

东中国海浪流相互作用对水位和波高影响的数值研究

贾 岩^{1,2,3}, 尹宝树^{1,3}, 杨德周^{1,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:通过修改风应力和底摩擦应力的计算方式并引入波致辐射应力,以 POM (Princeton Ocean Model) 和 SWAN (Simulating Waves Nearshore) 模式为基础构建了浪流相互作用耦合模式,对 1994 年 14 号台风过程下的东中国海浪流相互作用对水位和波高的影响进行了模拟研究。结果表明:浪流相互作用引起的水位变化主要出现在近岸浅水区。与岸边站点实测水位的对比显示,耦合后的结果相比非耦合结果更接近观测值,特别是在极值水位处。流的存在显著地影响有效波高的计算结果。在黄海海域,流对有效波高的增减在极值处大于 0.2 m。在台湾岛东北海域黑潮流系附近,流对有效波高的增加最大可达 1.6 m。上述结果对改善近岸风暴潮和海浪预报具有指导意义。

关键词:浪流相互作用;水位;有效波高;POM;SWAN

中图分类号:P731.2

文献标识码:A

文章编号:1000-3096(2009)08-0082-05

浪流相互作用的概念最早是由 Longuet-Higgin 和 Stewart^[1]提出的。一般而言,浪对流的影响主要通过以下方式:(1) 增大海表粗糙度,增大风应力^[2],(2) 在浅水处由于波动可深达海底,从而增大底摩擦应力^[3],(3) 波致辐射应力的影响^[1],(4) 产生 Langmuir 环流^[4]。流对浪的影响主要是水位和流场自身随时空变化造成的。

早在 1983 年,Heaps^[5]已经认识到需要浪模式来改进风暴潮模式中风应力的计算。过去的几十年,特别是近 10 年,虽然国内外学者从不同的角度对浪流相互作用进行了研究^[6~11],但由于问题本身的复杂性,使得这一方向仍然存在很大的研究空间。特别是国内,现有的研究成果^[12~16]并不多且基本是单向耦合模拟。作者尝试在前人研究的基础上,从修改风应力和底摩擦应力的计算并引入波致辐射应力入手,建立浪流耦合模式,并对东中国海区域开展针对性研究。

1 浪流耦合模式

1.1 耦合过程简介

作者所利用的浪流耦合模式是基于海浪模式 Simulating Waves Nearshore (SWAN) 和海流模式 Princeton Ocean Model (POM) 而建立的。两个模式通过交换某些海洋要素值来实现耦合。图 1 为浪流耦合过程的示意图。在每个数据交换的时间节点处,POM 将流场、底摩擦系数和水位值传递给 SWAN 进行浪场的模拟。之后利用 SWAN 计算的

海洋要素结果,结合风场资料和 POM 提供的相关水文要素,计算出 3 种应力的值,再传递给 POM,用于下一个数据交换的时间节点前流模式的运行。为了兼顾 CPU 计算时间和模式计算精度,整个耦合模拟过程中数据交换的时间间隔设为 1 h。

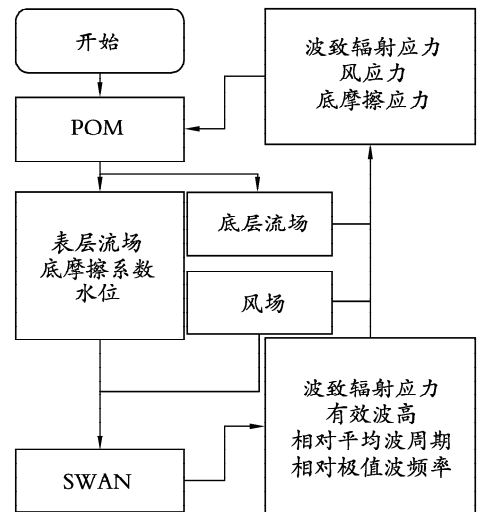


图 1 浪流耦合模式流程图

Fig. 1 Flow diagram of the coupling process between the current and the wave models

