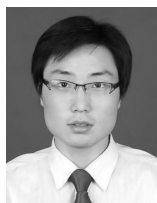


连云港海域“达维”台风风暴潮数值模拟*



齐庆辉¹, 朱志夏¹, 东培华¹, 童巍², 熊伟¹, 陈允才², 庞亮²

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏南京 210014;

2. 连云港港30万吨级航道建设指挥部, 江苏连云港 222042)

摘要:“达维”台风是建国以来登陆长江以北地区最强的台风。应用Jelesnianski台风参数模型、MIKE-SW波浪模型和MIKE-FM潮流模型,研究该台风在江苏海域登陆过程中台风浪、风暴潮的分布特征。计算结果表明,台风参数模型和台风浪模型验证较好,能够为风暴潮模拟提供准确的动力条件。台风过境期间,连云港海域最大风速超过40 m/s,产生明显的海面强烈上升现象,台风中心附近水域最大风暴增水为1.7~1.8 m,高潮时刻风暴增水为0.6~0.7 m。该模拟系统能够准确模拟台风过境期间连云港海域风暴潮变化过程,对防灾减灾的数值预报具有重要价值。

关键词:达维台风; 风暴潮; 数值模拟; 连云港海域

中图分类号: U 617.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0019-05

Numerical simulation on Damrey typhoon storm surge in Lianyungang sea area

QI Qing-hui¹, ZHU Zhi-xia¹, DONG Pei-hua¹, TONG Wei², XIONG Wei¹, CHEN Yun-cai², PANG Liang²

(1. Jiangsu Technology Research Center for Water Transport Engineering,

Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. Lianyungang Port 300,000 tons Waterway Construction Headquarters, Lianyungang 222042, China)

Abstract: Damrey typhoon is the strongest typhoon landing the norther area of the Yangtze River since the founding of new China. Applying the Jelesnianski typhoon parameter model, MIKE-SW wave model and MIKE-FM hydrodynamic model, we study the waves and storm surge distribution characteristics when the typhoon landed in Jiangsu. Calculation results show that the typhoon parameter model and the wave model verify well, and can provide the accurate dynamic condition for the storm surge simulation. During the typhoon transit, the maximum wind speed is more than 40 m/s in Lianyungang sea area and the sea level rise obviously. Near the typhoon center, the biggest storm tide is 1.7~1.8 m and the storm tide is 0.6~0.7 m at the high water level. The simulation system can accurately simulate the storm surge process during the typhoon period in Lianyungang sea area, and it is of significant value in prevention and mitigation of the typhoon disaster.

Keywords: Damrey typhoon; storm surge; numerical simulation; Lianyungang sea area

风暴潮是指由于剧烈的大气扰动、强风和气压骤变导致海水异常升降,使海区潮位大大地超过平常潮位的现象。我国拥有超过1.8万 km 的海岸线,且纬度范围大,是少数既受台风风暴潮影响又受温带风暴潮影响的国家之一。据统计,2000—2010年,我国每年因风暴潮灾害造成的直

接经济损失高达124.9亿元。2012年8月2日“达维”台风(1210号)在江苏省陈家港镇附近海域登陆,台风路径见图1,登陆风速为35 m/s,中心气压为975 hPa,造成沿海24个县(区、市)共计73万人受灾,近600间房屋倒塌。“达维”台风期间连云港海域发生明显的风暴增水现象,

