

# 胶州湾高分辨率三维风暴潮漫滩数值模拟

曹丛华<sup>1,2</sup>, 白涛<sup>1,2</sup>, 高松<sup>1,2</sup>, 徐江玲<sup>1,2</sup>, 曹雅静<sup>1,2</sup>, 吴玲娟<sup>1,2</sup>, 赵鹏<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局北海预报中心, 山东青岛 266033; 2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东青岛 266033)

**摘要:** 基于海表气压项改进的 FVCOM(Finite-Volume Coastal Ocean Model)海洋模式, 研发胶州湾高分辨率三维风暴潮漫滩数值模式(JS-FVCOM)。利用 JS-FVCOM 模式通过对天文潮、台风强度和径流 3 要素的不同组合, 共设计了 5 个试验, 分别进行风暴潮漫滩模拟实验。分析各试验结果得到如下结论: (1)随着台风最大风速的增加, 风暴潮增水迅速增加, 当综合水位超过防潮堤高程后增水速度明显减慢。海水淹没范围和淹没深度受综合水位超防潮堤高程时间影响明显。(2)在入海河流的河口区, 当洪水水位与高潮位相遇时, 由于高潮位的顶托作用, 洪水下泄不畅, 造成综合水位上升明显, 极易发生海水漫溢现象。JS-FVCOM 的模拟结果清楚地再现了海水漫堤的淹没过程, 可为紧急情况下的人员疏散提供科学的基础数据。

**关键词:** FVCOM(Finite-Volume Coastal Ocean Model); 胶州湾; 风暴潮; 漫滩

中图分类号: P731.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)02-0118-08

海洋灾害数值模拟方法的研究在国际上开展得较早, 美国、加拿大、英国、荷兰、德国、日本、印度等国家都先后提出过一些数值模式。国际上 20 世纪 80 年代, 以美国的 SPLASH 模式和英国的 Bidston 海洋研究所的风暴潮数值预报模式为代表, 这些模式已应用于国家业务预报, 为海洋开发与航运服务。1992 年美国又公开发布了新一代风暴潮数值预报模式——SLOSH 模式。该模式在美国得到了广泛的应用。2004 年 Westerink 等<sup>[1]</sup>采用大范围无结构网格技术, 研发了新一代的风、浪、潮、流耦合风暴潮预报模式, 并在南路易斯安那州取得了非常好的应用结果。

20 世纪 80 年代, 我国风暴潮的数值模式研究得到了相当迅速的发展。从孙文心<sup>[2]</sup>发表了国内第一篇风暴潮数值模拟的论文以来, 我国学者已对渤海、黄海、东海和南海陆架区的风暴潮进行了相当数量的数值模拟试验, 并以此来研究各动力因子的效应。这些数值模式从水平网格上分为: 矩形网格、曲线正交网格和无结构网格。由于我们关注胶州湾风暴潮的漫滩研究, 要求模式有高的分辨率和好的岸线拟合能力, 因此我们拟选用无结构网格方式对胶州湾风暴潮漫滩进行三维数值模拟, 此模式采用有限体积模型, 解决了数值计算中浅海复杂岸界拟合、质量守恒以及计算效率的难题。近几年应用在美国东部一系列海岸、河口区域、南大西洋等的水动力、温盐、

生态模拟和北冰洋海流、海冰模拟。

## 1 区域概况

胶州湾位于黄海中部、山东半岛的南岸(120°04'~120°23'E, 35°58'~36°18'N), 是一个伸入内陆的天然海湾, 且西岸和北岸存在较大范围的低洼、平坦区域(图 1、图 2)。

胶州湾及邻近海域易受风暴潮影响, 每年都有不同程度的风暴潮灾害发生。导致该地区风暴潮天气系统主要分为台风和温带气旋, 台风风暴潮发生频数较小、强度较大; 温带气旋风暴潮发生频数虽大但强度较弱。据 1949~2008 年资料统计, 导致青岛港增水  $\geq 50$  cm 的天气过程平均每年出现 5 次左右。其中, 增水  $\geq 80$  cm 和 100 cm 者分别为 2 a 和 7 a 出现 1 次, 最大增水为 143 cm(5612 台风, 大港验潮站)。受地理环境因素的影响, 胶州湾西岸到北岸风暴潮增水幅度略大于大港码头区。另外, 红岛两侧大沽河和女姑河感潮河段常常发生洪峰和风暴潮相叠加的情况。加之, 这一区域防潮设施简陋, 多数防潮堤坝

收稿日期: 2010-12-02; 修回日期: 2012-10-10

基金项目: 中国科学院海洋研究所海洋环境与波动重点实验室开放基金(KLOCAW0909, KLOCAW1206); 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金课题(2011016)

作者简介: 曹丛华(1960-), 女, 山东诸城人, 教授级高工, 主要从事海洋预报研究及防灾减灾工作, E-mail: putishuqd@163.com; 白涛, 通信作者, E-mail: baitao1981@163.com

