

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.018

风暴作用下河口动力过程数值模拟研究进展

汤立群¹,陈洁¹,申锦瑜²,刘大滨¹

(1. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所,北京 100048 ;2. 加拿大 Dalhousie 大学海洋系, Halifax, NS, B3H 4J1)

摘要 回顾了国内外风暴潮作用下河口动力过程数值模拟研究的进展,包括河口动力要素(水位、潮流、波浪、径流、温盐等)对风暴的响应,并根据目前数值模拟技术中存在的不足,讨论了进一步研究的方向和发展趋势。

关键词 风暴潮 河口动力过程 数值模拟 综述

中图分类号 P731 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2009)05-0078-06

Advances in simulation of dynamic estuarial processes reacting to storm surges in estuaries//TANG Li-qun¹, CHEN Jie¹, SHENG Jin-yu², LIU Da-bin¹ (1. Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China ;2. Department of Oceanography, Dalhousie University, Hailfax, Nova Scotia, Canada. B3H 4J1)

Abstract :Advances in the simulation of dynamic estuarine processes reacting to storm surges are reviewed in this paper, including the responses of dynamic estuarine factors (water level, tidal currents, waves, runoff, temperature, salinity, etc.) to storm surges. The defects in the numerical simulation technique are indicated and further research directions and trends in numerical simulation are also discussed.

Key words :storm surge ;dynamic estuarine processes ;numerical simulation ;review

风暴潮系指由于强烈的大气扰动(如强风和气压骤变)引起的海面异常升高或下降的现象,若恰好与天文潮高潮相叠加,往往会使其影响和涉及的海域潮位暴涨,甚至海水漫溢陆地,酿成巨灾^[1]。

河口地区是大陆、河流与海洋的交接区域,风暴潮活动频繁,陆地和海洋相互作用显著,主要的动力因素有径流、潮流、波浪、风成流、温盐流和柯氏力等。在风暴作用下,这些动力交互作用而使河口水流条件产生显著变化。研究河口对于风暴过程的响应,对于河口地区的防灾减灾、水产养殖、远洋运输、海洋勘探以及工程建设等具有积极意义。

采用数值模拟可以更直观地反映风暴潮作用下的河口动力过程。早期的模拟研究多集中在风暴潮增减水数值预报方面,随着工程实际的需要,风暴作用下流场、波浪、径流、温盐场等的数值模拟研究也逐步开展起来。笔者分别就上述内容的研究进展进行回顾。

1 风暴潮增、减水数值模拟

在强烈的大气扰动——如强风和气压骤变下,

海面高出正常潮水位的水位差称为风暴潮增水,当其恰与天文潮的高潮叠加时就会使水位暴涨,造成巨大的自然灾害。相反,有时背离开阔海岸方向的大风长时间地吹刮,致使岸边的水位大幅度异常性下降,海滩裸露,可形成“负风暴潮”灾害,称为风暴潮减水。

风暴增、减水数值模拟始于 20 世纪 50 年代,早期主要采用的是二维数值模式,70 年代后期逐步开展三维数值模拟,所考虑的物理过程也从简单到完备,早期多为纯风暴增水模型,80 年代开始逐渐发展为天文潮与风暴潮(简称 T-S,下同)耦合数值模型,使得风暴增水的模拟精度进一步提高。

1.1 二维数值模拟

二维模式给出的是深度平均流,由于其计算量小,各种物理过程处理简单,得到了广泛的应用。

20 世纪 70 年代,Jelesnianski 等^[2-5]建立了美国第一代风暴潮数值预报模式——SPLASH (special program to list amplitudes of surges from hurricanes)模式。在此基础上,经过 10 多年的研制和改进,发展了美国最新一代的台风暴潮数值预报模式——

