

渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用 对波浪影响的数值研究*

尹宝树 王 涛 侯一筠 程明华 范顺庭 苏京志

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

M. I. El-Sabh

(加拿大魁北克大学 里木斯基 G5L 3A1)

摘要 基于依赖波浪成长状态波令的表面风应力,提出了一个波浪和风暴潮潮汐运动相互作用的联合数值模式,实现了第三代波浪模式和三维风暴潮潮汐模式联合作用的数值研究,并结合渤海典型天气个例的研究,给出了渤海波浪和风暴潮潮汐相互作用对波浪影响的机制和大小量级的定量估计。研究表明,对不同天气过程,波浪和风暴潮潮汐相互作用对波浪影响的性质和大小不同;对强寒潮过程,对波浪影响主要由风暴潮所支配,波高调制可达 1m,在黄河口区一般达 0.5m;对弱天气过程,对波浪影响主要由潮所控制,波高调制约在 0.2m,联合作用模式给出的结果与实测更吻合。

关键词 渤海,波潮风暴潮,联合数值模式,影响机制,定量估计

中图分类号 P731

国际上开展波浪和风暴潮相互作用的数值研究始于 1988 年。Wolf 等(1988)首先就波浪和风暴潮的相互作用进行了数值研究,后来 Tolmann(1991),Mastenbroek 等(1993),Wu 等(1992¹⁾,1994)也对波浪和潮汐风暴潮相互作用的不同方面进行了研究,得到了一些初步的有一定价值的结果。目前,有关波浪和潮汐风暴潮相互作用研究仍是近岸海洋动力学研究的前沿方向,我国在这一领域的研究还刚刚起步。这些研究仅仅给出了对波浪和潮汐风暴潮相互作用的一个初步了解,且这些研究大多仅考虑了相互作用影响的一个方面,即潮汐风暴潮对波浪的影响或波浪对潮汐风暴潮的影响,而没有进行真正意义上的波浪和潮汐风暴潮相互作用影响的研究。本文将建立一个适合浅海的联合波浪和潮汐风暴潮相互作用数值模式,通过交互运行实现波浪和潮汐风暴潮相互作用影响的研究,结合渤海典型天气个例的研究给出渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的机制和大小量级估计。

1 联合波浪和潮汐风暴潮相互作用数值模式

联合波浪和潮汐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

* 国家“九五”攻关课题,D48970108 号;中国科学院重点项目,A16970110 号。尹宝树,男,出生于 1963 年 1 月,博士,研究员,E-mail:xdxia@ms.qdio.ac.cn

1) Wu X, Flather R A, 1992. Hindcasting waves using a coupled wave-tide-surge model, Third international workshop on wave hindcasting and forecasting, Montreal, May 19—22

收稿日期:1998-12-28, 收修改稿日期:1999-06-21

一个先进的三维 σ 坐标下的潮汐风暴潮数值模式组成,通过采用依赖波浪成长状态的表面风应力实现波浪和潮汐风暴潮相互作用的影响研究。

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。本研究采用的波浪模式 YWE-WAM 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,但是在浅水考虑了浅水破碎引起的能量耗散,其基本方程如下:

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

$$\text{式中, } N = \frac{F(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma}; C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma}{k}; C_\sigma = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial m} \right);$$

$$C_\theta = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla d \right) - C_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial s}$$

其中, $d, \sigma, \vec{k}, \vec{v}, \theta, s$ 和 m 分别为水深、固有频率、波数向量、流速向量、波向、波向线和波峰方向。传播速度 C_g, C_σ, C_θ 充分考虑了变水深和流对波浪传播的影响。源函数 $S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} + S_{abs}$, S_{in} 为风输入, S_{nl} 为非线性相互作用, S_{dis} 为白帽耗散, S_{bot} 为底摩擦耗散, S_{abs} 为深度限制破碎耗散,有关模式的详细描述参看 Yin 等(1996)。

