

我国海洋动力灾害研究进展与展望*

侯一筠^{1, 2, 3} 尹宝树^{1, 2, 3} 管长龙⁴ 郭明克⁵ 刘桂梅⁶ 胡 珀^{1, 2, 3}

(1. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237; 4. 中国海洋大学海洋与大气学院
青岛 266100; 5. 自然资源部北海局 青岛 266061; 6. 国家海洋环境预报中心 北京 100081)

摘要 海洋动力灾害(包括灾害性海浪、风暴潮、海冰、海啸等)是对我国沿海地区造成破坏和损失最大的自然灾害之一。开展海洋动力灾害研究具有重要意义和迫切的国家需求。本文回顾我国建国以来在海洋动力灾害研究方向的主要进展,重点针对近年来我国在海洋动力灾害数值模拟预报以及灾害风险评估等方面的进展进行综述,并在此基础上提出未来的发展展望,希望给海洋防灾减灾科研工作者提供参考。

关键词 风暴潮; 海浪; 海冰; 海啸; 风险评估; 危险性; 脆弱性

中图分类号 P731; P954 **doi:** 10.11693/hyhz20200100029

海洋动力灾害(包括灾害性海浪、风暴潮、海冰、海啸等)是对全球沿海各国危害最大的自然灾害。在全球变暖和海平面上升的背景下,海洋动力灾害发生的特征规律、致灾机理和影响程度等都出现了新的变化,灾害的群发性、难以预见性和灾害链效应日益突出,给世界各国带来的损失呈逐年上升趋势。我国是一个海岸线长、人口众多、经济发达的海洋大国,海洋动力灾害是对我国沿海地区造成破坏和损失最大的自然灾害。21 世纪以来,海洋动力灾害造成人员死亡达 4078 人,直接经济损失达 2434.206 亿元(中国海洋灾害公报,2000—2018)。因此,开展海洋动力灾害研究具有重要意义和迫切的国家需求。

从国际发展态势来看,随着计算机技术的快速发展,国际上自 20 世纪 70 年代开始重点发展海洋动力灾害数值预报预警技术,逐渐构建了较完善的预报模式和系统,在 WMO-IOC 海洋与海洋气象学联合委员会(JCOMM)等国际组织支持推动下,对风暴潮、海啸等灾害已具备较好的数值预报能力(Kohno *et al.*, 2018)。20 世纪末,自然灾害风险评估已成为各国防

灾减灾普遍关注的热点问题,国际减灾战略也把灾害风险、脆弱性和影响评估确定为优先开展的重点工作之一。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)等部门基于 SLOSH(Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes)模型研究不同路径和强度等级的热带气旋引起的风暴潮灾害,并提供风暴潮概率产品和最大可能增水产品等,为政府等部门提供决策支持(Glahn *et al.*, 2009)。在此基础上, NHC 发展综合海浪、潮汐、风暴潮、淡水等信息的风暴潮预报系统,并基于地理信息系统(Geographic Information System 或 Geo-Information system, GIS)技术,结合社会属性制作了风暴潮灾害危险图,并于 2017 年飓风季节正式官方发布(Kohno *et al.*, 2018)。日本气象厅等部门针对风暴潮和海啸灾害,综合分析土地利用、孕灾环境、风暴潮致灾因子危险性以及沿岸承灾体分布现状,制作了最大淹没范围、淹没水深分布图及应急疏散图等服务产品(石先武等, 2013),向日本政府和国民提

* 中科院先导 A 专项项目, XDA19060202 号; 自然科学基金委-山东省联合重点基金项目, U1706216 号; 国家重点研发计划项目, 2016YFC1402000 号; 中国科学院海洋大科学研究中心项目, COMS2019J02 号。侯一筠, 博士生导师, 研究员, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

通信作者: 胡 珀, 硕士生导师, 副研究员, E-mail: hupo@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-01-20, 收修改稿日期: 2020-03-20

供决策支持和预警报服务。此外,人口增长、沿海经济发展等承灾体脆弱性因素更多的被应用到风暴潮、海啸等灾害的风险评估中(Kleinosky *et al*, 2007; Frazier *et al*, 2010)。总之,21世纪以来,国外针对海洋动力灾害预报和风险评估开展了系列研究,开发了一系列数值预报和风险评估模型系统,用于海洋动力灾害预警服务、防灾减灾、经济损失评估等。

我国自20世纪60年代开始风暴潮、海浪研究。在国家“七五”、“八五”、“十五”和“十一五”重大科技计划项目的大力支持下,我国在海洋数值预报和预警技术方面取得了实质性进展,以中国科学院、高校和国家海洋局为代表的多家研究机构利用数值预报、遥感和地理信息系统等技术研发了海洋动力灾害预警预报系统并进行了业务化应用。2006年,国家海洋局发布了《风暴潮、海浪、海啸和海冰灾害应急预案》,2015年进行了修订实施。2019年12月31日,自然资源部在《风暴潮、海浪、海啸和海冰灾害应急预案》的基础上修订发布《海洋灾害应急预案》,我国已经初步形成了海洋动力灾害的防灾减灾体系。“十二五”期间,国家海洋局在“海洋灾情快速评估和综合研判系统研发与应用示范”等海洋公益性科研专项项目支持下,开展了海洋动力灾害灾情评估工作。“十三五”国家重点研发计划海洋环境安全保障重点专项提出,重点构建国家海洋环境安全平台技术体系,实现平台业务试运行,支撑风暴潮等重大海洋灾害与突发事件应对。“重大海洋动力灾害致灾机理、风险评估、应对技术研究及示范应用”等项目获得立项,进一步推动了海洋动力灾害研究和防灾减灾工作。

