

# 近岸流对波浪传播影响的数值分析

谢媛媛<sup>1</sup>, 梁丙臣<sup>2</sup>, 马得培<sup>3</sup>

(1. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520; 2. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 宁德海事局, 福建 宁德 352100)

**摘要:** 使用近岸波浪模型 SWAN 计算存在沿岸流和离岸流时的近岸波浪传播。先设离岸流  $u=0\text{m/s}$ , 模拟均匀、非均匀沿岸流的流速和梯度对波高传播的影响; 再设沿岸流  $v=0.5\text{m/s}$ , 模拟均匀、非均匀离岸流的流速和梯度对波能高传播的影响。从模拟中得到, 近岸波浪传播受沿岸流、离岸流的流速和梯度影响时, 波高的变化规律。

**关键词:** 波浪传播; 沿岸流; 离岸流; SWAN

中图分类号: TV139.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)05-0073-06

波浪在传播过程中受到流的影响。顺流即波流同向时, 波浪被拉长变平; 逆流即波流反向时, 波浪被压缩变陡, 波浪产生破碎。当波浪由外海传播至近岸区时, 会发生破碎, 在破波带内会形成平行海岸的沿岸流以及垂直于海岸的离岸流, 离岸流可以向海延伸出较远距离。波浪和水流相互作用的机理还不十分明确, 有必要进行深入的研究。

李玉成<sup>[1]</sup>通过系统分析和实验得出逆流中规则波的破碎指标能应用于不规则波, 并和滕斌、陈兵<sup>[2]</sup>合作在多功能水池中对沿不同角度传播的线性波与均匀流相遇过程中波变形做了系统的观测。练继建<sup>[3]</sup>从 N-S 方程出发, 引入相应的紊流模式, 得到波能耗散和波高衰减。吴永胜等<sup>[4]</sup>从波流运动的基本方程入手, 建立了波浪水流联合作用时边界层内、外流场结构紊动数学模型。张洪生<sup>[5]</sup>利用自适应网格技术, 建立了曲线坐标系下缓变水深水域非均匀水流中波浪传播的数值模拟模型。张洪生<sup>[6]</sup>建立了缓变水深水域非均匀水流中波浪传播的数值模拟模型。

作者采用波浪模型 SWAN 模拟波浪在流存在时的向岸传播, 从模拟中得到在均匀流和非均匀流情况下, 近岸波高传播随沿岸流和离岸流流速、梯度变化的趋势。

## 1 基本理论

作者采用第三代波浪产生模式 SWAN 进行近岸波浪传播的模拟。SWAN 是一个基于波作用密度守恒的波浪谱模型, 考虑风、底摩擦、破波、波波相互作用, 适用于海岸、湖泊、河口地区。SWAN 具体介

绍参见用户手册(The SWAN team., SWAN USER MANUL[Z] (SWAN Cycle version 40.51AB).Delft University of Technology .2007)及专业文件(The SWAN team. SWAN TECHNICAL DOCUMENTATION [Z] (SWAN Cycle version 40.51AB).Delft University of Technology. 2007), 现简要介绍如下: 在流存在的情况下, 波浪与流之间存在能量交换, 波作用密度守恒而能量密度不守恒, 所以 SWAN 使用的是波作用平衡方程。SWAN 模型主控方程如下:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (1)$$

式中,  $N$  为波浪作用谱;  $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  分别是  $x, y, \sigma, \theta$  向的空间传播速度。即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。 $S_{\text{tot}}$  是波作用源汇项, 包括风能输入  $S_{\text{in}}$ 、白帽耗散  $S_{\text{ds,w}}$ 、底摩擦  $S_{\text{ds,b}}$ 、破浪  $S_{\text{ds,br}}$

### 1.1 方程左边各项表达式

$$(c_x, c_y) = -\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2|k|d}{\sinh(2|k|d)} \right) \frac{\sigma \hat{k}}{|k|^2} + \mathbf{u} \quad (2)$$

$$c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla_{zd} \right) - c_g \frac{\hat{k} \partial u}{\partial s} \quad (3)$$

收稿日期: 2007-11-06; 修回日期: 2009-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50809065); 教育部新教师基金项目(200804231039)

