

# 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\*

林 祥 尹宝树 侯一筠 苏京志 程明华

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**提要** 基于考虑辐射应力机制的近岸高分辨率的波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合数值模式,研究了辐射应力在黄河三角洲胜利油田近岸海域波浪和潮汐风暴潮相互作用过程中对水位的影响,并与两个中等强度天气过程引发的实测水位过程进行比较。结果表明,考虑辐射应力机制的波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合模式模拟的结果与实测更接近,特别在极值增水位处吻合很好。对本研究的中等强度天气过程,辐射应力可增水 40cm,在黄河三角洲近岸区有 20cm 以上最大增水区域,这在工程上非常重要。可以预见,对引发黄河三角洲沿岸强增水的台风及强寒潮过程,辐射应力对增水的影响会更明显。本研究结果表明,在实际工程应用中,应采用波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合数值模式。

**关键词** 波浪和潮汐风暴潮,耦合模式,辐射应力效应

**中图分类号** P731

由于风既产生浪又产生风暴潮,因此,受同一外力风驱动,发生于同一水体中的这两个动力过程尽管有着不同的时空尺度,但两者的产生密切相关而又相互影响。Wolf 等(1999)详细概括了波浪和风暴潮相互作用的理论机制。风暴潮对波浪的影响主要通过: a) 水深的变化; b) 时空变化的流场,这将对波浪产生、传播、波碎过程产生影响;波浪对风暴潮的影响主要通过: i) 依赖波浪成长状态的表面风应力; ii) 依赖波流相互作用的底应力; iii) 波致辐射应力导致近岸流和增水的变化。在过去的 10 年里,不少学者研究了波浪和风暴潮相互作用机制不同的影响。Mastenbroek 等(1993)最早运用波浪和风暴潮联合数值模式对北海三个风暴过程进行了研究,其结论是辐射应力对水位的影响可以忽略;而 Zhang 等(1996)同样运用耦合数值模式对南海北部台风过程的研究得到了与 Mastenbroek 等(1993)类似的结论。金正华等(1998)研究了渤海波浪和风暴潮相互作用底应力机制的影响;尹宝树等(2001)研究了波浪和风暴潮相互作用机制依赖波浪状态的表面风应力的效应。在 Mastenbroek 等(1993)的研究中运用的空间分辨率为 $(1/4)^\circ \times (1/6)^\circ$ ,而在 Zhang 等(1996)的研究中采用的空间分辨率为 $50\text{km} \times 50\text{km}$ 。由于辐射应力的影响区域主要在近岸,显然依 Mastenbroek 等(1993)和 Zhang 等(1996)研究中采用的分辨率,得出辐射应力

\* 国家自然科学基金资助项目,40076005 号;中国科学院知识创新项目,KZCX2-202 号;国家“十五”攻关项目,H57022113 号。林 祥,男,出生于 1975 年 2 月,博士研究生,E-mail: bsyin@ms. qdio. ac. cn

收稿日期:2001-08-27,收修改稿日期:2002-01-12

的影响可以忽略的结论是可以预见的。事实上,在他们的研究中更主要体现的是依赖波浪状态的表面风应力的影响。基于上述研究,本文将采用近岸高分辨率网格 $(1/15)^\circ \times (1/15)^\circ$ ,运用波浪和风暴潮耦合数值模式重点研究波浪和风暴潮相互作用机制辐射应力在近岸对风暴潮的影响。

