

荣喜近岸区波流耦合作用下的流场模拟

李昌良^{1,2}, 梁丙臣³, 谢媛媛³

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川大学, 四川 成都 610065; 3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:一方面将波浪对底部剪切应力、表面拖曳力系数、辐射应力以及表面混合长度的影响引入至 COHERENS。另一方面又将水动力模型 COHERENS 和第三代波浪模型 SWAN 耦合, 使两模型能够随时互相交换水流、水位以及波浪信息, 最终获得波流耦合模型 COHERENS-SWAN 并将其应用于荣喜近岸区波流共同存在情况下的波流作用模拟研究。计算所得的流速、流向和水位与实测数据吻合较好。

关键词: 荣喜近岸区; 波生流; 波流耦合; 辐射应力

中图分类号: P731.24

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2009) 07-0099-08

通常, 近岸区波浪、海流同时存在, 波流之间相互作用显著, 尤其是在水深较浅的区域。近年来, 有很多关于近岸区波流耦合作用下的数值研究报道^[1-13], 这些研究极大地推进了波流耦合研究进展。本研究将更为适合于近岸区的第三代波浪预报模式 SWAN 与三维水动力生态耦合模式 COHERENS 耦合在一起, 进而获得能够考虑波流相互作用的且能同时模拟水流、波生流和波浪的数值模型 COHERENS-SWAN。

SWAN 作为 COHERENS 的子程序。一方面, SWAN 从 COHERENS 获取时空变化的流速和水位信息。另一方面, COHERENS 则通过调用 SWAN 来得到波高、周期、波向等波浪参数, 将波浪对底部剪切应力、表面拖曳力系数、辐射应力以及表面混合长度的影响引入至 COHERENS。波流模式通过如此的交换数据实现耦合, 并用其模拟波流耦合作用下的流场和浪场。

荣喜近岸区水深较浅, 波浪作用显著。此外, 该区域的潮流也很强。因此, 模拟荣喜近岸区流场则必须考虑波、流的耦合作用, 本研究通过作者建立的波流耦合模型 COHERENS-SWAN 模拟荣喜近岸区波流耦合作用下的流场。

1 模型描述

1.1 概述

COHERENS 模式是一个水动力-生态耦合模式, 用于近岸区、河口区的水动力及生态数值模拟

研究, 采用了 POM 等模式应用较为成功的过程分裂法, 将快过程表面重力波 (正压模式) 和慢过程内重力波 (斜压模式) 分开求解, 先求解正压模式, 然后求解斜压模式, 利用预测-校正法使正压模式得出的流速与斜压模式求出的流速沿水深积分值相等, 以使正压与斜压模式计算所得的相关结果取得一致, 作者仅利用 COHERENS 中的正压模式进行计算。

1.2 控制方程

控制方程包括连续方程和引入波浪辐射应力的动量方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[U(h+\eta)] + \frac{\partial}{\partial y}[V(h+\eta)] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{(h+\eta)} \left[\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right] - \frac{1}{(h+\eta)} (s_x - t_x) - A_{mx} = 0 \quad (2)$$

收稿日期: 2007-09-09; 修回日期: 2009-05-04

基金项目: 国家 973 计划项目 (2002CB412408); 国家杰出青年基金项目 (50325927)

作者简介: 李昌良 (1977-), 男, 山东莱芜人, 讲师, 博士, 从事海洋结构、海岸动力研究, 电话: 13658685848, E-mail: henrylcl@sina.com

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{(h+\eta)} \left[\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right] - \frac{1}{(h+\eta)} (s_y - b_y) - A_{my} = 0 \quad (3)$$

U, V 分别为 x, y 方向沿水深平均的流速分量； η 为平均水面升高； $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ 分别为波浪引起的辐射应力分量； s_x, s_y 分别为 x, y 方向的表面切应力分量； b_x, b_y 分别为 x, y 方向的底部切应力分量； A_{mx}, A_{my} 分别为 x, y 方向的湍流应力分量。

原 COHERENS 仅在底部拖曳力系数中考虑了波浪的影响，而且前提是波浪传播方向与潮流方向一致。作者引入波浪辐射应力、波浪对表面拖曳力系数 C_D^s 、波浪对表面混合长度的影响，同时也在底部拖曳力系数 C_D^b 中考虑波浪夹角不为零的影响。