收稿日期: 2015-12-22

***基金项目:** 国家863计划项目(2012AA112509); 江苏交通运输科研项目(2011Y01)

作者简介: 齐庆辉(1985—),男,工程师,从事港口、海岸及近海工程科研、规划、设计相关研究。

连云港海洋站实测最大风暴增水为 1.78 m。

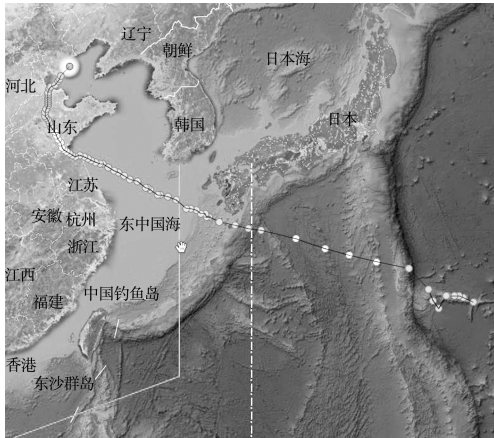


图 1 达维台风路径

风暴潮研究始于 20 世纪 20 年代，起初主要对风暴潮现象的成因进行了探讨。美国的 Jelesnianski 对风暴潮是否考虑底摩擦影响进行了系统分析研究，提出了用于美国大西洋沿岸的实时风暴潮预报模式，简称 SPLASH (special program to list amplitude of surges from hurricanes) 模式，并已成为美国预报风暴潮的主要方法^[1-2]。冯士筭^[3]、孙文心等^[4]在国内较早开展了风暴潮预报数值模拟的相关研究，对二维与三维模式结果、以及线性与非线性模式结果做了比较分析，提出了适用于中国海的风暴潮数值数学模型。于普兵等^[5]基于无结构网格有限体积法和 OpenMP 的并行计算技术，建立了包括东海、黄海、渤海大范围风暴潮模型，并集成为杭州湾风暴潮实时预报系统，实时预报了“莫拉克”(0908#)台风风暴潮在浙江省海域的登陆过程。张玮等^[6]、张娜等^[7]、朱志夏等^[8]在连云港港 30 万吨级航道科研项目中，对黄海海域风暴潮增减水过程进行了分析研究，为泥沙模型提供了准确的台风浪、风暴潮动力条件。本文在前人研究的基础上开展“达维”台风作用下江苏连云港海域风暴潮数学模型研究。

本文基于 Jelesnianski 参数模型模拟了达维台风移动、风速变化过程，采用 MIKE-FW 模式建立了台风作用下江苏连云港海域风暴潮数学模型，系统研究了台风过境期间黄海海域风暴增水效应，为地区防灾减灾提供科学依据。

1 Jelesnianski 台风参数模型

R 为最大风速半径，即 $0 \leq r < R$ 时：

$$\frac{P(r) - P_0}{P - P_0} = \frac{1}{4} (r/R)^3 \tag{1}$$

$$w_x = \frac{r}{r+R} v_{cx} - w_m \frac{2r/R}{1+(r/R)^2} [(x-x_0) \sin\theta + (y-y_0) \cos\theta] / r \tag{2}$$

$$w_y = \frac{r}{r+R} v_{cy} + w_m \frac{2r/R}{1+(r/R)^2} [(x-x_0) \sin\theta - (y-y_0) \cos\theta] / r \tag{3}$$

$R \leq r$ 时：

$$\frac{P(r) - P_0}{P - P_0} = 1 - \frac{3R}{4r} \tag{4}$$

$$w_x = \frac{R}{r+R} v_{cx} + w_m \frac{2r/R}{1+(r/R)^2} [(x-x_0) \sin\theta - (y-y_0) \cos\theta] / r \tag{5}$$

$$w_y = \frac{R}{r+R} v_{cy} + w_m \frac{2r/R}{1+(r/R)^2} [(x-x_0) \sin\theta - (y-y_0) \cos\theta] / r \tag{6}$$

式中： r 为与台风中心的距离； w_x 、 w_y 分别为风速在 x 、 y 方向的分量； v_{cx} 、 v_{cy} 分别为台风中心在 x 、 y 方向的速度分量； w_m 为最大的台风风速； P_0 为中心气压。

2 波浪数学模型

台风期间波浪模拟采用 MIKE-SW 数值模式，该模式基于波作用密度谱 $N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪成长过程，与波能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 关系为：