## 1 波浪和风暴潮相互作用耦合数值模式及实现过程

波浪和风暴潮相互作用数值模式由一个先进的第三代浅水波浪数值模式和一个二维风暴潮潮汐数值模式组成,通过辐射应力机制实现波浪和风暴潮相互作用对风暴潮影响的研究。

### 1.1 波浪数值模式

波浪数值模式采用目前国际上通用的第三代模式,本研究采用的是浅水波浪模式 YWE-WAM(Yin *et al.*, 1996)。由于考虑了波浪和风暴潮的相互作用,因此该模式包括了瞬变流场及水位的影响。同时在有流的背景下,由于波和流之间产生能量交换,波浪能量不再守恒,代之以波作用量守恒,故 YWE-WAM 波浪模式的特点是基于波作用平衡方程,源函数大多直接取自于第三代 WAM 模式,但在浅水考虑了浅水深度限制破碎引起的能量耗散,其基本方程如下:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot [(\bar{C}_g + \bar{u})N] + \frac{\partial}{\partial \sigma} [C_\sigma N] + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

其中,  $N = N(\sigma, \theta, \bar{x}, t) = \frac{F(\sigma, \theta, \bar{x}, t)}{\sigma}$  为作用谱密度,  $F$  为谱密度。

$S = S(\sigma, \theta, \bar{x}, t) = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} + S_{dbr}$  为源函数,  $C_g$ 、 $C_\sigma$ 、 $C_\theta$  为传播速度,表达式如下:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma}{k} \quad (2)$$

$$C_\theta = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial m} \right] \quad (3)$$

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \right] - C_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} \quad (4)$$

这里  $d$ 、 $\bar{k}$ 、 $\bar{u}$  分别为水深、波数向量、流速向量,  $s$ 、 $m$  分别为波向线和波峰方向距离。传播速度  $C_g$ 、 $C_\sigma$ 、 $C_\theta$  充分考虑了时空变化的水深和流对波浪传播的影响。源函数项分别为:

风输入源函数

$$S_{in} = \max \left\{ 0, \left[ 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{28u_*}{\sigma/k} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \right\} \sigma F(\sigma, \theta) \quad (5)$$

$$u_* = u_{10, \nu} \left[ (0.8 + 0.065u_{10, \nu}) 10^{-3} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中,  $\rho_a$ 、 $\rho_w$ 、 $u_{10, \nu}$ 、 $u_*$  分别为空气密度、水的密度、10m 处相对风速、摩擦速度。

破碎耗散源函数

$$S_{dis} = -2.36 \times 10^{-5} \sigma \frac{k}{k} \left[ \frac{\alpha}{\alpha_m} \right]^2 F(\sigma, \theta) \quad (7)$$

$$\alpha = k \iint F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (8)$$

$$\sigma = \left[ 1/\sigma \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{k} = [1/\sqrt{k}]^{-2} \quad (10)$$

$$\alpha_{pm} = 3.02 \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$k = \frac{\iint k F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (12)$$

底摩擦耗散源函数

$$S_{bot} = -\frac{8}{3} f_w < u^2 >^{1/2} \quad (13)$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \lg_{10} \frac{1}{4\sqrt{f_w}} = m_f + \lg_{10} \frac{a_b}{k_N} \quad (14)$$

$$< u^2 >^{1/2} = \sqrt{\iint \frac{2gk}{\sinh 2kd} F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (15)$$

$$a_b = \sqrt{2 \iint \frac{1}{\sinh^2 2kd} F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (16)$$

$$m_f = 0.08, \quad k_N = 0.05 \quad (17)$$

其中  $f_w$  为摩擦系数,  $k_N$  为粗糙度,  $a_b$  为近底振幅。

浅水深度限制破碎耗散  $S_{dbrc}$  采用总能量限制

$$\bar{E}_{max} = \frac{0.035 \bar{c}^4}{g^2} \quad (18)$$

其中,  $\bar{c}$ 、 $\bar{g}$ 、 $\bar{E}_{max}$  分别为平均相速、重力加速度、最大总能量。

非线性相互作用源函数

非线性相互作用源函数采用 Hasselmann 等(1985)离散相互作用计算方法,对浅水采用如下公式

$$S_{nl}^{浅} = R(kd) S_{nl}^{深} \quad (19)$$

$$R(kd) = 1 + \frac{5.5}{x} (1 - \frac{5}{6}x) \exp(-\frac{5}{4}x), (x = kd) \quad (20)$$