SWAN 内波浪的控制方程采用波作用密度谱方程 $N(\omega, \theta)$ 而不是波能量方程。原因是水流存在会导致波流间的能量交换而不守恒^[14]。该模式中控制方程采用考虑了流存在情况下成立的波浪作用密度谱方程，波浪作用谱 N 是通过将波浪能量谱 E 与相对频率 ω/Ω 相除得到的， $\frac{E}{\omega/\Omega}$ ， ω/Ω 分别是相对频率、波向。波作用密度谱控制方程在笛卡尔坐标下表达式为^[16]：

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \omega} c_\omega N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\omega} \quad (4)$$

其中 N 为波浪作用谱， $c_x, c_y, c_\omega, c_\theta$ 分别是 x, y, ω, θ 向的空间传播速度。左边第一项为局地变化项；第二、三项代表波作用在地理空间的传播；第四项是频移项，主要是由水深和流速的变化产生；第五项代表由于水深和流而引起的折射。这几种的传播速度的具体表达式可用线性波浪理论获得。

1.3 波浪影响

1.3.1 表面拖曳力系数 C_D^s

作为自由表面边界条件，风应力 s 通过下式计算：

$$s = \rho_a C_D^s |U_{10}| U_{10} \quad (5)$$

其中 ρ_a 为空气密度； U_{10} 为海面上 10 m 处风速。波浪依赖的表面拖曳力系数采用 Donelan 等^[15] 计算公式：

$$C_D^s = \left(\frac{0.4}{\ln(10 - \ln Z_0)} \right)^2, Z_0 = 3.7 \times 10^{-5} \frac{U_{10}^2}{g} \left(\frac{U_{10}}{C_p} \right)^{0.9} \quad (6)$$

式中， C_p 是波浪峰频对应波速， g 重力加速度（本文中取 9.81）。

1.3.2 波流共存情况下的底部拖曳力系数 C_D^b

作者基于 Signell 等^[16] 提出的波流共存下的底部剪切应力计算方法，Davies 等^[17] 采用了该方法。但这些研究假设波浪传播方向与潮流方向一致，而这与实际有所差异。作者引入波浪夹角的影响。下面给出简要描述：

首先，波浪最大底部剪切应力和波浪摩阻流速 u_{*w} 通过下式确定：

$$u_{*w, \max} = \omega u_{*w}^2 = \frac{1}{2} \omega f_w U_w^2 \quad (7)$$

U_w 为近底波浪轨迹速度，来自于 SWAN 输出，其计算表达式为：

$$U_w = \sqrt{2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\omega^2}{\sinh^2(kh)} E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (8)$$

ω, k, h 分别是波频率、波数、水深。

波浪摩阻系数 f_w 采用式 (9) 计算^[16]：

$$f_w = \begin{cases} 0.13 \left(\frac{k_b}{A_b} \right)^{0.4}, & \text{if } \frac{k_b}{A_b} < 0.08 \\ 0.23 \left(\frac{k_b}{A_b} \right)^{0.62}, & \text{if } 0.08 \leq \frac{k_b}{A_b} < 1 \\ 0.23, & \text{if } \frac{k_b}{A_b} > 1 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $A_b = U_w / \omega$ 为近底轨迹幅值。物理底部糙率 k_b 与糙率长度 z_0 有关，其关系式为 $k_b = 30z_0$ ，本文 z_0 取值为 0.003 5m。波流共同作用下的摩阻流速 u_{*cw} 计算式如下^[17]：

$$u_{*cw} = \left(u_{*b}^2 + u_{*w}^2 + 2u_{*c} u_{*w} \cos \alpha_c \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中， α_c 为波浪夹角，而水流摩阻流速 u_{*b} 计算式如下：

$$u_{*b}^2 = C_D^b (u_b^2 + v_b^2) = C_D^b u_c^2 \quad (11)$$

采用对数流速断面形状定义明显糙率 κ_{bc} ，表达式如下：

$$u_c = \frac{u_{*b}}{\kappa} \ln \frac{30\sigma H}{\kappa_{bc}} \quad (12)$$

在参考高度 z_r 处求解，参考高度本文取最底层的网格中心点高度。联合(10)与(12)，可得：

$$C_D^b = [\kappa / \ln(30z_r / k_{bc})]^2 \quad (13)$$

根据 Grant 和 Madsen^[18]，明显糙率 k_{bc} 与 Nikuradse 糙率关系如下，

$$k_{bc} = k_b \left(24 \frac{u_{*cw}}{U_w} \frac{A_b}{k_b} \right) \quad (14)$$

其中, $\beta = 1 - \frac{u_{*b}}{u_{*cw}}$ (15)