本文主要回顾我国建国以来在海洋动力灾害研究方向的主要进展,针对我国灾害性海浪、风暴潮、海冰和海啸4种典型动力灾害论述其研究历程和成果,以及在灾害风险评估及应急响应方面的研究进展,并在此基础上提出未来该研究方向的发展展望。受作者学术视野和文章篇幅的限制,文章无法涵盖该方向的所有工作。实际上,管长龙(2000)、陶爱峰等(2018)、魏泽勋等(2019)、石先武等(2013)分别围绕海浪、风暴潮、灾害风险评估等方向综述了研究进展。本文参考以上工作,重点针对近年来我国在海洋动力灾害数值模拟与预报以及灾害风险评估等方面的进展进行阐述和展望,为海洋科研工作者提供借鉴。

1 灾害性海浪研究

灾害性海浪一般指由于强风引起,在海上或者

岸边造成损失的海面波动。海浪灾害是我国遭受的海洋灾害中造成死亡最多的灾害,但由于渔船、海堤等不同承灾体抵抗海浪的程度不同,因此,对于灾害性海浪并没有严格的定量的定义(陶爱峰等, 2018)。不同的研究人员分别采用波高大于等于4m(王华等, 2007)、有效波高大于等于4m(邢闯等, 2013)和1/10大波大于等于3m(张薇等, 2012)等的海浪作为灾害性海浪进行统计分析。

1.1 灾害性海浪特征研究

在我国灾害性海浪主要是由于台风、温带气旋、寒潮等较强的天气过程造成的大浪过程。我国受到西北太平洋台风灾害影响,每年6—10月份均有多个台风在我国东海和南海登陆,伴随着台风浪灾害过程。因此,科研人员围绕台风浪特征开展了大量研究工作(许富祥, 1996)。最新研究发现,我国沿海省份中浙江省遭受的海浪灾害最为严重,而福建省受海浪灾害影响增长幅度最大(彭冀等, 2013);南海海浪灾害强度总体呈下降趋势,其他沿海海域则普遍呈上升趋势,尤其在福建省北部、台湾岛附近的东海海域海浪呈显著增长趋势,那里经常出现极高的波浪(冯兴如等, 2018; Li *et al*, 2018),这可能是全球变暖下台风强度增加的结果(Guan *et al*, 2018)。除台风浪外,由温带气旋和寒潮引起的海浪灾害过程对我国渤、黄海和东海海域也会产生重要影响,但目前相对研究较少。

1.2 海浪谱研究

海浪谱是描述海浪内部能量相对于频率和方向分布的图谱,它不仅可以描述海浪的内部结构,而且也可以间接表征海浪的对外表现特征,因此,海浪谱的理论研究与应用对海浪预报具有重要意义。我国的海浪谱研究始于20世纪60年代,文圣常先生提出了“普遍风浪谱及其应用”的著名论断,被誉为“文氏风浪谱”,在海浪理论研究和预报中得到了广泛应用。在其思想影响下,科研人员围绕海浪谱开展了系列研究,管长龙(2000)较系统总结了其研究进展。近年来,王鑫等(2008a, 2008b)利用动力-统计学相结合的方法对侯一筠等(1990)提出的三参量风浪频谱的谱参量随风区的依赖关系进行了修正。Yang等(2015)研究了南海北部不同海况下海浪谱的特征,基于JONSWAP谱,构建出台风影响下适合南海北部的海浪谱。Mo等(2018)改进了中国近海寒潮风浪频谱和谱参量的成长情况,更加适用于中国近海寒潮风浪频谱的实际应用。以上海浪谱研究工作为我们认识海浪特征并改进海浪预报结果提供了支撑。

1.3 海浪模拟和预报研究

国际上从 20 世纪 40 年代开始海浪模拟和预报的研究工作,随着人们对海浪特征和物理过程的认识的深入,模型参数化形式的不断改进,海浪数值预报模式经历了从第一代到第三代的发展(Tolman *et al.*, 2002)。到 20 世纪末,海浪数值模式已发展的比较成熟。欧洲一些国家开发了第三代海浪模式 WAM (The WAMDI Group, 1988), 并在此基础上又相继发展了 WAVEWATCH III(Tolman, 1999)和 SWAN(Booij *et al.*, 1999)等模式。目前, WAM 和 WAVEWATCH III 模式主要用于开阔大洋的波浪数值模拟计算, 而 SWAN 模式更适应于海岸、湖泊和河口等浅水波浪模拟。我国自“七五”开始重点开展海浪的数值模拟技术研究。Wen 等(1989)提出一种“新型混合型海浪数值模式”。Yuan 等(1991)改进了 WAM 模式, 开发了 LAGFD-WAM 海浪模式; Yin 等(1996a)建立了浅水海浪数值预报模式 YE-WAM, 等等。近年来, SWAN 模式因其更适合浅海海浪模拟的特点而被我国科研人员广泛应用, 取得了一系列研究成果。目前的研究主要围绕通过改进风输入场和模式参数以及考虑风暴潮与海浪的耦合作用以提高海浪数值模拟精度。Wang 等(2019c)阐明了阻力系数对台风波浪模型的影响, 当使用新的阻力系数时, SWAN 模型比使用原始系数时表现得更好。Wang 等(2019a)利用 SWAN 模式模拟了三个台风期间产生的台风波, 研究了风输入、白顶、底摩擦等关键因素对波的增长和消散过程的影响。Wang 等(2017)采用 WRF 气象模式模拟结果驱动 SWAN 海浪模式, 构建厦门高分辨率海浪预报系统, 取得较好预报效果。

