

## 北部湾台风暴潮研究现状与展望\*

# Research Status and Prospect of Storm Surge in Beibu Gulf

陈波

CHEN Bo

(广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007)

(Guangxi Key Laboratory of Coastal Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**摘要:**本文对国内外风暴潮的研究现状、进展进行了回顾;对广西沿海风暴潮的研究情况进行了评述。台风暴潮是广西沿海地区的最大海洋灾害,减少这种灾害损失是我们坚持不懈的目标。台风暴潮在广西有着显著的区域性特点:非周期性水位总是先减后增,增减水在港湾的强化与大气重力波密切相关。深入研究这些特殊性的规律,是减少风暴潮损失的必要手段。

**关键词:**北部湾 台风暴潮 回顾 展望

**中图分类号:**P73 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)04-0325-06

**Abstract:** Domestic and abroad research status and progress of storm surge are reviewed in this study, and the research situation of storm surge in coastal Guangxi is commented. The typhoon storm surge is the largest marine disaster around Guangxi so that reducing this disaster is our unremitting goal. The research results reveal that the typhoon storm surge around Guangxi has obvious regional features, that is, the non-periodic elevation always firstly decreases and then increases, and the enhancement of water level fluctuation is strongly related to the atmospheric gravity waves. Therefore, further study on the special laws of the typhoon storm surge is the necessary tool to reduce the loss induced by the storm surge.

**Key words:** Beibu Gulf, typhoon storm surge, review, prospect

台风暴潮的研究起始于20世纪20年代。最初对于台风暴潮的研究仅限于个例的观察和分析,主要目的是了解其现象、发生过程和初步探讨其成因。进入50年代,随着雷达、卫星等探测技术的发展,人们对台风暴潮的成因、机制以及发展过程有了更加深入的认识,提出了诸如:边缘波、陆架波;深海、浅海、超浅海风暴潮;线性、非线性模型以及天文潮与台风暴

潮的非线性耦合理论等。60年代后,计算机技术的高速发展为风暴潮研究技术的发展提供了优良的条件,台风暴潮的数值预报模式日臻完善,数值模拟方法成为研究台风暴潮的主要研究手段,在越来越多的台风暴潮预报中迅速推广应用。

国内外对台风暴潮的预报方法主要有数理统计法、经验统计法、数值模拟法3种。数理统计方法:是通过历史资料统计分析从而展开对台风暴潮的预测,将影响因素和量值与所研究的台风增水值进行对比,确定台风增水和影响因素变化的关系,并运用数理统计方法计算这种关系的可靠程度和相关程度,这种方法工作数据相当大,在实际应用中难于推广;经验统计方法:主要是采用回归分析和统计相关来建立指标站的风和气压与特定港口风暴潮位之间的经验预报

收稿日期:2014-05-29

修回日期:2014-06-20

作者简介:陈波(1954-),男,研究员,主要从事海洋环境动力学研究。

\*国家自然科学基金项目(批准号:41266002)资助。

方程或相关图表,此方法局限性较大,只能在少数特定的港口应用;数值模拟方法:是研究台风风暴潮的最直接方法,从流体力学方法出发,到处理台风中心到达海岸时,风、气压在沿岸引起的台风风暴潮分布的动力学模式,它是基于风暴潮控制方程、计算方法和计算机的应用而发展起来的一种新型的研究方法。台风风暴潮的数值模拟方法则克服了以上缺点,建立了预报场的概念。

## 1 国内外台风风暴潮研究概述

### 1.1 国际台风风暴潮研究

国外对台风风暴潮理论和数值模拟的研究始于上个世纪 50 年代,早期主要通过二维流体动力学基本方程的积分给出风暴潮增水的极值。W. Hansen 首次应用电子计算机对北海的一次台风风暴潮进行了数值计算,并获得了成功<sup>[1]</sup>。Jelesnianski 在上世纪 60、70 年代对不考虑和考虑底摩擦的台风风暴潮进行了数值计算,建立了 SPLASH 模式,该模式成为当时美国台风风暴潮的业务预报模型<sup>[2~5]</sup>。20 世纪 80 年代初期,Jelesnianski 等学者又开始对 SPLASH 模式进行改进,开发了一个二维流体动力学的数值模式 SLOSH,该模式计算域采用了扇形极坐标网格系统,其范围覆盖大部分大陆架和部分内陆地形及水域,如湖泊和接近封闭状的海湾等,由于考虑了漫滩,该模式同时还具有预报淹水范围的功能,因此 SLOSH 模式成为美国国家最新一代的台风风暴潮预报模式,广泛应用于台风风暴潮预报<sup>[6,7]</sup>,并在防灾预报中发挥了很好的作用。进入上世纪 90 年代后,台风风暴潮的三维数值模型也取得了长足进步。