由于 u_{*cw} 通过(10)与(11)而依赖于 C_D^b 的求解, 所以方程(13)与(14)原则上必须采用循环求解。为在满足工程应用的条件下, 节约更多的时间, 此处采用一个更为简单的办法求解^[19] :

k_{bc} 在初始时刻设为 k_b , C_D^b 利用(13)计算, 此后再根据(14)得到下一步的 k_{bc} , 并将新得到的 k_{bc} 带入(13)式中, 便完成一个时间步的计算, 后面的计算依次采用如此办法便计算得到各个时间步的底部拖曳力系数 C_D^b 。

1.3.3 表面混合长度

本文采用单方程湍流封闭模式 $k-\epsilon$ 计算涡粘系数, 混合长度采用 Xing 等^[20]公式计算, 但作者在表面处考虑了波浪引起的表面混合长度的影响, 具体实施过程与方法如下:

混合长度 l 计算公式如下:

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_b} + \frac{1}{l_s} \quad (16)$$

其中近底处混合长度 l_b 计算公式为:

$$l_b = \kappa (He^{1\sigma} + z_{0b}) \quad (17)$$

表面处混合长度的计算公式采用如下公式^[21] :

$$l_s = \kappa z_w + l_2 = \kappa \times 0.85 H_s + l_2 \quad (\text{考虑波浪影响}) \quad (18a)$$

$$l'_s = l_2 = \kappa (H - \sigma * H + z_{0s}) \quad (\text{未考虑波浪影响}) \quad (18b)$$

其中, H_s 为特征波高, z_w 为波浪相关的表面糙度长度, l_s 为考虑波浪影响的表面混合长度, l_2 (l'_s) 为没有考虑波浪影响的表面混合长度。

2 模型设置

水平向网格间距为 100 m。图 1 为荣喜近岸区水深地形。开边界的水位和流速来自于黄海模型的输出。正压和斜压模型的时间步长分别为 3 s 和 30 s。COHERENS 每 30 min 调用 SWAN 一次且两模型所采用的计算网格一样。从图 1 中可见, 狼牙岛以东近岸区水深梯度较大, 最大水深为 14 m, 位于东南。

3 模拟结论

3.1 波高、周期、水位、流速和流向验证

图 2 为波高、周期的验证情况。图 2 显示了波浪的计算结果也比较理想, 现有的差异可能来自于风场是利用一点的观测资料代替整个海域风场资料、观测仪器的误差以及模拟计算网格点与观测点不重合等因素。比较有耦合效应两种情况, 具有

耦合效应的情况大大改善了较大波高和周期的计算结果, 这一点可参考该图中模拟期的前 6 h 以及 25 到 30 h, 考虑波、流耦合效应的波高与周期都比没有考虑耦合效应的情况增加明显, 更为接近观测结果。因此, 波流耦合效应大大改善了较强波浪条件下的波浪计算结果, 工程项目的波浪计算应该考虑到波流耦合效应能够产生更强的波浪条件, 尤其是对于波浪条件比较敏感的工程结构, 考虑波、流耦合的波浪计算尤为重要。此外, 图 1 中 # 处有流速测量数据。图 3 和图 4 分别为流速和水位验证图。两图可见流速、流向和水位模拟结果都与实测结果吻合的较好。这些证明了模型的有效性, 从而可以进一步模拟荣喜近岸区波流耦合作用下的流场。

