

基于非结构网格的波流耦合数值模式研究*

夏波^{1,2} 张庆河¹ 蒋昌波²

(1. 天津大学建筑工程学院 天津 300072; 2. 长沙理工大学水利工程学院 长沙 410114)

提要 本文采用 ADCIRC 模型和 SWAN 模型, 建立了一个基于非结构化网格的波流耦合数值模式, 风浪计算和潮汐风暴潮计算均采用同一套三角网格, 对复杂岸线和建筑物布置均有较好的描述, 且避免了模型插值, 提高了计算效率和精度。利用该模型对渤海湾西南海域几次强风过程中的风浪和潮汐风暴潮进行了研究, 通过实测资料对该模型进行了验证, 结果表明该模式具有较高的精度, 能较好地描述风浪、潮汐风暴潮的传播演变及其相互作用, 可应用于风浪与潮汐风暴潮的模拟计算。

关键词 波流耦合数值模式; 非结构网格; 风浪; 潮汐风暴潮

中图分类号 P731.22

风浪和风暴潮是近岸海域最常见的两种现象, 是岸滩演变、海港和海岸工程最重要的动力因素和作用力, 由于受相同的作用力(风)控制, 因此在风暴过程中, 风暴潮与风浪之间通过不同的机制互相作用, 体现在如下几个方面: 潮位和流场的时空变化将影响波浪的传播变形规律及破碎位置, 而波浪的传播变形所引起的辐射应力梯度是产生近岸增减水及沿岸流的重要因素, 波浪的成长状态会改变海面的粗糙度进而影响表面风应力, 改变风增水的幅度和风生环流结构。因此, 只有全面考虑二者之间的相互作用, 建立波流耦合模式(朱良生等, 2001; 尹宝树等, 2001; 林祥, 2002¹⁾; 林祥等, 2002; Cobb *et al.*, 2002; 桂祁军等, 2005; 夏波, 2006²⁾; 李昌良等, 2009)才有可能准确地模拟出真实的水动力条件和波浪条件, 为其他研究提供基础。

以往的风浪型和潮汐风暴潮模型分别具有不同的网格类型和时空分辨率, 给其耦合带来一定的困难, 最普遍的做法通常为采用多层嵌套网格来提高风浪数值模式的空间分辨率, 通过插值进行风浪模式和潮汐风暴潮模式之间的数据交换, 实现波流耦

合(Cobb *et al.*, 2002; 夏波, 2006)。但是, 一方面, 多层嵌套网格和数据插值必定会降低模式的计算效率, 另一方面, 插值过程会降低数据的精度, 影响最终的计算结果。而随着基于非结构网格的风浪模式(Zijlema, 2010; Dietrich *et al.*, 2011)的出现, 使得采用相同的非结构化网格来建立波流耦合模式成为可能, 并可提高模式的计算效率和计算精度。

本文采用 ADCIRC 模型和 SWAN 模型, 建立了一个基于非结构化网格波流耦合数值模式, 由于采用非结构化网格, 模式能较好的描述地形及岸线对计算结果的影响, 波浪计算和潮汐风暴潮计算采用同一套网格避免了模型间的插值, 因此提高了计算效率和精度。利用该模式, 针对渤海风浪—潮汐风暴潮进行了模拟计算, 探讨了其相互作用的机制。

1 潮汐风暴潮模式

为了合理描述受各种复杂动力因素影响的近岸流场, 研究采用引入表面风应力和波浪辐射应力影响的二维潮流计算模型 ADCIRC(Luetlich, 2000), 来计算近岸海域在强风期间的流场。ADCIRC 模型采用

* 国家自然科学基金资助项目, 51309036 号; 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金项目, 2008SS07 号; 湖南省教育厅资助课题, 10C0392; 湖南省重点学科资助。夏波, 讲师, E-mail: steded@126.com

1) 林祥, 2002. 近岸海洋动力要素相互作用的数值模拟及其对物质输运影响的研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2

2) 夏波, 2006. 风暴潮过程中的波流耦合数值模式研究. 天津: 天津大学硕士学位论文, 1—3

收稿日期: 2011-11-12, 收修改稿日期: 2012-02-23

有限元方法进行求解,利用三角形网格进行离散,对岸线以及近岸地形变化有着很好的描述。在直角坐标系中,其描述二维浅水流动的控制方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \\ + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \\ + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \end{aligned} \quad (3)$$