海浪数值预报方法在我国海浪研究和业务化工作中得到广泛应用, 但是数值预报方法需要基于确定性的海浪初始条件和风场驱动条件, 而驱动风场, 特别是台风风场的精确预报仍然是一大难题, 可能影响数值预报的准确性。因此, 国际上开展了海浪集合预报方法的研究, 将传统的确定性预报扩展至概率预报领域, 可给出更多可能出现的未来状态, 能提供单纯确定性预报所不能提供的额外信息, 已成为国际上业务化海洋学未来发展的重要方向之一(李本霞等, 2014)。此外, 随着大数据分析和人工智能的发展, 基于神经网络和机器学习开展海浪模式的优化也成为海浪预报研究的新的热点(金权, 2019)。

2 风暴潮研究

风暴潮指由于强烈的大气扰动(强风和气压骤变)

引起的海面异常升高现象(冯士筭, 1982)。我国的风暴潮灾害几乎遍及沿海所有省份, 其中, 在夏、秋季节, 西北太平洋和南海生成的台风和热带气旋影响我国, 可带来急剧的风暴潮增水, 其主要影响我国东南沿海地区, 北方省份偶有影响; 冬春季节, 由于受温带气旋(如黄淮气旋、江淮气旋)影响, 可导致我国黄东海沿海省份产生持续的风暴潮增水; 此外, 在秋冬或冬春过渡季节, 由于冷暖气团激烈震荡, 渤海沿海极易受到寒潮或冷空气影响, 产生持续但不急剧的风暴潮增水。因此, 通常按照诱发风暴潮的天气系统的不同, 可将风暴潮分为: 由强热带气旋引发的台风风暴潮, 由温带气旋引发的温带风暴潮和由寒潮或冷空气所引发的寒潮风暴潮(莫冬雪, 2018)。我国的风暴潮研究始于 20 世纪 70 年代, 秦曾灏等(1975)、Sun 等(1982)围绕风暴潮研究和数值模拟开展的一系列工作, 为我国风暴潮研究和预报奠定了基础。在此基础上, 科研工作者围绕风暴潮灾害开展了大量的研究工作。特别说明的是《中国风暴潮灾害史料集(1049-2009)》(于福江等, 2015)、《渤海风暴潮与灾害》(李培顺等, 2019)两部资料集的出版, 为我们开展风暴潮灾害特征研究提供了宝贵的历史资料。本节重点围绕风暴潮灾害的数值模拟研究进展进行综述。

2.1 风暴潮数值模拟和预报研究

国际上从 20 世纪 70 年代开始开展风暴潮数值模拟研究, 建立了多种实时预报模式, 如美国的 SLOSH 模型、丹麦的 MIKE21 模型等。我国也从 20 世纪 80 年代开始开展风暴潮数值预报技术研究, 国家“七五”、“八五”科技重点攻关项目启动了由中国科学院海洋研究所和中国海洋大学(原山东海洋学院、青岛海洋大学)负责的多个研究课题重点开展风暴潮数值预报研究。王喜年等(1991)建立了二维风暴潮动力数值模式, 应用于覆盖中国的五个子区域, 并开始了业务化台风风暴潮数值预报工作; 于福江等(2002)开发了温带风暴潮数值预报模式并开展应用; Yin 等(1996b, 2009)、尹宝树等(2001)建立了波浪和潮汐-风暴潮运动相互作用的联合数值模式, 并讨论了风暴潮与海浪之间的相互作用对风暴潮增水和波浪影响的机制和定量估计等。近些年, 风暴潮数值模式研究主要是发展了非结构网格的风暴潮数值模型, 主要包括 FVCOM(Chen *et al.*, 2006), ADCIRC(Luetlich *et al.*, 2004), SELFE(Zhang *et al.*, 2008)等。非结构网格模型的最大优点在于可以根据实际地形特点设置网格, 在近岸设置精细网格以适应复杂的海岸线, 而在近

海可适当降低网格分辨率,既确保了模拟精度又提高了计算效率。科研人员利用非结构网格数值模型,构建我国近海不同海域的精细化数值模式,开展风暴潮过程的模拟预报和研究工作。开展的工作主要围绕以下几个方面:

一是开展风场改变对风暴潮的影响研究。Chu 等(2019)分析了我国东海海区不同台风风场产品对风暴潮模拟结果的影响。Zhang 等(2018)利用数值模拟详细研究了雷州半岛东部的增水对不同热带气旋活动的响应特征。Li 等(2019a)基于数值实验分析了台风强度和大小对于东海北部风暴潮增水的影响。

二是开展风暴潮-海浪耦合数值模拟研究。Feng 等(2016)建立 SWAN 与 ADCIRC 波流耦合模型研究了我国浙闽海域台风风暴潮过程,研究发现考虑波浪辐射应力、波浪对风应力阻力系数的影响以及水流和水位对波浪的调节时,耦合模型能更好地模拟风暴潮和波浪过程。Yu 等(2017)基于 ADSCRIC-SWAN 耦合模式,分析了莫拉克台风期间台湾海峡波流相互作用导致的风暴潮增水最大可达 0.28m,占风暴潮总水位的 24%。Wang 等(2019b)和 Xiong 等(2019)分别针对渤海和南黄海建立耦合数值模式,研究了风暴潮灾害过程。Li 等(2020)利用耦合模式研究了天鸽台风期间南海风暴潮与波浪增水特征,并指出波浪的耦合效应对风暴潮增水的贡献不容忽视。

通过不断改进数值模式并提高模拟精度,在获得准确的风场驱动条件下,我们可以较准确地模拟风暴潮过程,但是与海浪数值预报相同,也存在台风风场的不确定性问题。因此,分别开展风暴潮过程的集合数值预报研究和基于机器学习的风暴潮预报研究也是重要的研究方向。