收稿日期:2009-05-07;修回日期:2009-06-03

基金项目:中国科学院创新项目(KZCX2-YW-201)

作者简介:贾岩(1983-),男,山东淄博人,硕士,电话:0532-82898932,主要从事浪流相互作用研究,E-mail:jiayan@ms.qdio.ac.cn;尹宝树,通信作者,E-mail:bsyin@ms.qdio.ac.cn

1.2 3种应力的计算

1.2.1 风应力

海表风应力的计算公式为, $\tau = \rho_a C_D |u_{10}| u_{10}$, 其中, ρ_a 为空气密度, C_D 为拖曳系数, u_{10} 为海表上方 10 m 风速。本文通过修改 C_D 的计算公式来实现对风应力的修改。

POM 原有的拖曳系数计算公式为, $C_D = 7.5 \times 10^{-4} + 6.7 \times 10^{-5} u_{10}$, 只考虑了风速的影响。Donelan^[2] 的实验结果表明, 海表粗糙度不仅与海面风速有关, 还依赖于海浪状况。作者利用了 Donelan 提出的计算公式, $Z_0 = 3.7 \times 10^{-5} \frac{u_{10}^2}{g} \left(\frac{u_{10}}{c_p} \right)^{0.9}$, $C_D = \left(\frac{\kappa}{\ln 10 - \ln Z_0} \right)^2$, 其中 C_p 为谱峰频率对应的波速, $\frac{C_p}{u_{10}}$ 表示波龄, g 为重力加速度。耦合过程中, SWAN 在数据交换时刻提供谱峰波频率 ω_p , 利用波动频散关系 $\omega^2 = (gk) \tanh(kh)$, 迭代计算 k_p , $C_p = \omega_p / k_p$ 。

1.2.2 底摩擦应力

底摩擦应力的计算公式为, $\tau_b = \rho C_b |U_c| U_c$, 其中, ρ 为海水密度, C_b 为海底拖曳系数, U_c 为底层流速。POM 原有的海底拖曳系数计算公式仅考虑了海底地形起伏和粗糙度。Grant 和 Madse^[3] 提出在浅水区风浪足够达到海底, 海浪的存在会影响到摩擦。作者采用了由 Signel^[17] 根据 Grant 和 Madsen 的机制提出的算法。

假定浪流共同作用下的底摩擦可以线性分解, $\tau_b = \tau_w + \tau_c$, 其中, τ_w 为波动产生的底应力, $\tau_w = \frac{1}{2} f_w \rho U_w^2$, τ_c 为流动产生的底应力, $\tau_c = \frac{1}{2} f_c \rho U_c^2$, U_w 为近底层波浪轨迹速度, $U_w = a_w \omega / \sinh kh$, 根据波动频散关系 $\omega^2 = (gk) \tanh(kh)$ 可以求得 U_w 。 a_w , ω 分别为海浪振幅和频率, 在模式中由 SWAN 提供的有效波高和相对平均波周期计算得到, k 和 h 分别为波数和水深。 f_w 的计算依据是 Grant 和 Madsen^[18] 提出的经验公式,

$$f_w = \begin{cases} 0.13(k_b/A_b)^{0.40} & k_b/A_b < 0.08 \\ 0.23(k_b/A_b)^{0.82} & 0.08 < k_b/A_b < 1.00 \\ 0.23 & k_b/A_b > 1.00 \end{cases}$$

其中, k_b 为海底粗糙度, $A_b = U_w / \omega$ 。

$$f_c = 2 \left[\frac{0.4}{\ln(30z_r/k_{bc})} \right]^2$$

在 f_c 有一个预估值的情况下, 利用下列表达式进行迭代运算,

$$U_{*w} = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, U_{*c} = \left(\frac{\tau_c}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, U_{*cw} = (U_{*c}^2 + U_{*w}^2)^{\frac{1}{2}}, k_{bc} = k_b \left[24 \frac{U_{*cw} A_b}{U_w k_b} \right]^\beta, \beta = 1 - \frac{U_{*c}}{U_{*cw}}$$