其中 t 为时间, ζ 为从平均海平面起算的水位高度, U 和 V 分别表示 x 和 y 方向垂向平均流速, H 为总水深, f 为科氏参数, p_s 为表面大气压力, ρ_0 为水密度, g 为重力加速度, $(\eta + \gamma)$ 表示牛顿引潮势和固体潮作用, τ_{sx} 和 τ_{sy} 分别表示表面风应力和波浪辐射应力在 x 、 y 方向的分量, τ_{bx} 和 τ_{by} 、 D_x 和 D_y 、 B_x 和 B_y 分别代表底部切应力、扩散项以及斜压梯度项的 x 和 y 向分量。

表面风应力采用如下公式计算

$$\bar{\tau} = \rho_a C_d |\bar{W}| \bar{W}$$

其中 ρ_a 为空气密度, \bar{W} 为风速, C_d 为风摩阻系数, 风摩阻系数主要取决于风况和其他因素, ADCIRC 模型中采用表达式 $C_d = 0.001 \times (0.75 + 0.067U)$ 进行计算, 此外, ADCIRC 提供风应力输入的数据接口, 可选用其他公式计算风应力后再外部输入。

τ_{sx} 和 τ_{sy} 含有的波浪辐射应力分量采用如下公式计算

$$F_x = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right] \quad F_y = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right]$$

ADCIRC 模型底部应力提供三种方案, 即线性方案、二次方案和混合方案。一般来说, 在潮汐风暴潮数值模拟中, 底部应力均采用二次方案, 将底部应力视为速度的函数, 采用 $\bar{\tau}_b = \rho C_f |\bar{U}| \bar{U}$ 计算底部切应力, 其中 ρ 为水密度, \bar{U} 为流速, C_f 为底摩阻系数, 这是大部分模型计算底部摩擦力通常采用的形式。

计算初始条件为 $u = v = 0$ 和 $\zeta = 0$, 开边界采用水

位边界条件, 闭界条件取法向流速为零, 浅滩处则利用基于干湿网格的动边界技术进行处理。

由以上表达式可见, 风、浪对水位和流场变化的影响在方程中都得到了体现, 因此该模型可以较好地描述二维潮流、风增水、风吹流、波生流及其相互作用, 该模型在我国渤海海域潮汐风暴潮模的应用效果较好(曹永华, 2003)¹⁾。

2 波浪模式

波浪模拟采用第三代风浪模型——SWAN, 模型采用动谱平衡方程描述风浪生成及其在近岸区的演化过程。在直角坐标系下, 动谱平衡方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (4)$$

其中, $N = N(\sigma, \theta, x, y, t) = E(\sigma, \theta, x, y, t) / \sigma$ 为波作用密度谱, σ 为相对波频, θ 为波向, C_x 和 C_y 为波浪传播速度的 x 和 y 向分量, C_σ 和 C_θ 为 σ 和 θ 空间的波浪传播速度, S 是以谱密度表示的源项, 其具体的物理机制及表达式可参见用户手册(Booij *et al.*, 2010)。

SWAN 模型通过在波作用量守恒方程源项中考虑能量输入和损耗项(底摩擦、破碎、白浪)、波与波之间非线性相互作用, 可以比较全面、合理地模拟波浪的生成及各种近岸传播过程、海域流场的影响等。由于考虑了较多的物理过程, SWAN 模型的结构较为复杂, 另外, 波浪从深水传播至近岸区, 具有不同的时空尺度, 为了提高计算精度, 经常需要减小时间和空间步长, 这样必然会增加存储空间和计算时间。

为了提高运行效率, 本文建立的波浪模式采用非结构化三角网格来精确描述岸线和近岸地形的变化。在空间上采用三角网格进行离散, 所有波浪要素均定义在网格节点上, 采用全隐式有限差分格式对波作用量守恒方程进行离散, 在四个象限中用高斯—塞德尔(Gauss-Seidel method)迭代方法进行求解, 其计算是无条件稳定的, 允许较大的时间步长, 其具体的离散格式参见用户手册(Booij *et al.*, 2010)。