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \tag{7}$$

在笛卡尔坐标系下，Mike21 SW 的控制方程为：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}N) = \frac{S}{\sigma} \tag{8}$$

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \tag{9}$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \tag{10}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla d \right] - c_g k \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial S} \tag{11}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \tag{12}$$

式中: σ 为波频; θ 为波向; 波群速度 $v=(c_\sigma, c_\theta, c_x, c_y)$, c_x, c_y 为波作用在 x, y 方向的变化情况, c_σ 为相对频率的变化, c_θ 为波浪的折射变化; S 为源函数。

3 潮流数学模型

利用三维不可压缩雷诺 (Reynolds) 平均 Navier-Stokes 浅水方程建立水动力模型, 在 $h=\eta+d$ 范围内进行积分后可得到下列二维深度平均浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (13)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (14)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{yy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (15)$$

式中: t 为时间; η 为潮面高程; d 为静水深度; $h=\eta+d$ 为总水深; \bar{u}, \bar{v} 为深度平均流速 x, y 方向的分量, \bar{u}, \bar{v} 可按式计算:

$$\begin{cases} h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \\ h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \end{cases} \quad (16)$$

式中: S 为源汇项; f 为科氏力系数; g 为重力加速度; ρ 为水密度; ρ_0 为基准水密度; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力张量分量; T_{ij} 为水质点侧向应力, 包括黏滞摩擦力、紊流摩擦力、对流力等。

4 模型建立及参数设置

为了准确地模拟台风期间形成的风暴潮变化过程, 台风、波浪、潮流采用相同的 3 层嵌套的方式进行数值模拟, 嵌套区域 W01、W02、W03 的范围见图 2; W01 模型范围为: $105.8^\circ\text{E} \sim 140.6^\circ\text{E}$, $15.0^\circ\text{N} \sim 43.4^\circ\text{N}$; W02 模型范围为: $114.3^\circ\text{E} \sim 126.6^\circ\text{E}$, $22.0^\circ\text{N} \sim 40.8^\circ\text{N}$, W03 模型范围为:

$119.1^\circ\text{E} \sim 120.3^\circ\text{E}$, $34.3^\circ\text{N} \sim 35.5^\circ\text{N}$ 。图 3 为江苏连云港海域波浪、潮流模型计算范围(即为 W03 模型范围)。

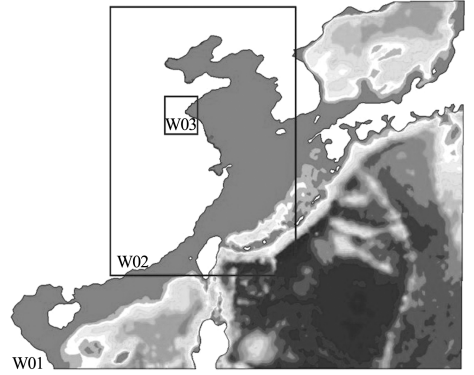


图 2 波浪模型计算范围

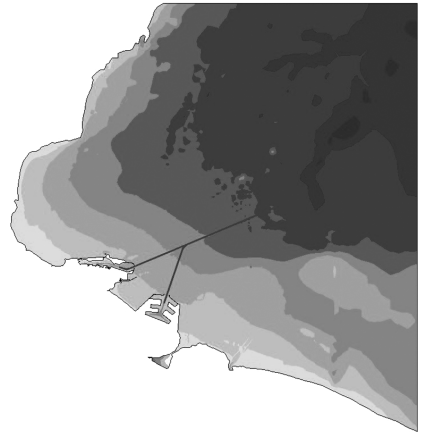


图 3 连云港海域计算范围

风场数据的空间步长为 0.02° , 时间精度为 1 h; 波浪模拟过程中考虑波与波之间的非线性作用、白帽、底摩阻等引起的能量损耗, 采用波浪 Jonswap 谱参数的方法将 360° 平均分为 24 份, 每份 15° 。潮流模型根据海州湾及连云港深水航道附近海域实测地形图确定水下地形, 采用三角形非结构化网格对计算域进行剖分, 网格空间步长最大为 3 000 m、最小为 30 m。外海潮位边界由全球潮汐预报系统获得, 灌河口处开边界采用实测的潮位过程, 模型计算时间步长为 15 s, 糙率随地形的不同在 0.010~0.025 取值。