台风浪与风暴潮的特性一直是物理海洋学界关注的热点问题。随着理论和计算技术的发展,以往单一对台风浪或风暴潮的数值模型在物理机制方面的不足逐渐被认识。Heaps 认识到需要波浪模式来改进风暴潮模式中风应力的计算<sup>[8]</sup>;Wolf 等首先发展了一个联合波浪、风暴潮模式,并对各种相互作用机制的潜在重要性进行了研究<sup>[9]</sup>;Olman 运用第三代 WaveWatch 模式和二维潮汐风暴潮模式研究了风暴潮对波浪的影响<sup>[10]</sup>;Mastenbroek 等运用第三代 WAM 模式和二维风暴潮模式研究了波浪对风暴潮的影响<sup>[11]</sup>;Xie 等利用由 POM 和 WAM 构建的耦合模式对 South Atlantic 湾研究了风应力和底应力的浪流耦合效应以及台风情况下波浪对流场及风暴潮的影响<sup>[12,13]</sup>。

通常情况下,台(飓)风等级常以风速作为参考变量,如把台风分为超强台风、强台风至热带低压的划

分方法、萨菲尔-辛普森飓风等级(SSHS)等。但仅以风速解释台风实际造成的危害可能会带来误差,如卡特里娜飓风(SSHS-3 级)的损失远大于卡米拉飓风造成的损失,Irish 指出这种偏差可能是由于风暴空间尺度不同而导致的<sup>[14]</sup>,并对此开展研究。Harris 认为风暴潮增水极值取决于中心气压及区域地形坡度<sup>[15]</sup>。Jelesnianski 通过数学模型建立了一个风暴潮增水极值与中心气压、风暴尺度以及地形坡度的关系,研究结果认为与风暴尺度关系不大,后续的诸多研究<sup>[16~20]</sup>仍坚持此观点。Dolan 提出了一个强度参数,开展了温带风暴潮的海岸侵蚀及漫滩的研究,但其方法由于是基于大尺度天气系统并未给出风暴潮增水极值与风暴大小的关系<sup>[21]</sup>。Weisberg 和 Zhang 研究了 SSHS、登陆点、行进速度、方向等因素对于风暴潮增水的影响,认为风暴潮增水对上述因素均比较敏感<sup>[15]</sup>。Powell 和 Reinhold 通过从风暴的动能角度出发研究了台风危害的评估<sup>[22]</sup>。Irish 利用数值模拟的方法研究了台风半径、中心气压、移行速度等因素与台风增水极值的关系<sup>[14]</sup>。Jones 等建立了高分辨率的非结构化网格风暴潮数学模型,对 Mersey 河口及邻近海域进行了研究,重点阐释了河口及口内风暴潮增水对其影响因素的响应,认为河口内的增水主要受口门处的增水水位以及口内地形的影响<sup>[23]</sup>。

### 1.2 国内台风风暴潮研究

我国的台风风暴潮研究始于上世纪 70 年代。1974 年,国家海洋局在厦门组织召开了我国首次风暴潮预报经验交流会,出版了论文集。1975 年,冯士筭分别从封闭和半封闭海域以及开敞海域的风暴潮问题出发,研究了风暴潮解析解的动力特征并揭示了风暴潮的内在动力机制,建立了我国风暴潮研究的理论体系<sup>[24]</sup>。1979~1989 年,孙文心、冯士筭、秦曾灏、吴培木、吴辉碇、王喜年等,对我国的风暴潮数值模拟研究与应用进行了深入研究,其模拟研究成果在渤海、黄海、东海和南海陆架区得到迅速应用<sup>[25~30]</sup>。此后,孙文心提出了流速分解法<sup>[31]</sup>,有效地提高了计算速度和预报精度,并把预报区域扩展到全国沿海地区;孙文心、魏更生又提出了一种新的计算方法——交序法,大大提高了计算速度<sup>[32]</sup>,并成功用于北部湾风暴潮数值模拟;王喜年等考虑有限振幅非线性影响,建立覆盖整个中国海沿岸海域的台风风暴潮模式,该模式采用忽略对流项的平面二维控制方程和 Takahashi、Fujita 嵌套气压场以及 Veno Takeo 风场模式,预报结果令人满意<sup>[33]</sup>。国家预报业务部门对风暴潮灾害预报十分重视。20 世纪 90 年代,中美合作上海市防汛信息中心引进了美国的新一代台风风