以上给出了波浪模式的基本框架,有关模式的详细描述参见 Yin 等(1996)。

## 1.2 风暴潮潮汐数值模式

笛卡尔坐标如下,取  $x$  轴向东为正,  $y$  轴向北为正,二维风暴潮潮汐数值模式的基本方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x} \quad (22)$$

$$+ \frac{1}{\rho_w D} (\tau_x - \tau_{yx} - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}) + A (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} \quad (23)$$

$$+ \frac{1}{\rho_w D} (\tau_y - \tau_{xy} - \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}) + A (\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$$

这里  $t$  为时间,  $x, y$  为笛卡尔坐标,  $u, v$  为深度平均速度在  $x, y$  方向的分量,  $f$  为科氏参量,  $g$  为重力加速度,  $\rho_w$  为海水密度,  $p_a$  为大气压力,  $\tau_x, \tau_y$  为  $x, y$  方向的表面风应力,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$  是  $x, y$  方向底应力,  $D = d + \zeta$  为瞬时水深,  $d$  为平均水深,  $\zeta$  为水位,  $A$  为侧向摩擦系数,  $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$  为波致辐射应力张量的 4 个分量。

$$\text{表面风应 } \bar{\tau} \text{ 为 } \quad \bar{\tau} = \rho_a C_d |\bar{w}| \bar{w} \tag{24}$$

$\rho_a$  为空气密度,  $C_d$  为拖曳系数, 按 Hsu(1986), 取

$$C_d = \lambda \left\{ \frac{0.4}{14.56 - 2 \ln |\bar{w}_{10}|} \right\} \tag{25}$$

$\lambda$  为可调系数,  $\bar{w}$  为风速。

$$\text{底应力 } \bar{\tau}_b \text{ 为 } \quad \bar{\tau}_b = \rho_w \forall |\bar{u}| \bar{u} \tag{26}$$

$\forall = \frac{ng}{c_z}$ ,  $c_z$  为 Chezy-Manning 系数,  $n$  为可调系数。

辐射应力各分量表达式为

$$S_{xx} = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left[ \left( n - \frac{1}{2} \right) + n \cos^2 \theta \right] F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \tag{27}$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (n \sin \theta \cos \theta) F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \tag{28}$$

$$S_{yy} = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left[ \left( n - \frac{1}{2} \right) + n \sin^2 \theta \right] F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \tag{29}$$

其中,  $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh kd} \right)$ 。于是通过波浪模式求得随机海浪的方向谱  $F(\sigma, \theta)$ , 便可利用上式确定随机波的辐射应力, 从而可以确定辐射应力对风暴潮的影响。

边界条件:

初始条件:  $\zeta = u = v = 0$

固体边界: 法向流速为 0

$$\text{开边界: } \quad \zeta = \frac{P_b - P_o}{\rho g} + \sum f_i H_i \cos[\omega_i t + (v + u)_i - g_i]$$

$P_o$  和  $P_b$  分别为开边界和风暴外的大气压,  $i$  代表分潮, 在此取为  $K_1, O_1, P_1, Q_1, M_2, S_2, N_2, K_2, S_a, S_{sa}$  10 个分潮。  $\omega_i$  为分潮角速率,  $H_i$  为分潮振幅,  $g_i$  为分潮迟角,  $f_i$  为交点因子,  $t$  为时间, 从某一初始时间  $t_0$  作为零开始计算,  $(v + u)_i$  为  $t_0$  时刻的分潮初位相, 其中  $u$  为交点订正角。

### 1.3 波浪和风暴潮潮汐耦合过程的实现

波浪和风暴潮潮汐联合作用的实现过程如下:

先提前 4 天进行潮汐风暴潮模式计算以达到稳定, 然后在风场起始时刻开始计算波浪和风暴潮:

(1) 应用风暴潮潮汐模式计算得到的流速和水位运行波浪模式得到波谱, 然后计算波致辐射应力等。

(2) 应用上述得到的辐射应力再运行风暴潮潮汐模式, 新计算的流速和水位再输入到波模式。重复上述步骤直到风过程计算完毕, 即完成了波浪和风暴潮潮汐通过辐射应

力机制的耦合计算。同时可输出水位、流速、波参量等要素。

## 2 黄河三角洲近岸区辐射应力在波浪和潮汐风暴潮相互作用中对水位的影响

黄河口三角洲近岸海域位于渤海西南部, 毗邻羊角沟和渤海湾, 如图 1 所示, 细网格区域即为要研究的黄河三角洲近岸海域。由于这里的水深较浅(一般不超过 12m), 在经常袭击渤海区域偏北风或强台风的影响下, 极易形成大的增水, 造成沿岸区域的漫滩、漫堤等灾害事故。因此, 准确的水位预报对该区域沿岸工程的设计及周边人民群众生命财产的安全具有重要意义。本研究目的就是要揭示辐射应力在该海区对水位的影响, 为该区域采用波浪和潮汐风暴潮耦合模式进行水位预报提供可行性分析。

### 2.1 个例描述

选择该区有实测资料的位于  $38^{\circ}13'N$ 、 $118^{\circ}49'E$ (见图 1, 水深为 10m) 的两个过程: 1998 年 4 月 22 日 20 时—25 日 2 时和 1999 年 4 月 1 日 0 时—2 日 14 时, 作为分析个例。这两个风场过程由青岛海洋大学提供, 计算中波浪模式采用粗网格嵌套, 分别为  $16' \times 16'$  和  $4' \times 4'$ , 风暴潮模式的网格为  $2' \times 2'$ 。通过对比分析不同模式结果, 重点研究黄河三角洲胜利油田海域( $118^{\circ}24' - 119^{\circ}24' E$ ,  $37^{\circ}48' - 38^{\circ}14' N$ ) 辐射应力的效应。

### 2.2 波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合模拟结果比较分析

为了体现辐射应力在波浪和潮汐风暴潮相互作用中的效应, 在波浪和潮汐风暴潮耦合模拟中只考虑辐射应力机制, 图 2 给出了 1998 和 1999 年两个风过程纯潮汐风暴潮模式模拟的水位和考虑辐射应力机制的波浪和潮汐风暴潮耦合模式模拟的水位及实测水位三者之间过程曲线比较。从图 2 中可以看到考虑辐射应力机制的波浪和潮汐风暴潮耦合模式给出的结果改进了纯潮汐风暴潮模式给出的结果, 特别是极值增水位改进明显, 与实测吻合很好(表 1)。从表 1 可见辐射应力可增水位 40cm, 与实测很一致。

表 1 模拟与实测最大增水比较(m)

Tab.1 The comparisons of simulated and measured maximum set-up (m)

个例	实测	潮汐风暴潮	耦合
1998 年 4 月 22 日 20 时—25 日 2 时	10.7	10.4	10.8
1999 年 4 月 1 日 0 时—2 日 14 时	4.75	4.5	4.7

图 3 给出了 1998 和 1999 年两个过程在黄河三角洲胜利油田海域纯潮汐风暴潮模式模拟的水位与考虑辐射应力机制的波浪和潮汐风暴潮耦合模式模拟水位的大面差值分布图。从图 3a 可看到辐射应力最大可增水位 20cm 以上的区域, 而从图 3b 可见辐射应力最