5 模型验证及计算结果

5.1 模型验证

1210# “达维”台风期间, 徐圩海洋站进行了风速、风向、波浪、潮位的定点观测, 利用该实

测数据对 Jelesnianski 台风模型、MIKE-SW 波浪模型、MIKE-FM 潮流模型进行验证。徐圩海洋站位置见图 4。

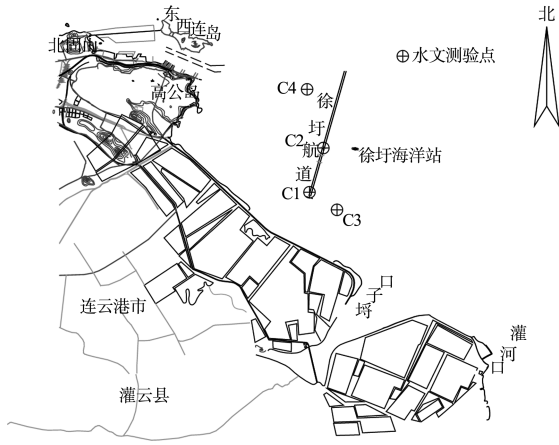
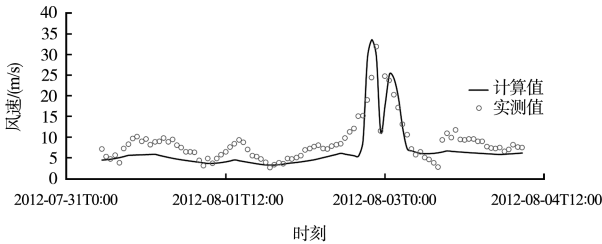
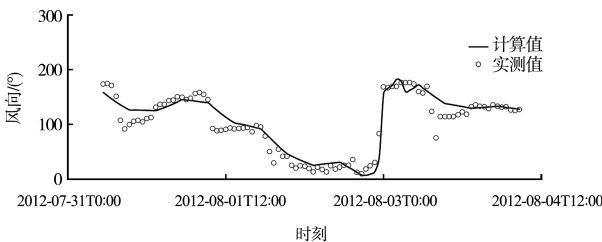


图 4 徐圩海洋站位置

图 5 为台风风速、风向验证，可以看出“达维”台风期间模拟的风速、风向与徐圩海洋站实测数据吻合良好，所建立的 Jelesnianski 风场模型较好地反映了江苏连云港海域风场状况。图 6 为台风期间波高验证曲线。图 7 为波高分布，波浪计算值与实测值吻合良好，较好地反映连云港海域波浪场的分布及波浪在台风中的演变过程，为风暴潮模型提供了合理的波浪分布场。图 8 为台风期间风暴潮验证曲线，高、低潮位吻合较好，整体相位基本一致，具有较好的相关性，可以用于台风期间风暴潮相关研究。