风暴模式 SLOSH,建立了适合上海及其邻近海域的风暴潮漫滩预报模式,并在上海对风暴潮过程进行了跟踪预报,成功模拟计算出台风引起的风暴潮增水过程。中国国家海洋预报中心、中国科学院海洋研究所和中国海洋大学等单位分别完成了“风暴潮数值预报方法研究”和“风暴潮数值预报(A、B)”等专项科研课题,并在模式中引入了风暴潮和天文潮的耦合效应。此后,国家海洋预报中心于福江等建立了球坐标系下的温带风暴潮数值模式,采用卡尔曼(Kalman)滤波方法,建立了东海的风暴潮同化预报模式和渤海温带风暴潮数值预报模式,提高了我国温带风暴潮数值预报的准确度。进入 21 世纪,我国风暴潮数值预报技术已经取得很大的突破,风暴潮预报已复盖全国沿海 11 个省市和自治区,从渤海、东海、南海都相继建立了区域性海洋预报网,国家海洋预报中心开展了常态化业务预报工作。

## 2 广西台风暴潮研究现状

广西台风暴潮研究工作慢于全国其他省份。20 世纪 70 年代,沿海气象、水文有关预报部门才开始对风暴潮灾害及破坏严重性程度有过统计和阐述。80 年代,李树华、陈波等人对广西沿岸主要港口台风暴潮特征及其预报模式进行研究,对风暴潮基本特征、运动规律及预报方法做过一些探讨,根据主要港口的验潮资料,分析台风暴潮特性和引起增减水的物理机制,采用经验的方法,初步建立了各港口台风暴潮的预报方程<sup>[34,35]</sup>。可以说,这是开创了广西台风暴潮研究方面的先河,该项研究成果获得了广西科技进步奖励。90 年代后,陈波、侍茂崇等人对广西沿海地区的台风暴潮形成与台风路径和地形的关系、增减水分布规律与强化机制等开展了较为深入的研究,取得了相关的成果<sup>[36~40]</sup>。研究成果内容有:将广西风暴潮发生期间不同港湾连续几天的风暴潮增水、减水值(去掉天文潮)进行能谱分析,探求增减水最大值与港湾固有振荡周期的关系,找出产生最大风暴潮增减水的形成原因,加强风暴潮在广西海岸形成、强化和衰减的理论研究;采用水动力模型 FVCOM、波浪模型 FVCOM-SWAVE 以及泥沙模型 FVCOM-SED,建立潮位、潮流、波浪、海底与风场等多要素耦合、多参数方法的风暴潮模型,研究风暴潮增减水的变化过程,大大地提高广西风暴潮灾害预报精度。国家和广西科技管理部门分别给予了项目支持,1999 年,广西科学技术厅下达“风暴潮增水与大气重力波及港湾固有周期谐振的关系研究(桂科基:0009020)”项目;2012 年,国家自然科学基金委下达“广西沿海主要港

