

中国灾害性海浪研究进展

陶爱峰^{1,2}, 沈至淳^{1,2}, 李硕³, 徐啸^{1,2}, 张尧⁴

1. 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学), 南京 210098

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098

3. 北京顺义建设投资服务有限公司, 北京 101300

4. 国家海洋局海洋减灾中心, 北京 100194

摘要 海浪灾害是海洋灾害的重要组成部分,是各种海洋灾害中导致人员死亡或失踪的最主要致灾因素,是各种涉海工程设计、施工和运维工作必须考虑的动力因素,是中国海洋安全与保障工作必须面对的自然灾害。通过讨论灾害性海浪的常用定义和分类,评述了有关典型灾害性海浪特性的主要研究成果,总结了主要灾害性海浪预报业务化现状,提出了灾害性海浪研究尚存的主要问题和未来的研究方向。

关键词 海浪灾害;灾害性海浪;海浪预测;风险评估

中国是海洋大国,同时也是海洋灾害损失巨大的沿海国家。通过对2000—2015年的《中国海洋灾害公报》统计分析发现,中国海洋灾害导致的死亡或失踪人

数共2599人,其中,由波浪灾害造成的占比例为73.7%(图1)。可见,海浪灾害已成为威胁中国近海民众生命安全最为突出的海洋灾害。为贯彻落实海洋强国战略

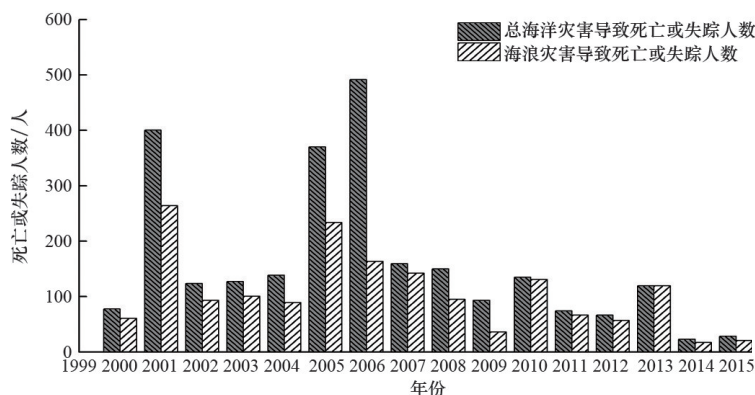


图1 2000—2015年海洋灾害导致的人员死亡或失踪人数

Fig. 1 The number of people killed or missing from waves of disasters from 2000 to 2015

收稿日期:2018-06-12;修回日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51579091,41106001);江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目;海岸灾害及防护教育部重点实验室开放基金项目(2016001)

作者简介:陶爱峰,教授,研究方向为水波动力学,电子信箱: aftao@hhu.edu.cn

引用格式:陶爱峰,沈至淳,李硕,等. 中国灾害性海浪研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(14): 26-34; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.14.005

部署,科技部会同国家海洋局、交通运输部、教育部、中国科学院等部门以及部分地区科技主管部门,共同编制了“十三五”国家重点研发计划《海洋环境安全保障》重点专项实施方案。在其支持的第一批项目中,明确强调需要研究包括海浪在内的重大动力灾害风险评估与灾害应对技术。基于以上背景,有必要对灾害性海浪这一典型的海洋致灾因素的研究发展现状进行梳理和总结。本文将围绕灾害性海浪的定义与分类、中国灾害性海浪特性有关的主要研究成果和灾害性海浪的预报业务化成果这3个方面展开。

1 灾害性海浪的定义和分类

1.1 灾害性海浪的定义

为获得灾害性海浪的定义,查阅了2000—2015年中国海洋灾害数据权威的官方来源——《中国海洋灾害公报》(简称公报)中有关灾害性海浪的相关描述,发现公报本身对此的说法并不统一,从“波高大于等于4 m”,到“有效波高大于等于4 m”,再到只统计有效波高大于4 m的灾害性海浪,逐渐淡化了对灾害性海浪的标准定义。2016年12月09日,以灾害性海浪为关键词在学术资料平台“中国知网”搜索得到183篇文献,其中王智峰等^[1]用有效波高年极值来定义灾害性海浪;邢闯等^[2]认为有效波高大于等于4 m的波浪为灾害性海浪;张薇等^[3]认为1/10大波大于等于3 m的海浪为灾害性海浪;王华等^[4]认为波高大于等于4 m的海浪为灾害性海浪。可见,在学术论文中,灾害性海浪的定义也是不一致的。究其原因,是由于灾害性海浪作用的承灾个体差异性导致的。例如小船的抗风浪能力低,2~3 m的海浪就能对其安全构成威胁,相对于千吨级轮船,3 m以上的海浪才会对其构成威胁,同样对于在近海、中海乃至大洋中航行的轮船,波浪要达到4~5 m、7~8 m甚至更高才能对其构成威胁,所以灾害性海浪没有明确统一的范围,通常意义上那些能够在海上或者岸边引起灾害损失的海浪就可以称之为灾害性海浪。因此,灾害性海浪本身包含了致灾的内涵,而灾害的后果是海浪本身的危险性和承灾体的脆弱性共同的结果。