a) 风速



b) 风向

图 5 徐圩海洋站“达维”台风期间风速、风向验证

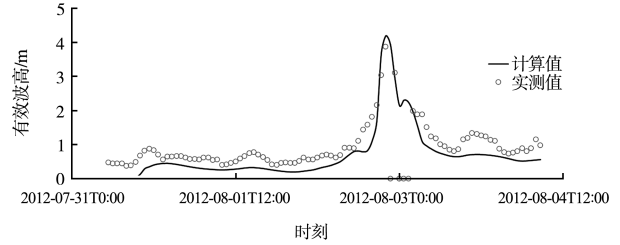


图 6 “达维”台风期间徐圩海洋站波高模拟值与实测值比较

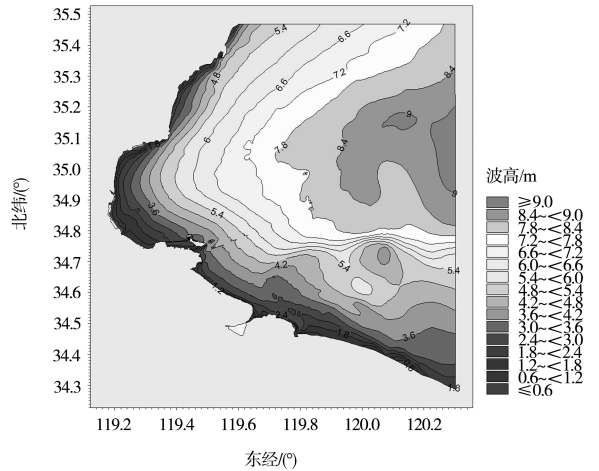


图 7 台风期间连云港海域波浪场

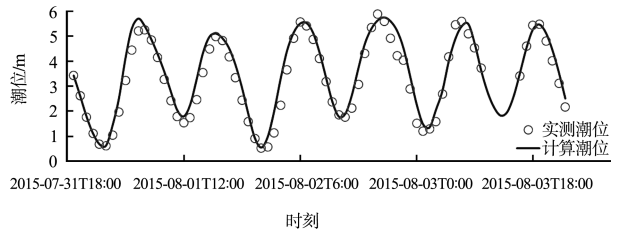


图 8 “达维”台风期间徐圩海洋站潮位验证

5.2 模型计算结果

“达维”台风于 8 月 2 日 21 时左右在江苏陈家港镇沿海登陆，8 月 3 日 01 时在苏北沿海减弱为强热带风暴；该台风是建国以来登陆我国长江以北地区最强的台风，正面从苏北海域登陆，给江苏省沿海造成巨大的经济损失。“达维”台风在日本附近的西北太平洋洋面上生成，在九州岛东南部海面加强为台风，在中国江苏沿海登陆后，向山东、河北等地区前进，最终在河北东北部近海减弱消散。图 9 为台风过境连云港海域的风场分布图，可以看出 1210#达维与相邻的台风形成了双台风效应；台风中心呈圆形分布，最大半径处风速最大，风速矢量呈逆时针方向旋转；登陆期间连云港海域最大风速超过 40 m/s，能够为风暴

潮、台风浪的形成提供强有力的驱动条件。

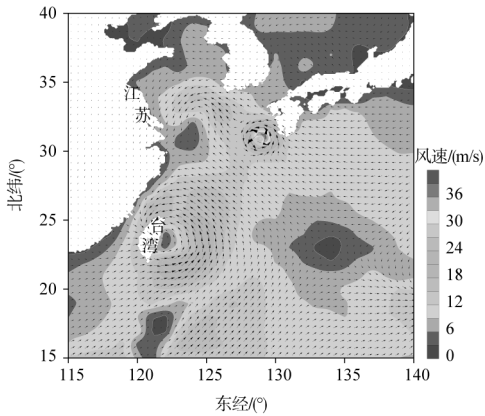


图 9 2012-08-01T20:00 时台风风场

台风期间连云港海域形成了巨大的风浪, 7 月 31 日 12:00—8 月 4 日 0:00, 最大波高超过 2 m 并且持续时间超过了 16 h, 其中在 8 月 2 日 21:00 波高值最大(超过 6.1 m)。 $H_{1/3}$ 波高最大值 4 m 左右, 有效波高超过 2.0 m 情况主要发生在 8 月 2 日 19:00—3 日 04:00, 持续时间约为 9~10 h。近岸海域波高等值线沿等深线分布; 由于淤泥质海岸存在明显的近岸破波带水域, -5 m 水深以内波浪衰减趋势明显加快。