SLOSH (sea, lake, and overland surges from hurricanes) 模式^[6], 该模式的计算海域(称之为 SLOSH 海域)覆盖大部分陆架海域、部分内陆和内陆水域(如湖泊或接近封闭状的海湾等), 除奥基乔比湖水域外, SLOSH 所有海域采用扇形的、均匀伸展的极坐标网格, 可以精细地刻画(1.4 km 左右)岸边重点区域微地形对风暴潮的影响。SLOSH 模式操作简单, 输出产品丰富, 且考虑了漫滩效应, 已广泛应用于海、陆以及湖泊的风暴潮模拟, 并且于 20 世纪 90 年代被我国引进用于杭州湾、上海等地风暴增水模拟, 但该模式未考虑天文潮的影响。王喜年等^[7]建立的覆盖整个中国沿海的台风风暴潮模式, 简称五区块(FBM, five-basin model)模式在风暴增水的数值模拟中也得到了广泛应用, 这个二维模式考虑了有限振幅的非线性影响和科氏参数随纬度的变化, 但未考虑天文潮的影响; 于福江等^[8]、吴少华等^[9-10]采用球坐标下的温带风暴潮模式对温带风暴潮增水过程进行了模拟; 此外, 岸界一维处理的有限差分模式、Kalman 滤波方法、嵌套网格、二维变边界模型、无结构三角单元网格的有限体积法、可视化系统和 GIS 系统也被用来增强结果的直观性。

以上研究大多略去潮汐作用的影响而成为纯风暴增水模型, 而台风引起的增水大小除与台风特性、路径及地形特征有关外, 更与当时的潮汐状况密切相关。尤其在近岸地区, 由于水深较浅, 风暴增水与潮汐之间的非线性效应十分显著, 以往将实测潮位简单地看作是风暴增水与潮汐潮位的线性叠加的方法并不能很好地反映实际水位的时空变化, 必须考虑潮汐因素对风暴增水的影响。

英国 Bidston 海洋研究所将风暴潮模式与英国气象局的 10 层大气模式相结合而发展的“海模式”(sea model)^[11]首次将潮汐和风暴潮一起计算, 并给出了总水位高度。1982 年大气模式由 10 层发展到 15 层, 在世界温带风暴潮数值预报技术中处于领先地位, 但它未考虑漫滩效应。张君伦等^[12]采用两重嵌套网格来克服潮汐与纯风暴潮非线性计算深水边界条件设定的困难, 外域不考虑非线性的对流项, 只进行线性增水计算, 并将计算结果作为内域的边界控制条件, 内域则进行潮汐与增水综合作用的非线性计算; 1992 年, 采用三重嵌套网格进一步提高了风暴增水模拟的精度^[13], 指出 T-S 的非线性效应对增水大小及发生时间有一定的影响。秦曾灏等^[14]、端义宏等^[15]采用 T-S 综合水位数值模拟方法研究了 T-S 非线性相互作用机制及其引起的增水特征, 发现在涨潮时实际增水高于纯风暴增水, 而在落潮时则小于纯风暴增水, 使模拟结果得到了改善, 并分析了控制方程中各非线性项

对 T-S 的非线性相互作用引起水位变化的贡献。周旭波等^[16]指出当风暴潮最大增水(最小减水)出现在天文潮高潮(低潮)时, 不计入天文潮的影响会使计算的增水偏大(减水偏小), 这和秦曾灏等^[14]的结论一致。同时发现增水(减水)越大, 这种误差也就越大, 而且考虑天文潮四大分潮比只考虑 M_2 分潮时结果要好。黄世昌等^[17]利用 T-S 耦合数值模型对超强台风作用下的风暴增水进行模拟, 发现台风路径对增水形态影响较大。这些工作使得两潮耦合模拟技术及方法日臻成熟, 进一步提高了风暴潮增水二维数值模拟的精度。

1.2 三维数值模拟

三维模式可以很好地再现水位过程, 但在增水验证上存在一定的局限性, 其应用没有二维模式普遍。近年来, 随着计算技术的发展和三维水动力数学模型理论及计算方法的完善, 三维风暴潮增水数值模拟也有了很大的进展。