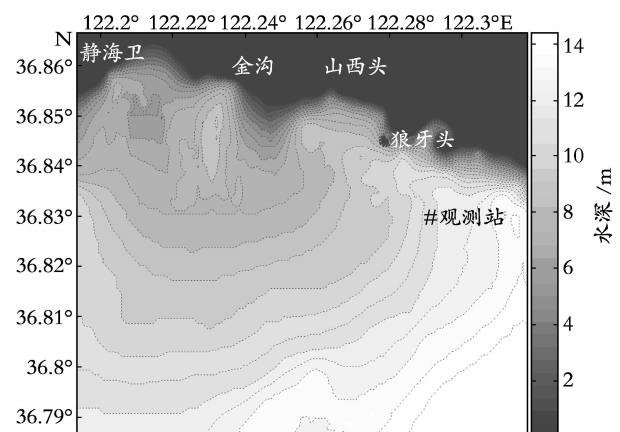


图 1 荣喜近岸区水深地形

Fig.1 Water depth map of Rongxi area

3.2 模拟结果讨论

下面通过数模 COHERENS-SWAN 给出两个数值试验。有效波高 2 m、有效周期 10 s 的入射波从东南方向传入计算域的。Run1 同时计算波生流和潮流, 而 Run2 仅计算潮流。

图 5 和图 6 分别为潮流和波生流共同存在情况下的涨潮、落潮流场分布图。由图 5 可见, 涨潮时最大流速约 1.4 m/s, 该值大于落潮时最大流速 1.1 m/s。这是由于涨潮流与东南来波的波生流相近, 而落潮流方向与该波生流方向相反, 因此叠加后的结果使得涨潮时最大流速大于落潮时的最大流速值。在水深 4~8 m 存在 4 个尺寸较大的逆时针涡流, 作者推断其原因是因为落潮流流向与波生流流向相反, 在水深 5 m 基本上处于平衡, 5 m 水深以深处潮流更强, 5 m 以浅区域波生流更强, 因此落潮时, 在 5 m 以深区域水流流速与落潮流一致, 即东偏南, 5 m 以浅区域, 波生流比潮流强度大, 水流流速与波生流

