

海洋动力要素耦合作用对悬浮物质输移的影响

林 祥¹ ,尹宝树² ,王义刚¹ ,侯一筠² ,陈 君¹

(1. 河海大学海洋工程学院 ,江苏 南京 210098 ; 2. 中国科学院海洋研究所 ,山东 青岛 266071)

摘要 利用近岸海洋动力要素耦合作用的数学模型提供的水动力条件 ,对悬浮物质输移扩散规律进行了数值模拟 ,并与在单纯潮汐风暴潮条件下的悬浮物质输移扩散规律进行了比较 .数值模拟结果表明 ,考虑波浪和潮汐耦合作用的海洋动力参数与实测资料更加吻合 ,从物理机制上看也更加合理 ,考虑近岸海洋动力要素耦合作用的悬浮物质输移扩散规律明显不同于单纯潮汐风暴潮情况下的悬浮物质输移扩散规律 .因此 ,在考虑悬浮物质输移扩散时 ,不应只考虑潮流 ,必须考虑近岸海洋动力要素的耦合作用 .

关键词 波浪 ;潮汐风暴潮 ;耦合 ;物质输移

中图分类号 P731.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2005)06-0709-04

近十几年来 ,沿海环境问题的日益突出使物质输移扩散的研究得到了迅速的发展 .国内外学者做过许多自然水域污染物输移扩散的数值研究 ,包括数值方法和扩散系数的研究 ,但以往的研究大都以潮流为主要的动力要素 ,考虑波浪和潮汐风暴潮耦合作用影响效应的很少^[1~5] .实际的海洋 ,在风的作用下 ,波浪和潮汐风暴潮等动力过程同时发生于同一水体里 ,它们之间必然产生相互影响 ,而且在大风情况下 ,它们之间耦合作用的背景场在近岸区域将决定物质的输运和动力平衡 .因此 ,只有考虑波浪和潮汐风暴潮的耦合作用才能真实地模拟出水动力环境 ,进而研究物质输移扩散规律 .本文对此进行了初步的尝试 ,得到了一些有价值的结果 .

1 波浪和潮汐风暴潮耦合作用的数值模式

1.1 波浪数值模式

本文采用波浪数值模式(YWE-WAM 模式)^[6]计算波浪场 .

波场初始条件 : $t=0$ 时 , F 取为 JONSWAP 谱 ;

开边界条件 :采用能量驱动方法以模拟涌浪的传入 ,即在开边界处假定波浪已达充分成长状态输入相应风速的 PM 谱值 .

1.2 潮汐风暴潮数值模式

在笛卡儿直角坐标系下 ,平面二维非恒定流基本方程可近似表达如下 :

连续方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \zeta)v] = 0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{du}{dt} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{h + \zeta} - \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + A_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

$$\frac{dv}{dt} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{h + \zeta} - \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + A_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

式中 : u , v ——流速在 x , y 方向的分量 ; t ——时间 ; f ——科氏参数 , $f=2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度 , φ 为地理纬度 ; g ——重力加速度 ; ζ ——潮位 ; τ_{ax} , τ_{ay} ——表面风应力在 x , y 方向的分量 ; τ_{bx} , τ_{by} ——底应力在

x, y 方向的分量; h ——平均海平面以下的水深; $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ ——辐射应力张量的4个分量; A_x, A_y ——侧向涡动黏性系数.

初始条件为: $\zeta(x, y, 0) = 0, u(x, y, 0) = 0, v(x, y, 0) = 0$. 边界条件: 对于陆域边界条件(闭边界)有 $v \cdot n = 0$; 对于水边界(开边界)给出各点的潮位值. 表面风应力 τ_{ax}, τ_{ay} , 底应力 τ_{bx}, τ_{by} 以及 $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ 的具体计算公式参阅文献[7].

1.3 沿水深平均的物质二维对流扩散方程

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HuC)}{\partial x} + \frac{\partial(HvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x H \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y H \frac{\partial C}{\partial y}\right) + HS_m$$

(4)

其中, $H = \zeta + h$ 为总水深, C, u, v, K_x 和 K_y 皆为深度平均值.

对开边界, 如果已知边界上的浓度值 C_{Bi} , 可给出 $C_i = C_{Bi}$; 如果不知道边界上的值, 在边界上以 $\frac{\partial^2 C}{\partial n^2} = 0$ 形式处理; 对固边界 $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$.