1978 年, Johns^[18]发展了一种铅垂二维模式, 以后发展为三维, 并在风暴潮数值模式中首先采用湍流能量封闭的方法和坐标变换方法, 这些都对以后风暴潮数值预报技术的发展起到了重要的作用。于斌等^[19]应用 HAMSOM 模式研究了风暴在珠江一线的增水。于宜法等^[20]利用正压三维非线性模式模拟了渤海海区的天文-风暴潮, 获得多年一遇极值水位。储麇^[21]则利用 Delft-3D 模式提供了 T-S 直接耦合的数值预报模式, 有效地消除了近岸地区潮波与增水之间叠加的非线性影响, 其中, 天文潮的作用通过在边界上给定主要分潮作为驱动力来实现, 而台风的作用通过台风气压和风场模型提供计算域内和开边界上的气压和风, 按照静压假设和自由表面条件作用在水体上。李艳芸等^[22]运用 COHERENS 三维多功能大陆架水动力学模型对渤海 4 个主要分潮进行了调和分析, 模拟了风暴增水过程, 发现底摩阻系数对水位有一定影响, 表现在底摩阻系数较大时涨潮过程水位略低一些, 而落潮过程水位略高一些。刘永玲等^[23]从海表风应力、辐射应力、底应力 3 方面入手, 对海浪对风暴潮的影响进行了数值研究, 发现海浪通过风应力对风暴潮水位的影响最为显著, 考虑海浪影响可以提高风暴潮增水的模拟精度。

风暴潮增减水的数值模拟精度主要取决于台风气压场、风场的模拟精度, 为了提高精度、增加时效、增强模型的实用性, 风暴增减水数值模型将朝着台风云图-风暴增水一体化数值预报模式发展, 通过卫星云图直接获取台风信息, 实时计算台风可能路径和台风增水, 以及提供相应的防洪对策。

2 风暴作用下河口潮流、波浪数值模拟

2.1 潮流数值模拟

泥沙、温盐及各类污染物均伴随着潮流而运动,河口地区流场的数值模拟是温盐等物质数值模拟的基础。相对于风暴增、减水的模拟,工程界更注重风暴作用下的水流结构,这使得风暴作用下流场的模拟和数值计算越来越受青睐。

郭冬建等^[24-25]采用理论分析与数值计算相结合的方法研究了理想海域中潮、流、波对移行台风的响应,此外还讨论了与风暴潮相关的近岸环流,但由于采用的是二维全流模式,无法描述环流的垂直结构以及与斜压性相联系的现象。张东生等^[26]采用东中国海风暴潮数学嵌套模型,通过对黄海辐射沙脊群水域潮流场、波浪场和风暴流场的数值模拟分析,研究了风暴潮综合作用对水下地形的巨大再塑力。周济福等^[27]研究了标准海域中风暴气压、海域深度及底坡变化对风暴增水及流场的影响,定量分析了流速、潮位随时间和空间变化的规律。

三维数值模拟随着模拟流场垂向结构的需要而逐步发展起来。Jelesnianski 在 1970 年把二维全流模式与局部地区的 Ekman 模式结合起来,以确定水位、深度平均流和定点上的水平流速的垂直分布,从而发展了三维模式,后来被 Forristall 用于计算墨西哥湾的风暴潮^[28]。陈春华等^[29]研究了琼州海峡和海口湾台风引起的水交换。李云川等^[30]应用美国第 5 代中尺度大气数值模式 MM5 对渤海湾风暴潮过程进行了全物理过程的数值模拟研究,在一定程度上提高了灾害性天气短期预报的精度,满足了时效性要求。MM5 发展比较完善,应用十分广泛,随着风暴潮数值预报精度要求的提高,中尺度大气数值模式与风暴潮模式相结合的模式无疑是今后风暴潮数值模式发展的趋势之一。Li 等^[31-32]将 MM5 与三维水动力海洋模式 ROMS 进行耦合,用以模拟计算飓风依莎贝尔过境形成的风暴潮、流速、因风混合形成的盐度均化、双层风生环流及飓风过后的重新分层等,取得了较好的效果。其中,MM5 垂向采用 σ 坐标,分为 30 个不均匀层,地面以上 10 m 的风场由观测得到;顶部采用辐射边界条件,设置在 50 hPa 处,将计算所得的 1 h 风应力场提供给 ROMS 作为风应力驱动。海洋模式 ROMS 采用曲线拟合坐标,垂向分为 20 层,将开边界海水位、河流入海淡水径流、水面水汽-热交换作为驱动力,并考虑了温盐作用。开边界潮位分解为 5 个主要分潮 M_2 , S_2 , N_2 , K_1 和 O_1 。在河流入海处,淡水径流采用时间系列的日均值,盐度设为零,水温随时间而变;离岸开边界温盐