迭代过程中波动对底摩擦的影响在 f_c 的计算中体现出来, $C_b = \frac{1}{2} f_c$, C_b 被用于 POM 的底摩擦应

力的计算。

1.2.3 波致辐射应力

Longuet-Higgins 和 Stewart^[1] 将作用于单位面积水柱的动量通量的时间平均值减去未受波浪作用时的静水压力定义为辐射应力, $S_{ij} = E \left[\frac{k_i k_j C_g}{k^2 C} + \left(\frac{C_g}{C} - \frac{1}{2} \right) \delta_{ij} \right]$,

其中 E 是波动能密度, k 是波数, k_i 和 k_j 分别是波数矢量的分量, C 是波速, C_g 是波群速, δ_{ij} 是 Kronecker 符号。

本文直接使用 SWAN 提供的辐射应力张量梯度的计算结果,

$$F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}$$

$$F_y = -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

上述两项被添加到 POM 中计算水平对流和扩散的子程序当中。

2 实验设计

本文的计算区域为中国东部沿海(图 2)南北范围为 $24^\circ \sim 41^\circ N$, 东西范围为 $116^\circ \sim 132^\circ E$, 包括渤海、黄海、东海以及部分黑潮流域。POM 和 SWAN 的水平分辨率均为 $5' \times 5'$, POM 垂向分为 21 层。

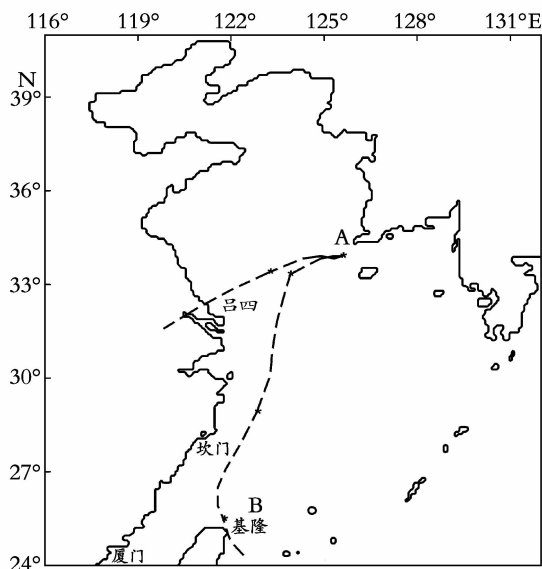


图 2 计算区域及站点分布

Fig. 2 The computational domain and locations of the tidal stations

计算区域的东边界和南边界以及朝鲜海峡处为开边界。边界条件 SWAN 取无梯度边界条件。POM 在开边界处给定了由更大区域的 Regional Ocean Modeling System (ROMS) 计算的月平均流速和水位。开边界处加入了 M_2 , S_2 , P_1 , K_1 , O_1 , K_2 , Q_1 和 N_2 共 8 个分潮水位。作者以 1994 年 8 月 7 日 00 时到 8 月 13 日 00 时 (世界时) 14 号台风经过计算区

域时的情况为例,考察了浪流相互作用的影响。图 2 中的虚线为台风路径, * 代表 8 日到 12 日,每日 00 时台风中心所在的位置。

在考察浪流相互作用对流模式的影响时,对比了修改 3 项应力计算的耦合模式与非耦合的 POM 模式给出的水位值。修改单项应力计算的耦合模式结果相比同时修改 3 项应力计算的耦合模式结果与实测数据的对比偏差要略大,在此不做详细讨论。在考察浪流相互作用对浪模式的影响时,对比了流场的有无对有效波高计算的影响。

3 结果分析

3.1 水位的变化

图 3 给出的是 8 月 7 日 22 时台风经过基隆、8 月 8 日 18 时台风距离坎门最近以及 8 月 12 日 18 时台风在吕四登陆 3 个时刻,对应的基隆、厦门、坎门、吕四 4 个站点前后共 48 h 的模拟水位与实测水位的对比。可以看出,耦合模式给出的水位极值要高于非耦合的 POM 模拟结果,相对更接近于观测结果。