广西科学 2014 年 8 月 第 21 卷第 4 期

湾风暴潮增减水及变化机制研究(批准号:41266002)”项目。但是,广西风暴潮增减水的变化影响机制是复杂的,风暴潮增减水的变化规律除受制于台风场和气压场的分布和变化过程外,还受到地形的影响,所以,增减水变化具有显著的特殊性,即先减后增呈起伏扰动形状,在增水前期一般出现一次减水过程,然后增水,只有极个别台风则主要表现为减水,与其他海区明显不同。所以,过去的这些研究还是初步的,包括对风暴潮发生、发展一些规律性东西,尚缺乏明确的认识,一些诊断模式离实际预报还相差甚远,还不能应用到减灾、防灾中去。风暴潮灾害预防是一个巨大的系统工程。除去风暴潮预报之外,还要对风暴潮灾害进行后期评估,建立台风和风暴潮灾档案,建立台风和风暴潮灾害数据库等,也就是说,要弄清楚广西风暴潮水位变化及分布规律,并对风暴潮增减水位传入近岸之后的极值形成与强化找到一个全新的理论依据,建立起一套可供预报的实用方法,提高灾害预报的精度,减少灾害造成的损失,还有大量的、更多的研究工作要做。

## 3 广西台风暴潮研究展望

广西沿海是台风的多发区。根据 2009 年 9 月《广西海洋灾害区划报告》报道,从 1949~2010 年,影响北部湾北部的热带风暴(台风)总数为 296 个,平均每年为 4.77 个,其中以 1969~1978 年的这 10 年为最多,平均每年达 5.4 个,而 2001~2010 年的 10 年为最少,平均每年仅 2.73 个。2011~2013 年,也有多个台风登陆和影响北部湾北部。其中,2013 年连续受到 4 个强台风侵袭,分别为:2013 年 8 月 2 日的强台风“飞燕”、8 月 7 日的强台风“山竹”、8 月 14 日的强台风“尤特”、11 月 11 日的强台风“海燕”等。

台风暴潮灾害造成的经济损失的数字是惊心动魄的,也是罕见的。据 1986~2010 年统计数字,近二十年来广西沿海风暴潮灾害造成的直接经济损失高达 94.70 亿元,受灾人数 1053.73 万人,死亡(不含失踪)102 人,农业和养殖受灾面积 610 千  $\text{hm}^2$ ,房屋损毁 16.29 万间,冲毁海岸工程 476.57km,损毁船只 1613 艘<sup>[41,42]</sup>。所以,台风暴潮是广西沿海地区的最大海洋灾害,减少这种灾害损失是我们的基本共识。

### 3.1 广西台风暴潮发生的特殊性

首先,广西沿海港湾众多,且都为半封闭状态,深入陆域很远,地理环境条件复杂,加之北部湾海区尺度小,广西岸段受越南沿岸反射的回潮波影响较大。因此,增减水过程具有广西港湾自己的特点:在增水前期一般出现一次减水过程,然后迅速增水,增水幅

度大,上升快,每次风暴潮诱发增水一般都达 1m 以上;而减水时间长,下降慢,可以延续 10~20h 以上。如 8303 号强台风,防城港在不到一个小时内增水 2.0m,而减水时间则延续 10 多个小时以上,有的甚至延续 20 个小时以上,几乎无规律性可寻<sup>[39]</sup>,这在其他海域是很少看见的。

其次,侵入广西的台风路径差异对风暴潮有重要影响。影响广西沿海的台风风暴潮,主要有偏北、偏西、偏东 3 个路径传入的台风<sup>[40]</sup>。偏北路径的风暴潮增水最为明显,如 8007 号和 8410 号强台风,铁山港、防城港和龙门港增水均超过 1.5m。偏东路径的风暴潮,在热带风暴进入北部湾之前,广西沿岸增减水呈 2~3 个周期波动,振幅显著增大,在广西中部的南流江三角洲变幅在 -40~+40cm,在远离台风路径中心广西西部珍珠港的白龙尾站,水位变幅在 -10~+20cm。

再则,风暴潮增减水与广西港湾地形也有密切关系<sup>[40]</sup>。如 8007 号强台风,廉州湾北海站增水 0.80m,减水 1.10m,珍珠港白龙尾站增水 1.25m,减水 0.70m,两站增水值相差 0.45m,减水值相差 0.40m。还有 8410 号强台风,东部的铁山港增水 1.50m,减水 1.40m,西部的珍珠港增水 0.80m,减水 0.60m,增减水差别较大。