1.2 潮汐风暴潮数值模式

潮汐风暴潮采用三维 σ 坐标半隐半显有限差分格式的数值模式,基本方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -g \frac{\partial(\zeta - \bar{\zeta})}{\partial x} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ - g \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(H \int_0^\sigma \frac{\rho'}{\rho_0} d\sigma' \right) + \frac{\rho'}{\rho_0} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -g \frac{\partial(\zeta - \bar{\zeta})}{\partial y} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + A \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ - g \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(H \int_0^\sigma \frac{\rho'}{\rho_0} d\sigma' \right) + \frac{\rho'}{\rho_0} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(Hw^*)}{\partial \sigma} = 0 \quad (4)$$

$$w^* = \frac{1}{H} \left[W + \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \sigma \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(k_H \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + D_T + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla S = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(k_H \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + D_S + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (7)$$

其中, t 为时间; (u, v, w^*) 为流速 \vec{v} 在 x, y, σ 坐标中的三个分量, $f = 2\Omega \sin \varphi$ 为科氏参量, Ω 和 φ 分别是地球自转角速率和地理纬度; g 是重力加速度, T 为温度; S 为盐度; P 是压力; ρ_0 是海水平均密度; A 是垂直涡动粘性系数; k 是垂向扩散系数; D_T, D_S 分别是水平粘性和扩散项; F_T, F_S 为外力或外源项; ρ 为密度距平; $H = h + \zeta$ 为总水深, h 为平均水深, ζ 为水位; $\bar{\zeta}$ 为考虑固体潮后的引潮势。

表面风应力采用常用公式: $\vec{\tau}_s = \rho_a C_D |\vec{u}_{10}| \vec{u}_{10}$

不考虑波浪影响时,取 $C_D = \left[\frac{K}{14.86 - 2 \ln |\vec{u}_{10}|} \right]^2$; 考虑波浪成长状态波令影响的公式:

$$z_0 = D_c \times 3.7 \times 10^{-5} \frac{u_{10}^2}{g} \left(\frac{C_p}{u_{10}} \right)^{-0.9}; C_D = \left[\frac{\kappa}{\ln 10 - \ln Z_0} \right]^2$$

这里, u_{10} 为 10m 高度处风速; ρ_a 为空气密度; D_c 为可调系数(这里取 $D_c = 1.0$); C_D 为拖曳系数; κ 为 Karman 常数(0.40), Z_0 为粗糙度, C_p 为波浪峰频对应的波速。

底应力: $\vec{\tau}_b = \gamma |\vec{u}| \vec{u}$, $\gamma = \frac{g}{c_z}$, \vec{u} 是底层流速, c_z 是

Chezy-Manning 摩擦系数。实际运行过程中,按正压模式实现计算。

2 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响

渤海平均水深约 20m,在这样的浅海区波浪和潮汐风暴潮应存在明显的相互作用。为此选择了经常侵袭渤海区的典型天气类型寒潮和南风过程共 4 个个例,通过数值计算结果与实测资料比较来揭示渤海区波浪和潮汐风暴潮的相互作用对波浪的影响。

2.1 个例描述

图 1 给出了渤海研究区及检验点位置,表 1 给出各检验点的具体坐标位置和时间。

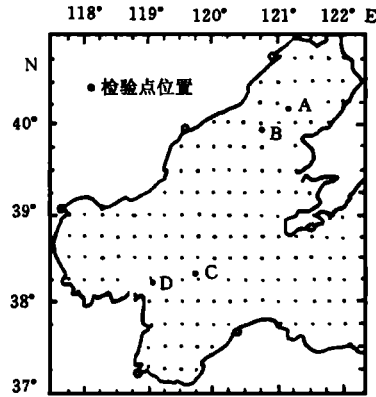


图 1 渤海检验点及网格点

Fig. 1 The position of test points and grid points in the Bohai Sea

表 1 渤海波浪检验个例位置

Tab. 1 The test cases of waves in the Bohai Sea

个例(编号)	过程	计算起止时间	坐标位置	水深(m)
1	CY8805	1988-05-26-08:00—1988-05-29-8:00	40°12'N, 121°07'E, A 点	29
2	CY8710	1987-10-29-02:00—1987-11-01-2:00	39°54'N, 120°45'E, B 点	31
3	CY8806	1988-06-29-08:00—1988-07-01-2:00	38°19'N, 119°41'E, C 点	22
4	CY6404	1964-04-05-08:00—1964-04-07-8:00	38°15'N, 119°00'E, D 点	9.5