1.2 灾害性海浪的分类

海浪是由风引起的海面波动现象,《中国海洋灾害公报》依据诱发海浪的大气扰动特征将海浪划分为台风浪、冷空气浪和气旋浪3种。此种分类方法简明清楚

的区分开了具有明显特性区别的海浪,同时这几种海浪也是造成现有人员伤亡的重要因素。

可是,还有两类海浪也引发了严重的伤人事件。低频涌浪可使舰船发生中拱、中垂、螺旋桨空转失速,使海洋平台发生倾斜、摇晃等现象。2012年4月24日,钦州驳区实施船靠船驳载作业时,受西南强涌浪影响,造成了子船5根横缆琵琶头相继断裂的事故^[5]。“海洋石油201”号等多艘铺管船在东海海域进行铺管施工时受低频涌浪环境影响横摇运动强烈,正常铺管作业受到了严重影响^[6];针对涌浪研究,周延东等^[7]、裴晔等^[8]做了相关综述。同时,畸形波也已经成为一种公认的海洋灾害,中国学者陶爱峰^[9]、高志一等^[10]和刘首华^[11]针对畸形浪的研究做了相关综述。

相关资料和研究表明,涌浪和畸形浪两种海浪虽然不常见,甚至鲜为人知,但往往出现就造成无法挽回的损失。因此,本研究认为如若将涌浪和畸形浪也归于灾害性海浪,可以对海浪引起的人员伤亡研究进行有效的补充,进而能够更全面的概述海浪灾害的致灾因子。

2 “灾害性海浪”特性研究进展

“灾害性海浪”不是某种具体的海浪,它的特性研究亦即台风浪、冷空气浪、气旋浪、涌浪和畸形波的特性研究进展。20世纪60年代,中国开始对典型海浪的时空特性进行记录观测。20世纪90年代,许富祥^[12-13]、高志华^[14]等对中国近海灾害性海浪的时空特性及其特征进行了统计分析,接下来将分别评述以上5种类型海浪的特性研究进展。

2.1 台风浪

台风浪是指受热带气旋(热带低压、台风和强台风)扰动形成的海浪。东海和南海为中国台风多发地带,每年的7~10月份江苏、浙江、上海和福建等沿海地区容易遭受台风侵袭。在中国海洋资料有记载以来台风造成的影响最大,相关研究也最多。台风浪的研究,集中在台风浪传播演变特性、典型受灾区域和台风浪与典型承灾体相互作用这3个方面。

2.1.1 台风浪的传播、演变特性

中国台风以西北行路径为主^[15],统计1949—2013年西北太平洋2157个台风过程,根据台风的路径分布特点做以下归纳,将台风分为正面登陆型、登陆北上

型、不登陆型和无规律型。正面登陆型指由江苏、浙江、上海、福建、广东、广西和海南省等沿海地区登陆后,影响继续向省内腹地延伸的台风;登陆北上型指在沿海地区登陆后向北偏转,影响范围扩大多省,此类台风往往会引发诸多陆地灾害;不登陆型指台风仅在外海活动,不会登陆;无规律型指无论台风路径及其变化规律无序,无法预测。

2.1.2 典型受灾区域台风浪特性

受台风传播特性影响,中国台风浪典型受灾区域集中在南方地区,各省的台风浪特性又不尽相同。在浙江登陆的台风,受近岸区海岛阻挡作用和等深线减小缘故,波浪周期远小于外海波浪^[16],而且在舟山岛E向产生的有效波高最大,N向最小^[17];在江苏登陆或未登陆的台风往往呈现出在126°N附近由南向北移动^[18]特点;福建受台风主要为西北行台风,受台湾岛阻挡效果,台风登陆时等级降低波浪危害减弱^[19];近年来广东省针对强台风“珍珠”的演变造成的危害做了研究调查^[20],但是在其余情况研究尚少;而浙江、海南省和广西壮族自治区的受灾情况较其他省份严重,相关研究较其他省市更少,该方面研究有待加强。

2.1.3 台风浪与典型承灾体相互作用机理

台风浪作用的主要承灾体有海堤、船舶、航道和掠海飞行器等。针对防波海堤建筑主要通过加大块体重量和空间构造的防浪措施^[21],同时通过合理布局确保防浪固堤效果最佳;在台风影响期间,作业船只只会产生摇摆,使仪器受影响,轮机速度不稳,严重者超过安全盆甚至会造成倾覆^[22],停泊船只则要做好避风防浪的锚固措施^[23];台风不仅可以对水上、陆地作业造成严重影响,台风期间还会造成人工航道的严重回淤^[24-25];在国防安全中,台风浪的强度与空间特性对不同掠海飞行器的击水概率大不相同^[26]。