是土质或砂石质简易堤坝, 高程一般为 3.0~3.5 m(黄 海面)。因此, 该区域更易发生海水漫溢的现象。

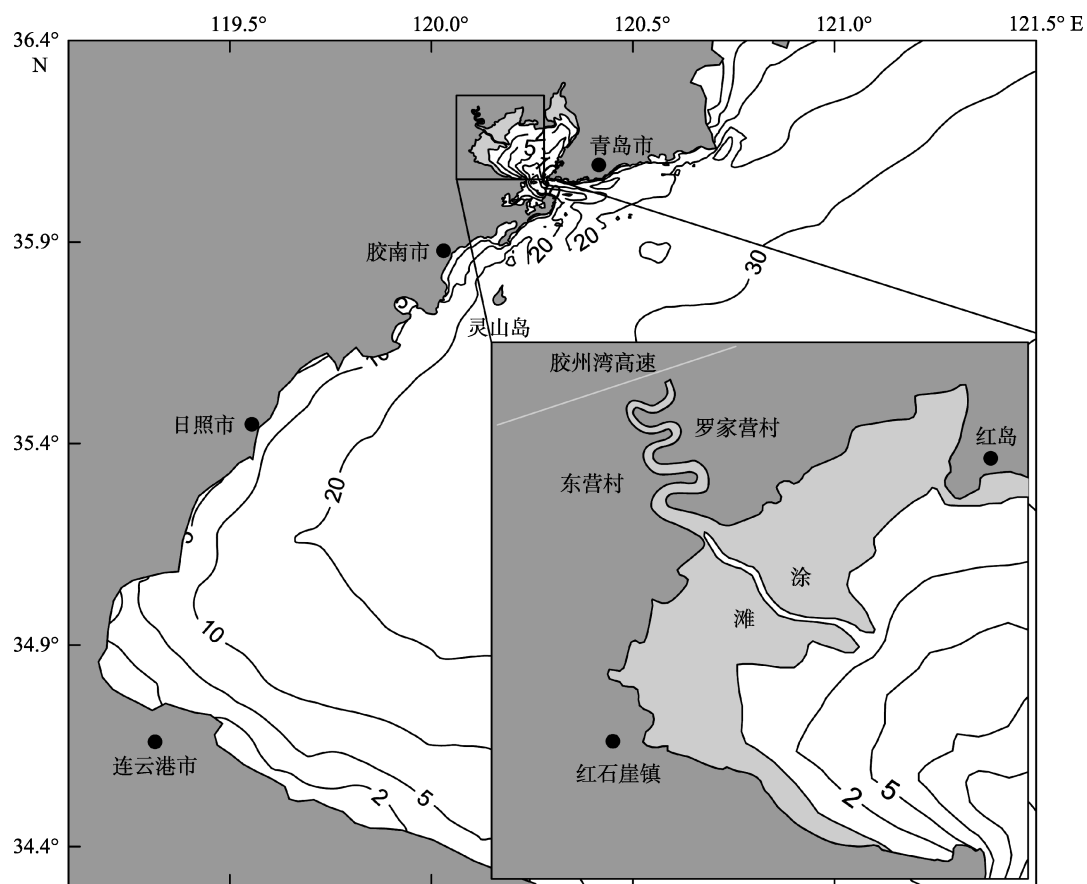


图 1 胶州湾地理位置和水深 (m)