2.2 风暴潮致灾机理和过程研究

通过大量研究,研究人员建立的风暴潮过程的数值模拟技术,可以较准确地模拟风暴潮过程,但是这并不能完全满足实际防灾减灾需求。风暴潮致灾主要是由于风暴潮增水淹没陆地造成的损失。由于我国海岸线建立了不同级别的海堤,即使较强的风暴潮过程,遇到百年一遇以上标准建造的海堤时,未必会产生灾害,相反,在没有海堤或者海堤防护级别较低的区域,并不十分强的风暴潮过程却可能造成重大的风暴潮灾害。此外,当洪水漫过海堤或者海堤溃堤时,风暴潮灾情的预报都是防灾减灾关心的问题。因此,近年来开展风暴潮漫堤、漫滩预报研究是一个重要的研究方向。尹宝树等(2006)、张莉等

(2016)、Li 等(2017, 2019b)分别针对不同海区建立了风暴潮漫堤预警系统或开展漫滩研究。其主要方法是利用耦合数值模式计算出堤前水位和海浪要素,结合波浪爬高公式和海堤与陆地的高程预测漫堤风险和漫滩的可能范围。当然我们也可以基于干湿网格等技术,直接利用数值模式模拟风暴潮漫滩漫堤过程,但现阶段存在的主要困难是模式需要极高的分辨率,一方面较难获取精细化的海堤特性、陆地高程、陆地地块属性等基础数据,另一方面对于模拟结果的现场检验缺少调查资料,因此还需要开展大量的工作。

3 海冰

我国的渤海和黄海北部,由于冬季受寒潮的影响,每年冬天都会有结冰现象。海冰灾害对渤海与黄海北部的水产养殖、海上航行、海上石油生产和其他海事活动造成了严重危害。刘煜等(2017a, 2017b)介绍了我国渤海海冰的基本特征,并回顾了海冰动力学的发展过程。目前,我国对于渤海海冰的研究主要集中在海冰灾情的年度特征分析(梁军等, 2016; 武浩等, 2016)、基于遥感和气象数据的海冰预测和风险分析(庞海洋等, 2018)和海冰数值模拟研究方面。

影响海冰发生和发展的过程主要分为热力学、动力学两种过程,热力学过程主要是由于大气和海洋间的热量交换造成海水冻结形成海冰以及海冰厚度的增长与消融;动力学过程包括由于大气、海洋和海冰之间的动量交换以及海冰内应力造成的海冰漂移和形变。因此海冰的数值模拟研究经历了由原来单纯的海冰动力模式、热力模式和动力-热力耦合模式向冰-气、冰-海及气-冰-海耦合模式方向发展。王仁树等(1994)、白珊等(1998)、刘钦政等(2003)、苏洁等(2005a,b)、刘煜(2013)在海冰数值模式中都做了大量的研究工作。目前我国海冰数值预报研究的主要单位是国家海洋预报中心和自然资源部北海预报中心,形成了基于冰-海洋耦合模式 CIOM(Coupled Ice-Ocean Model)建立的海冰短期预报系统等并业务化运行(吴玲娟等, 2015)。但由于现有模式仍存在未考虑海浪对海冰的影响,海冰模式中忽略切变黏性等诸多的问题,还需要开展进一步的研究。

4 海啸

海啸是由海底地震、大面积滑坡、海底火山爆发等因素引起海水大规模波动,从而形成的一种大洋

长波,当海啸波传递到近岸浅水区,波速变小,波高陡涨,有时可达 20—30m 以上,骤然形成“水墙”,给沿海地区造成严重的生命和财产损失(叶琳等,2005)。2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊岛外海发生 9.1 级海底地震,地震引发的海啸导致印度洋沿岸国家死亡近 30 万人。印度洋海啸灾害引起了全球各沿海国家的重视,我国也开始南海及其附近区域的潜在海啸威胁研究和定量海啸预警系统研发。

由于海啸灾害极少发生,因此利用数值模式模拟海啸灾害过程并研发预警报系统是比较有效的手段。海啸的模拟最核心的是海啸波的生成和传播两个阶段。现阶段通常采用 Okada 的弹性断层模型(Okada, 1985)对海啸产生阶段进行模拟,传播阶段常用的数值模式包括:由我国国家海洋预报中心自主研发的 CTSU(China Tsunami Model)模式、Cornell 大学土木与环境工程系 Philip Liu 研究组开发 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)、由 NOAA/PMEL 的 Titov 和南加州大学的 Synolakis 开发的 MOST 模型等(王培涛等,2011)。在计算精度相同的情况下,我国自主研发的 CTSU 模式计算速度明显优于同类其他模型(孙美仙等,2009),已实现业务化运行。由于海啸波传播速度快,灾害预警需要在极短的时间作出应急响应,因此,海啸灾害预警系统常用的方法是:假定地震海啸源,利用海啸生成模型和传播模型,模拟不同地震海啸源的不同参数条件下的情景,并形成海啸数据库,在海底地震发生后,在确定地震源及强度的情况下,通过人机交互调用数据库情景模拟结果,快速获取预警报信息并进行发布。基于该方法建立的海啸预警报系统已在多个地方开展应用(Hou *et al.* 2017; 任智源等,2019),利用该方法也可以开展沿海地区的海啸危险性分析(Feng *et al.* 2017)。2018 年 1 月,经联合国教科文组织政府间海洋学委员会(UNESCO/IOC)正式批准,由我国承建的 IOC 南中国海区域海啸预警中心(South China Sea Tsunami Advisory Center, SCSTAC)正式开展业务化试运行,2019 年 11 月 5 日启动业务化正式运行,为南中国海周边中国、文莱、柬埔寨、印尼、马来西亚、菲律宾、新加坡、泰国、越南等 9 个国家提供全天候的地震海啸监测预警服务。同时,由日本承建的西北太平洋海啸预警中心终止向南中国海区域提供临时性海啸预警服务。南中国海区域海啸预警中心的海啸预警与减灾系统集成全球及区域海底地震监测、全球水位监测、海啸并行预报模型、海啸情景数据库以