从选择的风场特征看,其中 CY8805, CY8806 是锋面气旋引起的偏南风过程,而 CY6404, CY8710 是寒潮过程,从点分布看,有两个点(CY8710, CY8805)分布于较深水深的辽东湾,一个(CY8806)位于渤海南部,还有一个位于黄河口浅水区(CY6404)。从强度看, CY6404 和 CY8710 是两个强寒潮过程(实测风速 27m/s),其中 CY6404 在羊角沟引发了历史上第二大增水 3.4m, CY8805 是一个中等强度的南风过程(实测大风速 14m/s),而 CY8806 则是一个较弱的南风(实测风速 10m/s)。

由此可以看出,4 个检验过程,既有大风过程,又有小风速情形,既有较深的位于辽东湾的点,又有位于中部及沿岸的点,因此所选的个例是比较全面的,能够较好地反映渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用过程的特征及大小。

2.2 波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的计算结果

运用所建立的联合波浪和潮汐风暴潮数值模式,对波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响进行了数值计算研究。为了更好地体现各单个机制的影响,通过不同机制波浪模式(表 2)计算结果比较可以分析:(1)流对波浪的影响;(2)水位对波浪的影响。

表 2 不同机制的波浪模式

Tab.2 Wave models with different mechanisms

WSTLU	波浪计算包括了所有波浪和潮汐风暴潮相互作用影响
WSTL	波浪计算仅包括水位不包括流影响
WSTU	波浪计算仅包括流不包括水位影响
WTLU	波浪计算包括所有波—潮相互作用影响
WTL	波浪计算仅包括潮位不包括潮流影响
WTU	波浪计算仅包括潮流不包括潮位影响
W	波浪计算不包括潮汐风暴潮水位和流场影响

数值模拟中,波浪模式空间步长为 $15' \times 15'$,潮汐风暴潮模式空间步长取 $6' \times 6'$,时间步长,波浪模式 15min,潮汐风暴潮模式 15min,风场是由青岛海洋大学“七·五”攻关期间提供的结果。另外,为了节省篇幅,这里仅对两个过程南风 CY8805 和强寒潮 CY6404 结果予以描述,另两个过程的结果将在结语中予以概括。

波浪和潮汐风暴潮相互作用数值计算过程如下:

- (1) 应用由潮汐风暴潮模式计算的流速和水位于波浪模式中,得到波谱及有关的波要素;
- (2) 计算依赖波浪状态参量波令的表面风应力;
- (3) 应用依赖波浪状态的表面风应力,运行潮汐风暴潮模式得到流速和水位,把新计算的流速和水位再输入波浪模式,重复上述计算顺序。

计算过程中,可以输出各感兴趣的参量及各种机制的结果,以便分析相互影响机制。

2.2.1 波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响 依据上述考虑不同机制的波浪模式,对所述个例分别进行了数值计算并对结果进行了比较,结果描述如下。

(1) 个例 CY8805 的模拟结果(图 1A 点) 模拟与实测结果的比较显示这个位置的水位和流场主要是潮控制的,风的效应对潮位、潮流仅有较少修正。图 2a 显示潮位(风暴水位)对波高的演化过程影响很弱¹⁾,WTL(WSTL)和 W 计算的结果几乎重合,从图 2a 中所示比例难以分辨,而图 2b 则显示潮流对波高的演化过程具有明显可见的影响,特别是波高峰值附近尤为明显。由此说明在该例中 A 点处潮位(风暴水位)较小影响波浪传播和产生,波潮风暴潮相互作用对波高的影响由潮流引起更明显。表 3 显示,考虑所有波浪和潮汐风暴潮相互作用影响的波浪模式 WSTLU 计算的峰值结果 2.68m,与实测值 2.70m 更接近,总的波浪和潮汐风暴潮相互作用对波高的最大调制约为 8%。