Fig. 1 Geographical position and bathymetry of the Jiaozhou Bay

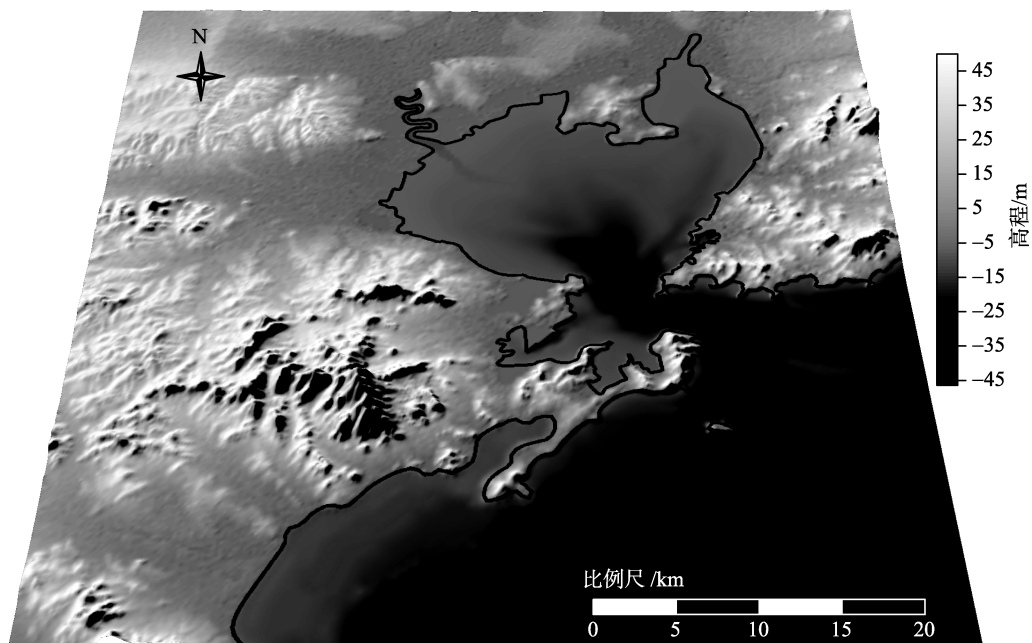


图 2 胶州湾地面高程

Fig. 2 Ground elevation of the Jiaozhou Bay

## 2 FVCOM 模式简介与改进

FVCOM(Finite-Volume Coastal Ocean Model)模式由美国麻省大学海洋科学和技术学院海洋生态模型实验室和美国伍兹霍尔海洋研究所,于2000年成功地建立的具有领先水平的非结构网格海洋环流与生态模型<sup>[3]</sup>。2006年由UMASS-D/WHOI模式开发团队进一步完善<sup>[3-4]</sup>。此模型综合了现有海洋有限差分 and 有限元模型的优点,解决了数值计算中浅海复杂岸界拟合、质量守恒以及计算有效性的难题。和其他自由表面海洋模式一样,FVCOM模式采用修正的Mellor-Yamada 2.5阶和Smagorinsky湍流闭合方案分别计算垂向和水平混合<sup>[5-6]</sup>。与目前流行的有结构网格模式(如Princeton Ocean Model (POM)和Regional Ocean Model system (ROMs))相同,FVCOM也采用时间分裂算法,外模式为二维,采用垂向积分方程;内模式为三维,采用垂直结构方程。根据CFL条件,内外模式可分别采用不同的时间步长。关于此模型的特点及有关方程详见FVCOM的用户手册<sup>[7]</sup>。

FVCOM模式使用的原始差分方程中,没有考虑海表气压对海面变化的影响,而这一因素对风暴潮增水,特别是台风风暴潮增水有不可忽略的贡献,因此,本文采用经过气压项修改的FVCOM模式进行胶州湾风暴潮漫滩模式(JS-FVCOM)的建立。

## 3 高分辨率三维风暴潮漫滩模式设置

JS-FVCOM计算范围为乳山市到连云港市海域(119°~122°E, 34.3°~36.8°N)。海水淹没范围重点考虑胶州湾西岸红石崖镇到北岸罗家营村一线,包括大沽河胶州湾高速以南河段,8 m高程线以下的范围。在该范围内通过对网格的加密设置,刻画如防潮堤和大沽河河道等地理特征,由于防潮堤高程的缺乏,将其高程全部设计为3.3 m。基础地理信息数据由实际调查资料、卫星遥感资料和DEM高程数据获得(图3、图4)。JS-FVCOM模式分辨率在防潮堤和河道等重点区域为20~50 m;在胶州中部分为300~500 m,开边界为5 000~10 000 m。垂向采用sigma坐标,共设置6层。

模式设置的三角形网格数和节点数分别为44 465和23 063。外模计算时间步长为0.3 s,内外模时间步长比值为10,采用MPI并行方式计算。大沽河考虑径流出入。

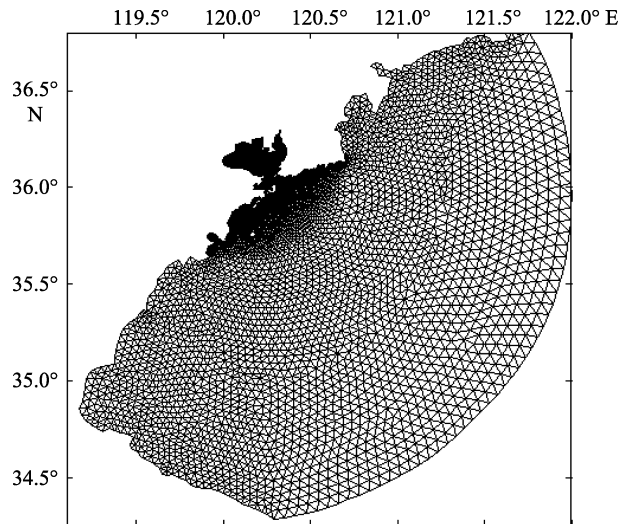


图3 模式计算区域和网格设置图

Fig. 3 The model domain and grids

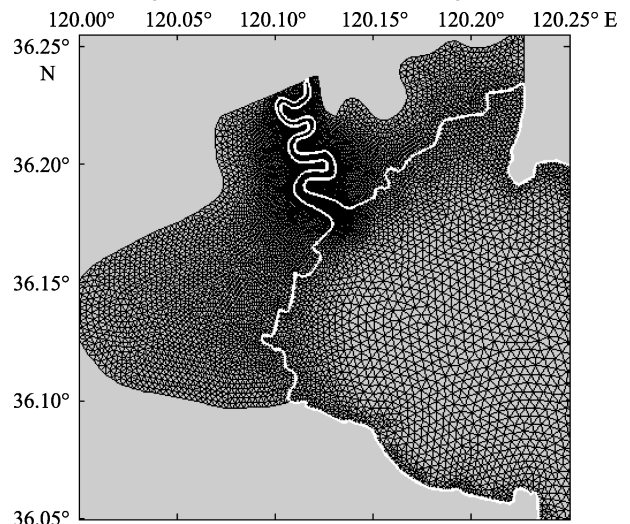


图4 胶州湾西岸和北岸模式加密网格设置图

Fig. 4 Grid refinement in the western and northern parts of model domain

模式开边界输入6个主要天文潮( $S_2$ ,  $M_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $P_1$ ,  $O_1$ )和大区风暴潮模式水位计算结果,天文潮开边界水位条件由渤、黄、东海水文图集获得。大区风暴潮模式计算范围为渤、黄、东海,模式只计算风暴潮水位变化,开边界采用静压条件。