一致，即西偏北，因此形成这 4 个尺寸较大的逆时针涡流。

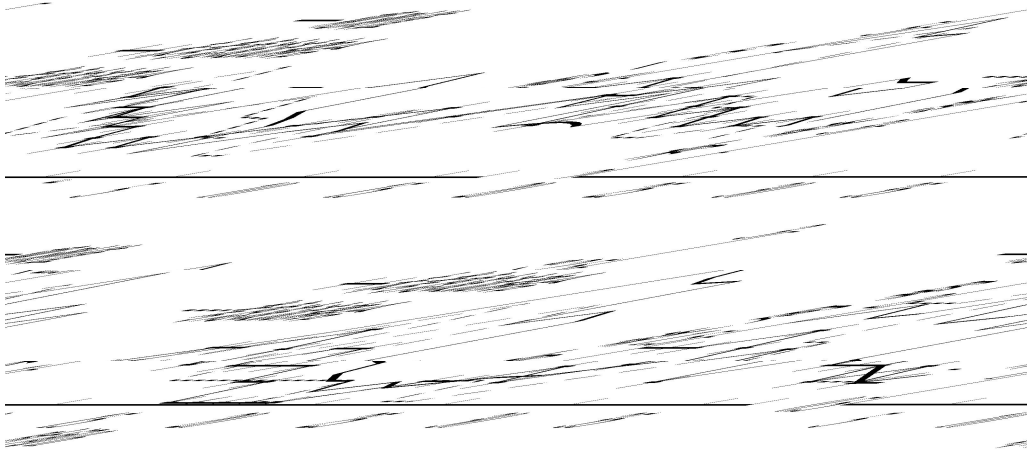


图 2 特征波高与特征周期验证

Fig.2 Verification of characteristic wave height and wave period

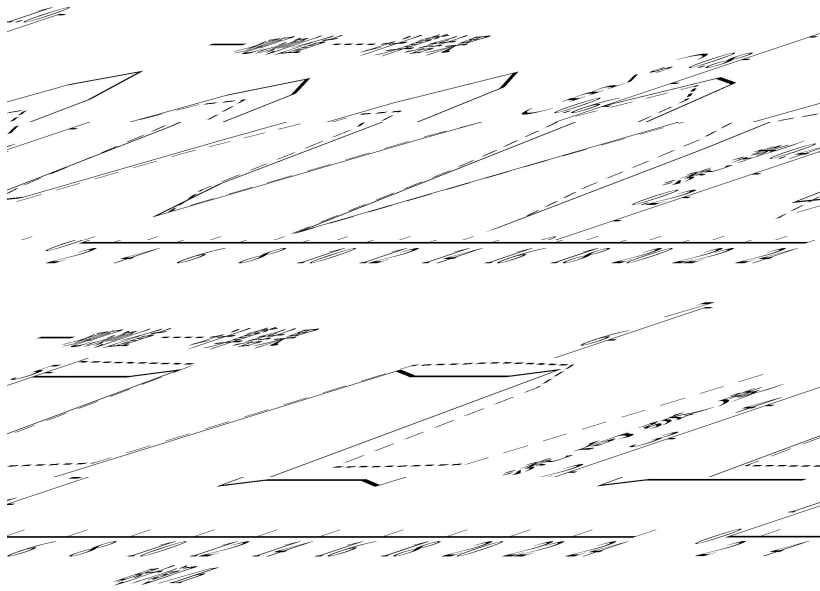


图 3 流速、流向验证

Fig.3 Verification of velocity and flow direction

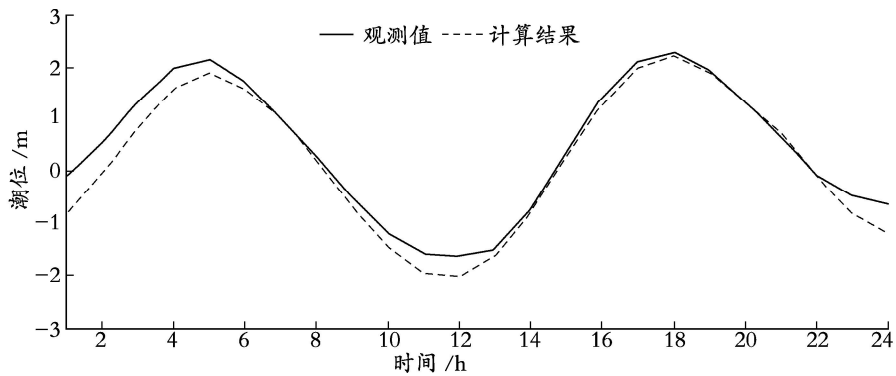


图 4 水位验证

Fig.4 Verification of water level

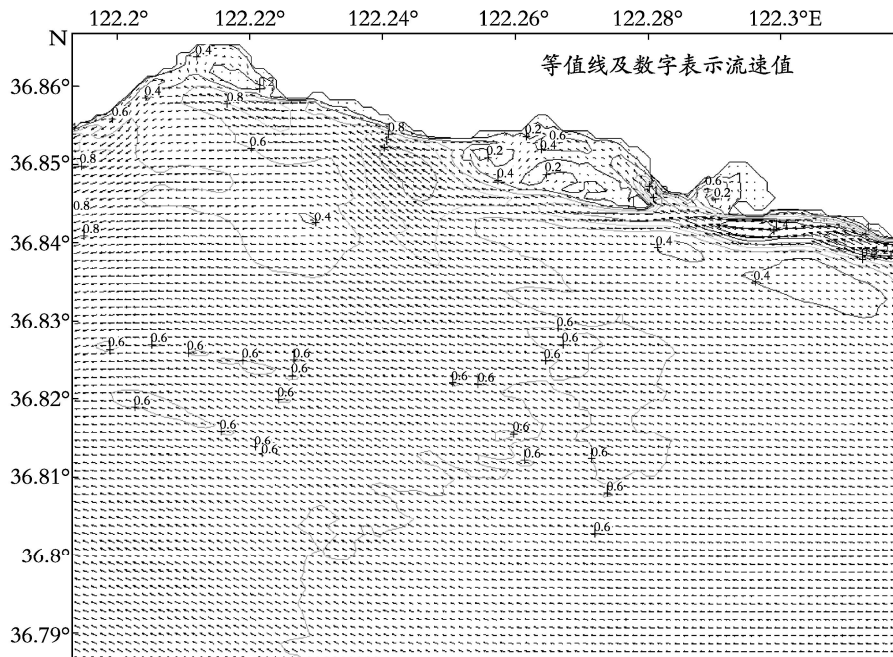


图 5 潮流和波生流共同存在情况下的涨潮时流场

Fig.5 Flow field of flood-tide in condition of tide coexisting with wave-induced current