3 波流耦合模式

本文建立的波浪与潮汐风暴潮相互影响的耦合数值模式由改进型 ADCIRC 模型与 SWAN 模型(非结

1) 曹永华, 2003. 二维潮流的浅水紊流模型及其应用. 天津: 天津大学硕士学位论文, 25—37

构网格)组成, 计算流程如图 1 所示, 波浪与潮汐风暴潮的相互作用是通过波浪模型和潮汐风暴潮模型的迭代耦合来实现的, 由于采用相同的计算网格, 模型间不需要插值即可实现数据交换, 大大提高了计算效率, 这一耦合数值模型基本能反映波浪与潮汐风暴潮之间的非线性相互作用。通过实时读写数据文件在计算过程中进行数据的及时交换实现模式的耦合, 交换数据的时间间隔可以自由设置, 本研究设置为 5—10 分钟以充分反映波浪与潮汐风暴潮的相互影响。

考虑波浪对风应力的影响, 本文针对 ADCIRC 的风应力计算程序进行了修改, 耦合模式的表面风应力摩阻系数采用下式进行计算:

$$C_d = \left[\frac{\kappa}{\ln 10 - \ln z_0} \right]^2 \quad z_0 = D_c \times 3.7 \times 10^{-5} \frac{w^2}{g} \left(\frac{C_p}{w} \right)^{-0.9}$$

其中 κ 为卡门常数, z_0 为考虑波浪成长状态影响的粗糙度, D_c 为可调系数, 一般取为 1.0, w 为风速, C_p 为峰频波速。上述风应力公式对波龄的依赖性关系对中等发展的波浪有良好的适应性(Weber, 1994), 通过将这一计算模型引入潮汐风暴潮模型中, 能够合理地描述波浪对表面风应力的影响。

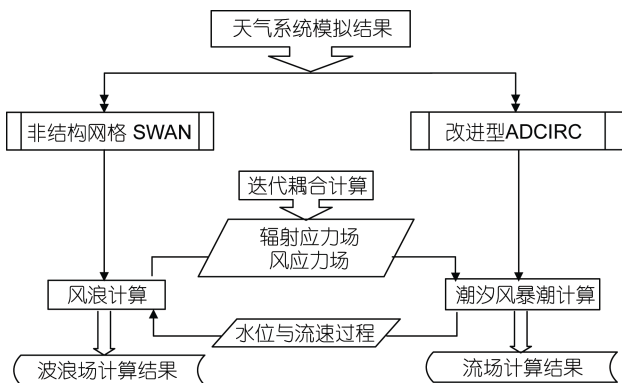


图 1 波流耦合数值模式计算流程

Fig. 1 Flow chart of the wave-current coupled model

4 模式应用

4.1 模型设置与参数

本文将上述建立的波流耦合数值模式应用于渤

海海域, 针对三次典型风暴过程的风浪和潮汐风暴潮进行了分析计算, 三次风暴的时间及相关信息如表 1 所示, 模型采用三角形网格, 网格如图 2 所示, 其最大空间步长约 5000m, 研究的重点区域渤海湾西南岸计算网格最小步长为 100m, 计算区域网格数总计 17584 个, 共有节点 9134 个。

风浪数值模拟设置如下: 计算时间步长为 2 分钟; 方向步长为 5°; 频率计算范围为 0.0521—1Hz; 破碎指标取为 0.75; 由于 Madsen 公式认为底摩擦系数是底床粗糙度与实际波浪条件的函数, 能反映不同底床和波浪条件下的特征, 因此底摩阻公式采用 Madsen 公式进行计算, 粗糙度取为 0.01m; 其他参数均取默认值进行计算。

潮汐风暴潮数值模拟参数设置如下: 计算时间步长为 1s; 潮汐开边界采用调和常数进行确定, 模型闭边界采用滑移边界条件; 风场采用美国大气研究中心(NCAR)利用 QSCAT 卫星测风资料对 NCEP 数据进行再分析的数据, 并利用岸边气象站风资料进行订正; 风应力的计算考虑了波浪成长状态对表面粗糙度的影响; 而底部应力计算采用二次律计算公式, 摩阻系数取为 0.001。

4.2 风浪计算结果

图 3—图 5 分别为上述三次强风过程中的风浪计算结果与实测结果, 测点位于渤海湾西南海域的黄骅港附近, 由图可以看出, 计算与实测波高是比较接近的, 采用本文建立的耦合模式计算所得波高的绝对误差分别为 0.15m、0.12m 和 0.19m, 而采用非耦合模式计算的绝对误差则为 0.19m、0.18m 和 0.27m, 由此可见, 耦合模式能更好地描述渤海湾西南海域风浪发展演变过程。由 3 次不同风浪过程的风浪成长规律来看, 渤海湾西南岸水域风浪成长历时较短, 在向岸强风作用下短时间可形成大波, 浪高大小取决于风速大小, 波浪的成长与衰减与风速变化呈较好的相关关系(如图 6 所示), 其相关系数为 0.81。此外, 由于岸坡平缓, 渤海湾西南海域波浪演变受水位变化影响明显, 涨潮期风浪成长速度相对较快, 如图 3 所示, 耦合模式的波高计算结果随水位上涨而增大, 随