场采用 Levitus 月均气候值。ROMS 初边值条件的设定、驱动力的处理都比较全面合理。由于 MM5 具有实时预报功能,使得三维海洋动力的模拟计算也具有一定的预测性,这在当前研究河口地区对风暴潮的响应上处于领先水平。但模型因飓风中心经过 Chesapeake 海湾,没有考虑小型反向气压计和表面波浪的影响,以至于计算精度有所降低。

为了提高风暴作用下流场的模拟精度,不少学者考虑了 T-S 非线性耦合作用。张延廷等^[33]、赵永良等^[34]以 4 个主要分潮之和为开边界的输入值,从流的变化与增水关系上研究 T-S 耦合作用规律。张延廷得出与秦曾灏等^[14]、端义宏等^[15]一致的结论,并发现风暴潮越强、潮差越大的海域,两者的耦合作用也越大,这与周旭波等^[16]的看法也是相吻合的;赵永良等发现一般情况下耦合作用流速要小于两者线性叠加的流速,且耦合流向总是偏向两者流速较强的一方。李纪生^[35]在‘水利系统天文潮及风暴潮数值预报模型’项目中将动态增水同步与天文潮叠加,给出了满足防汛对高潮位预报要求的综合水位过程线,其研究成果已在国家防汛抗旱总指挥部办公室等水利系统推广应用。夏华永等^[36]探讨了 T-S 的耦合作用对风暴潮模拟的影响,揭示了风暴潮流的空间结构和台风引起的北部湾沿岸海水交换,但对于水边界的处理不是太合理。2005 年通过对 T-S 进行耦合模拟计算,推算了珠江口海域多年一遇的极值流速分布。江毓武等^[37]引入了潮汐、风暴潮耦合效应,设计小港湾风暴潮二维数值模型,模拟了厦门港内的台风增水过程、潮位和流场变化情况,但风场的确定以及浅水区水动力过程的模拟有待进一步探讨。黄华等^[38]发现风暴潮期间的流场主要受风应力的影响,风暴中心周围的强风将以紊流切应力的作用引起表面海水形成一个与风场同样的气旋式的环流,使得涨、落潮流向发生很大改变,表层流场受台风的影响较大,底层则不是很明显。

2.2 波浪数值模拟

波浪也是近岸海域重要的动力要素,在风暴潮过程中,浪、潮、流 3 者通过不同的机制相互影响、制约。只有全面考虑诸动力相互影响及其综合作用,才有可能准确地模拟出真实的河口动力过程。基于此,Wolf 等^[39]首先就波浪和风暴潮的相互作用进行了数值研究。金正华等^[40]对浪、潮和风暴潮非线性耦合作用下底应力及其对耦合波浪场和流场的影响进行了数值模拟分析。张延廷等^[41]通过风暴潮、潮、流、波浪联合模式及其耦合作用数值模拟,分析其联合作用对浅海开发的影响。中国科学院海洋研究所 2001 年提出并实现了以第 3 代海浪模式和三

维风暴潮-潮汐模式为基础的浪-潮-流联合作用预测模式。沙文钰等^[42]、李岩等^[43]的研究小组开展了风暴潮、浪数值预报模式的研究,用于实际风暴潮、浪的预报和后报试验,取得了令人满意的结果。夏波^[44]、尹宝树等^[45]建立了一个联合波浪与潮汐风暴潮相互作用的数值模式,分析讨论了波浪与潮汐风暴潮相互影响的程度和机制。2006年尹宝树等^[46]又通过双向耦合研究了各耦合机制的影响,也发现耦合模式的结果对于海浪和风暴潮的模拟精度有所改进。