最后,风暴潮在近岸港湾的强化、分布及极值的出现与大气重力波密切相关<sup>[40]</sup>。研究发现,即使处在同一侧的同一天气条件下的港湾,引起的风暴潮增减水也有很大差别。我们将风暴潮发生期间,不同港湾连续几天的风暴潮增水、减水值进行能谱分析发现,能谱最高值对应的频率各不相同,但是最大值出现总是与港湾的固有振荡频率颇为一致。例如,8609 号强台风,风力不大,但是增水却达 2m,最大能谱对应的周期为 102min,与港湾固有的振动周期 99min 很接近。同样,我们对连续几天气压变化进行能谱分析,也发现如果气压变化的能谱周期与港湾固有振动周期相接近,这时出现最大风暴潮增减水。因此,可以认为大气重力波与海湾共振是导致风暴潮出现最大值的重要原因,近岸港湾中风暴潮的水位强化、分布直接与其有关<sup>[40]</sup>。

由此可见,台风风暴潮在广西有着显著的特殊性。深入研究其特殊性的规律,是减少风暴潮损失的必要手段。

### 3.2 广西台风风暴潮研究展望

2008 年 2 月,国家批准《广西北部湾经济区发展规划》实施,广西沿海地区的开放开发迎来了一个前所未有的高潮。广西总投资约 600 多亿元建设的 40

多项临海产业重点项目正在建设,一批临海(临港)工业重大项目纷纷落户广西沿海,总装机达 600 万 kW 的 3 个火电厂、中石油 1000 万 t 炼油厂、年产 180 万 t 浆及 250 万 t 纸项目、北海哈纳利 12 万 m<sup>3</sup> 铁山港 LPG 大型冷冻储存库等重大项目已逐步建成;防城港 1000 万 t 钢铁项目、钦州中石化年产 300 万 t LNG 项目、总装机 600 万 kW 的防城港核电项目、年产 300 万 t 重油沥青项目、防城港企沙半岛沿岸的 60 万吨铜冶炼及配套项目也进入了建设阶段。北部湾经济区开放开发,既关系到广西自身发展,也关系到国家整体发展。为了满足项目建设用地需要,防城港、钦州港、北海港不断通过填海方式扩大港口建设,这些项目集中建在海岸都面临着一个海洋自然灾害的侵袭问题。广西沿海为典型的全潮海区,潮流强,潮差大,沿海平均潮差 2.42m,最大潮差 6.25m。风暴潮增水如适遇天文大潮,产生的增水将对海岸工程造成极大危害。此外,广西大陆海岸线为 1595km,其中,泥质海岸 447km,占 28.3%,基岩海岸 72km,占 4.5%,其余为沙质或河口海岸,约占 67.2%。可见,海岸抗风浪能力相当低,而且沿海还有近 250 万人居住在海岸线 3km 之内。所以,从保护国家财产、海岸工程安全和人民生命安全的角度考虑,建立精度高、计算快捷的广西风暴潮数值预报模式仍将是我们的主流。进入 21 世纪以后,风暴潮与近岸浪的耦合技术,风暴潮数值预报四维同化技术,风暴潮漫滩数值预报技术,风暴潮集合数值预报技术,GIS、遥感与风暴潮风险评估模型集成技术,风暴潮灾害长期预测技术,风暴潮灾害风险评估技术,将成为未来风暴潮研究的方向。广西对台风风暴潮的研究起步较晚,落后于其他沿海省市。所以,为了提高广西台风风暴潮灾害预报的精度,尽可能减少灾害造成的损失,加快、深入、开展这方面研究,是广西沿海地区刻不容缓的任务。

#### 参考文献:

- [1] 沙文钰,杨支中,冯芒,等. 风暴潮、浪数值预报[M]. 北京:海洋出版社,2004.  
Sha W Y, Yang Z Z, Feng M, et al. Numerical forecast of storm surge and wave[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- [2] Jelesnianski C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf [J]. Month Wea Rev, 1965, 93: 343-358.
- [3] Jelesnianski C P. Numerical computations of storm surges without bottom stress[J]. Mon Wea Rev, 1966, 94 (6): 379-394.