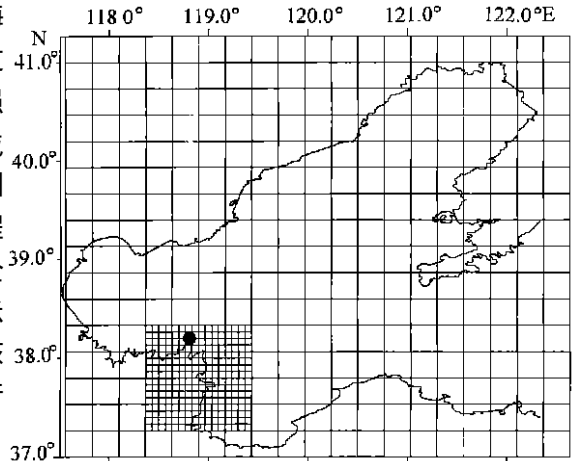


图 1 渤海及黄河三角洲近岸区域计算网格图  
Fig.1 The grid sketch of Bohai and Huanghe Delta coastal area  
● 为实测点

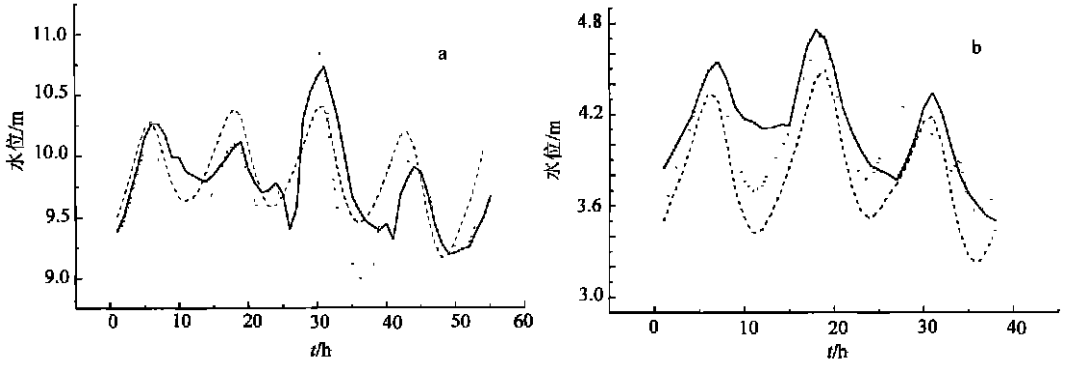


图2 模拟和实测水位过程比较

Fig. 2 The comparisons of simulated and measured elevations

a. 1998年4月22日20时—25日2时; b. 1999年4月1日0时—2日14时

实线表示实测结果; 虚线表示纯潮汐风暴潮模拟结果; 点线表示波浪和潮汐风暴潮耦合模拟结果

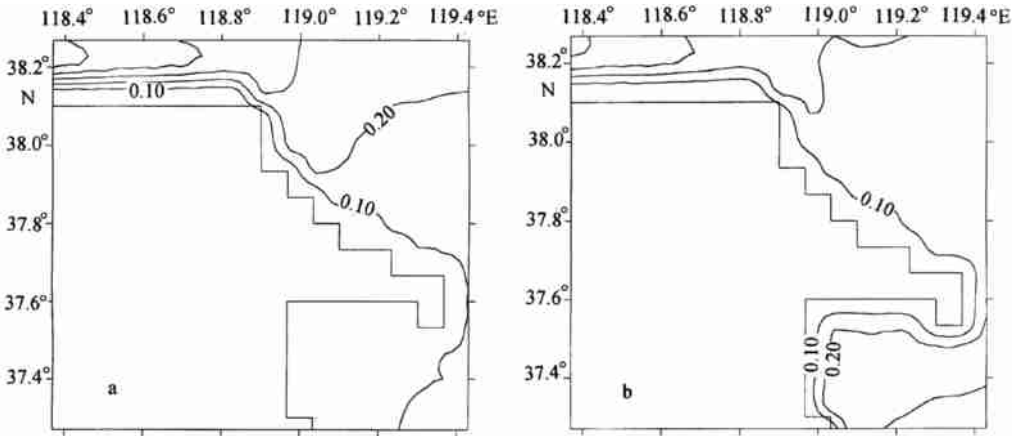


图3 纯潮汐风暴潮模拟水位和波浪和潮汐风暴潮耦合模拟水位差值分布

Fig. 3 The difference distributions of elevations simulated by pure tide-surge model and coupled wave-tide-surge model