2.2 气旋浪和冷空气浪

气旋浪主要是由于温带气旋扰动引起,虽然和寒潮大风导致的冷空气浪不同,但是在冷暖交替的10~12月、2~4月交互出现,发生频繁。通过对《中国海洋灾害公报》2010—2015年海浪造成的人员伤亡资料统计(图2)发现,除2013年由台风蝴蝶直接造成了63人死亡外,其余年份造成伤亡的比例,均以冷空气浪为主,冷空气浪和气旋浪在海浪伤人中比例最大。

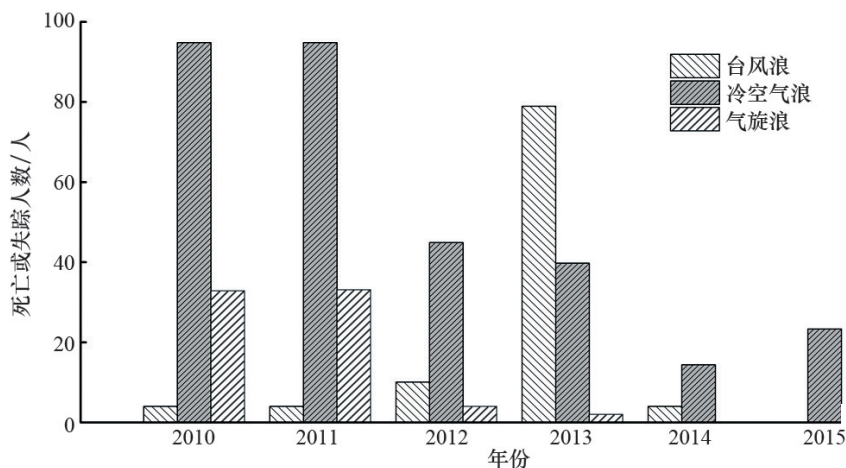


图2 2010—2015年海洋灾害公报台风浪、气旋浪和冷空气浪伤亡统计

Fig. 2 Casualty statistics of typhoon wave, cyclone wave and cold air wave in the marine disaster bulletin from 2010 to 2015

中国气旋浪和冷空气浪资料在20世纪60年代开始收集,到20世纪80年代逐步开始相关研究,现有研究主要集中在时空分布特性和生成机理。2016年12月14日在“中国知网”中分别搜索全文中含气旋浪和冷空气浪文章有142和70篇,以气旋浪为主题的文章为12篇,而以冷空气浪或寒潮浪为主题的仅有4篇。在该领域的研究有待加强。

气旋浪受近海气候影响,尤其是中国黄海和东海常有温带气旋通过。基于1976—1985年这10年的海浪实况图中的87个气旋过程分析,气旋浪场具有三部分波高、波向不同的结构,波高相对于气旋中心具有不对称性^[27];郭佩芳等^[28]通过分析卫星海面轨迹断面,发现相对于风速,温带气旋的内围波高明显大于外围,波高与风速成中空反旋结构。

冷空气浪即寒潮浪,冬季频发,频发区在黄海、东海和台湾海峡^[29],引起的人员伤亡众多,由于在汛期之外,未引起广泛重视;刘占英^[30]利用航空遥感试验研究气旋与冷空气共同影响时风速与浪高关系,发现气旋中心过后6~10 h浪达到最大值,其中冷风后偏北风风时最长、风力最强,易出现波浪最大值;通过对中国海洋1966—1990年大于等于6 m海浪统计分析发现,中国海域发生大浪的主要成因均有强冷空气活动和冷空气与气旋共同作用,其中南海、台湾海峡、台湾以东以及巴士海峡中台风也占主要因素^[31]。

2.3 涌浪

涌浪是指风停止或削弱、转向以后遗留在海上,或来自于其他海域的波浪。虽然相比于风浪而言,涌浪的波级较低,但因其周期较大、频率较低,容易与在行船舶及海洋石油平台等海上建筑物发生共振,使其无法正常工作,甚至造成结构破坏和人员的伤亡。因而,对于涌浪研究很有必要,对海上航行、海洋资源开发利用、防止和减少海浪灾害都具有重要的意义。

前人对涌浪的特性研究主要在利用半理论半经验公式讨论涌浪在生成和传播过程中的外观特性演变,以及利用数值模拟计算分析极端天气情况下涌浪在时间和空间上的特征等方面。

2.3.1 涌浪的外观特性演变

海浪成分复杂,大部分以不同成分的风浪和涌浪混合而成,涌浪的特性演变主要是指风涌浪相互作用及分离。程展^[32]在前人基础上发现,风浪的能量及其分布受逆行涌浪影响,风浪谱扩宽;风区在涌浪对风浪的抑制中作用较小,而随着波龄倒数以及涌浪波陡的增加而增加^[33]。由于风涌浪作用机制复杂,现场实测因素繁多,相关验证存在很大难度,有待深入研究。