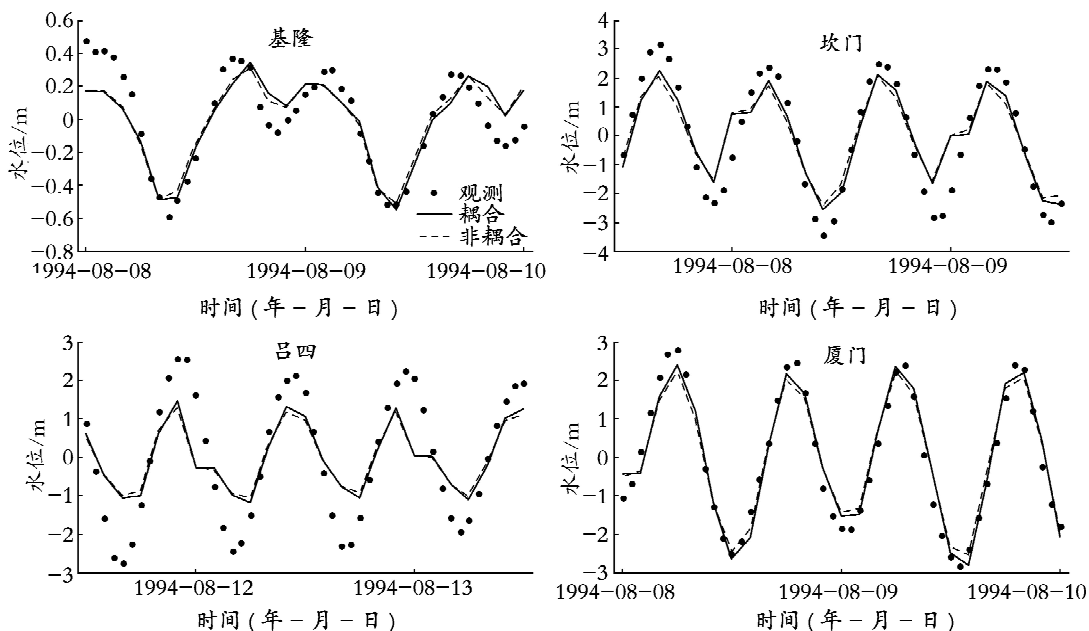


图 3 模拟水位与实测水位对比

Fig. 3 Comparison of water elevation between simulations and observation

图 4 给出了 8 月 7 日 00 时到 8 月 13 日 00 时 144 h 内整个计算区域耦合模式结果与非耦合的 POM 模式结果水位差最大值的分布情况。可以看出,福建、浙江沿岸、长江口以及朝鲜半岛西部受到的浪流相互作用最为明显。其中福州沿岸最大增幅 0.25 m 以上,温州沿岸最大增幅 0.3 m,长江入海口处最大增幅 0.3 m 左右,仁川沿岸最大增幅则达到 0.4 m。此外,辽东半岛沿岸、山东半岛南部、江苏沿岸最大增幅也达到 0.15 m 以上。黄渤海水位差分布图样与刘永玲等^[16]单向耦合模拟的结果类似,浪流相互作用对水位的影响主要出现在近岸浅水区。

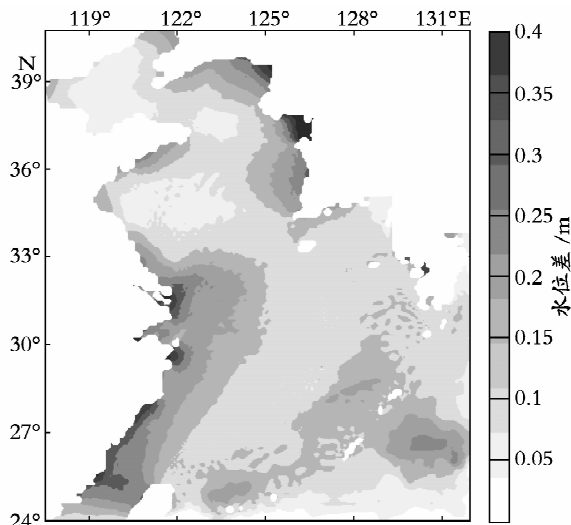


图 4 耦合模式与非耦合模式水位差极值的空间分布

Fig. 4 Extreme difference of water elevation between the coupled model and uncoupled model

