

渤海及辽河口湿地海域风暴潮过程的数值模拟研究

冀永鹏¹, 张洪兴², 王旖旎¹, 徐天平¹, 张明亮^{1*}

(1. 大连海洋大学, 海洋科技与环境学院, 辽宁大连, 116023; Email: zhmliang_mail@126.com; 2. 大连理工大学, 港口、海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁大连, 116025)

摘要: 近岸海域潮滩多植被, 这些植被在消散波能、保护海岸线及岸堤免受侵蚀, 特别是调节极端海洋灾害方面发挥了重要的作用。本研究采用有限体积法建立了基于非结构三角形网格的深度平均二维浅水数值模型, 对界面通量的计算采用 Roe 格式, 并引入干湿处理技术解决潮流涨落、风暴潮等陆地入侵产生的动边界问题。植物拖曳力作为源项放入动量方程中来表示植被对水体的阻力作用。首先对孤立波和长周期波在斜坡海岸的传播进行了分析和验证; 其次数值探究 9711 号台风“温妮”过境期间北黄海及渤海海域的风场、气压场, 以及台风对研究海域水位、流场结构的影响; 最后讨论 9711 号台风“温妮”期间辽河口红海滩湿地水域风暴潮陆地入侵、增减水特征。

关键词: 风暴潮; 植被作用; 二维浅水; 渤海及辽河口

1 前言

风暴潮是由于台风、气压骤降、温带气旋等原因形成的一种灾害性自然现象, 表现为海平面的异常升高。一般情况下风暴潮引起的海平面升高并不大, 而当风暴潮恰逢天文潮向近岸运动, 加上地形的影响, 就会造成海平面的急剧上升, 在沿岸地区形成极大的灾害。我国拥有 1.8 万 km 的海岸线, 作为海洋大国, 我国曾多次发生严重的海洋灾害, 其中风暴潮发生频率最高, 造成的损害最为严重。据《2017 年中国海洋灾害公报》数据统计, 风暴潮造成的直接经济损失占全年各类海洋灾害经济损失的 87%, 可见风暴潮的危害十分严重。因此, 迫切需要对风暴潮及其灾害状况进行预测, 这对减少人员伤亡和降低经济损失具有重要的作用和意义。

数值模拟是近年来人们认识和研究水体的一种重要的研究方法。随着数值模拟技术的不断发展, 人们越来越认识到数值模拟的优越性。数值模拟不仅能够模拟自然界水体中水动力和水环境的动态变化过程, 还能发现一些未被探知的物理现象, 对水体存在的问题进

基金项目: 国家自然科学基金(51879028); 辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201725)

作者简介: 张明亮(1976-), 男, 黑龙江海林人, 博士, 教授, 主要从事波流植物相互作用研究。E-mail: zhmliang_mail@126.com; 电话: 13478986601

行预报,具有一定的前瞻性^[1]。数值模拟可以用于风暴潮以及灾况的预测,在风暴潮研究中也发挥了重要的作用。国内外学者已经开展了很多相关的工作,如荷兰 Delft 水利研究院开发的三维水动力—水质模型 (Delft3D) 模型;美国麻省理工大学的 FVCOM (An unstructured Finite Volume Coastal Ocean Model) 模式也应用于风暴潮的模拟预测。20 世纪 80 年代,Jelesnianski 等^[2]在 SPLASH 基础上进一步发展了新一代二维 SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes) 风暴潮预报模式,该模式可以有效保证近岸复杂地形处的高分辨率,进而更加精确地模拟风暴潮造成的漫滩效应,能够预报风暴潮的陆地侵入范围;于福江等^[3]基于球坐标系建立发展了东海风暴潮预报模型,此模型采用网格嵌套方式来提高局部海域的分辨率,模拟分析了 9216 号风暴潮在渤海海域的传播;马进荣^[4]等建立了球坐标系二维风暴潮预报模型,用改进的 ADI 法求解该模型,并以渤海、黄海、东海为研究区域,对 9711 号台风进行风暴潮模拟,模拟结果与实测值较为符合。