对于风涌浪分离,汪炳祥等^[34]认为满足深水: $\frac{U^2}{H}=43.6$, $\delta \leq 0.0193$, $\beta \geq 1.17$;浅水: $\frac{U^2}{H}=62.0$, $\delta \leq 0.0177$, $\beta \geq 1.07$,这3个判据中的任意2个即可认为是涌浪;李水清等^[35]则通过比较得出一维谱方法简单易行和二维谱方法可靠精细的特点。然而如何确定一个全面合理的分离参数作为判别标准,从而很精准的对风涌浪进行分离,这一方面的研究还存在很大发展空间。

2.3.2 涌浪的时、空特性

韩晓伟等^[36]发现台风影响期间所产生的大浪主要

为风浪,涌浪波高远小于风浪波高,涌浪的大值区域基本分布在远离台风中心的外围海域;陈晓斌等^[37]基于1109号台风“梅花”,探讨了发现混合浪的波高及其组成随着台风中心的移动而不断变化。在接近台风中心的区域,台风比较大,因此产生的风浪比较大,涌浪较小;而在远离台风中心的区域,台风影响较小,因此产生的风浪较小,涌浪较大。

这些模拟结果的分析都仅限于一次台风过程的影响,那么对于更多不同类型的台风,这些结论是否具有参考价值,还需要更多的对比计算和深入探讨。

2.4 畸形波

畸形波一词是杨冠生等^[38]对“Freak wave”这一独特的灾害性海浪名称的直译,后来一直为中国学者沿用。而“Freak wave”一词最早是由Drauper^[39]于1965年提出的,用来描述一种突发的灾害性海浪,其波高很大、持续时间较短、破坏性极强。该种海浪逐渐引起科研人员的关注,围绕畸形波产生的动力学原因、畸形波运动学特性、畸形波的实验室重构技术、畸形波与结构物的相互作用等方面开展了大量的研究工作^[40-41]。

中国台湾四周海岸几乎每年都有畸形波发生的记录,冬季以台湾东北角海岸发生的次数最多,夏季时西南海岸发生较频繁,当地常称此种突发性伤人怪浪为“疯狗浪”。台湾学者曾收集1954至1998年共140例有关异常浪事件的报道,分析指出因异常浪事件而被摧毁的船只达35艘,死亡人数343人以上,将畸形波事件列为台湾地区严重的经常性海洋灾害之一^[42]。大陆虽还没有人进行这方面的专门统计,但陶爱峰曾对2005—2006年的新闻中查到了6例因为突发海浪造成经济损失或人员伤亡的报道,这些突发海浪基本都具备畸形波的主要特性^[42]。

中国大多数学者仍采用大于等于2倍有效波高来作为畸形波的判定依据^[42]。陶爱峰^[43]和王瑶^[44]基于实测资料探讨了畸形波的发生概率和诱发原因;武雨晴^[45]指出了不同特性畸形波序列波谱的差异以及在畸形波发生时频率、能量的分布特点;齐可仁^[46]通过多初始条件下的深水波长期模拟,研究了畸形波特性和发生概率情况;还有学者探讨了两种非线性机制下畸形波特性^[47]。

陶爱峰^[42]、刘首华等^[48]和高志一等^[49]就畸形波的生成特性和相关研究进展做了研究综述。通过中国学者

对畸形波的不懈研究,从其发生机理,演变特性到相关延伸均取得了一定成果,但是由于其突发性极其难以预测,相关理论研究有待深入。

3 “灾害性海浪”预报研究进展

中国对于海浪的预报研究取得的突破性进展主要以台风浪为主。台风浪的预测预报工作主要集中在海浪的数值预报模式和预报的业务化。

3.1 海浪的数值预报模式

早在 20 世纪 60 年代初期,中国成立专门小组开始了对沿海海区波浪的研究工作。20 世纪 80 年代,文圣常^[50]较为详细的讨论了海浪计算模式和现代海浪理论,为中国海洋数值模拟研究提供了指导。中国科学院南海海洋研究所和香港理工学院于 1982 年对香港附近海区台风波浪进行了研究,提出一种适用于深、浅海的海浪数值预报方法——BSCS 方法^[51],较精细地计算了香港附近海区的台风浪。隋世峰等^[52-53]引入标志着风浪成长程度的参数——平均波龄,建立了一种成长海浪谱模式的台风波浪数值预报方法,简称 CHGS,较好地完成台风波浪数值计算。袁业立等^[54]根据 O.M.Phillips 提出的含波-流相互作用的能量平衡方程,提出了 LGFD 海浪数值预报方法模拟了南海的台风波浪,计算值与实测值符合得很好。