1) 由于影响很弱,加之画图比例有些结果重叠,从图中难以分辨,其它的图中也有类似情况。

表 3 个例 CY8805 考虑不同机制波浪模式计算的过程极值(m)

Tabl. 3 Process wave height extreme values for case CY8805 computed by the various wave models(m)

实测	W	WTL	WTU	WTLU	WSTL	WSTU	WSTLU
2.70	2.50	2.50	2.65	2.65	2.50	2.68	2.68

图 2c 和图 2d 分别给出了整个渤海 1988 年 5 月 28 日 04 时波浪较充分发展阶段, 考虑和不考虑波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响计算的波高场和波向大面分布; 而图 2e 和图 2f 则分别给出了该时刻两者波高场差值和波向差值的大面分布。从图 2 可见,

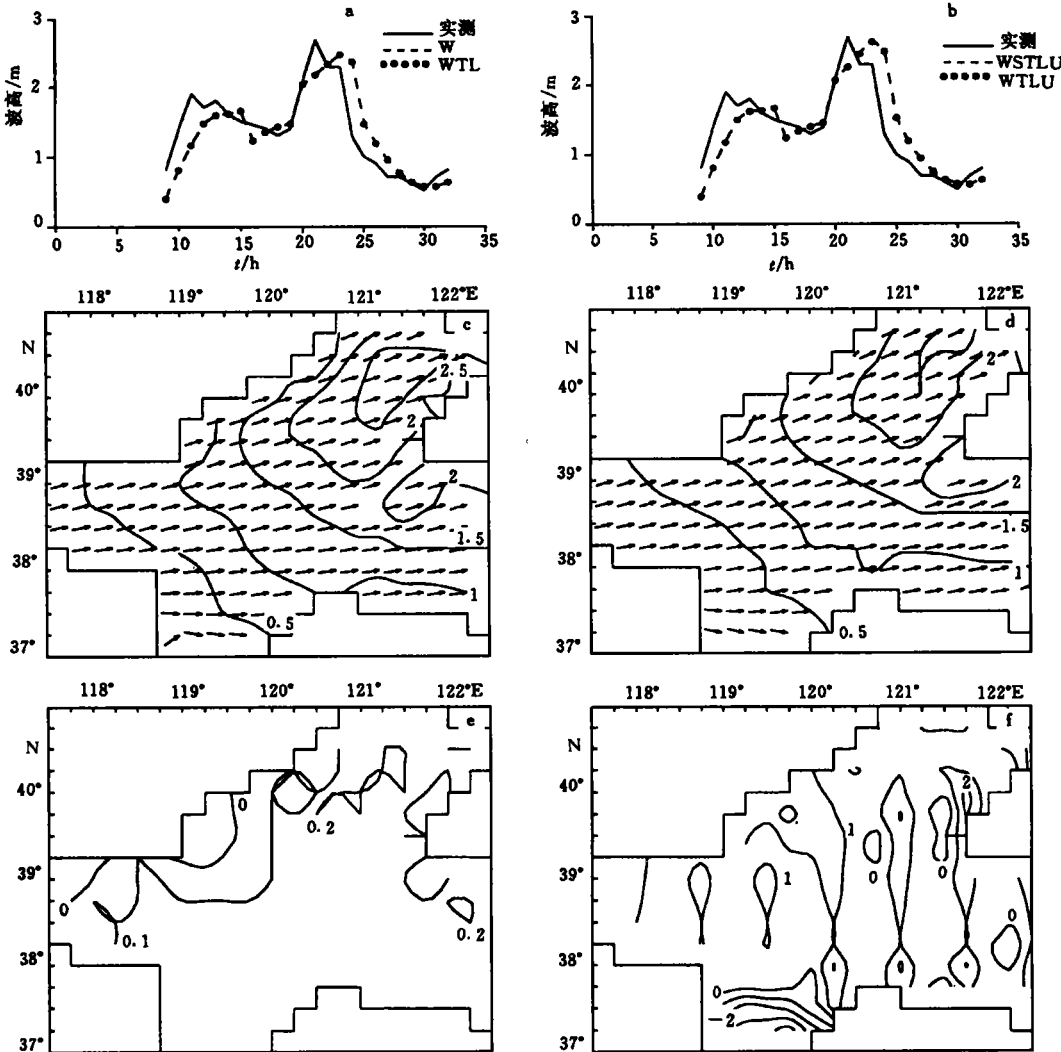


图 2 考虑不同机制的波浪模式对个例 CY8805 的检验和比较

Fig. 2 Examination and comparison of the results computed by the wave models with different mechanisms for case CY8805
 a. A 点 W 和 WTL 计算的 CY8805 波高曲线; b. A 点 WSTLU 和 WTLU 计算的 CY8805 波高曲线; c. WSTLU 计算的有效波高分布(等值线间隔 0.5m); d. W 计算的有效波高分布(等值线间隔 0.5m); e. WSTLU 和 W 计算的有效波高比较; f. WSTLU 和 W 计算的波向比较

对这个中等强度的偏南风过程,总的波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响主要发生在渤海北部,且主要由(潮)流场决定,其它区域较弱。在渤海北部的波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响,最大可增加波高 20cm;对波向影响较弱,最大影响约 2°。

(2) 个例 CY6404 的模拟结果(图 1D 点) 个例 CY6404 的检验点 D 位于黄河口附近,由于偏东北风及地形的诱导作用,使黄河口区域有较大的持续增水,同时由于风及渤海地形诱导作用及潮流的耦合结果,使渤海湾外、黄河口东侧一带形成强的风暴海流,流向总的趋势偏西南,与波传播方向相近(东北向)。由于这样一种流动使水体通过莱州湾外流向湾内又在莱州湾外东北部形成一股趋于东北向的流系,有与波向相反的分量,加