表 1 风浪—潮汐风暴潮模拟过程计算时段及统计值

Tab.1 The statistics of the maximum wave height and maximum surge

计算时段	最大增水	最大波高	波高测量位置
2003 年 11 月 5 日 17:00—7 日 6:00	1.61m	3.0m	117.9873°E, 38.3711°N
2004 年 11 月 23 日 0:00—27 日 0:00	1.52m	2.7m	118.0086°E, 38.3709°N
2004 年 12 月 21 日 0:00—25 日 0:00	1.1m	2.6m	118.0016°E, 38.3709°N

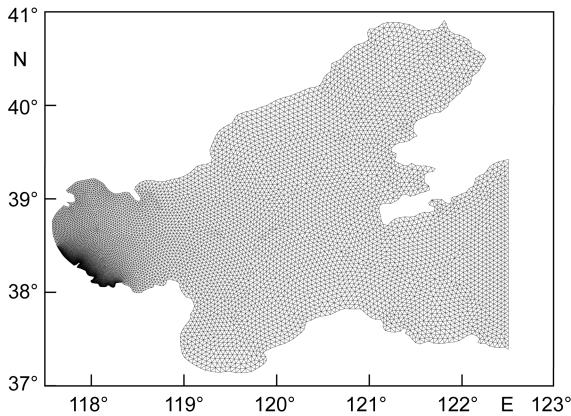


图2 渤海海域风浪及潮汐风暴潮计算网格图

Fig. 2 The mesh of the wind waves and storm surge simulation around the Bohai Sea

水位下降而减小,与实测结果吻合较好。关于水位及流场对风浪传播的影响,夏波等(2006)进行了相关讨论,限于篇幅,本文不再赘述。

4.3 潮汐风暴潮计算结果

图7—图9为三次强风过程中黄骅港的水位计算结果和实测结果,采用本文建立的耦合模式计算误差分别为0.08m、0.08m和0.10m,而采用非耦合模式的计算误差则为0.13m、0.12m和0.11m,耦合模式具

有较好的模拟精度,且对风暴增水的极值有着更好的描述。由于渤海湾为一向东开口呈喇叭形状的半封闭海湾,岸坡极其平缓,在强烈的偏东向风的带动下,大量海水涌入渤海,冲向渤海湾西岸,使得该海域海面水位急剧增加,耦合模式较好地反映了实际增减水过程。由于向岸大风的增水效应,使得近岸水域水深增加,有利于波浪的发育和成长,风浪的影响范围增大进而对潮汐风暴潮的水动力特性产生影响,而风浪的成长状态又改变了海面粗糙度,增大了风应力对风暴潮的影响,耦合模式对于风暴潮的最高潮位吻合更好,因此,在模拟近岸水域潮汐风暴潮时应当合理考虑波浪的影响。

5 结论

本文基于非结构网格,采用 ADCIRC 模型和 SWAN 模型建立了一个波浪—潮汐风暴潮耦合模式,耦合模式采用相同的计算网格,避免了空间插值带来的误差,并提高了计算效率,验证表明该耦合模式具有较高的模拟精度,将该耦合模式应用到我国的渤海海域,得到如下结论:(1)耦合模式能较好地模拟风浪的成长演变过程以及水位及流场对风浪传播的