本文基于质量和动量守恒的浅水方程,建立了非结构三角形网格下的深度平均二维浅水数值模型。应用该模型首先对非破碎孤立波在海滩上的传播以及植被作用下长周期波在海岸上的传播进行了模拟,验证了该模型的准确性;然后对 9711 号台风“温妮”期间黄、渤海区域以及辽河口红海滩湿地的风暴潮进行了模拟研究。

2 浅水水流数学模型

2.1 控制方程

由 Navier-Stokes 方程深度平均的二维浅水方程包括连续性方程和动量方程,其具体形式为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(huu)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\tau_{wx} - \tau_{bx}}{\rho_w} - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - gh S_{px} + f_c hv - f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hvv)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\tau_{wy} - \tau_{by}}{\rho_w} - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - gh S_{py} - f_c hu - f_y \quad (3)$$

上述方程中: t 是时间; x 和 y 是笛卡尔水平坐标; u 、 v 分别代表 x 和 y 方向上深度平均的流速; η 为水位; ν_t 表示动力涡黏性系数; τ_{bx} 和 τ_{by} 分别表示 x 和 y 方向上的底部摩擦项; f_c 是科氏力因子; g 是重力加速度; ρ_w 是水体密度; τ_{wx} 和 τ_{wy} 分别为 x 和 y 方向上的风应力项; S_{px} 和 S_{py} 分别表示 x 和 y 方向上的气压项。

2.2 植被阻力作用

近岸植被对水流的阻碍作用通过在动量方程的源项中添加一个考虑密度、高度、拖曳力系数等植被参数的植被拖曳力项来表示,其具体表达为^[5-6]:

$$f_x = \frac{1}{2} NC_D(h) b_v \min(h_v, h) u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad f_y = \frac{1}{2} NC_D(h) b_v \min(h_v, h) v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