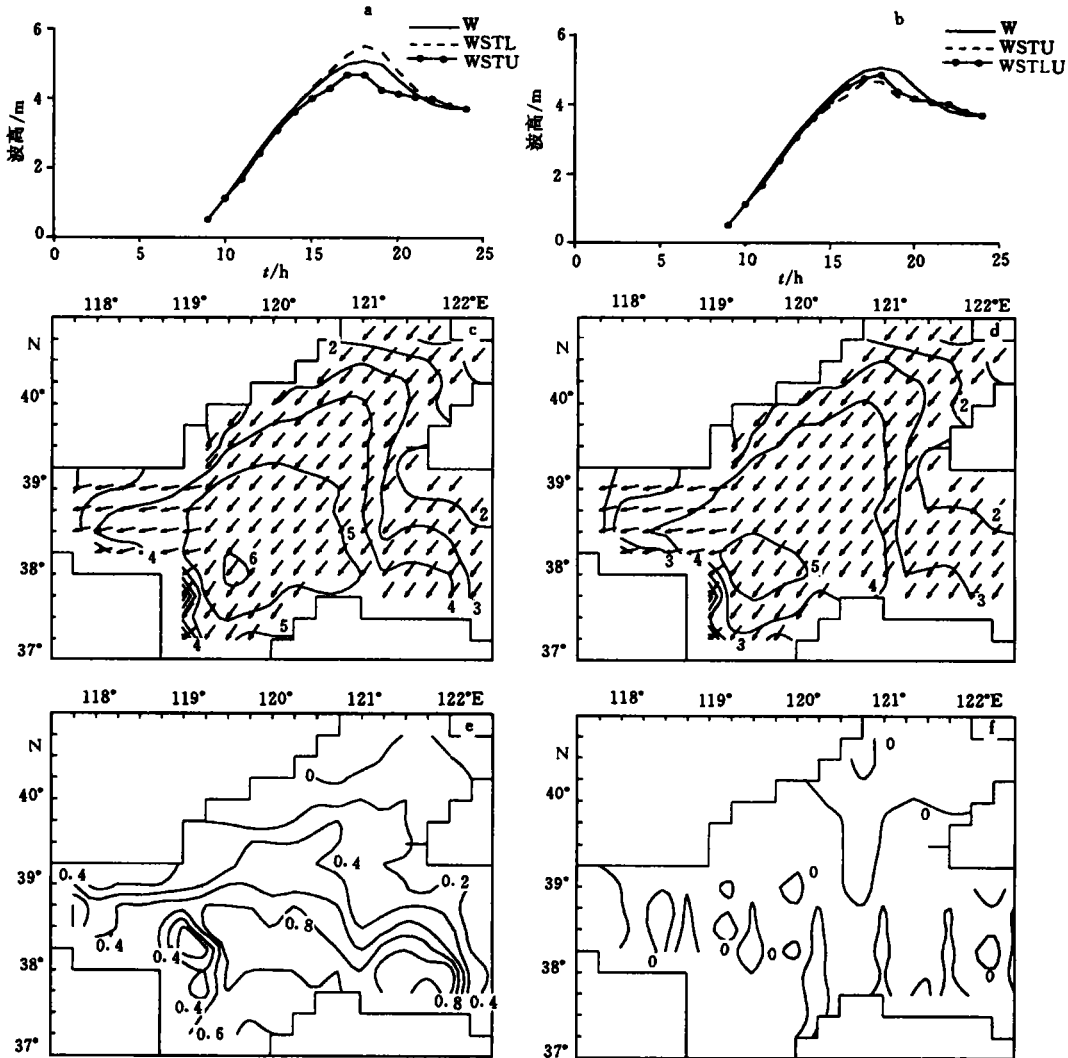


图3 考虑不同机制的波浪模式对个例 CY6404 的检验和比较

Fig.3 Examination and comparison of the results computed by the wave models with different mechanisms for Case CY6404
 a. D点 W,WSTL 和 WSTU 计算的 CY6404 波高曲线比较;b. D点 W,WSTU 和 WSTLU 计算的 CY6404 波高曲线比较;c. WSTLU 计算的有效波高分布(等值线间隔 1.0m);d. W 计算的有效波高分布(等值线间隔 1.0m);
 e. WSTLU 和 W 计算的有效波高比较;f. WSTLU 和 W 计算的波向比较

之黄河口区域水深较浅,使该区域的波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响越显复杂,风暴水位和流场都将起较重要的作用。

模拟与实测结果比较显示该点有较强的持续的风暴增水和较强而趋于偏西南向的流系,水位和流场不再有潮振荡性质,说明该点波浪和潮汐风暴潮相互作用影响强烈地为风暴潮所支配。对这个寒潮过程可以预见水位的变化对波浪的影响,因为水位明显的是由风而增加的,水位的增大导致波高的增大,这是因为在黄河口区的波浪严重地受到深度限制。由于风暴水深的增加减少了底边界层能量耗散,因而导致了大而长的浪。