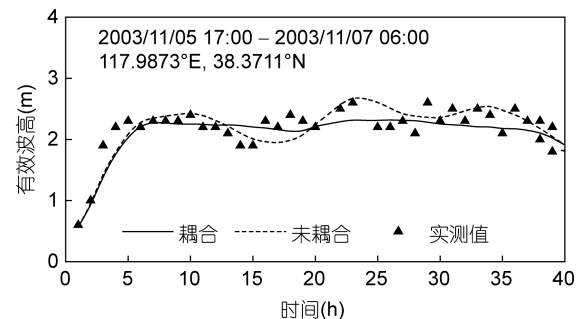
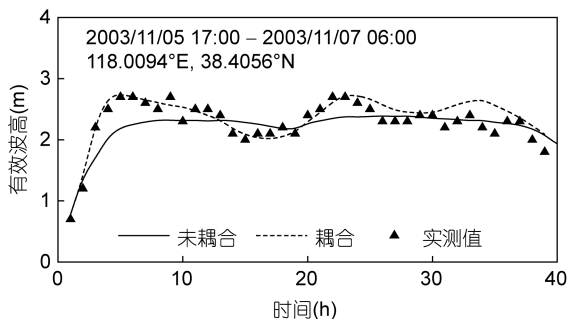


图3 有效波高计算结果与实测值比较

Fig. 3 Measured and simulated H_s

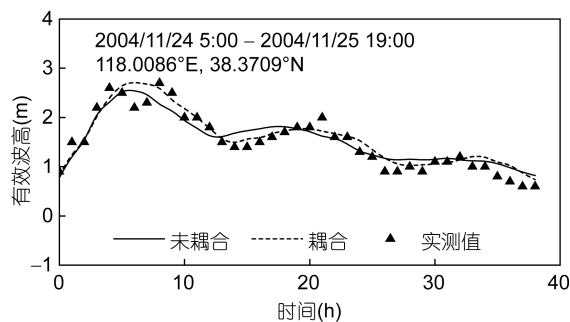


图4 有效波高计算结果与实测值比较

Fig. 4 Measured and simulated H_s

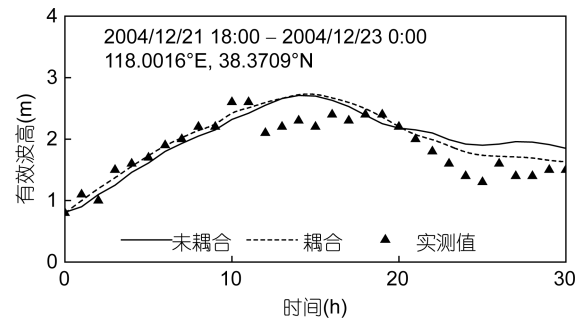


图5 有效波高计算结果与实测值比较

Fig. 5 Measured and simulated H_s

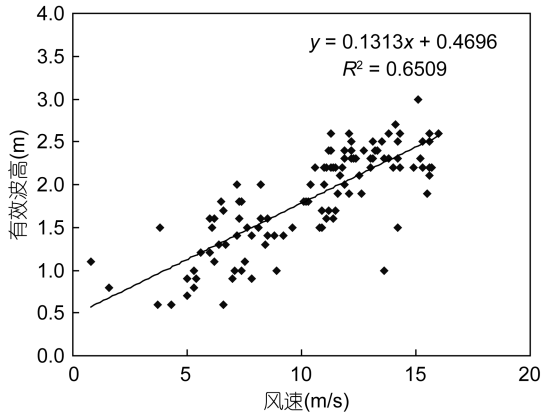


图 6 有效波高与风速的相关关系

Fig. 6 The relationship of the significant wave height and wind speed

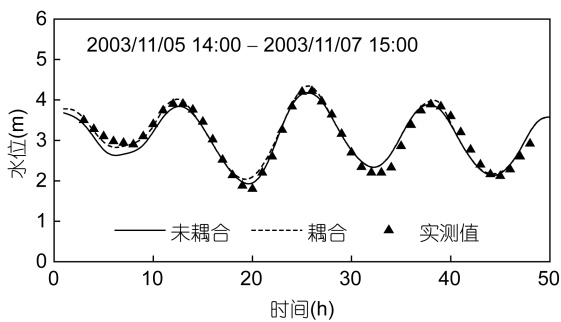


图 7 潮位计算结果与实测值比较

Fig. 7 Measured and simulated water levels

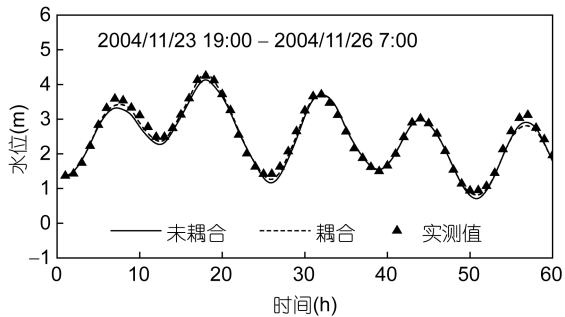


图 8 潮位计算结果与实测值比较

Fig. 8 Measured and simulated water levels

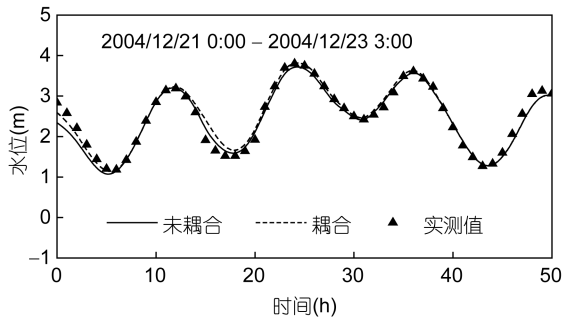


图 9 潮位计算结果与实测值比较

Fig. 9 Measured and simulated water levels

影响, 采用非结构化的三角形网格, 能有效提高近岸水域风浪计算的精度。(2)耦合模式能较好的模拟风暴过程中的实际增减水过程以及风浪对水位及流场的影响。(3)在近海风浪及潮汐风暴潮的模拟中, 波流耦合数值模式能有效的改进浅水水域波浪与潮汐风暴潮的模拟精度, 在近岸动力要素模拟中可选用耦合模式。(4)基于非结构化网格的波流耦合模式, 由于采用相同的三角形网格, 能精确描述岸线及建筑物对水动力要素的影响, 提高了耦合模式的时空分辨率。

参 考 文 献

尹宝树, 王涛, 侯一筠等, 2001. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究. 海洋与湖沼, 32: 109—116

朱良生, 宋运法, 邱章, 2001. 热带风暴下波浪、潮汐、海流耦合数学模型在海洋工程中的应用. 第十届中国海岸工程学术讨论会论文集, 北京: 海洋出版社, 211—217

李昌良, 梁丙臣, 谢媛媛, 2009. 荣喜近岸区波流耦合作用下的流场模拟. 海洋科学, 33: 99—105

林祥, 尹宝树, 侯一筠等, 2002. 辐射应力在黄河三角洲近岸波浪和潮汐风暴潮相互作用中的影响. 海洋与湖沼, 33: 615—621

桂祁军, 沙文钰, 2005. 黄渤海春季浪流耦合数值模拟. 解放军理工大学学报(自然科学版), 6: 71—75

夏 波, 张庆河, 2006. 水动力时空变化对近岸风浪演化的影响—以渤海湾西南岸为例. 海洋通报, 25: 1—8

Booij N, Haagsma I J G, Holthuijsen L H *et al*, 2010. SWAN User Manual. SWAN Cycle III version 40.81. <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan>

Cobb M, Blain C A, 2002. A Coupled Hydrodynamic-Wave Model for Simulating Wave and Tidally-Driven 2D Circulation in Inlets. *Estuarine and Coastal Modeling*. Proceedings of the Seventh International Conference, ASCE, Reston, VA, 725—744