及海啸产品制作发布等多个子系统,实现了海啸预警产品的自动化制作与发布,使得我国海啸预警的时效大幅缩短至 6—12min,达到了国际先进水平(徐志国,2018)。

5 灾害风险评估

进入 21 世纪以来,自然灾害的风险评估研究成为国际上灾害研究的热点问题。过去的灾害风险评估重点针对灾害致灾因子的危险性开展研究,IPCC(2012)发布了《管理极端事件和灾害风险,推进气候变化适应特别报告》,提出极端气候影响的特征和严重性不仅取决于极端气候本身,而且还取决于(承载体的)暴露度和脆弱性。脆弱性研究成为国内外自然灾害学领域研究的重点和热点。国际减灾战略(International Strategy for Disaster Reduction, ISDR)于 2004 年提出自然灾害风险评估的一般方法,即首先对可能造成人员伤亡、财产损失、环境破坏的潜在致灾因子的危险度进行评估,并评估承灾体的脆弱性,然后进行风险程度的推算(孙劭等,2012)。因此,风险评估模型可表示为:

综合风险=灾害危险性×承灾体脆弱性。

围绕海洋动力灾害危险性分析,国际上通常有两种方法:一种是开展典型重现期的灾害估计,即基于历史资料,利用经典参数统计方法或联合概率分布方法,给出研究区域未来发生不同严重程度灾害的概率,反映了研究区域灾害危险性的长期特征;另一种是开展可能最大灾害程度计算,如通过数值分析给出最大风暴潮增水、最大可能淹没范围等,依据最大可能淹没范围的程度确定灾害危险性等级。我国科研工作者围绕风暴潮、海冰、海啸等危险性评估做了大量的工作。

联合国国际减灾战略(United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR)减轻灾害术语中将脆弱性定义为:社区、系统或财产的属性和环境受到致灾因子破坏的程度,认为脆弱性和各种自然、社会、经济以及环境等因子有关,并且具有一定的时间和空间属性(石先武等,2016)。但由于研究背景和关注程度不同,对脆弱性的认识也不一致。石勇等(2011),石先武等(2016)分别综述了灾害脆弱性的相关概念和研究进展。许多科研工作者也根据各自认识,开展了针对海洋动力灾害的脆弱性评价(袁顺等,2016; Yang *et al.* 2019)。

在此基础上,针对我国沿海区域的风暴潮等灾

害的综合风险评估工作在逐步推进。石先武等(2013)开展了风暴潮灾害风险评估综述。Gao 等(2014)以县级为单位,选取台风登陆频率和最大风暴潮水位作为指标计算危险性,选取社会经济、土地利用、生态环境和恢复力作为指标计算脆弱性,给出了我国沿海风暴潮灾害风险图。Liu 等(2018)提出基于数值模拟的最大风暴潮危险和基于遥感土地利用信息的脆弱性评价方法,并开展潍坊市的综合风险评价工作。袁本坤等(2015)综合考虑致灾因子危险性、承灾体脆弱性以及防灾减灾能力,通过建立指标体系给出海冰灾害的风险评估和区划方法。

由此可见,近年来我国在海洋动力灾害风险评估方面开展了很多有意义的工作,但是灾害综合风险评估方法和技术体系还不成熟,形成的风险评估产品还不能满足实际防灾减灾的应用需求。究其原因,一方面是由于我国尚未形成系统的综合风险评估办法。国内的灾害风险评估主要侧重动力灾害的危险性研究,综合风险评估特别是脆弱性评估有待进一步深入和精细化。自然资源部在 2019 年 12 月发布的《灾害风险评估和区划技术导则第 1 部分:风暴潮》于 2020 年 2 月 1 日开始实施,导则为我国开展灾害的综合风险评估提供了技术指导,但导则对于危险性评估指标的计算做了详细制定,而对脆弱性评价主要基于土地利用现状作为脆弱性评价指标。另一方面,我国在灾害风险评估所需的数据严重缺乏。我国对于精细化的历史灾情数据严重缺乏,承灾体物理属性和社会属性的要素数据较难获取给我国开展灾害风险评估研究带来了困难。当今社会进入大数据时代,数据的共享和管理也是开展海洋灾害风险评估的基础。

6 结论与展望

我国是受海洋动力灾害影响最为严重的国家之一。经过几十年海洋科研工作者的不断努力,我国在海洋灾害特征机理、预警报服务和风险评估方面已取得了巨大进展,在灾害预报等方面达到了国际先进水平,初步建立了海洋动力灾害防灾减灾体系。但是,我国在面向大众的灾害预警报服务、灾害综合风险评估、防灾减灾决策服务产品等方面还存在许多不足。在“十四五”即将到来之际,针对我国海洋动力灾害防灾减灾提出以下展望:

1) 海洋学研究是一门以调查观测为基础的学科,虽然本文没有围绕海洋动力灾害监测开展综述,但无论是灾害数值模拟还是风险评估研究,都是以海

洋要素、地理信息以及社会属性要素等数据资料为基础。实际上,我国现在已建立以遥感、海洋站、海上浮标、无人机为手段的海上立体监测系统,可实现对海洋动力灾害过程灾前、灾中、灾后的立体实时监测。如何将这些数据与数值模拟和风险评估相结合,提高灾害过程模拟预报精度和风险评估能力,是科研工作者需要研究的问题。当今社会进入高速发展的大数据时代,如何将海洋动力灾害相关的大量数据进行收集、整理、管理和共享,也是相关管理部门应该重点考虑的。