上式中 N 为植被密度； $C_D(h)$ 代表植被深度平均的拖曳力系数； b_v 是植被宽度； h_v 为植被高度。上述植被参数由现场实测或实验室试验获得。

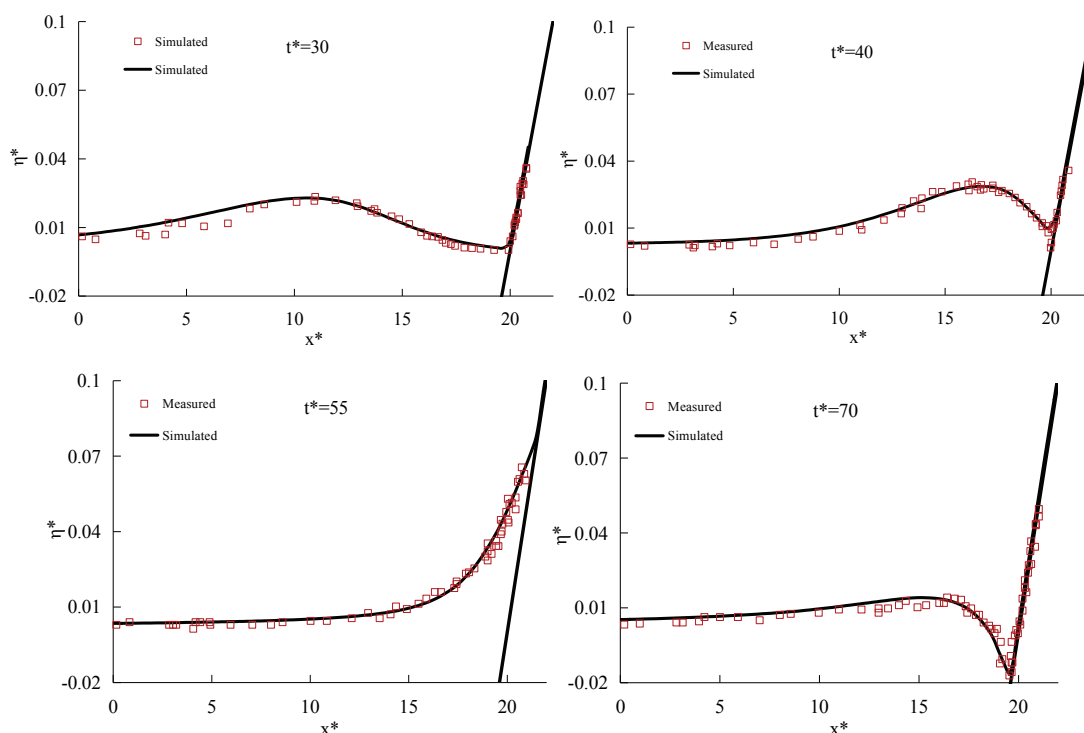
2.3 台风作用

参数化台风风场一般由台风内部风场和环境风场两个矢量场叠加得到。台风内部风场环绕着台风中心形成，呈对称分布状态；与此同时，整个台风作为一个整体在大气中运动，这会产生一个移动环境风场，它与台风的移动速度有关。通过不断调试，最终选择Jelesniansca 65 台风模型计算台风气压场和风场。考虑到以经验公式为基础的台风模型并不能很好地模拟距离台风较远海域的台风风场和气压场，因此必须考虑背景风场的影响，本研究中背景台风数据由亚太数据研究中心获得。整个海域的台风风场由台风模型计算的台风风场和背景风场耦合得到。

3 数值模拟

3.1 非破碎孤立波在斜坡海滩上的爬坡

孤立波在近岸水域的传播及伴随的爬坡在近岸水动力中扮演着十分重要的角色，本研究基于深度平均的二维浅水模型来研究非破碎孤立波在斜坡海滩上的爬坡和衰退过程^[7]。该试验水槽地形由平底河床和 1:19.85 的斜坡构成。孤立波从左侧开边界进入水槽并向右侧斜坡传播，根据一阶孤立波理论定义其水面高程和速度^[8]。该算例水深 $h_0=1\text{m}$ ，计算域由长度为 0.02 m 的三角形网格组成，时间步长设置为 0.001 s，最小水深设置为 0.0001 m，底床曼宁系数参数化为 0.01。为了方便比较，数值结果以无量纲化的形式进行表达： $x^*=x/h_0$ ， $\eta^*=\eta/h_0$ 和 $t^*=t\sqrt{g/h_0}$ 。 H_w 为波高，图 1 展示了 $H_w/h_0 = 0.0185$ 非破碎孤立波在斜坡上爬坡和退水对比。入射孤立波在早期阶段 ($t^*=50$ 之前) 沿斜坡爬升，大约在 $t^*=55$ 时达到最大爬坡高度，最大爬坡高度可达 0.078 左右；随后出现退水，在 $t^*=70$ 时退到 $\eta^*\approx -0.017$ 处，形成了水位“凹陷”。综上所述，模型模拟结果与实验数据吻合良好，该模型可以准确地预测孤立波在斜坡海滩上的传播。

图1 $H_0/h_0 = 0.0185$ 非破碎孤立波在 1:19.85 斜坡上爬坡和退水对比

3.2 长周期波在植被海滩上爬升

本算例模拟了长周期波在植被海滩上的爬坡和波能衰减过程,该试验在 Saitama 大学实验室完成^[9]。植被由直径为 0.005 m 的木制圆柱体代替,植被密度设为 2200 株/ m^2 ,植被拖曳力系数 C_D 参数化为 2.5。周期为 20 s、波高为 0.16 cm 的入射正弦波从右侧开边界(水深为 0.44 m)进入计算海域,并向左侧传播到斜坡海滩上。为了探究长周期波在植被海滩上的演进,在 $B_g = 0\text{m}$ 和 0.4 m 的工况条件下沿水槽的中心位置依次布设 6 个测点(G1-G6)来测量不同时刻的水位值;在 $B_g = 0.07\text{m}$ 的工况条件下沿植被区后 G6 所在横截面再次布设 6 个测点测量不同时刻的流速值,植被分布以及测点布局见图 2。