夏璐一^[55]依据 MIKE21 SW 谱波浪模型对西北行路径台风进行数值模拟,结果表明台风移动路径上前眼壁处的有效波高大于后眼壁处;移动路径以外区域有效波高经历无规律的衰减过程,路径两侧的有效波高与该点到台风移动路径距离成反比。邹文峰^[56]依据白帽耗散项对深水波浪影响较大,对浅水波浪影响较小;在深水与浅水中底摩阻对波浪影响程度相当的特征,建立国内海水域台风浪计算模型,东南内海向黄、渤海传播的台风浪大小受台风风速、台风作用于水面的时间、台风中心移动速度等因素制约,路径只对近岸地区的波高数值有较大影响。

随着台风浪研究的深入,逐步形成了针对台风演变特性,分布特性的几类研究方向,均取得一定的研究成果。然而由于台风的不确定性,理论解析推导过程复杂多变等,即便借助计算机对台风浪的传播进行复演和预测,台风浪的预警预报工作依然有待更深入的研究探索。

3.2 预报的业务化

随着海浪研究的深入,沿海部分地区某些单位对周边典型区域实现了精准业务化预报。目前国内外海浪数值预报主流是基于确定性海浪初始条件,给定风场驱动在第三代海浪模式下开展海浪相关要素的预报。廖学鹏等^[57]基于修正的 Holland 台风模型风场,在同化 Quik Scat/NCEP 混合风场基础上,结合高分辨率水深和岸线资料,通过第三代近岸海浪 SWAN 模式,对台湾基隆港附近海域实施了精准化海浪预报;张学宏^[58]通过国家气候中心的中长期风场资料,运用 WaveWatch III 建立了西北太平洋海浪数值预报业务化系统。

同时,随着集合海浪预报的出现,该预报方法将传统意义上单一的确定性预报变成不确定性预报,在充分考虑海浪数值模式中物理过程的不确定性基础上,将传统的确定性预报扩展至概率预报领域,进而提供单纯确定性预报所不能提供的额外信息,尽可能使得到的海浪预报包含未来海浪变化可能出现的所有状态,从而达到提高海浪预报技巧的目的。加拿大、日本和挪威等国家取得了一定进展,中国孙明华^[59]采用集合天气预报系统的风场驱动海浪模式 Wave Watch III,开展了全球集合海浪预报试验并开展了初步检验。研究表明,集合平均的预报水平要优于单一的确定性预报。由于中国在业务化预报领域起步较晚,与发达国家还存在较大差距,该方面研究有待加强。

4 结论

沿海的安全影响着众多人的生活,海洋灾害的预防预报研究越来越受到重视。灾害性海浪作为威胁沿海地区的重要因素,明确不同类型的灾害性海浪的作用机理、演化机制以及预报预警方法都将是长久科研任务中的重中之重。通过概述主要类型的灾害性海浪的研究概况,评述了灾害性海浪特性研究现状,并对海浪预报研究进行了展望,希望对灾害性海浪研究相关人员提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 王智峰, 董胜. 三沙近海海域灾害性海浪数值推算[J]. 海洋开发与管, 2013, 30(增刊1): 98-101.
Wang Zhifeng, Dong Sheng. Numerical calculation of disastrous