图 3a 和图 3b 显示了在 D 点增水和流对波高的不同影响程度,虽然增水使波高增大,但由于顺波向流的影响,流的作用使波高减少,即在 D 点增水和流对波高的影响是相反的,互相抵消的;但单就这个个例而言,增水和流对波高的效应不能完全抵消,总的增水和流共同影响的结果(WSTLU)使波高稍有减少(约 20cm),与该点已有的研究结果比较(王涛,1995)¹⁾,考虑波浪和潮汐风暴潮共同作用影响的结果更合理,仅考虑潮流的影响可能会得到不合理的结果。由表 4 可见,总的波浪和潮汐风暴潮相互作用对波高的调制影响可达 8%。

表 4 个例 CY6404 考虑不同机制的波浪模式计算的过程极值(m)

Tab. 4 Wave height extreme values for Case CY6404 computed by the various wave models(m)

W	WTL	WTU	WTLU	WSTL	WSTU	WSTLU
5.2	5.2	5.2	5.6	5.6	4.7	4.9

图 3c 和图 3d 给出了 1964 年 4 月 6 日 13 时不考虑和考虑波浪和潮汐风暴潮相互作用影响的波浪模式 W 和 WSTLU 计算的波高场和波向的大面分布,而图 3e 和图 3f 则给出了该时刻两者的波高和波向差值的大面分布。从图 3 中可以看到,波、潮、风暴潮相互作用对波浪的影响主要分布于渤海南部,辽东湾有较弱的作用区域,减水和流共同作用可使波高减小最大约 0.2m,其它区域多为正作用区;黄河口有一区域增水和流的共同影响,使波高变化不是很大,一般波高增加不超过 0.4m,在渤海南部其它区域增水及流的共同影响使波高增大约 0.8m,对波向的影响约 2°的量级。