## 4 漫滩试验设计

### 4.1 台风风场与径流设计

结合前面对胶州湾风暴潮灾情的分析,选择易引起青岛海域增水的9216台风路径为基础(图5),构建不同强度的3种台风风场(表1),风场采用Jelesnianski圆形风场模型获得<sup>[8]</sup>。

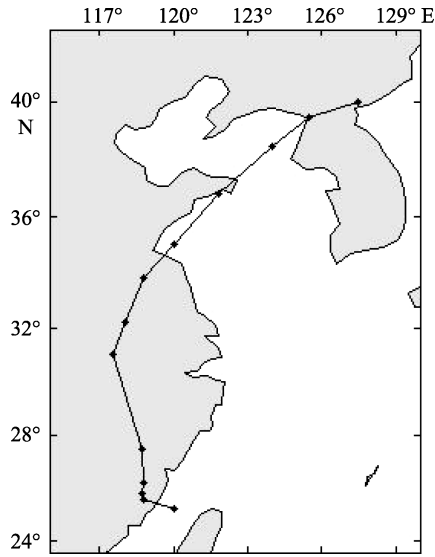


图 5 9216 台风路径图

Fig. 5 Trajectory of typhoon 9216

由于缺少 9216 台风期间的实测洪峰径流资料, 本文参考有关文献 [9], 设定大沽河洪峰径流为  $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

#### 4.2 漫滩试验设计

为了检验漫滩模式对海水漫滩和海水对径流的顶托作用的模拟能力, 通过对天文潮、台风强度和径流的不同组合, 共设计了 6 个试验(表 2)。

### 5 模式模拟验证与试验结果分析

#### 5.1 模式验证

为验证模式对风暴潮过程的计算能力, 本文对 9216 台风风暴潮过程进行了模拟, 并与胶州湾内的五号码头潮位站的资料进行了对比。从图 6 可以看出, 模式模拟的风暴增水值、潮位值和综合水位值都与实测资料吻合较好。

表 1 台风设计要素表

Tab. 1 The designed factors of typhoon

时间(h)	位置	中心气压 (hPa)	最大风速半径 (km)	最大风速(m/s)		
				型	型	型
0	25.2°N, 120.0°E	970	90	30	34	35
6	25.6°N, 118.8°E	970	90	30	34	35
12	25.8°N, 118.8°E	970	90	30	34	35
18	26.2°N, 118.7°E	970	90	30	34	35
24	27.5°N, 117.5°E	970	90	30	34	35
30	31.0°N, 118.0°E	970	90	30	34	35
36	32.2°N, 118.8°E	970	90	30	34	35
42	33.8°N, 120.0°E	970	90	30	34	35
48	35.0°N, 120.0°E	970	90	30	34	35
54	36.8°N, 121.8°E	970	90	30	34	35
60	38.5°N, 124.0°E	970	90	30	34	35
66	39.5°N, 125.5°E	970	90	30	34	35
72	40.0°N, 127.5°E	970	90	30	34	35

表 2 各试验设计方案表

Tab. 2 The project design of every experiment

台风型	设计方案	
	大沽河径流( $\text{m}^3/\text{s}$ )	
	0	1200
无	试验 0	-
型	试验 1	试验 4
型	试验 2	-
型	试验 3	试验 5

#### 5.2 综合潮位分析

通过 4 个位置点(图 7)进行各试验模拟结果比较, 分析风暴潮过程中的综合潮位变化和大沽河径流对水位和海水淹没深度的影响。

图 8 为试验 0~3 在位置点 1 综合潮位曲线图。随着台风风速的增加, 增水也逐渐增大, 试验 1~3 的综合水位最高值为 2.95, 3.31, 3.36 m。试验 2 超过防潮能力的水位(3.3 m)持续不到 1 h, 试验 3 则持续超过 3 h, 导致海水淹没范围和淹没深度急剧增加。