a. 1998年4月24日2时; b. 1999年4月1日17时

大可增大水位 10cm 以上的区域。这对工程而言是非常重要、有时可能是致命的。况且这里考虑的过程并不是造成黄河三角洲区强增水的强寒潮过程和台风过程(限于资料),可以预见对造成黄河三角洲近岸区强增水的 9216 和 9711 等那样的强台风,辐射应力的增水效应会更大。

### 3 结语

本文采用了考虑辐射应力机制的波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合数值模式,经改进使其耦合计算在近岸分辨率达到  $4' \times 4'$ 。对黄河三角洲沿岸胜利油田海域两个实测过程进行了耦合计算模拟与结果验证分析,得到如下结果。

#### 3.1 对本研究考虑的两个中等强度的天气过程,辐射应力在波浪和潮汐风暴潮相互作用

中对增水的影响可达 40cm, 在黄河三角洲近岸区域有 20cm 以上的增水区域, 这在工程上是重要的; 实际验证表明, 考虑辐射应力的波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合模式模拟的水位与实测吻合更好, 特别是在极值增水位处, 吻合很好。

3.2 考虑到本项研究的成果, 在工程应用水位计算中, 应采用波浪和潮汐风暴潮相互作用耦合数值模式计算水位, 对于引起黄河三角洲沿岸强增水的强寒潮和台风过程更应如此。

### 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(1): 109—116
- 金正华, 王 涛, 尹宝树, 1998. 浪、潮、风暴潮联合作用下的底应力效应. 海洋与湖沼, 29(6): 604—610
- Hasselmann K, Hasselmann S, 1985. Computation and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part I: A new method for efficient computation of the exact nonlinear transfer integral. J Phys Oceanogr, 15: 1369—1377
- Hsu S A, 1986. A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: a parametric model. J Phys Oceanogr, 16: 144—150
- Mastenbroek C, Burgers G, Janssen P A E M, 1993. The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer. J Phys Oceanogr, 8: 1856—1866
- Wolf J, Prandle D, 1999. Some observations of wave-current interaction. Coastal Engineering, 37: 471—485
- Yin Bao-shu, Wang Tao, El-Sabh M I, 1996. A third generation shallow water wave numerical model YE\_WAM. Chin J Oceanol Limnol, 14(2): 106—112
- Zhang M Y, Li Y S, 1996. The synchronous coupling of a third-generation wave model and a two-dimensional storm model. Ocean Engineering, 6: 533—543

## EFFECTS OF RADIATION STRESS IN THE INTERACTION OF COUPLED WAVE-TIDE-SURGE IN THE COASTAL AREA OF HUANGHE DELTA

LIN Xiang, YIN Bao-Shu, HOU Yi-Jun, SU Jing-Zhi, CHENG Ming-Hua  
(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

**Abstract** Based on a coupled wave-tide-surge interaction numerical model, the effect of radiation stress on elevations in the interaction of wave-tide-surge in the coastal area of Huanghe Delta was studied. A comparison of simulated and measured elevations for two mediate strong weather demonstrated that the result simulated by the coupled wave-tide-surge model including radiation stress is close to the measured and particularly in excellent agreement with the extreme set-up. This study shows that the radiation stress can increase sea level by up to 40cm and there is an area of over 20cm sea level increase in the Huanghe Delta area, which is very important for engineering. It is expected that for a strong cold wave weather or typhoon causing strong set-up in the Huanghe Delta coastal area, the effect of radiation stress will be more significant. It is suggested from this study that in the practical engineering application, coupled wave-tide-surge interaction should be considered.

**Key words** Wave-tide-surge, Coupled model, Effect of radiation stress