计算域由长度为 0.01 m 的均匀三角形网格组成,时间步长为 0.002s,干湿床的临界值设置为 0.001 m,曼宁系数为 0.012。图 3 为长周期波在有无植被工况条件下波高、波谷和波峰实测值和模拟值的对比。由图 3 可知,在无植被工况条件下长周期波的波高由于浅化而逐渐增加,而植被的存在能够有效衰减波高的增加,其中 G6 点(植被区后)的衰减率可达到 38.96%;此外植被的阻碍作用还可以减小长周期波的最大爬坡。图 4 显示了植被区后和非植被区后($B_g = 0.07\text{m}$)流速的比较,非植被区后的峰值流速可以达到 0.42 m/s,是植被区后峰值流速的 3.07 倍。综上所述,本模型可以准确预测长周期波在植被海滩上传播。植被可以有效地衰退长周期波在斜坡海滩上的爬升;然而植被带间断的存在会在间断出口

处产生较大流速，对间断口位置的护岸产生不利影响。

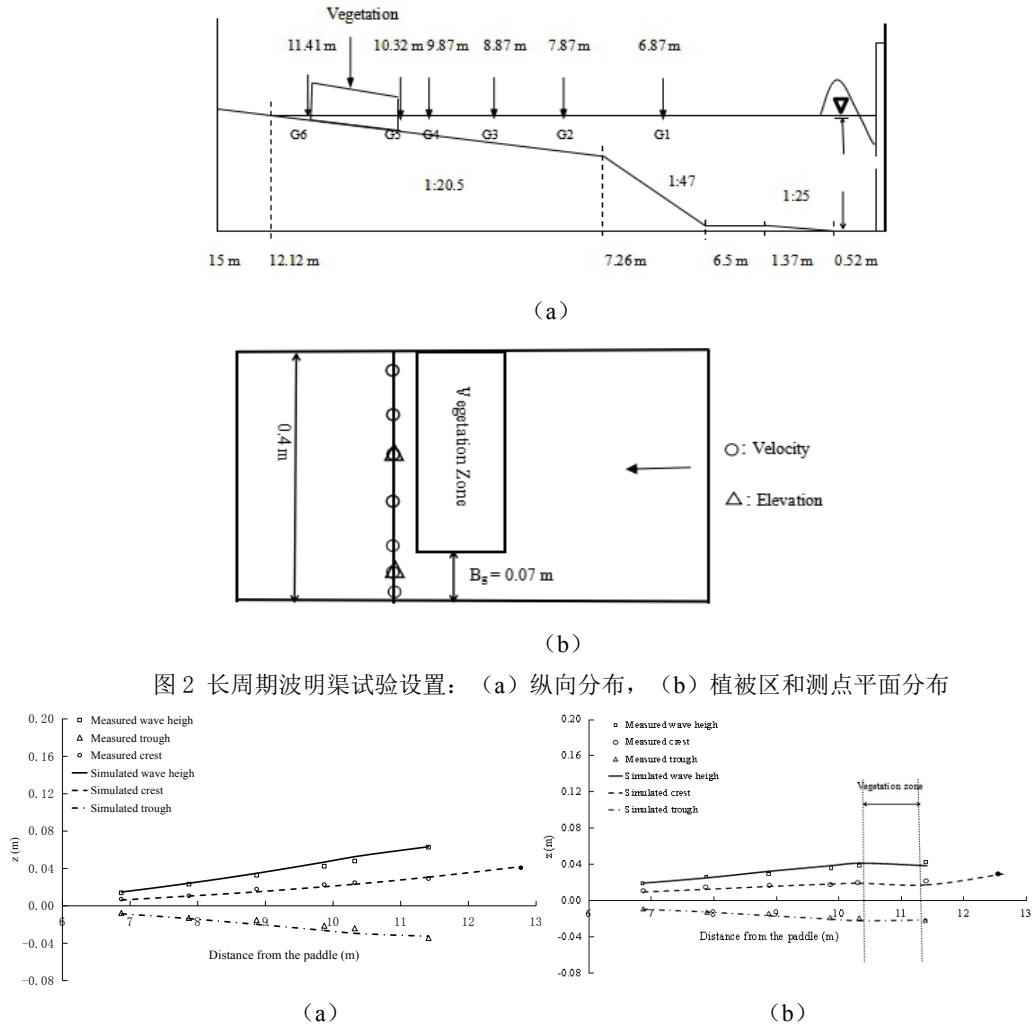


图 2 长周期波明渠试验设置：（a）纵向分布，（b）植被区和测点平面分布

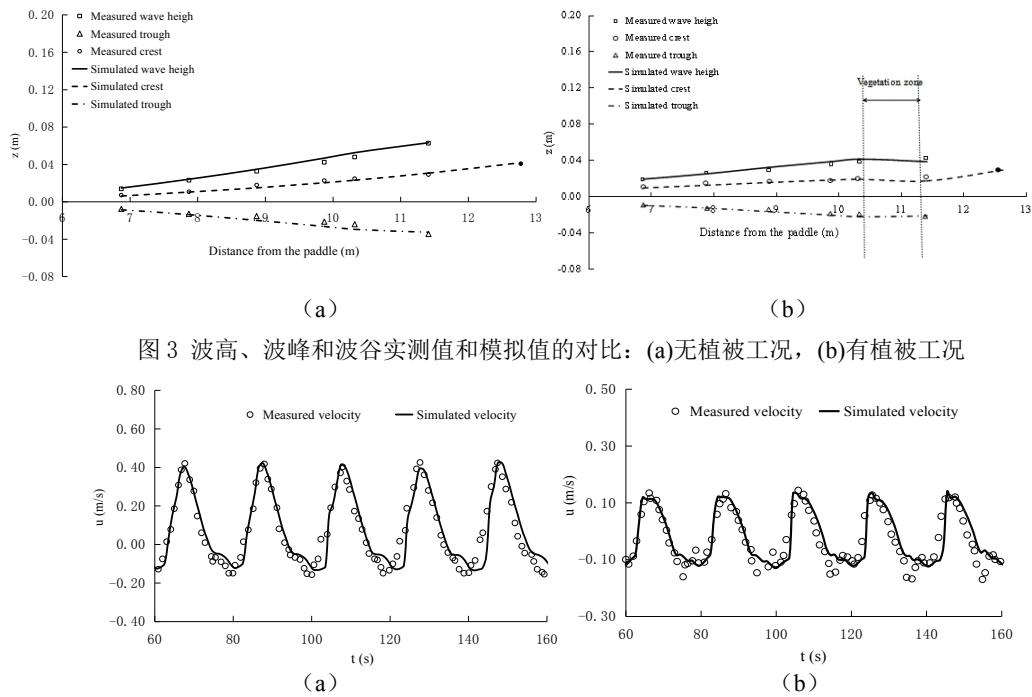


图 3 波高、波峰和波谷实测值和模拟值的对比：(a)无植被工况，(b)有植被工况

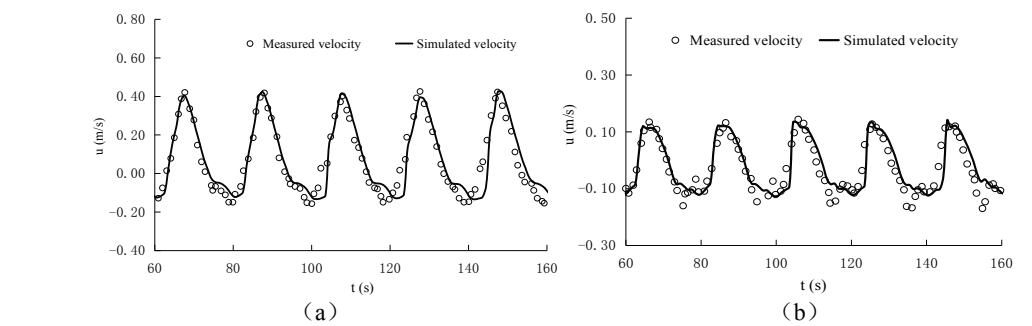


图 4 植被间断后（a）和植被区后（b）中心位置的速度-时间序列

3.3 “温妮”台风期间风暴潮在黄、渤海区域的数值模拟

1997年8月10日9711号台风“温妮”在西北太平洋洋面上生成后往中国沿海移动，随后台风强度不断增强。“温妮”台风于18日21时30分在浙江温岭市石塘镇沿海登陆，近中心最大风力可达54 m/s，然后转向东北移动横穿山东，20日17时在黄河三角洲的羊角沟一带入渤海，21日凌晨在辽宁营口市再次登陆，继续向东北移动。

