作为灾害风险的考虑要素<sup>[38]</sup>。

总结灾害综合风险评估的数学模型,主要包括:概率分布函数<sup>[38-39]</sup>、模糊综合评价<sup>[40]</sup>、信息扩散理论<sup>[23]</sup>、层次分析法<sup>[41]</sup>、专家打分法和德尔菲法<sup>[42]</sup>、主成分分析法<sup>[43]</sup>等。概率分布函数主要应用观测样本数据拟合灾害风险概率曲线,但其评估结果受样本大小的影响较明显;模糊综合评价法利用模糊隶属度衡量灾害风险指数与各评估指标的量化关系,但在实际应用中其隶属函数难以确定;信息扩散理论是一种对有限样本的集值化方法,但其模型的参数选择仍具有一样的随机性;层次分析法思路清晰,对问题归纳较透彻,实用性较强,但其建模过程需要完整的灾害数据指标;专家打分法和德尔菲法的专家主观决策较强;主成分分析法具有对灾害数据指标的降维作用,但其主成分缺乏对灾害风险指数的可解释性。除此之外,随着气候模式、数值天气模式、水动力模式、海洋模式等发展,情景模拟法也被大量运用于灾害综合风险评估的研究中<sup>[44]</sup>,该方法能在时空上清晰地描述各灾害物理过程及其演变机制,是灾害风险评估的有效工具。

## 5 气候变化背景下提升中国沿海地区灾害风险防范能力的思考

近年来,尽管中国在沿海地区灾害风险防范方面取得了一定的进展,但抵御自然灾害的综合能力依旧不足,与国民经济、社会发展的迫切需求并不完全相适应。如何应对气候变化背景下的极端天气事件与自然灾害的潜在影响,并相应对接灾害风险评估和管理等工作,目前还尚未形成系统的研究框架。本文通过整合灾害风险研究的前沿与理论,针对气候变化背景下沿海地区灾害风险研究,提出以下6点建议。

第一,注重灾害防御系统的多样化。在气候变化背景下中国沿海地区的自然灾害发生往往具有

复合性及诱发性的特点,灾害群发、链发,因此在灾害防范中需充分考虑沿海地区在特定时域、特定区域将面临的多灾种灾害的可能性。中国现阶段单一型的灾害监测、防御系统已无法满足多灾种灾害防范的要求,建立具有多样化功能的抵御多灾种灾害的防御系统、城市韧性系统势在必行<sup>[45]</sup>。例如,在中国东南沿海城市,台风灾害一般会伴随着风暴潮、暴雨内涝、洪水等多灾种灾害,这要求加强沿海城市的生态系统建设(如红树林、珊瑚礁),使之不仅能减缓风暴潮、海浪,同时可以有效控制风灾、防御海岸侵蚀等综合作用。

第二,注重灾害防御系统的稳健性。指沿海地区灾害防御系统具有应对多灾种重大灾害持续冲击的能力。气候变化背景下,沿海地区多灾种灾害发生的频率和强度都可能有增加趋势,这就要求在灾害防范中更应注重提高防御不同灾种的基础设施建设,提升各设防标准和技术水平。具体而言,要加快推进以国家标准和行业标准为主体的多灾种灾害防御标准体系建设,根据各灾害种类及风险区划,摒弃以往的以“重现期”为设防标准防御工作,制定或修订多灾种灾害防御工程标准和非工程标准,增强灾害防御的科学性、规范化、标准化,提高各灾害防御系统应对灾害的稳健性。

第三,实现多灾种灾害信息的共享。指在灾前防御阶段对各灾种信息实施联合监测、预警、信息交换与共享。气候变化背景下,沿海地区多灾种灾害发生明显,在灾害防范中需同时建设多灾种灾害综合立体观测网,联合建设跨地区、跨部门的交通、海洋、水文、城市等灾害监测网;有关部门组建多灾种重大灾害及相关信息的实时、快速交换网络和共享平台,实现沿海地区多灾种信息的高度共享和决策协调;各灾区要整合多灾种重大灾害信息与减轻灾害风险的知识与措施,通过交流、反馈和经验共享等加强各灾区在应对多灾种灾害、促进在防灾减灾救灾等方面的合作。

第四,强化承灾主体的自恢复能力。指各承灾体具有可逆性和还原性,当受到极端天气事件、多灾种重大灾害冲击后能在一定时期内恢复到系统原有结构和功能。自恢复能力虽然是承灾主体内部固有属性,但也可以施加外部环境的作用使之得到强化。具体而言,沿海地区的气象、水利、民政等相关部门应联合开展多灾种灾害实际成灾损失的