Dietrich J C, Zijlema M, Westerink J J *et al*, 2011. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58: 45—65

Luettich R A, Westerrink J J, 2000. ADCIRC User Manual: A (Parallel) Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters. http://www.marine.unc.edu/C_CATS/adcirc

Weber S L, 1994. Statistics of the air-sea fluxes of momentum and mechanical energy in a coupled wave-atmosphere model. *Journal of Physical Oceanography*, 24: 1388—1398

Zijlema M, 2010. Computation of wind—wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. *Coastal Engineering*, 57: 267—277

A COUPLED WAVE—CURRENT NUMERICAL MODEL ON UNSTRUCTURED GRIDS

XIA Bo^{1,2}, ZHANG Qing-He¹, JIANG Chang-Bo²

(1. *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072*; 2. *School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, 410114*)

Abstract Using unstructured grids, we developed a numerical wave-tide-current coupling model applying SWAN and ADCIRC schemes. To fit the boundary and structures better, the two schemes are run on the same unstructured grids. Thus, information is passed without spatial interpolation; and so the efficiency and accuracy of the coupled model are improved significantly. The coupled model is then applied to study wind waves and storm tides in the Bohai Sea during several strong wind cases. The model is verified against measured data. The results show that the model has high accuracy and can be used to simulate waves, circulation, and their propagation from deep water to nearshore systems.

Key words wave-current coupled model; unstructured grids; wind waves; storm surge