3 风暴作用下河口径流数值模拟

在河口地区,风暴潮、径流及潮流三者非线性的相互作用,使风暴的作用变得更加复杂。流入大海的河流径流也许会大幅度增加风暴潮的高度,当风暴潮的最大高度恰与洪峰重合时,河流径流效应对风暴潮所起的作用尤为明显。同时河口咸淡水强烈掺混,能量消耗,使得河口三角洲地区的水流结构、物质输移产生深远影响,因此,入海径流的影响不容忽视。

近年来,一些学者在进行河口地区对风暴潮响应的研究时开始考虑径流作用。冯浩鉴等^[47]考虑了河流及天文潮的影响,首次将GIS与风暴潮漫滩计算相结合,建立了一个风暴潮灾害预估系统,具有较强的应用价值;马进荣等^[48]采用一、二维联解模型研究了长江口径流、潮汐和风暴潮三者相互作用下的增水过程及流场变化特征,结果表明,径流量的变化使得风暴潮引起的潮位、流速、潮量等的变化较大,而增水过程的变化很小;上游径流越大,风暴潮的增水幅度越小,但高、低潮位的绝对值越大。端义宏等^[49]通过敏感性试验,就长江口径流量变化对风暴潮的影响进行了定量估计,但仅考虑了部分天文潮(仅4个分潮)与风暴潮的非线性相互作用,不能完全模拟出由于T-S非线性相互作用引起的增水变化,而且径流量采用的是定常的年平均值,没有考虑洪、枯季径流量的变化。黄华等^[38]对此做了改进,将台风当月大通站平均径流量作为上边界条件,计算了径流、天文潮、风暴潮耦合作用下的长江口及杭州湾海区风暴潮水位过程和流场分布,并定量地给出了风暴过程中径流、天文潮和风暴潮三个动力因子单独作用下的水位和流场数值模拟结果。但其模式中尚未考虑波浪增水、环境风场和降雨导致的水位抬升等因素,这些均可能导致模拟高水位比实测高水位偏低。Li等^[31-32]在设定入海径流对风暴潮的影响时采用了时间系列的日均径流量,使所模拟的淡水径流对河口或海湾的影响显得更加合理。

4 风暴作用下河口温盐数值模拟

风暴过境常引起水平和垂直环流,这些环流对海洋水体的温盐场有很大影响,会使河口温盐结构发生显著的变化,这对于水产养殖、河口淡水资源的开发利用以及生态环境保护等有重大的影响。

关于河口温盐结构对风暴的响应逐步引起学者们的重视,不少学者为此做了有益的模拟分析。Black等^[50]发现飓风路径上的海表温度(SST)明显下降。Simon等^[51]模拟了海洋流速、温度和混合层深对台风的非线性响应,指出其具有明显的右偏性。朱建荣等^[52-53]、苏洁等^[54]也发现台风所引起的降温效应存在左弱右强的不对称。张淑芬^[55]指出这种右偏性特征随着台风移速的加快而加剧,而SST下降幅度随着台风移速的加快而减小。张长宽等在“长江下游实用型洪水-风暴潮综合数学模型”项目中,对长江口T-S耦合作用下三维流场和盐度场进行了系统深入的数值模拟研究,并应用实测潮位、流速和盐度资料对模型进行了细致的率定,其研究成果可以为长江口各种工程设计、水环境生态等服务。黄立文等^[56]综合考虑了径流、温盐作用,运用改进的ECOM-si模式对真实的强台风下的海洋响应进行了模拟研究,也发现强台风会使SST大幅度降低。李岩等^[57]对南海SST和盐度对台风的响应进行数值模拟,结果表明,台风入海时其影响下的表层海水出现明显降温和增盐效应,它们均具有明显的右偏性。加拿大达尔豪斯大学海洋系研制的DALCOAST河口海岸预报系统^[58],在大西洋海域的风暴潮、三维流场及温盐场的预测预报中发挥了重要作用,可以提供24h后报和48h预报。Li等^[31-32]通过ROMS研究飓风依莎贝尔过境Chesapeake海湾及以后的盐度分布发现,在飓风到达前,湾内盐度高度分层,大风过境引起强烈掺混,发生垂向的强烈交换,使得盐度垂向高度均化,而飓风离境后盐度重新分层又逐步回复到飓风前的分布结构。