- waves in the coastal seas of Sansha[J]. Ocean Development and Management, 2013, 30(Supply1): 98-101.
- [2] 邢闯, 李本霞. 中国近海2012年灾害性海浪分析及2013年预测[J]. 海洋预报, 2013, 30(3): 1-8.
- Xing Chuang, Li Benxia. Analysis of disastrous wave of China seas in 2012 and prediction for 2013[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(3): 1-8.
- [3] 张薇, 高山, 闫忠辉, 等. 渤海灾害性海浪特征分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 73-77.
- Zhang Wei, Gao Shan, Yan Zhonghui, et al. Characteristics of the disastrous wave in the Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 73-77.
- [4] 王华, 姚圣康, 龚茂珣, 等. 东海区域灾害性海浪长期预测方法研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(5): 35-42.
- Wang Hua, Yao Shengkang, Gong Maoxun, et al. Study on the long-term predicting way of disastrous sea wave of East china sea[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(5): 35-42.
- [5] 赵更龙. 西南强涌浪下驳载作业断缆的警示[J]. 中国海事, 2012(10): 29-31.
- Zhao Genglong. Caution on the risk of rope line breaking during barge transfer operation under strong southwest swell[J]. China Maritime Safety, 2012(10): 29-31.
- [6] 闫澍旺, 李嘉, 雷震名, 等. 涌浪环境中铺管船横摇机理及模型试验研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(4): 16-22.
- Yan Shuwang, Li Jia, Lei Zhenming, et al. Mechanism and model test research of pipelay vessel rolling affected by swells[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(4): 16-22.
- [7] 周延东, 雷震名, 孙国民, 等. 涌浪基本理论研究综述[J]. 水道港口, 2016, 37(1): 1-6.
- Zhou Yandong, Lei Zhenming, Sun Guomin, et al. A review on basic theory research of swell[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(1): 1-6.
- [8] 裴晔, 陶爱峰, 张义丰, 等. 东海E3海域低频涌浪生成机制研究[J]. 海洋湖沼通报, 2016(1): 17-24.
- Pei Ye, Tao Aifeng, Zhang Yifeng, et al. The generation mechanisms of low-frequency swell in the E3 sea area of the east China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016(1): 17-24.
- [9] 陶爱峰, 胡国栋. 灾害性异常浪特性及研究方法综述[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 174-179.
- Tao Aifeng, Hu Guodong. Characteristics of disastrous rogue waves and summary of its research method[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(1): 174-179.
- [10] 高志一, 于福江, 许富祥, 等. 畸形波生成条件预报方法研究进展[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 351-356.
- Gao Zhiyi, Xu Fuxiang, Yu Fuxiang, et al. Progress in the method of freak wave condition forecasting[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 351-356.
- [11] 刘首华. 畸形波的海浪数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Liu Shouhua. Study of freak waves based on numerical ocean waves simulation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [12] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 26-31.
- Xu Fuxiang. Progress in the method of freak wave condition forecasting[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(2): 26-31.
- [13] 许富祥. 海浪灾害及中国海灾害性海浪分布规律[C]//全国沿海地区减灾与发展研讨会. 烟台: 地震出版社, 1991.
- Xu Fuxiang. Law of distribution of waves of disasters and disastrous waves in China[C]//National seminar on disaster reduction and development in coastal areas. Yantai: Seismological Press, 1991.
- [14] 高志华, 许富祥. 1994年中国海灾害性海浪特征分析[J]. 海洋开发与管理, 1995, 12(4): 57-59.
- Gao Zhihua, Xu Fuxiang. The analysis on the features of disastrous wave in China sea[J]. Ocean Development and Management, 1995, 12(4): 57-59.
- [15] 夏璐一, 栾曙光, 张超. 西北行路径台风浪的特征分析[J]. 大连海洋大学学报, 2014(6): 654-658.
- Xia Luyi, Luan Shuguang, Zhang Chao. Wave characteristics of northwest moving path typhoon[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2014(6): 654-658.
- [16] 余墅幸. 浙江省沿海风暴潮位对台风浪的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Yu Shuxing. Study on the influence of storm tide on the typhoon waves in coastal areas of Zhejiang province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [17] 夏璐一. 浙江省近岸台风浪特征分析[D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- Xia Luyi. Analysis on characteristics of offshore typhoon waves in zhejiang province[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014.
- [18] 邱桔斐. 江苏沿海风、浪特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- Qiu Jiepei. Characteristics of wind and wave in coastal areas of Jiangsu province[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [19] 栾曙光, 刘永孝, 赵凯. 闽中近岸西北行路径台风浪波向特征[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 65-72.
- Luan Shuguang, Liu Yongxiao, Zhao Kai. Characteristics of wave direction caused by the northwest typhoon in the offshore of Fujian province[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 65-72.
- [20] 邓文君, 宋萍萍, 冯伟忠, 等. 强台风“珍珠”引发广东沿岸灾害性海浪调查分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 52-59.
- Deng Wenjun, Song Pingping, Feng Weizhong, et al. Survey and analysis of rough high sea wave along Guangdong coast