图 10 为台风期间江苏连云港海域潮流动力场分布, 图 11 为达维台风期间风暴潮增水过程曲线。在大气压的扰动作用下, 连云港海域表面风和气压骤变引起海平面强烈上升, 产生明显的风暴增水现象。由图 11 可以看出, 台风期间最大风暴增水为 1.7~1.8 m, 高潮位期间最大风暴增水为 0.6~0.7 m; 最大增水时刻出现在低潮位附近, 与天文潮叠加后并没有达到登陆海域的警戒水位, 降低了本次台风的危害程度。

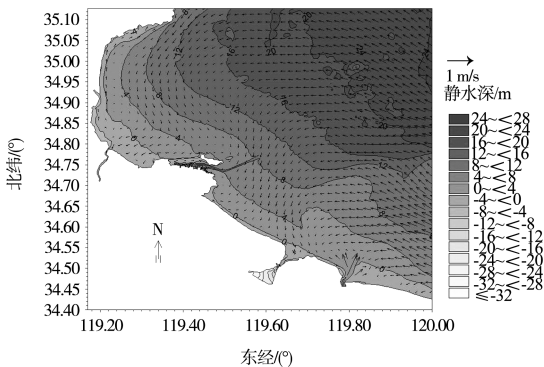


图 10 台风期间连云港海域潮流场分布

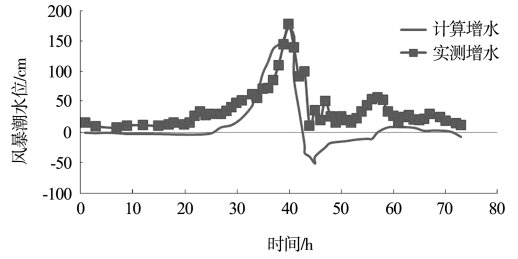


图 11 达维台风期间风暴潮增水过程曲线

6 结语

1) 基于 Jelesnianski 台风参数模型和 MIKE-SW 波浪模型验证较好, 生成的台风风场、气压场和波浪场具有较高的精度, 能够为风暴潮模拟提供准确的动力条件。

2) 台风期间, 由于风和气压骤变而产生海平面强烈上升; 台风期间最大风暴增水为 1.7~1.8 m, 处于低潮位时刻; 高潮位期间最大风暴增水为 0.6~0.7 m, 高潮位与最大增水时刻不一致。因此, 准确计算台风期间风暴潮的增水过程, 评估风暴潮位是否达到防洪警戒水位, 能够为防灾减灾决策提供参考依据。

参考文献:

- [1] Jelesnianski C.P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Mon Wea Rev, 1965, 93: 343-358.
- [2] Jelesnianski C.P. Numerical computations of storm surges without bottom stress[J]. Mon Wea Rev, 1966, 94: 379-394.
- [3] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 241.
- [4] 孙文心, 冯士筭, 秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟(I) [J]. 海洋学报, 1979 (2): 193-211.
- [5] 于普兵, 潘存鸿, 谢亚力. 二维风暴潮实时预报模型及其在杭州湾的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(6): 747-756.
- [6] 张伟, 钟春欣. 淤泥质海岸波生流及其对泥沙运动影响研究报告 [R]. 南京: 河海大学, 2014.
- [7] 张娜, 杨华, 庞启秀, 等. 连云港港 30 万吨级航道工程大风天波浪潮流泥沙三维数学模型研究报告 [R]. 天津: 交通运输部天津水运科学研究院, 2014.
- [8] 朱志夏, 齐庆辉. 连云港港 30 万吨级航道工程大风天波浪潮流泥沙三维数学模型研究报告[R]. 南京: 江苏省交通规划设计院, 2014. (本文编辑 武亚庆)