以上研究工作大都集中于海表温度(SST)及盐度对风暴潮响应的定性研究,所得定量结果还是初步的,有待进一步向结构化定量方面发展。

5 存在问题及展望

5.1 存在问题

关于风暴作用下河口动力过程的模拟研究,主要存在以下几个方面的问题:①比较成熟的应用模型主要集中在平面二维,三维模型处于研究与探索阶段;②单因素或多因素非耦合的模拟多,通常不考虑径流、温盐作用对河口地区的影响;③入海径流的

设定大多比较粗,仅利用洪、枯季平均值,少数模型使用了较细的径流设定;④通常针对沿海地区风暴增水所造成的淹没灾害开展研究,多致力于最高风暴潮位的预报,风暴作用下的流场尚处于定性分析;⑤风暴潮模式输入的强迫力场大都采用的是模型气压场和风场,所包含的物理过程也不够完善,天气数值预报的风场和气压场在业务预报中有所尝试,但还不够普遍;⑥风暴期间波浪对河口物理量的影响是显而易见的,而波浪与潮流是一个非线性的关系,在考虑波浪与潮流同时作用时大都只是线性叠加,如何从动力方程有效地引入波浪因子,还处于试验研究阶段;⑦系统地研究风暴作用下河口动力要素响应的成果尚不多见。

5.2 展望

通过对风暴潮作用下河口动力过程数值模拟主要进展的回顾总结,根据学科发展和工程实际的需要,笔者认为未来的研究应着重在以下几个方面开展:①从单一的淡水介质向咸、淡水相互作用的多介质掺混作用模拟发展;从单相清水研究向水、沙相互作用的多相流研究发展;从垂向平均积分的单层模拟向垂向分层的多层次精细模拟发展;从单一动力要素向潮、流、浪、径、温、盐复合作用的多动力要素耦合模拟发展。②通过嵌套技术提高模式分辨率,改进网格嵌套技术,变单向嵌套为双向嵌套以较好地解决模型间的信息交换和河口地区上下游物理量的相互影响;对河口重点关注的区域通过增加嵌套层数(三重,甚至四重)使模拟向精细化方向发展。③在径流作用显著的河口,应在入海河口边界细化淡水径流的设定,如以实测径流过程替代季节性均值。④用 Semi-prognostic 技术减少海洋模型的漂移;采用 Kalman 滤波法、变分法等改进风暴潮后报结果。⑤向全数值风暴潮模式方向发展,将大气模式与海洋模式真正耦合以有效确定气压场和风应力场,或者通过卫星云图和数值化技术实时获取台风信息以驱动风暴潮计算模式,并开展风暴作用下河口海洋动力要素变化的预测研究。⑥充分利用 GIS 的强大预处理和后处理等分析功能,在 GIS 平台条件下使 GIS 和大气模块、海洋模块完全集成,达到模拟过程实用化、智能化以及模拟结果的仿真动态显示。⑦建立与物理模型相结合的复合模型,使数学模型与物理模型相互提供边界条件,相互印证河口动力要素模拟结果,共同揭示风暴作用下河口的各类物理过程与机理。⑧为河口海岸各类工程的规划、设计及施工提供极端天气条件下的动力要素科学计算结果,起到技术支撑的作用。

参考文献:

- [1] 冯士琰. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-2.
- [2] JELESNIANSKI C P. Numerical computation of storm surge induced by a tropical storm impinging on a continental Shelf [J]. Monthly Weather Review, 1965, 93(16): 343-358.
- [3] JELESNIANSKI C P. Numerical computation of storm surge without bottom stress [J]. Monthly Weather Review, 1966, 94(6): 374-379.
- [4] JELESNIANSKI C P. SPLASH (special program to list amplitudes of surges from hurricanes) I: landfall storms [M]. Washington: NOAA Tech Mem NWS TDL, 1972: 1-52.
- [5] JELESNIANSKI C P. SPLASH (special program to list amplitudes of surges from hurricanes) II: general track and variant storm conditions [M]. Washington: NOAA Tech Mem NWS TDL, 1974: 1-55.
- [6] JELESNIANSKI C P, JYE C, WILSON A S. SLOSH: sea, lake and overland surges from hurricanes [M]. MD: NOAA Technical Report NWS, 1992: 48, 71.
- [7] 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.
- [8] 于福江, 王喜年, 戴明瑞. 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 [J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 113-122.
- [9] 吴少华, 王喜年, 戴明瑞, 等. 渤海风暴潮概况及温带风暴潮数值模拟 [J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 28-34.
- [10] 吴少华, 王喜年, 于福江, 等. 连云港温带风暴潮及可能最大温带风暴潮的计算 [J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 8-18.
- [11] 王喜年. 关于温带风暴潮 [J]. 海洋预报, 2005, 22(增刊): 17-23.
- [12] 张君伦, 盛根明. 长江口台风风暴潮的计算模式研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1987, 15(1): 8-18.
- [13] 张君伦, 曹国平, 盛根明. 长江口台风增水的数值试验 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1992, 20(6): 17-25.
- [14] 秦曾灏, 端义宏. 热带气旋影响下上海港水位数值模拟研究和预报方法研究 [J]. 海洋湖沼通报, 1994(2): 41-47.
- [15] 端义宏, 秦曾灏. 上海沿岸天文潮与风暴潮非线性相互作用的数值研究 [J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(1): 80-87.
- [16] 周旭波, 孙文心. 长江口以外海域风暴潮与天文潮的非线性相互作用 [J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(2): 201-206.
- [17] 黄世昌, 李玉成, 赵鑫, 等. 浙江沿海超强台风作用下的风暴增水数值分析 [J]. 海洋工程, 2008, 26(3): 58-64.
- [18] JOHNS B. The modelling of tidal flow in a channel using a turbulence energy closure scheme [J]. Phys Oceanogr, 1978, 8: 1041-1049.
- [19] 于斌, 林少奕, 王永信, 等. 风暴潮沿珠江河道上溯运动的数值模拟 [J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 17-24.
- [20] 于宜法, 俞聿修. 渤海天文-风暴潮数值模拟和一种多年一遇极值水位的计算方法 [J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 10-17.