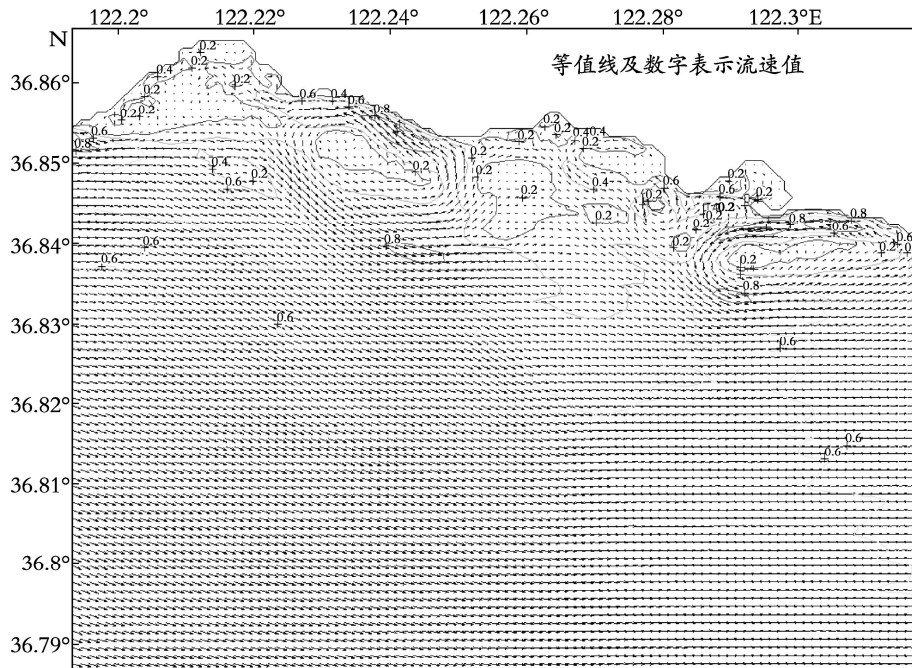


图 6 潮流和波生流共同存在情况下的落潮时流场

Fig.6 Flow field of ebb-tide in condition of tide coexisting with wave-induced current

图 7 和图 8 分别是落息和涨息时的流场。图 8 中的强流区比图 7 中窄一些，这是因为图 8 对应的涨息时刻水位高，使得水深比图 7 对应的落息时刻的水深普遍深了 2 m 多，从而涨息时刻由于水深的变深

而导致波浪破碎点向岸边移动。图 7 给出的最大流速为 1.4 m/s，该值高于图 8 中的最大流速 0.8 m/s，这可能有两个原因：首先，涨息时对应的水深更深，水体和质量相应更大，同样大小的力作用下质量大