2) 高度重视海洋动力灾害耦合致灾机理的研究,发展精细化的风暴潮漫堤、漫滩数值预报模式。大量的研究表明,风暴潮海岸侵蚀过程中波浪增水及爬高起到关键作用。因此,开展风暴潮-海浪的耦合对近岸承灾体的致灾机理研究,并在此基础上建立风暴潮漫堤、漫滩数值预报模式对于防灾减灾实际工作具有十分重要的意义且需求迫切。实际上,这一工作的推进很大程度上也将受到海岸带地形高程数据和海堤信息数据缺乏的制约。

3) 大力发展海洋动力灾害综合风险评价评估研究,尤其是脆弱性风险评估研究。随着精细化遥感信息提取等技术的快速发展,结合实地调查,开展基于土地利用的脆弱性评价是现阶段具有极强操作性的风险评估方法,可基于此方法开展街区尺度的脆弱性评估,结合危险性评价评估产品形成灾害的综合风险评估产品,为防灾减灾服务。在此基础上通过收集整理灾损数据、社会属性数据等建立更完善的脆弱性评估指标体系,不断完善脆弱性风险评估和综合风险评估方法和产品。

4) 自然灾害每年给我国沿海城市带来大量人员伤亡和经济损失,但致灾过程并不是某单一灾害。以台风灾害为例,台风过程的大风天气直接破坏陆地建筑物;台风引起的风暴潮、海浪灾害导致海堤破坏、海岸带侵蚀;台风带来的暴雨由于风暴潮增水导致排水管网失灵和管涌引发城市内涝,多灾种灾害的联合效应给沿海城市带来大量损失。因此,我们要加强大气-陆地-海洋灾害链的综合研究,通过学科交叉,开展灾害链的综合预警报服务和辅助决策研究,切实提高防灾减灾能力。

总之,经过几十年的研究和建设,我国的海洋动力灾害预报减灾能力不断提高。与此同时,“21 世纪海上丝绸之路”、“建设海洋生态文明和建设海洋强国”等国家重大战略实施对海洋防灾减灾提出了更高的要