评估;依据相关法律和评估结果,对受灾区给予救助,迅速部署灾后重建工作;积极引导鼓励各受灾的单位开展灾后恢复生产自救,使其在最短时间内恢复原有的运作机能;向灾害风险区群众传授基本的防灾减灾常识和灾难逃生技能,全面培育安全文化,系统改进自救与互救的能力与水平。

第五,加强灾害风险分担与转移能力建设。指在灾后依靠市场、社会、政府等措施对灾害风险以不同个体、不同区域进行分担与转移。在全球变化背景下,面对多灾种灾害的新形势和新挑战,以增强城市韧性为目标,构建和谐的社会秩序,各承灾主体需要以更有效、更灵活、更迅速的方式应对各种灾害。具体而言,需要在风险治理的全过程中借鉴国际先进经验,建立社会保险、社会救助、商业保险和慈善捐赠相结合的多元灾害风险分担和转移机制,形成由政府、企业与公众共同组成的区域综合减灾功能体系。

第六,逐步适应气候变化背景下的极端天气与自然灾害。指承灾体根据各灾种灾害的持续发生、转变等情况,具有调节自身的形态、结构或功能,以使与各灾种灾害相适应。具体表现为各承灾主体为应对各灾害,进而在其社会生态系统的结构及功能上进行适当调整。要适应气候变化下自然灾害,首先必须明确区域所面临的各灾害风险的时空规律,进而在遵循自然灾害发生客观规律的基础上合理布局人类社会活动,以减轻承灾体的暴露性和脆弱性;同时,避免因城市各种不合理开发活动造成新的致灾因素;最后,合理调节人与灾害的矛盾,适当利用部分自然灾害,如强暴雨、洪涝等可以适当缓解旱情。

## 6 结论

(1) 气候变化在时空尺度下存在4种变化形式,其中人类活动的加剧,尤其快速城市化是影响气候变化、极端天气事件增多、灾害风险加大的重要原因。中国沿海地区极端灾害及灾害风险的新特点主要包括:极端天气事件与灾害的不确定性、气候变化下灾害的多样性、灾害风险的差异性、灾害系统的复杂性。

(2) 气候变化对现有的灾害风险研究带来的冲击和挑战,主要体现在对孕灾环境和致灾因子等的

影响。此外,应特别强调“城市化”与“气候变化”的“恶性循环”作用,并重点关注灾害的时空尺度变化、多灾种灾害的协同效应,从而构建了气候变化背景下灾害风险系统结构。

(3) 针对国内外气候变化背景下灾害风险评估理论和方法的优缺点及适用范围,提出了致灾因子识别及其危险性量化、承灾体暴露度和脆弱性评估、灾情损失界定和评估、灾害综合风险评估的沿海地区灾害风险评估和应对的步骤和方法。

(4) 针对气候变化对中国沿海地区灾害风险的影响,提出6个方面提升沿海地区灾害风险防范能力建设,即:注重灾害防御系统的多样化、注重灾害防御系统的稳健性、实现多灾种灾害信息的共享、强化承灾主体的自恢复能力、加强灾害风险分担与转移能力建设、逐步适应气候变化背景下的极端天气与自然灾害。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Intergovernmental panel on climate change climate change 2013: Fifth assessment report (AR5) [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理 with 适应国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Qin Dahe. National assessment report on risk management and adaptation of extreme weather and climate events and disasters in China. Beijing, China: Science Press, 2015. ]
- [3] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2019) [R]. 北京, 2019. [Climate change center of China Meteorological Administration. China's climate change blue book. Beijing, China, 2019. ]
- [4] 国家发展和改革委员会, 等. 关于印发国家适应气候变化战略的通知[N/OL]. 2013-11-18 [2020-06-01]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201312/t20131209\\_963985.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201312/t20131209_963985.html). [National Development and Reform Commission, et al. Notice on printing and distributing national climate change adaptation strategy. 2013- 11- 18 [2020- 06- 01]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201312/t20131209\\_963985.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201312/t20131209_963985.html). ]
- [5] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 关于印发城市适应气候变化行动方案的通知 [N/OL]. 2016-02-04 [2020-06-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-02/17/content\\_5042426.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-02/17/content_5042426.htm). [National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Notice on issuing the action plan for urban adaptation to climate change. 2016-02-04 [2020-06-01].