作者简介: 谢媛媛(1983-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 近海波浪作用下的泥沙运动, 电话: 13553005023, E-mail: xieyy@mail.cooec.com.cn

$$c_\theta = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \frac{\partial u}{\partial m} \right) \quad (4)$$

## 1.2 方程右边各源汇项表达式

$$S_{in} = A + BE(\sigma, \theta) \quad (5)$$

$$S_{ds,w} = -c_{ds} \left( \frac{B(k)}{B_r} \right)^{p/2} (\tanh(kh))^{(2-p_0)/4} \sqrt{gk} E \quad (6)$$

$$S_{ds,b} = -c_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E \quad (7)$$

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (8)$$

式中,  $D_{tot}$  是由波浪破碎引起的单位面积上的能量耗散率;  $E_{tot}$  为总波能。

## 2 模型设置

计算域为规则长方形 1 500 m × 4 500 m, 横向网格数  $N_C=200$ , 纵向网格数  $N_R=600$ 。海底等高线平行, 坡度为 1/100, 计算区域的西面边界水深为 15 m, 入射波高为 2 m, 入射角度为零。计算区域平面如图 1 所示。

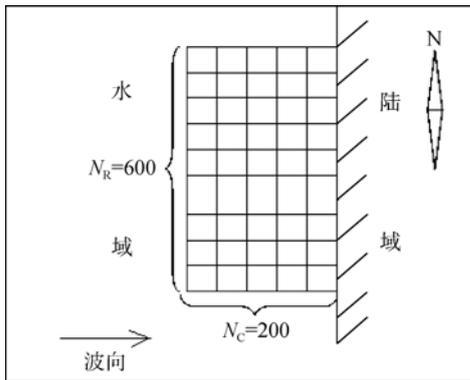


图 1 计算域平面图  
Fig. 1 Plan sketch

模拟时先将离岸流设为零, 分别考虑均匀、非均匀沿岸流情况下流速和梯度对波高传播的影响, 再将沿岸流设为一常值, 分别考虑均匀、非均匀离岸流情况下流速和梯度对波高传播的影响。

## 3 数值模拟结果讨论

### 3.1 沿岸流 $v$ 的影响

#### 3.1.1 均匀沿岸流, 流速对波能传播的影响

模拟结果见图 2。  $v$  没有流速梯度时, 在波浪向岸传播的过程中浅水作用比较明显。并且和图 6 结

果进行比较可以得到, 在离岸流和沿岸流都为均匀流时, 如果离岸流  $u=0$  m/s, 则浅水作用占主导作用。这时波浪在向岸传播的过程中, 先从周围中吸收能量波高增加, 达到破碎高度后, 波高快速减小到零。当  $v < 1.5$  m/s 时, 波高变化连续, 流速越大浅水作用越弱, 但是影响并不大; 当  $1.5 \text{ m/s} < v < 3.3 \text{ m/s}$  时, 波浪在向岸传播过程中波高有突变点, 并且这个点的水深排序和流速排序不一致。

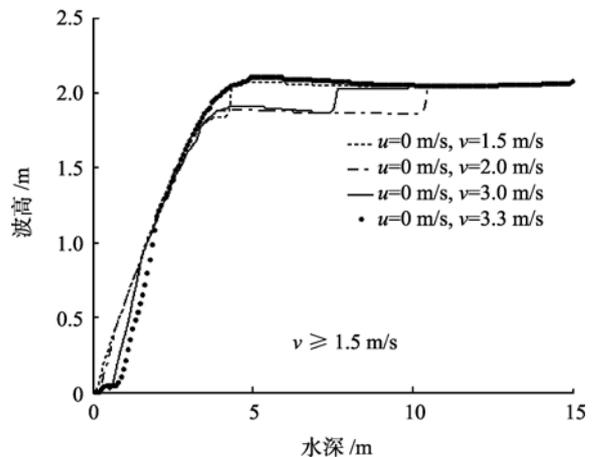
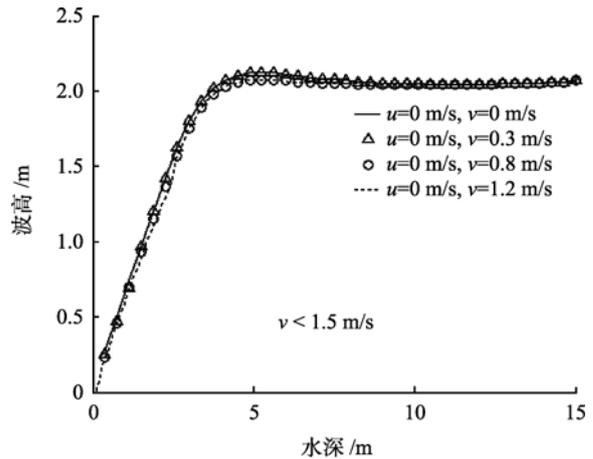