在该算例中，计算域为黄海北部和渤海全部，其地形和测点分布见图5。数值模式基于有限体积对浅水方程进行离散，采用非结构化三角形网格来更好地拟合变化复杂的岸线和地形，非结构化网格单元共计46445个，外海网格空间步长约为9700 m，近岸网格空间步长约65 m。数值模式采用显格式，时间步长取0.5 s，底床曼宁糙率系数为0.014。考虑到台风过程给当地带来的降水，上游河流的入流边界给定来袭台风当月最大径流量。图6给出了模型模拟的“温妮”台风期间SZ36测站的台风风速与实测值的比较。“温妮”台风期间，SZ36测站的最大台风风速可以达到13.30 m/s，较为准确地模拟到最大台风速度，模拟的风速变化趋势与实测值大致相同。图7对SZ36点模拟流速、流向和实测值进行了对比，该点模拟的最大流速为0.66 m/s，模拟值与实测值的相位基本符合，振幅误差范围较小，模拟结果基本合理，在可接受的结果范围内。图8为9711“温妮”台风期间天津港模拟风暴潮增水与实测值的对比，天津港在1997年8月20日6:00左右达到增水极值，此时最大增水可达2.06 m。图9为1997年8月20日6:00时刻北黄海及渤海风场、气压场和风暴潮增水图，从图9中可以看出，此时台风中心刚刚进入渤海海域，在持续的东北向台风作用下，在黄骅港-天津港-曹妃甸附近海域出现最大增水，台风带来的增水作用向东逐渐减小。总体而言，本研究的台风预报和实测值吻合较好。

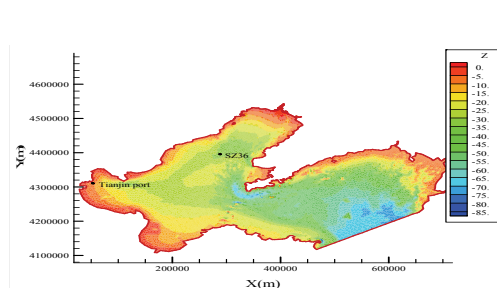


图5 计算区域地形及测站分布

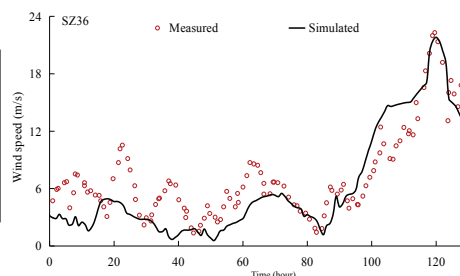


图6 SZ36 站点实测和模拟台风风速比较

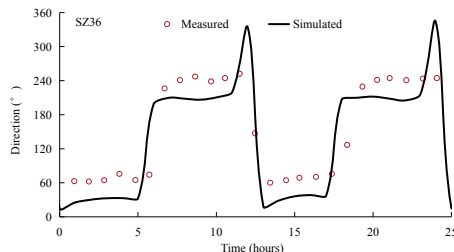
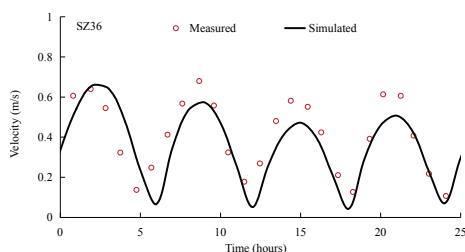