- [http://www.gov.cn/xinwen/2016-02/17/content\\_5042426.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-02/17/content_5042426.htm). ]
- [6] Oumeraci H, Kortenhaus A, Burzel A, et al. Xtremrisk-integrated flood risk analysis for extreme storm surges at open coasts and in estuaries: Methodology, key results and lessons learned [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2015, 57(1). doi: 10.1142/S057856341540001X.
- [7] Aerts J C J H, Botzen W J W, Emanuel K, et al. Climate adaptation: Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities [J]. *Science*, 2014, 344: 473-475.
- [8] Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, et al. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 462-467.
- [9] 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. ]
- [10] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5): 625-636. [Fang Jiayi, Shi Peijun. A review of coastal flood risk research under global climate change. *Progress in Geography*, 2019, 38(5): 625-636. ]
- [11] 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 [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [12] Bell M. Climate change, extreme weather events and issues of human perception [J]. *Archaeological Dialogues*, 2012, 19(1): 42-46.
- [13] Committee on Extreme Weather Events and Climate Change Attribution. Attribution of extreme weather events in the context of climate change [M]. Washington D C, USA: The National Academies Press, 2016.
- [14] Stott P. How climate change affects extreme weather events [J]. *Science*, 2016, 352: 1517-1518.
- [15] 孔锋, 王志强, 吕丽莉. 基于全球气候变化多样性特征的战略思考 [J]. *阅江学刊*, 2018, 10(1): 82-89, 146-147. [Kong Feng, Wang Zhiqiang, Lv Lili. Strategic thinking based on the characteristics of global climate change diversity. *Yuejiang Academic Journal*, 2018, 10(1): 82-89, 146-147. ]
- [16] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961—2010年) [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2294-2306. [Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Climate change regionalization in China (1961–2010). *Scientia Sinica Terrae*, 2014, 44(10): 2294-2306. ]
- [17] Ford J D, Cameron L, Rubis J, et al. Including indigenous knowledge and experience in IPCC assessment reports [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 349-353.
- [18] 刘冰, 薛澜. “管理极端气候事件和灾害风险特别报告”对我国的启示 [J]. *中国行政管理*, 2012(3): 92-95. [Liu Bing, Xue Lan. The implications on China's disaster prevention and mitigation from IPCC special report on "Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation". *Chinese Public Administration*, 2012(3): 92-95. ]
- [19] 何霄嘉, 张九天, 仇天宇, 等. 海平面上升对我国沿海地区的影响及其适应对策 [J]. *海洋预报*, 2012, 29(6): 84-91. [He Xiaojia, Zhang Jiutian, Zhang Tianyu, et al. Study on the sea level rising in the China coast and its adaptation strategy. *Marine Forecasts*, 2012, 29(6): 84-91. ]
- [20] 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. ]
- [21] 吴绍洪, 潘韬, 贺山峰. 气候变化风险研究的初步探讨 [J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 363-368. [Wu Shaohong, Pan Tao, He Shanfeng. Primary study on the theories and methods of research on climate change risk. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(5): 363-368. ]
- [22] Romieu E, Welle T, Schneiderbauer S, et al. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: Revealing gaps and synergies through coastal applications [J]. *Sustainability Science*, 2010, 5: 159-170.
- [23] 黄崇福. 非完备样本知识的优化处理 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1992, 28(2): 129-135. [Huang Chongfu. Optimality processing to the sample knowledge of non-completeness. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 1992, 28(2): 129-135. ]
- [24] Chuang C W, Lin C Y, Chien C H, et al. Application of Markov-chain model for vegetation restoration assessment at landslide areas caused by a catastrophic earthquake in Central Taiwan [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(3): 835-845.
- [25] Xie M, Esaki T, Zhou G. GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model [J]. *Natural Hazards*, 2004, 33(2): 265-282.
- [26] Liu H X, Zhang D L. Analysis and prediction of hazard risks caused by tropical cyclones in Southern China with fuzzy mathematical and grey models [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(2): 626-637.
- [27] 胡雨豪, 袁路, 马东涛, 等. 泥石流次声警报研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(6): 606-613. [Hu Yuhao, Lu Yuan, Ma Dongtao, et al. Research progress on debris