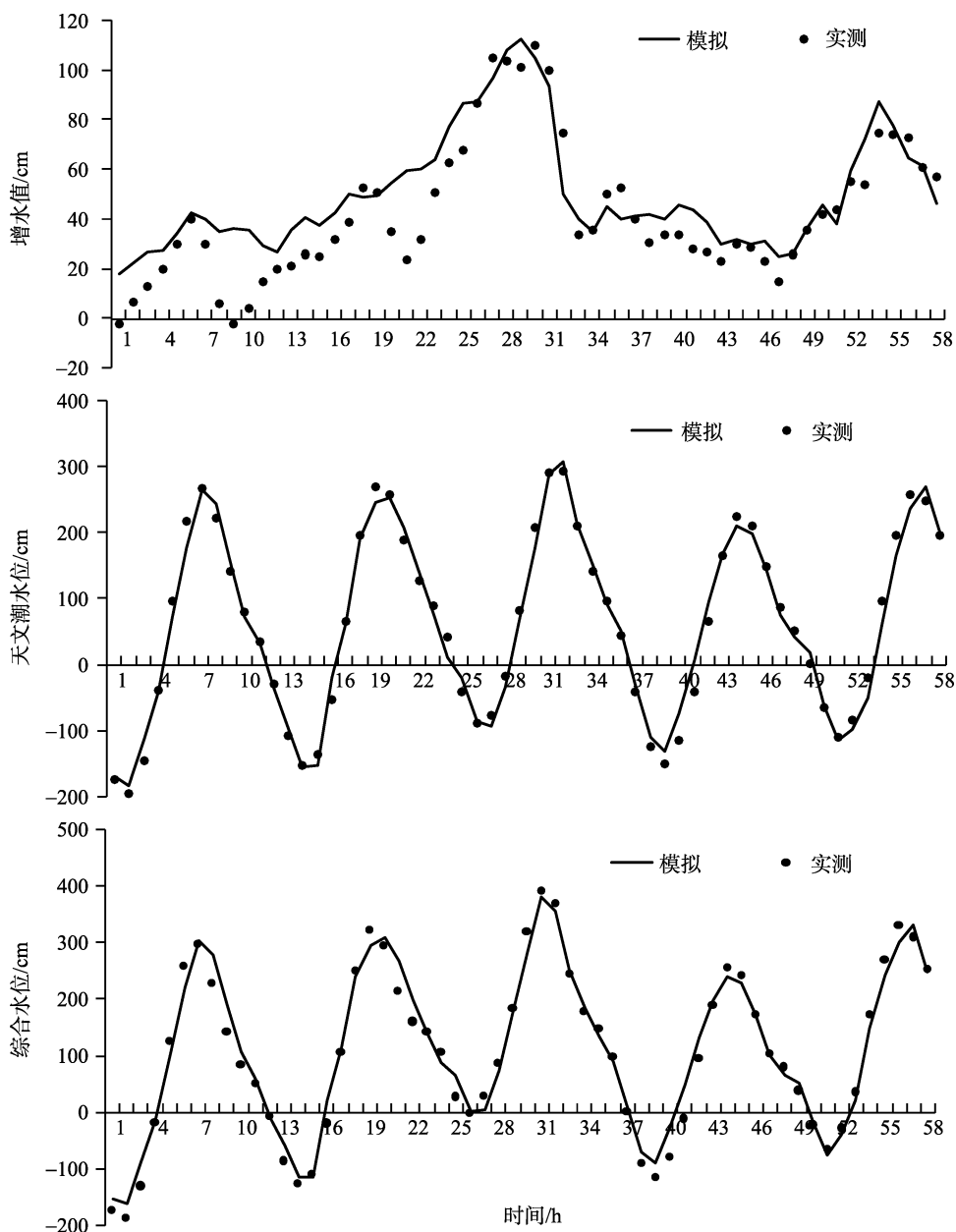


图 6 9216 台风风暴潮过程期间五号码头海洋站模拟与实测结果

Fig. 6 Comparison of simulated and observed elevation during typhoon 9216

图 9 为试验 1~3 和试验 5 在位置点 2 处综合潮位曲线图, 从图中可以看出: 试验 1 综合水位低于防潮堤的高程(3.3 m)(从图 8 可知, 位置点 1 的最高综合水位为 2.95 m), 没有发生海水漫溢现象, 因此该点的高度为地面值(位置点 2 的地面高程 0.3 m); 试验 2 在位置点 1 处的水位为 3.31 m, 高于防潮堤的高程因此发生海水漫溢现象, 位置点 2 水位为 0.54 m。试验 3 由于水位高度和持续时间都有增加, 位置点 2 处的水位高度急剧增加为 2.29 m, 且海水开始影响的时间从试验 2 的第 58 小时提前到试验 3 的 48 小

时; 试验 5 考虑大沽河径流影响, 增水曲线在试验 4 的基础上, 增加约 0.13 m 为 2.42 m。

图 10 为试验 0, 1, 3, 4 和 5 在位置点 4 处综合潮位曲线图。在考虑径流的影响情况下, 综合水位有明显的升高。试验 1 和试验 4 的最高综合潮位分别为 2.82 m 和 3.18 m, 在 型台风的情况下, 径流引起的水位增高为 0.36 m。试验 3 和试验 5 的最高综合水位分别为 3.26 m 和 3.30 m, 在 型台风的情况下, 径流引起的水位增高仅为 0.04 m, 这是因为在海水和洪水的共同作用发生海水漫溢情况, 使得水位没