图7 SZ36 站点实测和模拟流速、流向的对比

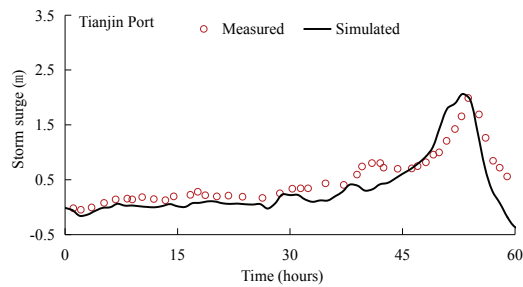


图 8 9711 “温妮” 台风期间实测和模拟风暴潮对比

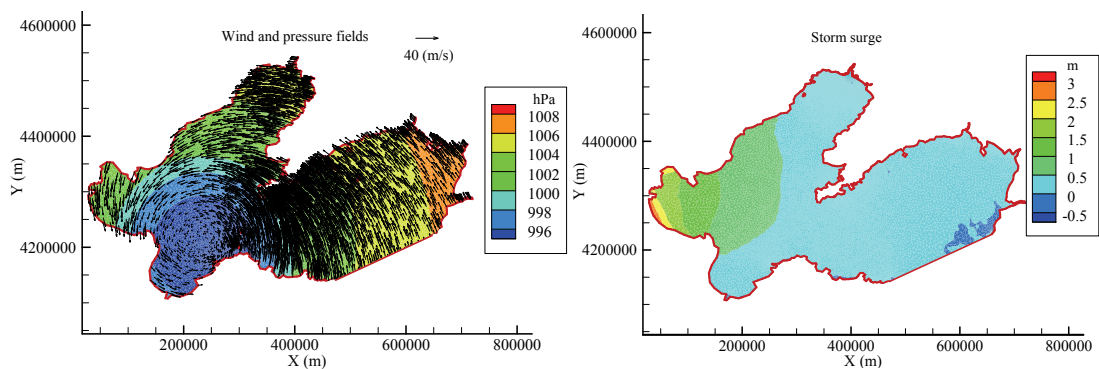


图 9 1997 年 8 月 20 日 6:00 北黄海及渤海风场、气压场和风暴潮增水图

3.4 “温妮” 台风期间风暴潮在红海滩水域的传播

湿地对近岸海域以及河口的水动力特性发挥着重要作用，它能够减少风暴潮、海水入侵以及海岸侵蚀等带来的危害。湿地植被对风暴潮及其引起的巨大波浪有着明显削弱作用，能够降低波浪的传播速度，从而有效地保护海岸，减少风暴潮对海岸造成的破坏。因此，对湿地风暴潮的数值模拟研究具有很重要的意义。本研究对“温妮”台风期间辽河口红海滩湿地的风暴潮进行模拟研究。根据 2017 年遥感影像和现场调查发现：辽河口红海滩湿地主要植被为翅碱蓬。根据现场实测将翅碱蓬植被相关物理参数定义如下：宽度为 0.002 m，密度为 250 株/m²。考虑到翅碱蓬为半刚性植被，植被拖曳力系数参数化为 0.3。

图 10 为辽河口红海滩水域范围以及测点的分布位置。图 11 为有无台风工况条件下红海滩湿地海域两个模拟点的水位历时变化（起算时间为格林尼治时间 1997 年 8 月 14 日 4 点）。从图 10 中可以看出，当台风中心经过辽河口海域后，在向岸风和逆气压的综合作用下，G1 和 G2 模拟点涨潮时间在 T = 134 h 到 T = 178 h 时间段内潮流到达时间有所提前；G1 模拟点在这一时间段内相应的滞水时间分布由 21 h 增加到 23 h；G1 模拟点和 G2 模拟点在 T = 159 h 左右出现最大增水，增水值分别为为 2.34 m 和 2.86 m，模拟结果很好的反映了台风影响下红海滩水域海水的传播和运动情况。