求。在机遇和挑战面前, 科研工作者应加快创新性成果产出并积极推动成果的业务化应用, 切实为国家防灾减灾提供技术支撑。

参 考 文 献

- 于福江, 王喜年, 戴明瑞, 2002. 影响连云港的几次显著温带风暴潮过程分析及其数值模拟. 海洋预报, 19(1): 113—122
- 于福江, 董剑希, 叶琳等, 2015. 中国风暴潮灾害史料集 (1949—2009). 北京: 海洋出版社
- 王华, 姚圣康, 龚茂珣等, 2007. 东海区域灾害性海浪长期预测方法研究. 海洋通报, 26(5): 35—42
- 王鑫, 侯一筠, 2008a. 风浪频谱的成长模型 I. 谱参量随风区的生长关系. 海洋与湖沼, 39(5): 433—438
- 王鑫, 侯一筠, 2008b. 风浪频谱的成长模型 II. 三参量的风浪频谱随风区的生长关系. 海洋与湖沼, 39(6): 541—545
- 王仁树, 刘钦政, 陈伟斌等, 1994. 渤海海冰漂移过程的数值模拟和试验. 海洋与湖沼, 25(3): 301—305
- 王培涛, 赵联大, 于福江等, 2011. 海啸灾害数值预报技术研究现状. 海洋预报, 28(3): 74—79
- 王喜年, 尹庆江, 张保明, 1991. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用. 水科学进展, 2(1): 1—10
- 尹宝树, 王涛, 侯一筠等, 2001. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究. 海洋与湖沼, 32(1): 109—116
- 尹宝树, 徐艳青, 任鲁川等, 2006. 黄河三角洲沿岸海浪风暴潮耦合作用漫堤风险评估研究. 海洋与湖沼, 37(5): 457—463
- 石勇, 许世远, 石纯等, 2011. 自然灾害脆弱性研究进展. 自然灾害学报, 20(2): 131—137
- 石先武, 国志兴, 张尧等, 2016. 风暴潮灾害脆弱性研究综述. 地理科学进展, 35(7): 889—897
- 石先武, 谭骏, 国志兴等, 2013. 风暴潮灾害风险评估研究综述. 地球科学进展, 28(8): 866—874
- 叶琳, 于福江, 吴玮, 2005. 我国海啸灾害及预警现状与建议. 海洋预报, 22(S1): 147—157
- 白珊, 吴辉碇, 1998. 渤海的海冰数值预报. 气象学报, 56(2): 139—153
- 冯士祚, 1982. 风暴潮导论. 北京: 科学出版社
- 冯兴如, 杨德周, 尹宝树等, 2018. 中国浙江和福建海域台风浪变化特征和趋势. 海洋与湖沼, 49(2): 233—241
- 邢闯, 李本霞, 2013. 中国近海 2012 年灾害性海浪分析及 2013 年预测. 海洋预报, 30(3): 1—8
- 任智源, 侯京明, 王培涛等, 2019. 精细化地震海啸波流实时预警系统研究与应用. 海洋学报, 41(9): 145—155
- 刘煜, 2013. 渤海海冰数值预报关键技术研究及应用. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 刘煜, 吴辉碇, 2017a. 第 1 讲 渤、黄海的海冰. 海洋预报, 34(3): 94—101
- 刘煜, 吴辉碇, 2017b. 第 2 讲 海冰动力学. 海洋预报, 34(5): 99—110
- 刘钦政, 刘煜, 白珊, 2003. 2002~2003 渤海海冰数值预报. 海洋预报, 20(3): 60—67
- 许富祥, 1996. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布. 海洋学报, 18(2): 26—31
- 孙劲, 史培军, 2012. 渤海和黄海北部地区海冰灾害风险评估. 自然灾害学报, 21(4): 8—13
- 孙美仙, 丁照东, 赵联大等, 2009. 基于 GIS 的海啸预警信息系统集成框架. 海洋学研究, 27(4): 108—116
- 苏洁, 吴辉碇, 白珊等, 2005b. 渤海冰-海洋耦合模式 II: 个例试验. 海洋学报, 27(2): 18—28
- 苏洁, 吴辉碇, 刘钦政等, 2005a. 渤海冰-海洋耦合模式 I: 模式和参数研究. 海洋学报, 27(1): 19—26
- 李本霞, 王德帅, 2014. 集合海浪预报的发展与应用回顾. 海洋预报, 31(6): 79—85
- 李培顺, 曹丛华, 2019. 渤海风暴潮与灾害. 北京: 海洋出版社
- 吴玲娟, 高松, 刘爱超等, 2015. 山东省海洋灾害观测预警系统. 防灾科技学院学报, 17(2): 61—69
- 张莉, 商少平, 张峰等, 2016. 福建沿岸天文潮-风暴潮-台风浪耦合漫堤预警系统. 海洋预报, 33(5): 61—69
- 张薇, 高山, 阎忠辉等, 2012. 渤海灾害性海浪特征分析. 海洋预报, 29(5): 73—77
- 武浩, 夏芸, 许映军等, 2016. 2004 年以来中国渤海海冰灾害时空特征分析. 自然灾害学报, 25(5): 81—87
- 金权, 2019. 基于机器学习算法对海浪波高的预测及优化研究. 自然资源部第一海洋研究所硕士学位论文
- 庞海洋, 孔祥生, 孙志伟等, 2018. 基于遥感和气象数据对辽东湾海冰变化预测研究. 海洋与湖沼, 49(4): 725—733
- 侯一筠, 文圣常, 1990. 三参量的风浪频谱. 海洋与湖沼, 21(6): 495—504
- 秦曾灏, 冯士祚, 1975. 浅海风暴潮动力机制的初步研究. 中国科学, (1): 64—78
- 袁顺, 赵昕, 李琳琳, 2016. 沿海地区风暴潮灾害的脆弱性组合评价及原因探析. 海洋学报, 38(2): 16—24
- 袁本坤, 曹丛华, 江崇波等, 2015. 基于致灾因子指标体系的海冰灾害风险评估和区划方法. 防灾科技学院学报, 17(2): 8—12
- 莫冬雪, 2018. 中国近海寒潮影响下的灾害性海洋动力环境研究. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文
- 徐志国, 2018. 南中国海区域海啸预警中心海啸预警与减灾系统建设与发展. 见: 中国地球物理学会信息技术专业委员会地球物理信息前沿技术研讨会论文摘要集. 汉中: 中国地球物理学会信息技术专业委员会
- 陶爱峰, 沈至淳, 李硕等, 2018. 中国灾害性海浪研究进展. 科技导报, 36(14): 26—34
- 梁军, 陈长胜, 秦玉琳等, 2016. 1981—2011 年中国近海海冰变化特征及其与东亚冬季风的关系. 气象灾害防御, 23(3): 1—5, 13
- 彭冀, 陶爱峰, 齐可仁等, 2013. 近十年中国海浪灾害特性分析. 见: 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 大连: 中国海洋工程学会, 805—808
- 管长龙, 2000. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望. 青岛海洋大学学报, 30(4): 549—556
- 魏泽勋, 郑全安, 杨永增等, 2019. 中国物理海洋学研究 70 年: 发展历程、学术成就概览. 海洋学报, 41(10): 23—64
- IPCC, 2012. 管理极端事件和灾害风险, 推进气候变化适应特