有明显上升。

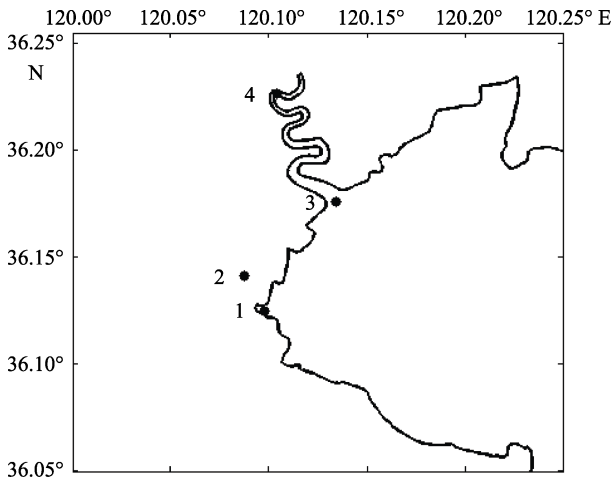


图 7 模式输出分析点位置图

Fig. 7 The position of analytic points for model output

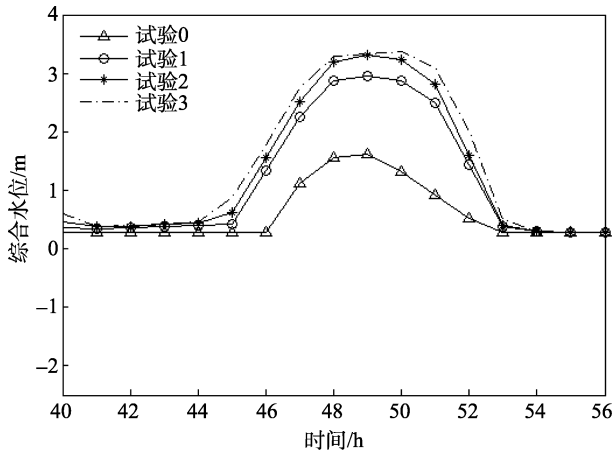


图 8 试验 0~3 在位置点 1 处综合潮位曲线

Fig. 8 Tidal elevation of experiment 0, 1, 2 and 3 at point 1

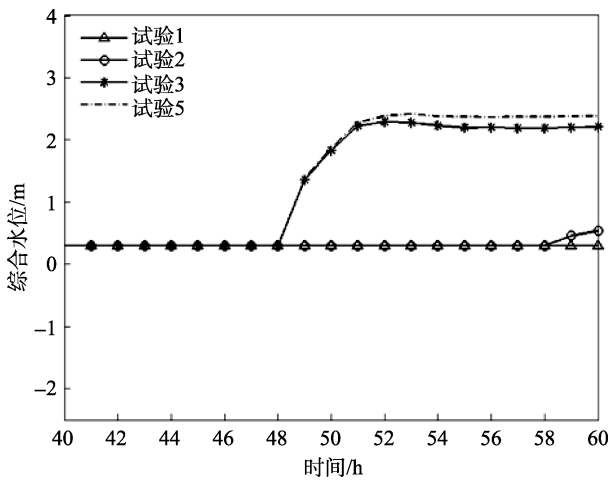


图 9 试验 1, 2, 3 和 5 在位置点 2 处综合潮位曲线

Fig. 9 Tidal elevation of experiment 1, 2, 3 and 5 at point 2

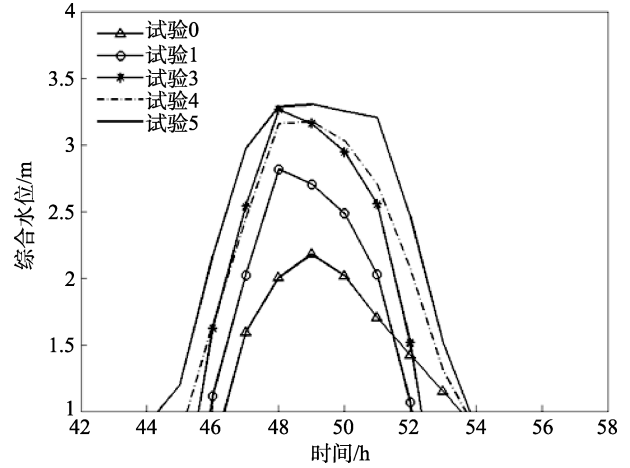


图 10 试验 0, 1, 3, 4 和 5 在位置点 4 处综合潮位曲线

Fig. 10 Tidal elevation of experiment 0, 1, 3, 4 and 5 at point 4

图 11 为试验 1, 4 在位置点 3, 4 处综合潮位曲线, 可以看出, 径流引起的水位升高, 从位置点 4 的 0.5 m, 减小到河口处(位置点 3)的 0.05 m。