1.4 计算方法和实现过程

本文采用“ADI”法进行数值模拟. 首先在风场来临前4d进行潮汐的模拟, 得到稳定的潮汐后, 加上风应力项, 进行数值模拟, 得到水位与流速, 并计算物质运输. 然后将水位和流速输入到波浪模式, 进行下一时间步的波浪场数值模拟. 利用计算得到的波参数可以计算出辐射应力和底应力. 然后将计算得到的辐射应力和底应力代入潮汐风暴潮数值模式, 得到新的水位、流速, 并同时计算物质运输. 然后再把水位、流速代入波浪模式进行模拟, 如此进行下去, 直到风过程结束.

2 数值模拟结果

2.1 波浪和潮汐风暴潮耦合作用的数学模型验证

计算区域为 $117^{\circ}38'E \sim 122^{\circ}30'E, 37^{\circ}6'N \sim 41^{\circ}54'N$, 内有实测点A, 见图1. 空间步长取为 $2' \times 2'$. 风场采用青岛海洋大学提供的1999年4月1日0时至4月2日14时大风过程.

图2是A点计算波高、水位、流速、流向与实测资料的比较. 从图2可以看出, 波浪和潮汐风暴潮耦合作用的数学模型是合理可行的.

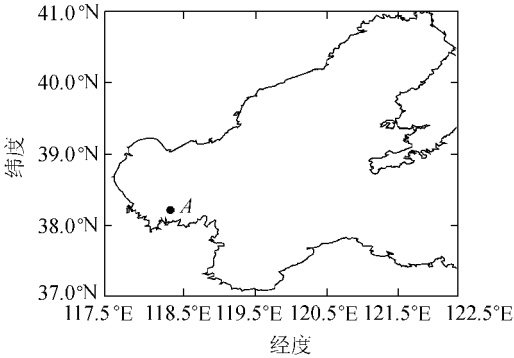


图1 渤海计算区域与实测点A

Fig.1 Location of test point A and calculated region in Bohai Sea

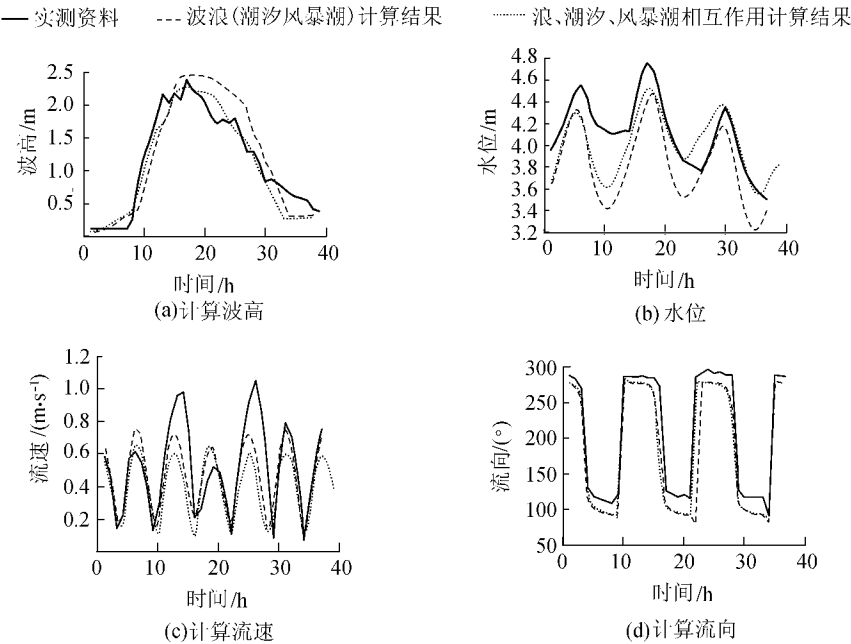


图2 计算值与实测值比较

Fig.2 Comparison between calculated and measured data

2.2 波浪和潮汐风暴潮耦合作用下物质输移扩散规律的数值模拟

计算分两种情况 (a)单纯潮汐风暴潮作用 (b)波浪和潮汐风暴潮耦合作用, 并进行比较. 计算的初始条件取全域从静止状态开始, 即当 $t = 0$ 时, $u = v = \zeta = C = 0$, 解浓度场的对流扩散方程, 沿水深平均的扩散系数由式 (5) 计算^[1]:

$$K_x = \frac{(\alpha U^2 + \beta V^2)H\sqrt{g}}{\lambda \sqrt{U^2 + V^2}} \quad K_y = \frac{(\alpha V^2 + \beta U^2)H\sqrt{g}}{\lambda \sqrt{U^2 + V^2}} \quad (5)$$

式中的 λ 为谢才系数, 根据 Elder, $\alpha = 5.93$, $\beta = 0.23$.