3 结语

本文提出了一个联合波浪和潮汐风暴潮相互作用数值模式,并运用此模式,就 4 个典型天气个例,对渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的机制和大小进行了研究,在渤海得到了有关波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的如下重要结论。

3.1 波浪和潮汐风暴潮相互作用的影响明显改进传统的波浪的计算结果,因此,在渤海为了得到较准确的波场计算结果,应选用波浪和潮汐风暴潮联合模式。

3.2 波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响对不同强度的天气过程有不同性质。对中等以下的偏南风,渤海波浪和潮汐风暴潮对波浪的影响主要由潮(流)控制。

3.3 对强寒潮过程,波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪的影响主要由风暴潮决定,风暴水位和海流都对波高有不同程度的影响;在增水较强的渤海南部的黄河口区域,增水和海流对波高的影响部分抵消,减弱了风暴潮增水对波高增大的效应;在辽东湾风暴减水和风暴海流的共同作用对波高的调制不大;在渤海南部黄河口区域外风暴水位和海流对波

1) 王涛,1995. 埕岛海域海底长期冲淤变化规律及海水动力因素长期演化规律,内部研究报告

高的调制很明显。

3.4 通过对渤海几个典型天气个例计算可知,对中等以下的偏南风过程波高最大调制可达 0.2m,而对强寒潮天气过程,波高调制可达 1m;在黄河口区域波高调制一般不超过 0.5m;对波向的影响最大达 4°。

参 考 文 献

- 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: 1 856—1 866
- Tolmann H L, 1991. Effects of tides and storm surges on North sea wind waves. *J Phys Oceanogr*, 6: 766—781
- Wolf J, Hubbert K P, Flather R A, 1988. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model. Proudman Oceanographic Laboratory, Rep, 1: 1—109
- Wu X, Flather R A, Wolf J, 1994. A third generation wave model of European continental shelf seas. Proudman Oceanographic Laboratory. Rep, 33: 1—48
- Yin Baoshu, 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

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF WAVES AND TIDE-SURGE INTERACTION ON WAVES IN BOHAI SEA

YIN Bao-Shu, WANG Tao, HOU Yi-Jun, CHENG Ming-Hua, FAN Shun-Ting, SU Jing-Zhi

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

M. I. El-Sabh

(*University of Quebec at Rimouski, Rimouski, G5L, 3A1, Canada*)

Abstract This paper developed a joint numerical model of wave and tide-surge motion. The model consists of an advanced third generation shallow water wave model and a three dimensional tide-surge model, taking into account all wave-current interactions and time varying depth. The joint interaction was carried out by running the two models interactively, exchanging calculated data of sea parameters at regular time intervals. The joint model was applied to the Bohai Sea. For the typical weather cases, influence mechanisms of wave and tide-surge interaction on waves and quantitative estimates of magnitude were obtained. The results demonstrate that the influence nature and magnitude vary with weather conditions; for the cases of moderate intensity, the effects of wave-tide-surge interaction on waves are mainly dominated by tides, but for strong cold waves, the effects of wave-tide-surge interaction on waves are mainly dominated by storm surges and in these cases both storm elevation and currents have some effects on waves, to a certain degree. At the Huanghe River mouth, the effects of storm set up and currents on waves are inverse and partially cancel out, weakening the interaction effects; in general, for strong cold wave cases, wave height maximum modulation can reach 1m, and at the Huanghe River estuary up to 0.5m; for weak weather cases, wave height maximum modulation is around 0.2m. The results computed by the joint model are in good agreement with measured data.

Key words Bohai Sea, Wave-tide-surge, Combined numerical model, Influence mechanisms, Quantitative estimates