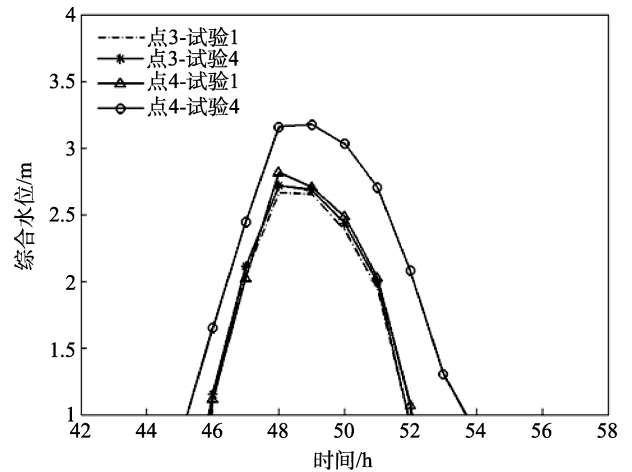


图 11 试验 1, 4 在位置点 3, 4 处综合潮位曲线

Fig. 11 Tidal elevation of experiment 1 and 4 at point 3 and 4 respectively

### 5.3 漫滩范围分析

图 12 为试验 1, 2, 3, 4 和 5 综合水位最大值空间分布图。从图中可以明显地看出, 在东南风的作用下, 海水在胶州湾西岸和西北岸产生堆积, 最大值约为 2.95 m, 没有发生河水漫溢的现象。试验 2 风暴潮增水过程和水位的空间分布特征与试验 1 基本一致, 但由于台风最大风速由 30 m/s 增加到 34 m/s, 海水在胶州湾西岸和西北岸堆积的强度增加, 最大综合水位值约为 3.35 m, 超过防潮堤高程(3.3 m)水位持续约 1 h, 最大影响面积约为 12 km<sup>2</sup>, 最大淹没水位约为 1.5 m。试验 3 台风最大风速增加到 35 m/s, 胶

州湾西岸和西北岸综合潮位最大约为 3.4 m, 超过防潮堤高程(3.3 m)的时间持续约 3 h, 海水淹没范围扩大到红石崖镇至东营村一线, 特别是大沽河东营村岸段也发生漫溢现象。试验 3 与试验 2 相比, 虽然综合水位最大增水仅增加 0.05 m, 但超防潮堤水位的持续时间由 1 h 增加到 3 h, 漫溢海水影响计算范围急剧增加为 55 km<sup>2</sup>, 约为试验 2 淹没范围的 4.6 倍, 最大淹没水位约为 3.0 m。

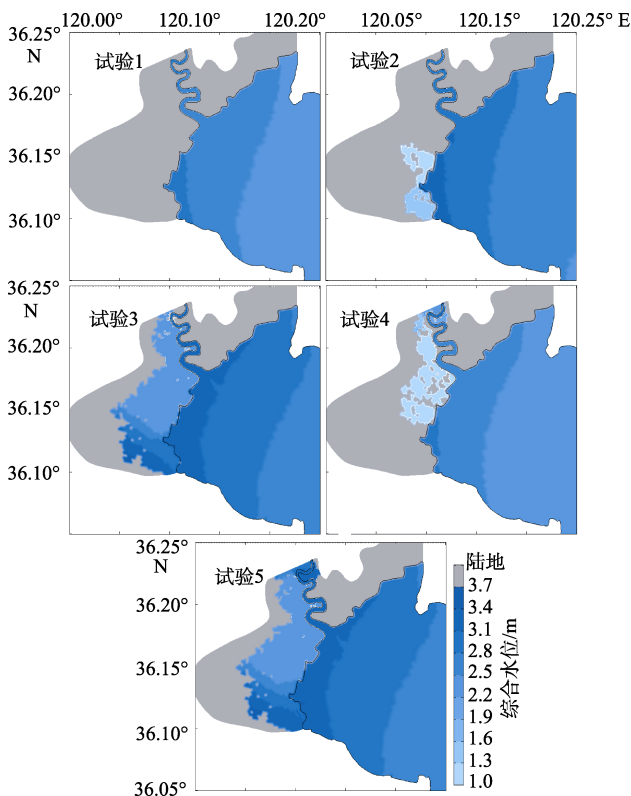


图 12 试验 1, 2, 3, 4 和 5 综合水位最大值空间分布图  
Fig. 12 Spatial structure of maximum elevation for experiment 1, 2, 3, 4 and 5

#### 5.4 径流影响分析

试验 4 和试验 5 分别在试验 1 和试验 3 的基础上, 在大沽河增加了 1 200 m<sup>3</sup>/s 的洪水径流。从图 12 对比分析可知, 在试验 1 情况下海水没有发生漫滩的现象。而在试验 4 情况下, 在大沽河胶州湾高速河段两岸于均发生海洋漫溢现象, 最大淹没范围约为 25 km<sup>2</sup>。试验 5 海水漫溢的影响面积除包括试验 3 的影响范围外, 还包括了大沽河胶州湾高速河段东、西两侧区域, 且淹没深度平均增加约 0.1 m。

#### 5.5 淹没过程分析

各试验的风暴潮海水漫溢模拟结果表明, 该模

式较好地再现了海水的漫溢后淹没过程。以试验 5 为例(图 13), 第 48 小时前后, 在大沽河胶州湾高速河段和胶州湾西岸洋河口附近发生海水漫溢现象, 随后, 大沽河胶州湾高速河段漫溢海水向南扩散, 胶州湾西岸洋河口漫溢海水向北扩散; 第 50 小时前后, 两个漫溢区漫溢海水连成一片, 胶州湾西侧东营村到红石崖大部分区域被海水淹没, 最大淹没范围为 57 km<sup>2</sup>。