- flow infrasound warning. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(6): 606-613.]
- [28] 尹姗, 孙诚, 李建平. 灾害风险的决定因素及其管理 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 84-89. [Yin Shan, Sun Cheng, Li Jianping. Determinants of disaster risk and disaster risk management. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2012, 8(2): 84-89. ]
- [29] 张悦, 李珊珊, 陈灏, 等. 广东省台风灾害风险综合评估 [J]. 热带气象学报, 2017, 33(2): 281-288. [Zhang Yue, Li Shanshan, Chen Hao, et al. Evaluation of typhoon disaster risk in Guangdong Province. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 33(2): 281-288. ]
- [30] 孟晖, 李春燕, 张若琳, 等. 京津冀地区县域单元地质灾害风险评估 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 327-334. [Meng Hui, Li Chunyan, Zhang Ruolin, et al. Risk assessment of geological hazards for counties and districts of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 327-334. ]
- [31] 周萍. 上海市自然灾害社会脆弱性评价指标体系与模型构建 [J]. 科技展望, 2017, 27(20): 287-288. [Zhou Ping. Index system and model construction of social vulnerability assessment of natural disasters in Shanghai. *Science and Technology*, 2017, 27(20): 287-288. ]
- [32] 袁艺. 自然灾害灾情评估研究与实践进展 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(1): 22-32. [Yuan Yi. Advances in the assessment of natural disaster situation. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(1): 22-32. ]
- [33] Sikora M, Sikora B. Improving prediction models applied in systems monitoring natural hazards and machinery [J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2012, 22(2): 477-491.
- [34] 徐明, 雷小途, 杨秋珍. 应用联合极值分布评估热带气旋影响风险: 以“海葵”对上海地区影响为例 [J]. 灾害学, 2014, 29(3): 124-130. [Xu Ming, Lei Xiaotu, Yang Qiuzhen. Risk assessment on impacts of tropical cyclone Haikui on Shanghai by applying multivariate compound distribution function. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 124-130. ]
- [35] Jing P, Zhang G B. Short-term impact of natural disasters on China's economy: Empirical analysis based on Harrod-Domar Model [C/OL]// IEEE. 2011 International conference on information management, innovation management and industrial engineering. Shenzhen, China, 2011: 197-200. doi: 10.1109/ICIII.2011.52.
- [36] 孙慧娜. 重大自然灾害统计及间接经济损失评估: 基于汶川地震的研究 [D]. 成都: 西南财经大学, 2011. [Sun Huina. Major natural disaster statistics and indirect economic loss assessment: Based on the study of Wenchuan earthquake. Chengdu, China: Southwestern University of Finance and Economics, 2011. ]
- [37] 谢梦莉. 气象灾害风险因素分析与风险评估思路 [J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(2): 57-59. [Xie Mengli. Risk factors analysis and evaluation clue of meteorological disasters. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2007, 30(2): 57-59. ]
- [38] Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, et al. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale [J]. *Geomorphology*, 2005, 72: 272-299.
- [39] Apel H, Thieken A H, Merz B, et al. A probabilistic modelling system for assessing flood risks [J]. *Natural Hazards*, 2006, 38(1/2): 79-100.
- [40] Liu H X, Zhang D L. Analysis and prediction of hazard risks caused by tropical cyclones in Southern China with fuzzy mathematical and grey models [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(2): 626-637.
- [41] Stefanidis S, Stathis D. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP) [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(2): 569-585.
- [42] Ferro G. Assessment of major and minor events that occurred in Italy during the last century using a disaster severity scale score [J]. *Prehospital and Disaster Medicine*, 2005, 20(5): 316-323.
- [43] Xia J, Yang P, Zhan C S, et al. Analysis of changes in drought and terrestrial water storage in the Tarim River Basin based on principal component analysis [J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(2): 761-777.
- [44] Wang J, Gao W, Xu S Y, et al. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China [J]. *Climatic Change*, 2012, 115(3/4): 537-558.
- [45] Wu S H, Gao J B, Wei B G, et al. Building a resilient society to reduce natural disaster risks [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(21): 1785-1787.

## Understanding the climate change and disaster risks in coastal areas of China to develop coping strategies

WANG Jun<sup>1,2</sup>, TAN Jinkai<sup>1,3\*</sup>

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Research Center for Urban Public Security, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China)

**Abstract:** In the context of global climate change, extreme weather events and the concomitant natural disasters are becoming a primary risk restricting the socioeconomic development in coastal areas that are often highly urbanized. This study sets out to explore the new characteristics of natural hazards and disasters in the coastal areas of China against the backdrop of a changing climate. Major conclusions are as follows. First, the occurrences of extreme weather and climatic events are considerably uncertain. The climate and disasters are different across various temporal and spatial scales, and the components of the disaster risk system become more complicated. Second, in view of the new challenges brought by climate change, we suggest paying close attention to three issues in the future, including the change of temporal and spatial scales that are used to depict the disasters, the synergism of multi-disasters, and the effects of climate change and urbanization. Based on these, a new framework of disaster risk system is established to reflect the qualities of disasters in complex spatiotemporal contexts. Lastly, to develop more effective coping strategies for the climate and natural hazards and disasters in coastal areas, it is necessary to promote diversification of the disaster prevention system and enhance its robustness, and to strengthen the self-recovery capability of the social, economic, and ecological environments. Meanwhile, information sharing in multi-disaster management and risk sharing and transfer policies are also important for accommodating the negative impacts of extreme events and disasters coming with climate change.

**Keywords:** climate change; urbanization; disaster risk assessment; risk framework; coastal areas