- [4] Jelesnianski C P, SPLASH (Special program to list amplitudes of surges from Hurricanes) II. General track and variant storm conditions [R]. NOAA Tech Mem NWS TDL-52, 1974.
- [5] Jelesnianski C P, SPLASH (Special program to list amplitudes of surges from Hurricanes) I. Landfall storms [R]. NOAA Tech Memo NWS TDL-46, 1972; 52.
- [6] Jelesnianski C P, Shaffer J W A, SLOSH (Sea, lake, and overland surges from Hurricanes) [R]. NOAA Technical Report, NWS 48, 1992.
- [7] 王喜年. 一种简单的台风风暴潮过程预报方法的研究 [J]. 海洋学报, 1985, 7(2): 233-239.  
Wang X N. Research on a simple prediction method of storm surge [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(2): 233-239.
- [8] Heaps N S. Development of numerical model for the prediction of currents [J]. J Soc Underwater Technol, 1984, 10(2): 8-18.
- [9] Wolf J, Hubbert K P, Flather R A. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model [R]. Proudman Oceanographic Laboratory, 1988, Rep No. 1: 109.
- [10] Tolman H L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents [J]. J Phys Oceanogr, 1991, 21: 782-797.
- [11] Mastenbroek C, Burgers G, Janssen PAEM. The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer [J]. J Phys Oceanogr, 1993, 23: 1856-1866.
- [12] Xie L A, Wu K J, Pietradesa J. A numerical study of wave-current interaction through surface and bottom stresses; wind-driven circulation in the south Atlantic Bight under uniform winds [J]. J Geophys Res, 2001, 106(C8): 16841-16855.
- [13] Xie L A, Wu K J, Pietradesa J. A numerical study of wave-current interaction through surface and bottom stresses; coastal ocean response to Hurricane Fran of 1996 [J]. J Geophys Res, 2003, 108(C2): 3049-3066.
- [14] Irish J L, D T Resio, Ratcliff J J. The influence of storm size on hurricane surge [J]. J Phys Ocean, 2008, 38(9): 2003-2013.
- [15] Harris D L. Characteristics of the hurricane storm surge [R]. U S Weather Bureau Tech Paper No. 48, 1963.
- [16] Berke P, Larsen T, Ruch C. A computer system for hurricane hazard assessment [J]. Comput Environ Urban Syst, 1984, 9: 259-269.
- [17] Westerink J J, Coauthors. A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model as implemented for southern Louisiana [J]. Mon Wea Rev, 2008, 136: 833-864.
- [18] Blain C A, Westerink J J, Luettich R A Jr. Grid convergence studies for the prediction of hurricane storm surge [J]. Int J Numer Methods Fluids, 1998, 26: 369-401.
- [19] Taylor R B. Simplified methods for prediction of hurricane surge and wave run-up [J]. Mar Technol Soc J, 1980, 14 (3): 20-26.
- [20] Weisberg R H, Zheng L. Hurricane storm surge simulations for Tampa Bay [J]. Estuaries Coasts, 2006, 29 (6A): 899-913.
- [21] Dolan R, Davis R E. An intensity scale for Atlantic Coast northeast storms [J]. J Coastal Res, 1992, 8: 840-853.
- [22] Powell M D, Reinhold T A. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88: 513-526.
- [23] Eric J J, Marshall D A. Storm surge computations in estuarine and near-coastal regions: the Mersey estuary and Irish Sea area [J]. Ocean Dynamics, 2009, 59 (6): 1061-1076.
- [24] 冯士筭. 风暴潮导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.  
Feng S Z. Storm surge introduction [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [25] 孙文心, 冯士筭, 秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟 (一)——零阶模型对渤海风潮的初步应用 [J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 194-211.  
Sun W X, Feng S Z, Qin Z H. Numerical modeling of an ultra-shallow water storm surge ( I ) [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1979, 1(2): 194-211.
- [26] 孙文心, 冯士筭, 秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟 ( II )——渤海风潮的一阶模型 [J]. 山东海洋学院学报, 1980, 10(2): 7-19.  
Sun W X, Feng S Z, Qin Z H. Numerical modeling of an ultra-shallow water storm surge ( II )—The first-order model of the behai sea wind-surges [J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1980, 10(2): 7-19.
- [27] 孙文心. 超浅海风暴潮的进一步研究 [J]. 山东海洋学院学报, 1987, 17(1): 34-45.  
Sun W X. A further study of ultra-shallow water storm surge model [J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1987, 17(1): 34-45.
- [28] 吴培木. 中国东南海岸台风风暴潮数值预报模式 [J]. 海洋学报, 1983, 5(3): 273-283.  
Wu P M. A numerical storm surge forecast model in Southeastern Coastal of China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1983, 5(3): 273-283.
- [29] 王喜年. 风暴潮灾害及其预报与防御对策 [J]. 海洋预