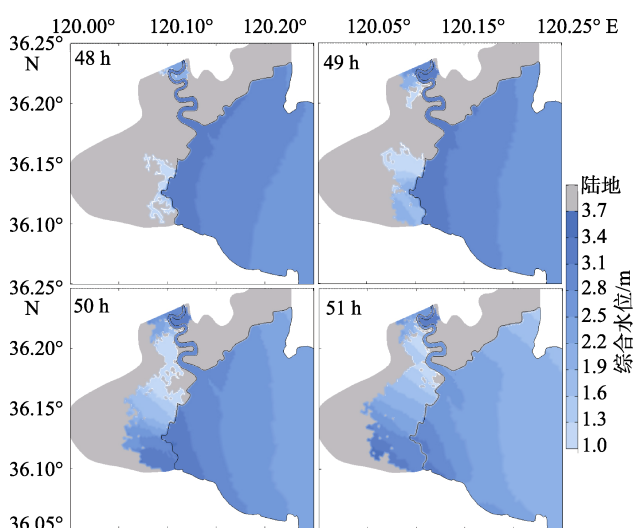


图 13 试验 5 第 48, 49, 50 和 51 小时综合水位分布图  
Fig. 13 Spatial structure of elevation for experiment 5 at the 48<sup>th</sup>, 49<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> and 51<sup>st</sup> hour respectively

## 6 结论

本研究可以看出 JS-FVCOM 模式适用于胶州湾风暴潮漫滩过程的模拟, 并且该模式重点区域的水平分辨率已达 20 m, 基本可以满足海水侵漫海堤后淹没街区情况的模拟要求, 同时采用 MPI 并行计算方式大大缩短了计算时间, 完全可以满足业务化运行的要求。

研究结果表明: (1)随着台风最大风速的增加, 风暴潮增水迅速增加, 当综合水位超过防潮堤高程后增水速度明显减慢。海水淹没范围和淹没深度受综合水位超防潮堤高程时间影响明显。(2)在入海河流的河口区, 当洪水位与高潮位相遇时, 由于高潮位的顶托作用, 洪水下泄不畅, 造成综合水位上升明显, 极易发生海水的漫溢现象。

由此可见 JS-FVCOM 的模拟结果清楚地再现了海水漫堤的淹没过程, 可为紧急情况下的人员疏散提供科学基础数据。

参考文献:

- [1] Joannes J W, Jesse C F, John H A, et al. 2005: A New Generation Hurricane Storm Surge Model for Southern Louisiana[R]. Notre Dame: Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, 2004.
- [2] 孙文心, 冯士筭, 秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 193-211.
- [3] Chen Changsheng, Cowles G, Robert C B. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) System [J]. Advances In Computational Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [4] Chen Changsheng, Huang Haosheng, Robert C B, et al. A finite-volume numerical approach for coastal ocean circulation studies: Comparisons with finite-difference models[J]. J Geophys Res, (2006c), 112, C03018, doi:10.1029/2006JC003485.
- [5] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem[J]. Rev Geophys, 1982, 20: 851-875.
- [6] Galperin B, Kantha L H, Hassid S, et al. A quasiequilibrium turbulent energy model for geophysical flows[J]. J Atmos Sci, 1988, 45: 55-62.
- [7] Chen Changsheng, Robert C, Beardsley. An unstructured grid, Finite -Volume Coastal Ocean Model FVCOM user manual[EB/OL].2009-02-18. <http://fvcom.smast.umassd.edu/FVCOM/index.html>.
- [8] Jelesnianski C P. A numerical computation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf [J]. Monthly Weather Preview, 1995, 93(6): 343-358.
- [9] 韩树宗, 赵瑾, 魏福宝, 等. 胶州湾大沽河洪水期三维水沙数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 689-692.

## High resolution 3D storm surge and inundation numerical model used in the Jiaozhou Bay

CAO Cong-hua<sup>1,2</sup>, BAI Tao<sup>1,2</sup>, GAO Song<sup>1,2</sup>, XU Jiang-ling<sup>1,2</sup>, CAO Ya-jing<sup>1,2</sup>, WU Ling-juan<sup>1,2</sup>, ZHAO Peng<sup>1,2</sup>

(1. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266033, China)

Received: Dec., 2, 2010

Key words: FVCOM (Finite-Volume Coastal Ocean Model); the Jiaozhou Bay; storm surge; inundation

**Abstract:** Based on FVCOM (Finite-Volume Coastal Ocean Model) ocean model with improved sea surface atmosphere item, the high resolution 3D storm surge and inundation numerical model (JS-FVCOM) was developed in the Jiaozhou Bay, which has a much finer resolution especially in the Dagu River Estuary, where the grid sizes equal to about 20 m. Besides, by adopting MPI calculating method, the calculating time can be further reduced, which can satisfy the need of practical operation. With different combinations of three essential factors such as astronomic tides, typhoon intensity and river flux, five numerical experimentations were designed to simulate the process of storm surge. The results show that 1) the storm surge increases rapidly with the increase of typhoon intensity, however, it starts to decrease significantly when the water level is higher than the dike; 2) in tidal estuary, where the flooding encounters high tide, the floodplain will happen easily; 3) the JS-FVCOM model can successfully simulate the process of the storm surge with reasonable flooded coverage and water level, which can provide scientific and credible simulation data for the emergency response work, such as risk assessment of storm surge and staff evacuation.

(本文编辑: 刘珊珊)