- caused by severe Typhoon 'Chanchu' [J]. *Marine Forecasts*, 2007, 24(2): 52-59.
- [21] 刘学先, 武桂秋. 1985年九号台风浪推算与北海船厂防波堤头受损分析[J]. *海岸工程*, 1987(1): 36-40.
Liu Xuexian, Wu Guiqiu. Calculation of typhoon wave No.9.1985 and analyses of the damage of the head of breakwater at Bei-hai shipyard[J]. *Coastal Engineering*, 1987(1): 36-40.
- [22] 唐友刚, 刘利琴, 郑宏宇. 船舶斜浪航行生存概率预报的安全盆方法[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(9): 1021-1025.
Tang Yougang, Liu Liqin, Zheng Hongyu. Safe basin method of predicting survival probability of ships in bow seas and quartering seas[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(9): 1021-1025.
- [23] 曹祥村, 袁群哲. 台风浪及其对船舶的影响[C]//海浪海啸与实用航海技术. 广州: 中国航海学会, 2006: 38-42.
Cao Xiangcun, Yuan Qunzhe. Influences of typhoon waves on ships[C]//Wave, tsunami and practical navigation technology. Guangzhou: China institute of navigation, 2006: 38-42.
- [24] 徐福敏, 张长宽. 台风浪对长江口深水航道淤积的影响研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2004, 19(2): 137-143.
Xu Fumin, Zhang Changkuan. Study of the effect of storm waves on the rapid deposition on the Yangtze River Estuary channel[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(2): 137-143.
- [25] 茅志昌. 长江口的台风浪及其对崇明东滩的冲淤作用[J]. *东海海洋*, 1993, 11(4): 8-16.
Mao Zhichang. Wave caused by typhoon and its impacts on the erosion-accumulation of the eastern Chongming flat[J]. *Journal of Marine Sciences*, 1993, 11(4): 8-16.
- [26] 郑崇伟, 潘静. 台风浪对掠海飞行器击水概率的影响[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(4): 467-472.
Zheng Chongwei, Pan Jing. Impact of typhoon wave on ditching probability of sea skimming flying vehicle[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 14(4): 467-472.
- [27] 李凤金, 黄爱军, 刘占英. 我国黄、东海气旋浪的分布和计算[J]. *海洋湖沼通报*, 1988(3): 3-10.
Li Fengjin, Huang Aijun, Liu Zhanying. On the distribution and calculation of cyclone wave in Huanghai Sea and Donghai Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1988 (3): 3-10.
- [28] 郭佩芳, 王华. 温带气旋浪断面结构的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(3): 288-292.
Guo Peifang, Wang Hua. Study on the section structure of waves in the temperature depression with geosat altimeter data [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1994, 25(3): 288-292.
- [29] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. *海洋学报*, 1996, 18(2): 26-31.
Xu Fuxiang. Temporal and spatial distribution of disastrous waves in the coastal waters of China and its adjacent waters [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(2): 26-31.
- [30] 刘占英. 气旋波浪的个例分析[J]. *海洋预报*, 1985(1): 86-89.
Liu Zhanying. A case study of Cyclone waves[J]. *Marine Forecasts*, 1985(1): 86-89.
- [31] 王祥涛, 王文毅. 我国海洋1966—1990年 ≥ 6 米灾害性海浪的统计分析[C]//全国天气海洋与航海安全学术研讨会. 延吉: 中国航海学会, 2000: 57-64.
Wang Xiangtao, Wang Wenyi. Statistical analysis of the disastrous waves from 1966 to 1990 in oceans of China[C]//National symposium on weather, Marine and maritime safety. Yanji: China institute of navigation, 2000: 57-64.
- [32] 程展. 逆行涌浪引起的风浪谱的变化—I. 实验研究[J]. *海洋学报*, 1994, 16(2): 134-142.
Chen Zhan. Changes of wind wave spectrum induced by retrograde swell—I. Experimental study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(2): 134-142.
- [33] 黄必桂, 郑桂珍, 丛培秀. 涌浪对风浪能量影响的实验研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(3): 381-386.
Huang Bigui, Zheng Guizhen, Cong Peixiu. Laboratory Research on the Influence of Swell on Wind Wave Energy[J]. *Periodical of Ocean University of China(Science & Technology Edition)*, 2009, 39(3): 381-386.
- [34] 汪炳祥, 常瑞芳, 王一飞. 风浪与涌浪的划分判据[J]. *黄渤海海洋*, 1990, 8(1): 16-24.
Wang Bingxiang, Chang Ruifang, Wang Yifei. Criteria of differentiating swell from wind waves[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1990, 8(1): 16-24.
- [35] 李水清, 赵栋梁. 风浪和涌浪分离方法的比较[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 23-29.
Li Shuiqing, Zhao Dongliang. Comparison of spectral partitioning techniques for wind wave and swell[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 23-29.
- [36] 韩晓伟, 周林, 游大鸣, 等. 0801号台风风浪场和涌浪场的数值模拟[J]. *大气科学学报*, 2011, 34(5): 597-605.
Han Xiaowei, Zhou Lin, You Daming, et al. Numerical simulation of wind wave and swell fields generated by 0801 Typhoon [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(5): 597-605.
- [37] 陈晓斌, 周林, 史文丽, 等. 台风“梅花”风浪场和涌浪场特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1): 22-30.
Chen Xiaobing, Zhou Lin, Shi Wenli, et al. Characteristics of wave and surge fields of Typhoon MUFA[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 22-30.
- [38] 杨冠声, 董艳秋, 陈学闯. 畸形波(freak wave)[J]. *海洋工程*, 2002, 20(4): 105-108.
Yang Guansheng, Dong Yanqiu, Chen Xuechuang. Freak Wave