- [21] 储震. Delft-3D 在天文潮与风暴潮耦合数值模拟中的应用[J]. 海洋预报, 2004, 21(3): 29-36.
- [22] 李艳芸, 李绍武. 风暴潮预报模式在渤海海域中的应用研究[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 101-106.
- [23] 刘永玲, 王秀芹, 王淑娟. 波浪对风暴潮影响的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007(增刊): 1-7.
- [24] 郭冬建, 曾庆存. 理想海域中台风引起的潮、流及波的分析 I 开阔海域的情况[J]. 气候与环境研究, 1997, 2(4): 323-332.
- [25] 郭冬建, 曾庆存. 理想海域中台风引起的潮、流及波的分析 II 海岸及陆架的影响[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(1): 15-26.
- [26] 张东生, 张君伦, 张长宽, 等. 潮流塑造—风暴破坏—潮流恢复(试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制)[J]. 中国科学 D 辑, 1998, 28(5): 394-402.
- [27] 周济福, 梁兰, 李家春. 风暴潮流运动的数值模拟[J]. 力学学报, 2001, 33(6): 729-740.
- [28] 冯士耘. 风暴潮的研究与发展[J]. 世界科技进展, 1998, 20(4): 44-47.
- [29] 陈春华, 侍茂崇, 孙士才, 等. 琼州海峡和海口湾台风引起的水交换研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 8-12.
- [30] 李云川, 张迎新, 王福侠, 等. 2003 年 10 月风暴潮的形成及数值模拟分析[J]. 气象, 2005, 31(11): 15-18.
- [31] LI Ming, ZHONG L, BOICOURT W C, et al. Hurricane-induced storms surges, currents and destratification in a semi-enclosed bay[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L02604, doi: 10.1029/2005GL024992.
- [32] LI Ming, ZHONG L, BOICOURT W C, et al. Hurricane-induced destratification and restratification in a partially-mixed estuary[J]. Journal of Marine Research, 2007, 65: 169-192.
- [33] 张延廷, 王以娇. 渤海风暴潮和天文潮耦合作用的数值模拟[J]. 海洋学报, 1990, 12(4): 426-431.
- [34] 赵永良, 张延廷, 陈则实. 黄海风暴潮和天文潮非线性耦合作用的数值研究[J]. 海洋学报, 1992, 14(3): 37-46.
- [35] 李纪生. 水利系统天文潮及风暴潮数值预报模型[J]. 水利水电自动化, 1997(1): 49.
- [36] 夏华永, 詹华平, 朱鹏利, 等. 潮流、风暴潮耦合模型推算珠江口海域极值流速[J]. 海洋工程, 2005, 23(2): 32-41.
- [37] 江毓武, 吴培木, 许金殿. 厦门港潮汐、风暴潮耦合模型[J]. 海洋学报, 2000, 22(3): 1-6.
- [38] 黄华, 朱建荣, 吴辉. 长江口与杭州湾风暴潮三维数值模拟[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2007(4): 9-19.
- [39] WOLF J, HUBBERT K P, FLATHER R A. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model[R]. Liverpool, UK: Proudman Oceanographic Laboratory, 1988: 1-109.
- [40] 金正华, 王涛, 尹宝树. 浪、潮、风暴潮联合作用下的底应力效应[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 604-610.
- [41] 张延廷, 吴秀杰. 风暴潮、潮汐、流、波浪联合作用及其对浅海开发的影响[C]//中国海洋环境科学学会. 第四届全国海事技术研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 1998.
- [42] 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.
- [43] 李岩, 沙文钰, 杨支中. 湛江港风暴潮数值预报[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(7): 220-224.
- [44] 夏波. 风暴潮过程中的波流耦合数值模式研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [45] 尹宝树, 王涛, 侯一筠, 等. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 109-116.
- [46] YIN Bao-shu, SHA R, YANG De-shou, et al. Numerical study of wave-tide-Surge coupling processes[J]. Studia Marina Sinica, 2006, 47: 1-15.
- [47] 冯浩鉴, 于福江, 方爱平, 等. GIS 支持下风暴潮漫滩计算与减灾防灾[J]. 海洋测绘, 1997(3): 11-22.
- [48] 马进荣, 陈志昌. 长江口风暴潮流场计算[J]. 水利水运工程学报, 2002(1): 35-39.
- [49] 端义宏, 朱建荣, 秦曾灏, 等. 一个高分辨率的长江口台风风暴潮数值预报模式及其应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(3): 11-19.
- [50] BLACK P G, WITHEE G. The effect of hurricane Eloise on the Gulf of Mexico [C]//JA Businger-Bull Amer Meteorol. Proc, Second conf, Oceanatmosphere interactions. Abstract in Bull Seattle: Amer Meteor Soc, 1976: 57-139.
- [51] SIMON W C, RICHARD A A. Numerical simulations of the ocean's nonlinear, baroclinic response to translating hurricanes[J]. J Phys Oceanogr, 1978, 8: 468-480.
- [52] 朱建荣, 秦曾灏. 海洋对热带气旋响应的研究 I: 海洋对静止、移速不同的热带气旋响应[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(2): 146-153.
- [53] 朱建荣, 沈焕庭, 秦曾灏. 海洋对热带气旋响应的一种改进模式[J]. 热带海洋, 1995, 14(3): 44-50.
- [54] 苏洁, 李磊, 鲍献文, 等. 黄、渤海表层海温对台风过程响应数值试验[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(2): 165-172.
- [55] 张淑芬. 海洋上混合层对台风浪响应的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [56] 黄立文, 邓健. 黄、东海海洋对于台风过程的响应[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(3): 246-252.
- [57] 李岩, 沙文钰. 台风对海表温盐影响的模拟研究[C]//左其华, 窦希萍. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 266-270.
- [58] BOBANOVIC J, THOMPSON K R, DESJARDINS S, et al. Forecasting storm surges along the east coast of Canada and Northeastern US: the storm of 21 January 2000 [J]. Atmosphere-Ocean, 2006, 44(2): 151-161.

(收稿日期: 2008-10-16 编辑: 高建群)