- 报,1998,15(3):26-31.
- Wang X N. Storm surge disasters, forecast and defensive countermeasures [J]. *Marine Forecasts*, 1998, 15(3):26-31.
- [30] 吴辉碇,季晓阳. 台风暴潮的数值预报试验[J]. *海洋学报*,1985,7(5):633-640.
- Wu H D, Ji X Y. Numerical prediction experiment on storm surge[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(5): 633-640.
- [31] 罗义勇,孙文心. 北部湾风暴潮的数值模拟——三维流速分解模型的一个应用[J]. *青岛海洋大学学报*,1995, 25(1):7-16.
- Luo Y Y, Sun W X. Numerical simulation of the Beibu Gulf storm surges—An application of the 3-D separating current model[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1995, 25(1):7-16.
- [32] 孙文心,魏更生. 交换计算顺序法[J]. *水动力学研究与进展*,1995,10(4):391-397.
- Sun W X, Wei G S. Alternating computation sequence (ACS) method[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1995, 10(4):391-397.
- [33] 王喜年,尹庆江,张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. *水科学进展*,1991,2(1):1-10.
- Wang X N, Yin Q J, Zhang B M. Research and applications of a forecasting model of typhoon surges in China Seas[J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(1):1-10.
- [34] 李树华,陈文广,陈波,等. 广西沿海风暴潮数值模拟试验[J]. *海洋学报*,1992,14(5):15-25.
- Li S H, Chen W G, Chen B, et al. Numerical simulation of storm surge in Guangxi coastal areas [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(5):15-25.
- [35] 李树华. 珍珠港台风暴潮特征及其预报的初步研究[J]. *海洋预报*,1986,3(4):17-24.
- Li S H. Characteristic of the storm surges in Pearl Harbour and preliminary research of its forecast [J]. *Marine Forecasts*, 1986, 3(4):17-24.
- [36] 陈波,邱绍芳. 北海港多年一遇风暴潮增减水极值推算[J]. *广西科学院学报*,2000,6(3):12-15.
- Chen B, Qiu S F. Reckoning of extremal water level fluctuation caused by storm surge in every years in Beihai Port [J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2000, 6(3):12-15.
- [37] 陈波. 广西南流江三角洲海洋环境特征[M]. 北京:海洋出版社,1997.
- Chen B. Ocean environment characteristics of Nanliu-jiang Delta, Guangxi [M]. Beijing: China Ocean Press, 1997.
- [38] 陈波,侍茂崇. 廉州湾风暴潮的数值模拟[J]. *海洋通报*,2001,20(3):88-92.
- Chen B, Shi M C. Numerical simulation of storm surge in Lianzhou Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(3):88-92.
- [39] 陈波,魏更生. 广西沿海风暴潮的数值计算研究[J]. *海洋湖沼通报*,2002,2:1-8.
- Chen B, Wei G S. Numerical calculation of storm surges near Guangxi coast [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2002, 2:1-8.
- [40] 陈波,邱绍芳. 广西沿海港湾风暴潮增减水与台风路径和地形效应的关系[J]. *广西科学*,2000,7(4):282-285.
- Chen B, Qiu S F. Impacts of typhoon course and landform on water level fluctuation in the coastal bays in Guangxi [J]. *Guangxi Sciences*, 2000, 7(4):282-285.
- [41] 陈宪云,刘晖,董德信,等. 广西主要海洋灾害风险分析[J]. *广西科学*,2013,20(3):248-253.
- Chen X Y, Liu H, Dong D X, et al. Analysis of Guangxi marine disaster risk [J]. *Guangxi Sciences*, 2013, 20(3):248-253.
- [42] 陈宪云,陈波,刘晖,等. 广西沿海风暴潮灾害及防治对策[J]. *海洋湖沼通报*,2013(4):17-23.
- Chen X Y, Chen B, Liu H, et al. Guangxi coastal storm surge disasters and countermeasures [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(4):17-23.

(责任编辑:陈小玲)