从图 3 可以看出, 在近岸区波浪和潮汐风暴潮耦合作用下的流场结构明显不同于单纯潮汐风暴潮的流场结构.

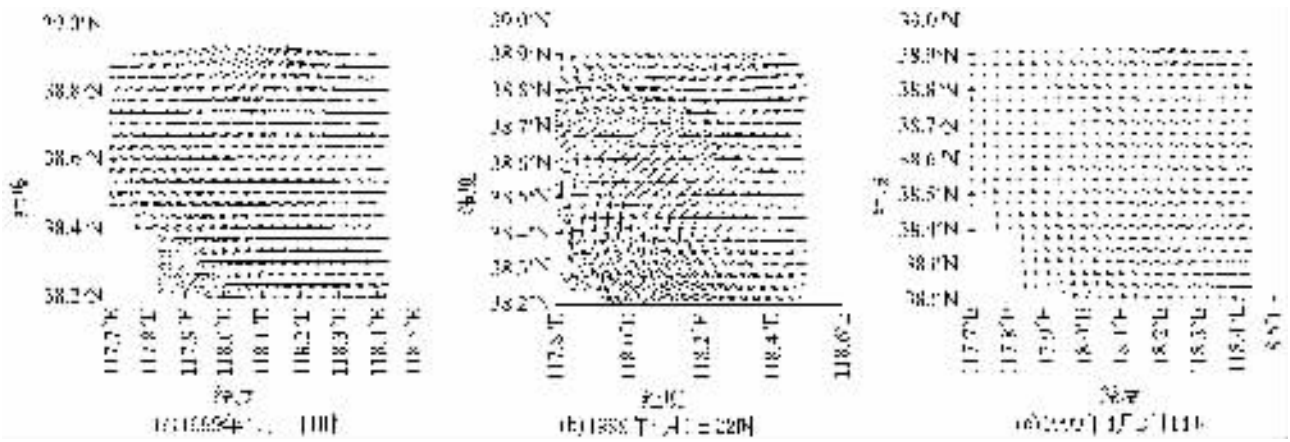


图 3 流场比较

Fig.3 Comparison between velocity fields

在点(E117°58', N38°28', 水深 7.4 m, 离岸不远的地点)上放置 1 个单位浓度的物质点源. 从图 3(a) 可以看到两个计算模式得到的流场图差不多是一样的, 那是因为刚刚起风, 波浪还未充分成长, 因而波浪对流场的作用不是很明显; 从图 4(a) 可以看到, 两个计算模式得到的点源输移扩散情况是类似的.