- 别报告. 政府间气候变化专门委员会第一工作组和第二工作组的特别报告. 英国, 剑桥, 剑桥大学出版社, 2. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/IPCC_SREX_ZH_web-1.pdf
- Booij N R, Ris R C, Holthuijsen L H, 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4): 7649—7666
- Chen C S, Beardsley R, Cowles G, 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanography*, 19(1): 78—89
- Chu D D, Zhang J C, Wu Y S *et al*, 2019. Sensitivities of modelling storm surge to bottom friction, wind drag coefficient, and meteorological product in the East China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 231: 106460
- Feng X R, Yin B S, Gao S *et al*, 2017. Assessment of tsunami hazard for coastal areas of Shandong Province, China. *Applied Ocean Research*, 62: 37—48
- Feng X R, Yin B S, Yang D Z, 2016. Development of an unstructured-grid wave-current coupled model and its application. *Ocean Modelling*, 104: 213—225
- Frazier T G, Wood N, Yarnal B *et al*, 2010. Influence of potential sea level rise on societal vulnerability to hurricane storm-surge hazards, Sarasota County, Florida. *Applied Geography*, 30(4): 490—505
- Gao Y, Wang H, Liu G M *et al*, 2014. Risk assessment of tropical storm surges for coastal regions of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9): 5364—5374
- Glahn B, Taylor A, Kurkowski N *et al*, 2009. The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting. *National Weather Digest*, 33(1): 3—14
- Guan S D, Li S Q, Hou Y J *et al*, 2018. Increasing threat of landfalling typhoons in the western North Pacific between 1974 and 2013. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68: 279—286
- Hou J M, Yuan Y, Wang P T *et al*, 2017. Development of a decision support system for tsunami evacuation: application to the Jiyang District of Sanya city in China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(3): 335—343
- Kleinosky L R, Yarnal B, Fisher A, 2007. Vulnerability of Hampton roads, Virginia to storm-surge flooding and sea-level rise. *Natural Hazards*, 40(1): 43—70
- Kohno N, Dube S K, Entel M *et al*, 2018. Recent progress in storm surge forecasting. *Tropical Cyclone Research and Review*, 7(2): 128—139
- Li T, Fu C F, Wang F D *et al*, 2017. Storm surge disaster risk assessment and zoning, taking Cangnan County for instance. *Procedia IUTAM*, 25: 92—99
- Li S Q, Guan S D, Hou Y J *et al*, 2018. Evaluation and adjustment of altimeter measurement and numerical hindcast in wave height trend estimation in China's coastal seas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67: 161—172
- Li A L, Guan S D, Mo D X *et al*, 2020. Modeling wave effects on storm surge from different typhoon intensities and sizes in the South China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235: 106551
- Li J, Hou Y J, Mo D X *et al*, 2019a. Influence of tropical cyclone intensity and size on storm surge in the Northern East China Sea. *Remote Sensing*, 11(24): 3033
- Li T, Wang F D, Hou J M *et al*, 2019b. Validation of an operational forecasting system of sea dike risk in the southern Zhejiang, South China. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6): 1929—1940
- Liu Q R, Ruan C Q, Zhong S *et al*, 2018. Risk assessment of storm surge disaster based on numerical models and remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68: 20—30
- Luettich R A, Westerink J, 2004. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44. Internal report. <http://www.adcirc.org>
- Mo D X, Hou Y J, Liu Y H *et al*, 2018. Study on the growth of wind wave frequency spectra generated by cold waves in the northern East China Sea. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(5): 1509—1526
- Okada Y, 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135—1154
- Sun W X, Feng S Z, Qin Z H, 1982. Numerical study on the Bohai sea wind surges-the zeroth-order dynamical model. *Acta Oceanologica Sinica*, 1(2): 175—188
- The WAMDI Group, 1988. The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12): 1775—1810
- Tolman H L, 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Tech. Note 166
- Tolman H L, Balasubramanian B, Burroughs L D *et al*, 2002. Development and implementation of wind-generated ocean surface wave Modelsat NCEP. *Weather and Forecasting*, 17(2): 311—333
- Wang N, Hou Y J, Li S Q *et al*, 2019a. Numerical simulation and preliminary analysis of typhoon waves during three typhoons in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6): 1805—1816
- Wang Y P, Liu Y L, Mao X Y *et al*, 2019b. Long-term variation of storm surge-associated waves in the Bohai Sea. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6): 1868—1878
- Wang Z F, Wu K J, Gao S H *et al*, 2017. Nearshore wave forecast for Xiamen, China. *Journal of Coastal Research*, 80: 48—54
- Wang Z F, Gong Y J, Cui J N *et al*, 2019c. Effect of the drag coefficient on a typhoon wave model. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6): 1795—1804
- Wen S C, Zhang D C, Chen B H *et al*, 1989. A hybrid model for numerical wave forecasting and its implementation—I. The wind wave model. *Acta Oceanologica Sinica*, 8(1): 1—14
- Xiong M J, Zhang J S, Zhang W S *et al*, 2019. Heterogeneous tide-surge interaction during co-occurrence of tropical and extratropical cyclones in the radial sand ridges of the southern Yellow Sea. *Journal of Oceanology and Limnology*,

- 37(6): 1879—1898
- Yang S Q, Hou Y J, Liu Y H, 2015. Observed typhoon wave spectrum in northern South China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(5): 1286—1294
- Yang F S, Yang X M, Wang Z H *et al*, 2019. Object-based classification of cloudy coastal areas using medium-resolution optical and SAR images for vulnerability assessment of marine disaster. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6): 1955—1970
- Yin B S, Wang T, 1996a. A third generation shallow water wave numerical model- YE-WAM. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 14(2): 106—112
- Yin B S, Wang T, El-Sabh M I, 1996b. Interaction between waves and tide-surge motion and a joint wave-tide surge model. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 14(4): 349—356
- Yin B S, Xu Z H, Huang Y *et al*, 2009. Simulating a typhoon storm surge in the East Sea of China using a coupled model. *Progress in Natural Science*, 19(1): 65—71
- Yu X L, Pan W R, Zheng X J *et al*, 2017. Effects of wave-current interaction on storm surge in the Taiwan Strait: Insights from Typhoon Morakot. *Continental Shelf Research*, 146: 47—57
- Yuan Y L, Hua F, Pan Z D *et al*, 1991. LAGFD-WAM numerical wave model- I. Basic Physical model. *Acta Oceanologica Sinica*, 10(4): 483—488
- Zhang Y L, Baptista A M, 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21(3—4): 71—96
- Zhang J S, Xiong M J, Yin C T *et al*, 2018. Inner shelf response to storm track variations over the east Leizhou Peninsula, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71: 56—69

PROGRESS AND PROSPECT IN RESEARCH ON MARINE DYNAMIC DISASTERS IN CHINA

HOU Yi-Jun^{1, 2, 3}, YIN Bao-Shu^{1, 2, 3}, GUAN Chang-Long⁴, GUO Ming-Ke⁵, LIU Gui-Mei⁶, HU Po^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 5. North China Sea Bureau, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 6. National Marine Environmental Forecast Center, Beijing 100081, China)

Abstract Marine dynamic disasters (including huge waves, storm surges, sea ice, tsunamis, etc.) are large harmful natural disasters and often cause serious damages and losses to human life and economic activity in the coastal areas of China. Research on marine dynamic disasters is thus an urgent demand for the national marine development and protection. This paper reviews the main progress in the research on marine dynamic disasters since the establishment of China in 1949, focusing on the progress in numerical simulation and prediction of marine dynamic disasters and disaster risk assessment. In addition, the future development prospects in the research are proposed, which provides a reference for the prevention and mitigation of marine disasters in China as well as in other countries in the world.

Key words storm surge; sea wave; sea ice; tsunami; risk assessment; hazard; vulnerability