图 10 红海滩水域模拟点分布

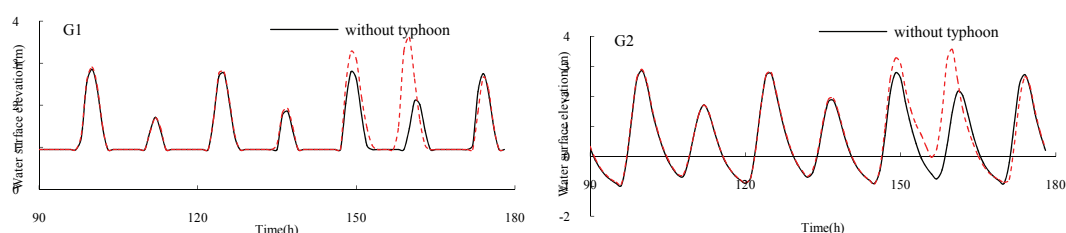


图 11 有无台风工况条件下红海滩水域模拟点水位对比

4 结论

本研究基于深度平均二维浅水模型模拟了孤立波和长周期波在斜坡海滩上的传播,验证了该模型有较高的模拟精度,同时也能较好的处理干湿边界的问题。在此基础上模拟了9711号台风“温妮”在北黄海和渤海的运动过程,以及台风过境期间北黄海及渤海海域的增减水状况;探究了9711号“温妮”台风过境期间红海滩水域的潮流变化,结果表明:“温妮”台风中心过境后,在强大的向岸风和逆气压作用下红海滩水域滞水时间有所增加,并出现明显增水;该水域潮流陆地淹没范围在台风作用下明显扩大,淹没区内流速显著增加。综上所述,本研究实测值和模拟结果都比较一致,因此所建模型能够良好地模拟台风及风暴潮的传播。

参 考 文 献

- 1 张明亮. 近海及河流环境水动力数值模拟方法与应用[M].北京: 科学出版社, 2015.
- 2 Jelesnianski C P, Chen J, Shaffer W A. SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes [R]. NOAA Technical Report NWS 48, 1992.
- 3 于福江, 张占海. 一个东海嵌套网格台风风暴潮数值预报模式的研制与应用[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(4): 23-33.
- 4 马进荣,张金善,宋志尧.渤、黄、东海海域 9711 号风暴潮数值模拟[J].海洋通报, 2008, 27(06): 15-19.
- 5 Tang J, Shen S D, Causon D M, Qian L, Mingham CG. Numerical study of periodic long wave run-up on a rigid vegetation sloping beach [J]. Coastal Engineering, 2017, 121: 158-166.

- 6 Beudin A, Kalra T S, Ganju N K, Warner J C. Development of a coupled wave-flow-vegetation interaction model [J]. Computer Geoscience, 2017, 100: 76-86.
- 7 Geernaert G L. On the importance of the drag coefficient in air-sea interactions [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 11 (1):19-38.
- 8 Zhang M, Zhang H, Zhao K, Tang J, Qin H. Evolution of wave and tide over vegetation region in nearshore waters. Ocean Dynamics, 2017, 67 (8): 973-988.
- 9Thuy N.B, Tanimoto K, Tanaka N, Harada K, Iimura K. Effect of open gap in coastal forest on tsunami run-up-investigations by experiment and numerical simulation [J]. Ocean Engineering, 2009, 36: 1258-1269.

Numerical Simulation of Storm surge process in Bohai Sea and Liaohe Estuary Wetland

JI Yong-peng¹, ZHANG Hong-xing¹, WANG Yi-ni¹, XU Tian-ping¹, ZHANG Ming-liang^{1*}

(1. Dalian Ocean University, School of Ocean Science and Environment, Dalian, Liaoning, 116023; 2. Dalian University of Technology, State key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian, Liaoning, 116025)

Abstract: Coastal tidal flats are covered with vegetation, which play an important role in dissipating wave energy and protecting coastline and bank from erosion, especially in regulating extreme marine disasters. In this paper, a depth-averaged two-dimensional shallow water numerical model based on unstructured triangular meshes is established by using the finite volume method. The Roe scheme is used to calculate the interfacial flux, the Roe approximate Riemann solver coupled with drying-wetting boundary technique is proposed to evaluate the interface fluxes and track the moving shoreline caused by the land intrusion of tsunamis as well as the evolution of tidal current. The drag force induced by vegetation is added to momentum equations as internal source to express vegetation effects on flows. Firstly, the propagation of solitary wave and long-period wave along the slope coast is analyzed and verified. In typhoon simulation, Typhoon Jelesnianski65 model is selected to predict typhoon wind field and atmospheric pressure field, and the influence of background wind field is considered at the same time. The wind field, atmospheric pressure field and the influence of typhoon 9711 on the water level and flow field structure in the North Yellow Sea and the Bohai Sea during the transit of Typhoon 9711 are investigated. Then, the key points are studied in the storm surge land invasion, variation of tidal level and the characteristics of storm surge in the Red Beach wetland of Liaohe estuary during 9711 Typhoon "Winnie".

Key words: Storm surge; Vegetation; Two-dimensional shallow water; Bohai Sea and Liaohe Estuary