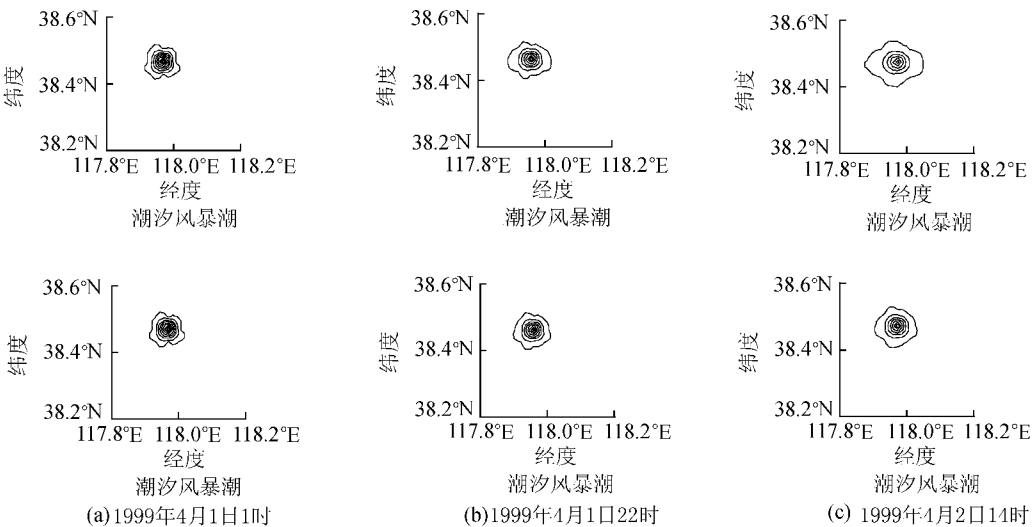


图 4 不同时刻物质输移比较

Fig.4 Comparison of suspended material transportation at different time

随着风速的增加, 波浪不断成长. 在浅水地区, 波浪对流场的作用越来越明显, 从而改变了浅水地区的流场. 这可以从图 3(b) 看出, 流场结构的改变, 导致了点源输移扩散情况的变化. 从图 4(b) 可以看出, 两种计算模式得到的点源输移扩散情况明显开始发生变化. 在波浪和潮汐风暴潮耦合作用下, 点源开始加快在东西方向上的输移扩散, 而单纯潮汐风暴潮流作用下的点源输移扩散速度没有发生大的变化. 随着时间的推移, 点

源输移扩散的范围越来越大.从1999年4月2日0时起,风场发生变化,转变成成为西南风,风速也较小.在笔者所关心的浅水地区,波浪几乎没有了,因而波浪对流场的影响很小.两个模式计算得到的流场几乎是一样的,这可以从图3(c)看出来.

经过38h后,在点(37°28'N,117°58'E)上的1个单位浓度的点源输移扩散情况见图4(c).从图4(c)可以看出,波浪和潮汐风暴潮耦合作用下的物质输移扩散规律不同于单纯潮汐风暴潮作用下的物质输移扩散规律,说明当风存在时,波浪和风暴潮及其耦合作用将改变潮流场,从而影响物质输移的扩散;而当大风时,波浪的搅拌作用更强,它们的耦合背景流场将可能对近岸研究区域的物质输移起决定作用.

3 结 语

利用近岸海洋动力要素耦合作用的数学模型提供的水动力条件,对物质输移扩散规律进行了数值模拟,并与在单纯潮汐风暴潮条件下的物质输移扩散规律进行了比较.从模拟结果看,波浪和潮汐风暴潮耦合作用下的物质输移扩散规律与单纯潮汐风暴潮作用下的物质输移扩散规律不同,说明当有风时,波浪的存在改变了潮汐风暴潮流的流场结构,从而使物质的输移状况发生了变化,因此在近岸海域物质输移扩散计算中,应该考虑波浪和潮汐风暴潮的耦合作用背景场.

参考文献:

- [1] 雷坤.东海陆架悬浮体输送及其数值研究[D].青岛:青岛海洋大学,2000.
- [2] 韩光.浅海近岸大面积波浪场的数值模拟及波流共同作用下污染物输移的数学模型研究[D].天津:天津大学,2000.
- [3] 蒋东辉.渤海海峡沉积物输运的数值模拟[D].北京:中国科学院海洋研究所,2001.
- [4] 江文胜,孙文心.渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究I——模式[J].海洋与湖沼,2000,31(6):682—687.
- [5] 江文胜,孙文心.渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究II——结果[J].海洋与湖沼,2001,32(1):95—99.
- [6] 尹宝树.渤海波浪和风暴潮潮汐运动相互作用的理论和数值研究[D].北京:中国科学院海洋研究所,1996.
- [7] YIN Bao-shu, YANG De-zhou, LIN Xiang, et al. Impact of bottom stress and currents on wave-current interactions[J]. Journal of Hydrodynamic, 2003, B-5: 13—19.

Influence of oceanic dynamic factors coupling on suspended material transportation in coastal areas

LIN Xiang¹, YIN Bao-shu², WANG Yi-gang¹, HOU Yi-jun², CHEN Jun¹

(1. College of Ocean, College of Traffic, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Abstract: The regularity of suspended material transportation and dispersion in coastal areas was simulated under the hydrodynamic condition obtained from the numerical model for oceanic dynamic factor coupling. The comparison of the simulated result with that under storm tides indicates that the present results about wave height, water level, flow velocity and flow direction are more close to the field data, showing that the present result is more reasonable. In consideration of the above fact, not only the oceanic dynamic factors, but also the coupling of the factors should be considered in analysis of suspended material transportation and dispersion.

Key words: wave; storm tide; coupling; material transportation