的速度小；其次，落息时破碎点离岸较远，破碎区较宽造成的。从图 5 至图 8 可见，在狼牙岛以东流速总是较强，而在该岛以西沿岸尽管水深也较浅，

但流速却不总是很强。同时，狼牙岛以东虽然总是存在强流速，但强流区域却很窄。这归因于此处存在较大的深度梯度。

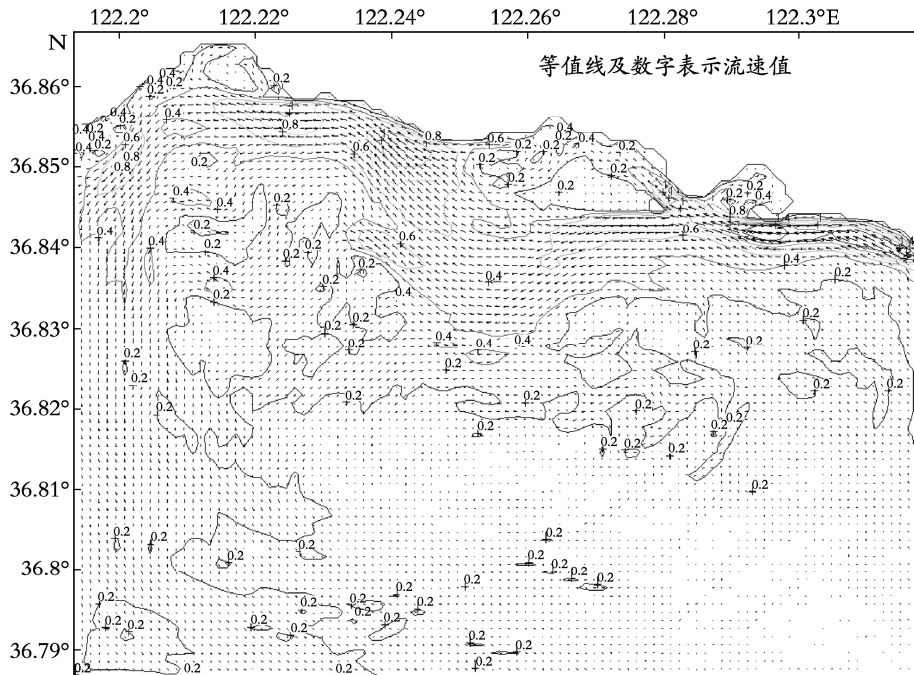


图 7 落息时潮流和波生流共同存在情况下的流场

Fig.7 Flow field of low tide in condition of tide coexisting with wave-induced current

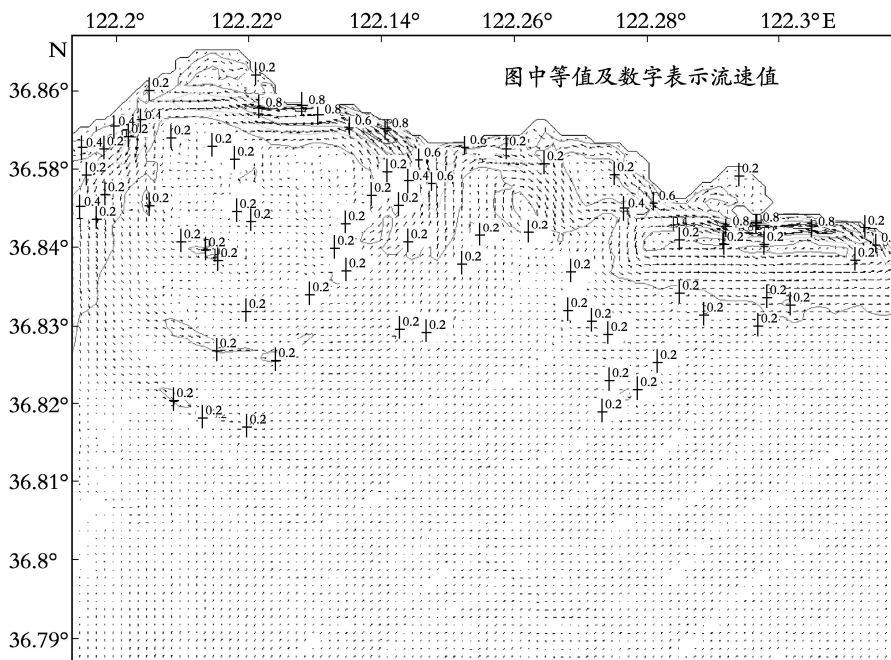


图 8 涨息时潮流和波生流共同存在情况下的流场

Fig.8 Flow field of high tide in condition of tide coexisting with wave-induced current

4 结论

运用 COHERENS-SWAN 模式计算所得的特征波高和周期在考虑水流影响的情况比没有考虑水流影响的计算结果与实测资料吻合的程度要好些。总的来说,计算所得流速、流向以及水位与实测数据较吻合。波生流在水深小于 8 m 的浅水区波生流较强,较深处则较弱。由于涨潮流向与波生流向相近,涨潮时对应的最大流速比落潮时的最大流速值大。落潮时,在水深 4~8 m 存在 4 个尺寸较大的逆时针涡流。由于涨息时比落息时的水深更深,涨息时强流速区比落息时强流速区窄些。

参考文献:

- [1] Bai Y C, Sheng H T, Hu S X. Three dimensional mathematical model of sediment transport in estuarine region [J]. *Int J Sediment Res*, 2000, **15**(4):410-423.
- [2] Longuet H M S, Stewar R W. Radiation stress in water waves: a physical discussion with application [J]. *Deep Sea Research*, 1964, **11**: 529-562.
- [3] 沈永明,唐军,郑永红,等.基于抛物型缓坡方程模拟近岸波流场 [J].水利学报,2006,**37** (3) :301-307.
- [4] 陶建华,韩光.波浪对浅海近岸污染物输移扩散规律的影响 [J].中国科学 (E 辑),2003,**33** (11) :1 045-1 056.
- [5] 诸裕良.南黄海辐射状沙脊群动力特征研究 [D].南京:河海大学,2003.
- [6] 李孟国.海岸河口水动力数值模拟研究及对泥沙运动研究的应用 [D].青岛:中国海洋大学,2002.
- [7] 韩国其,汪德灌,许协庆.潮汐河口三维水流数值模拟 [J].水利学报,1989,12:54-60.
- [8] 丁平兴,孔亚珍,史峰岩.水波的辐射应力及其计算 [J].华东师范大学学报,1998,1:82-87.
- [9] 王厚杰,李瑞杰.近岸区域波流耦合作用的数学模型 [J].海洋湖沼通报,1999,3:1-9.
- [10] 刘桦,何友声.长江口水环境数值模拟研究及水动力数值模拟 [J].水动力学研究与进展,2000,**15** (1) :17-30.
- [11] 包四林,西村仁嗣.近岸波生流数值计算的一种新方法 [J].海洋学报,2000,**22** (5) :115-123.
- [12] Xie L, Wu K, Pietrafesa L, *et al.* A numerical study of wave-current interaction through surface and bottom stresses: Wind-driven circulation in the South Atlantic Bight under uniform winds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**:16 841-16 855.
- [13] Liang Bingchen, Li Huajun, Dongyong Lee. Numerical study of wave effects in surface wind stress and surface mixing length by three dimensional circulation modeling [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, **18**(4):397-404.
- [14] Whitham G B. Linear and nonlinear waves [M]. New York: Wiley, 1974.
- [15] Donelan M A, Dobson F W, Smith S D, *et al.* On the dependence of sea surface roughness on wave development [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, **23**: 2 143-2 149.
- [16] Signell R P, Beardsley R C, Graber H C, *et al.* A Effect of wave-current interaction on wind-driven circulation in narrow, shallow embayments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**: 9 671-9 678.
- [17] Davies A M, Lawrence J. Examining the influence of wind and wind wave turbulence on tidal currents, using a three-dimensional hydrodynamic model including wave-current interaction [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, **24**:2 441-2 460.
- [18] Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, **84**:1 797-1 808.
- [19] Lou J, Peter V R. Wavecurrent bottom shear stresses and sediment resuspension in Cleveland Bay, Australia [J]. *Coastal Engineering*, 1996, **29**:169-186.
- [20] Xing J, Davies A M. Application of turbulence energy models to the computation of tidal currents and mixing intensities in shelf edge regions [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, **26**: 417-447.
- [21] Mellor G L, Blumberg A F. Wave breaking and ocean surface layer thermal response [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, **34**:693-698.

Numerical simulation of wave-tide induced longshore current in Rongxi

LI Chang-liang^{1,2}, LIANG Bing-chen³, XIE Yuan-yuan³

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Sep.,9,2007

Key words: Rongxi; wave induced current; wave and current coupling; radiation stress

Abstract: Wave-tide induced longshore current in Rongxi area will be discussed in the potential paper. A hydrodynamic model COHERENS is coupled with the third generation wave model SWAN. Inside COHERENS, SWAN is regarded as a subroutine and it gets time- and space-varying current velocity and surface elevation from COHERENS. COHERENS gets time- and space-varying wave relevant parameters calculated by SWAN. Wave-enhanced bottom stress, wave dependent surface drag coefficient and radiation stress are introduced to COHERENS. Then a fully coupled hydrodynamic-wave model COHERENS-SWAN accounting for interaction between wave and current is obtained and adopted to simulate longshore current in Rongxi area. Generally, the values of time series of current velocity, current direction and water level have a good agreement with the observed data.

(本文编辑 : 刘珊珊)