- [J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(4): 105–108.
- [39] Draper L. 'Freak' waves[J]. Marine Observer, 1965(35): 193–195.
- [40] Pelinovsky E N, Slunyaev A V, Talipova T G, et al. Nonlinear parabolic equation and extreme waves on the sea surface: Wave methods for studying natural media[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 2003, 46(7): 451–463.
- [41] Dysthe K, Krogstad H, Muller P. Oceanic rogue waves[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008(40): 287–310.
- [42] 陶爱峰, 胡国栋. 灾害性异常浪特性及研究方法综述[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 174–179.
- Tao Aifeng, Hu Guodong. Characteristics of disastrous rogue waves and summary of its research method[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(1): 174–179.
- [43] Tao A F, Peng J, Zheng J H, et al. Discussions on the occurrence probabilities of observed freak waves[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2015, 23(6): 923–928.
- [44] 王瑶. 基于实测数据的畸形波特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2013.
- Wang Yao. The characteristics of observed freak waves[D]. Nanjing: Hohai University, 2013.
- [45] 武雨晴. 基于连续实测资料的韩国海域畸形波特性分析[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- Wu Yuqing. The characteristics of freak waves based on continuous measured wave data around Korea[D]. Nanjing: Hohai University, 2016.
- [46] 齐可仁. 调制 Stokes 波列长期演化及其伴生畸形波特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- Qi Keren. Long-term evolution of modulated Stokes wave trains and its associated freak wave characteristics[D]. Nanjing: Hohai University, 2016.
- [47] Tao Aifeng, Zheng Jinhai, Chen Botao, et al. Properties of freak waves induced by two kinds of nonlinear mechanisms[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 1(33): 73.
- [48] 刘首华, 牟林, 刘克修, 等. 畸形波研究的进展及存在问题[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 665–673.
- Liu Shouhua, Mou Lin, Liu Kexiu, et al. Research advance and problems in freak waves[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 665–673.
- [49] 高志一, 于福江, 许富祥, 等. 畸形波生成条件预报方法研究进展[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 351–356.
- Gao Zhiyi, Yu Fujiang, Xu Fuxiang, et al. Progress in the method of freak wave condition forecasting[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 351–356.
- [50] 文圣常. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- Wen Shengchang. Wave theory and calculation principle[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [51] 王文质, 陈俊昌, 黎满球, 等. BSCS 海浪数值预报方法[J]. 热带海洋学报, 1990(4): 9–15.
- Wang Wenzhi, Chen Junchang, Li Manqiu, et al. BSCS Numerical forecasting method for ocean waves[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1990(4): 9–15.
- [52] 隋世峰. 台风波浪数值预报的 CHGS 法 I. 成长过程中的海浪谱[J]. 热带海洋学报, 1988, 7(4): 9–17.
- Sui Shifeng. CHGS method for numerical forecasting of typhoon waves I. Spectrum of waves in growing process[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1988, 7(4): 9–17.
- [53] 隋世峰, 章家琳. 台风波浪数值预报的 CHGS 法: III, 风浪的成长和涌浪的消衰[J]. 热带海洋学报, 1989, 8(2): 13–20.
- Sui Shifeng, Zhang Jialin. CHGS method for numerical forecasting of typhoon waves III. Growth of wind wave and decay of swell[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1989, 8(2): 13–20.
- [54] 袁业立, 潘增弟, 邹建生. LFGD 海浪数值预报方法 I: 海浪数值预报模式[J]. 黄渤海海洋, 1988, 6(2): 1–5.
- Yuan Yeli, Pan Zengdi, Zou Jiansheng. LFGD wave numerical forecasting method part I: Wave numerical forecast model[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1988, 6(2): 1–5.
- [55] 夏璐一, 栾曙光, 张超. 西北行路径台风浪的特征分析[J]. 大连海洋大学学报, 2014(6): 654–658.
- Xia Luyi, Luan Shuguang, Zhao Chao. Wave characteristics of northwest moving path typhoon[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2014(6): 654–658.
- [56] 邹文峰. 台风浪在我国内海的传播、演变数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- Zou Wenfeng. The numerical simulations of Typhoon wave's propagation and development in China's internal sea[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [57] 廖雪鹏, 陈希, 何君姮, 等. 基隆港台风浪特征分布数值模拟分析[J]. 海洋预报, 2010, 27(2): 1–7.
- Liao Xuepeng, Chen Xi, He Junheng, et al. Numerical study of typhoon wave distribution characteristic of the Keelung port[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(2): 1–7.
- [58] 张学宏. 西北太平洋海浪数值预报业务化系统[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- Zhang Xuehong. Operational ocean wave modeling system over the northwest pacific ocean[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [59] 孙明华. 一个集合海浪预报系统及其初步试验[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 673–680.
- Sun Minghua. An ensemble ocean wave forecast system and preliminary experiment[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(6): 673–680.

Research progress for disastrous waves in China

TAO Aifeng^{1,2}, SHEN Zhichun^{1,2}, LI Shuo³, XU Xiao^{1,2}, ZHANG Yao⁴

1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence(Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China

2. College of Harbour, Coastal and Off shore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. Beijing Shunyi Construction Investment Services LTD, Beijing 101300, China

4. National Marine Hazard Mitigation Service, State Oceanic Administration, Beijing 100194, China

Abstract China is a marine-disaster-prone country, and the wave disaster, as an important part of various marine disasters, is the most important disaster form with casualties, and it also is an important natural disaster in the consideration of the marine safety and security in our country. The common definition and classification of disastrous waves are discussed, and the main research achievements with respect to the typical disastrous wave characteristics are reviewed. The progress in disastrous wave warning and forecasting are summarized, and the main problems as well as the future research directions for disastrous waves are proposed.

Keywords waves of disasters; disastrous waves; wave prediction; risk assessment ●



(责任编辑 傅雪)