3.2 有效波高的变化

流场的存在影响到波动振幅的计算,这一结果可以通过有效波高的改变显示出来。肖文军等^[19]的研究结果显示水流对长江口波浪计算的影响显著,考虑了水流条件后,尤其是在大潮期间,能比较显著地提高计算精度。图5给出的是125°30'E, 34°40'N(见图2中A站点)处8月8日00时到11日20时有效波高在考虑水流影响与否时的差值。可见,当流向与波向相对时,有效波高增大,最大增幅为0.23 m,当流向与波向同向时,有效波高减小,最大减幅为0.07 m。差值变化为半日周期,原因是在该时段内波向基本维持不变,始终是向北的,而流向主要受当地半日潮周期的影响,这一结果与文献^[18]的结果相似。

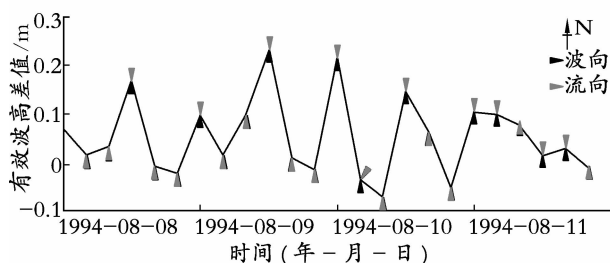


图5 A点处加入流和不加流模拟有效波高的计算差值时间序列
Fig. 5 Time series of the difference of significant wave height between simulation with current and without current at point A

除了潮流对有效波高产生影响类型之外,黑潮路径附近也存在类似的波高变化区。图6给出的是122°45'E, 25°50'N(见图2中B站点)处8月7日00时到10日20时有效波高在考虑水流影响与否时的差值。该点处潮流为不规则半日潮,但始终存在一个正的差值区,极值在0.2 m以上,最大值接近1.6 m。原因是该海域黑潮流速(不加潮汐的模拟结果为1 m/s左右)要高于潮流流速(文献^[20]提供的该区域的最大可能潮流为1 m/s),始终维持偏北的流向。在实验时段内该海区主要是波向的变化造成了有效波高的变化,8月8日整日基本维持相对的波向与流向使有效波高大幅增大。

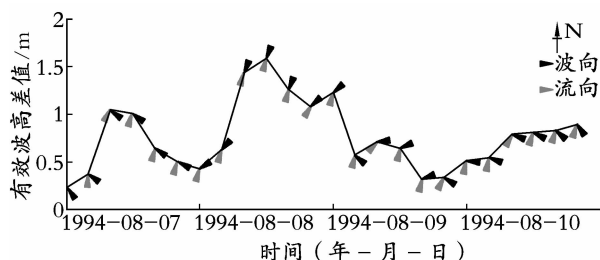


图6 B点处加入流和不加流模拟有效波高的计算差值时间序列
Fig. 6 Time series of the difference of significant wave height between simulation with current and without current at point B

4 结语

作者通过修改风应力和底摩擦应力的计算方式并引入波致辐射应力,以POM和SWAN模式为基础构建了浪流相互作用模式,初步研究了浪流相互作用对东中国海水位和有效波高计算的影响。结果表明水位受浪流相互作用影响显著的区域集中在近岸浅水区,最大增幅可达0.4 m。流场会显著地影响有效波高的计算,特别是台湾岛东北海域有效波高最大增幅可达到1.6 m。上述结果对改善近岸风暴潮和海浪预报有指导作用。应该指出的是,作者只是对东中国海浪流相互作用进行了初步的研究,实验中还存在很多不足,比如地形和风场的精度问题,浪流相互作用对水体温盐结构的影响等,这都是今后研究中需要进一步考虑的问题。

参考文献:

- [1] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf-beats' [J]. *J Fluid Mech*, 1962, 10: 529-549.
- [2] Donelan M A, Dobson F W, Smith S D, et al. On the dependence of sea surface roughness on wave development [J]. *J Phys Oceanogr*, 1993, 23: 2 143-2 149.
- [3] Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom [J]. *J Geophys Oceanogr*, 1979, 84: 1 797-1 808.
- [4] Craik A D D, Leibovich S. A rational model for Langmuir circulation [J]. *J Fluid Mech*, 1976, 73: 401-426.
- [5] Heaps N S. Storm surges 1967-1982 [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1983, 74: 331-376.
- [6] Tolman H L. Effects of tides and storm surges on North sea and waves [J]. *J Phys Oceanogr*, 1991, 6: 766-781.
- [7] 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]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24: 2 441-2 460.
- [8] Zhang M Y, Li Y S. The dynamic coupling of a third-generation wave model and a 3D hydrodynamic model through boundary layers [J]. *Continental shelf Research*, 1997, 10: 1 141-1 170.
- [9] Xie L, Wu K, Pietrafesa L J, 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]. *J Geophys Res*, 2001, 106(C8): 16 841-16 855.

- [10] Moon Il-Ju. Impact of a coupled ocean wave-tide-circulation system on coastal modeling [J]. **Ocean Modelling**, 2005, 8: 203-236.
- [11] Xie L, Liu H, Peng M. The effect of wave-current interaction on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989 [J]. **Ocean Modelling**, 2008, 20: 252-269.
- [12] 尹宝树, 王涛, 侯一筠, 等. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究 [J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(1): 109-116.
- [13] 林祥, 尹宝树, 侯一筠, 等. 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 [J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(6): 615-621.
- [14] 胡好国, 袁业立, 万振文. 海浪混合参数化的渤海、黄海、东海水动力环境数值模拟 [J]. 海洋学报, 2004, **26**(4): 9-32.
- [15] 林祥, 尹宝树. 潮汐风暴潮中波浪对表面风应力系数的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(6): 714-717.
- [16] 刘永玲, 王秀芹, 王淑娟. 波浪对风暴潮影响的数值研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2007, 增刊: 1-7.
- [17] Signell R P, Beardsley R C, Graber H C, *et al.* Effect of wave-current interaction on wind-driven circulation in narrow shallow embayments [J]. **J Geophys Res**, 1990, 95: 9 671-9 678.
- [18] Grant W D, Madsen O S. Movable bed roughness in Unsteady Oscillatory Flow [J]. **J Geophys Res**, 1982, **87**(C1): 469-481.
- [19] 肖文军, 丁平兴, 胡克林. 潮汐和流影响下长江口波浪场数值计算 [J]. 海洋工程, 2008, **26**(4): 45-52.
- [20] 海洋图集编委会. 渤海 黄海 东海 海洋图集(水文) [M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 429-432.

A numerical study of the influence of wave-current interaction on water elevation and significant wave height in the East China Sea

JIA Yan^{1,2,3}, YIN Bao-shu^{1,3}, YANG De-zhou^{1,3}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: May, 7, 2009

Key words: wave-current interaction; water elevation; significant wave height; POM; SWAN

Abstract: A coupled wave-current model system is built up based on the Princeton Ocean Model (POM) and Simulating Waves Nearshore (SWAN), by modifying the calculation of surface wind stress, bottom stress and wave-induced radiation stress in POM, and exchanging data between POM and SWAN. In this study, several numerical experiments are taken in the East China Sea during No. 14 typhoon case, 1994. The results indicated that the differences of water elevation caused by model coupling are larger in the near-shore shallow areas. Comparison between observation and numerical results indicates that the water elevation is closer to that of the observation when the three stresses are fully coupled. The current plays an important role on the calculation of significant wave height. In the Yellow Sea when the tidal current adds a 0.2 m height to the peak values in the northeast area of Taiwan, the Kuroshio Current could give a maximum 1.6 m addition height to the peak value. These results can guide the prediction of storm surge and waves.

(本文编辑:刘珊珊)