图 2 均匀沿岸流时波高变化

Fig. 2 Variation of wave height (uniform longshore currents)

#### 3.1.2 非均匀沿岸流, 梯度对波能传播的影响

模拟结果见图 3。梯度的绝对值越大, 初始时波能随水深变化越快, 周围环境从波浪中吸收能量。在传播过程的中部, 波高变化较缓慢, 波浪和近岸流能量交换较少。达到岸边时由于水深变浅, 波浪破碎, 波高快速地减为零。尤其当沿岸流较大和较少时, 波浪传播到岸边时, 由于水的粘滞作用, 波高略有增加后减小为零。

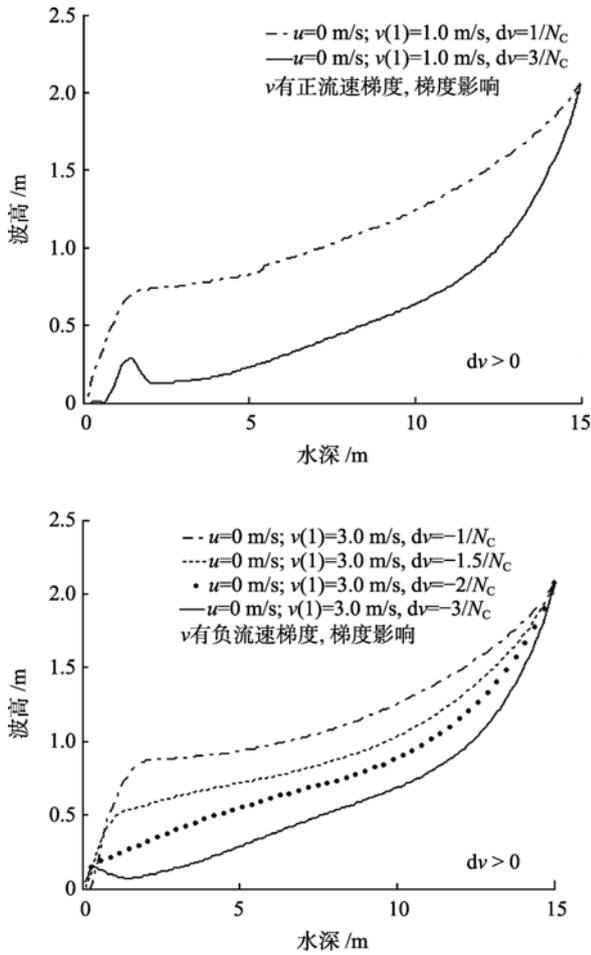


图 3 非均匀沿岸流时波高随水深变化

Fig. 3 Variation of wave height (non-uniform longshore currents, different gradients)

### 3.1.3 非均匀沿岸流, 入射流速对波能传播的影响

模拟结果见图 4。梯度相同的情况下, 流速大小对波能传播基本没有影响。当流有正流速梯度时, 波高基本随水深呈指数衰减, 传到岸边时, 在地形变浅作用下, 波高有一个稍有增加然后减小的过程, 流速越大这个变化处的水深越大。当流有负流速梯度时, 波浪在流、底摩擦等的作用下损失能量, 速度较缓慢, 这个过程大概损失一半波能, 到达破碎水深后剩下的一半波能由于破碎迅速地减小为零。

### 3.1.4 流速梯度符号对波能传播的影响

模拟结果见图 5。在深水区, 流速梯度符号对波能传播基本没有影响; 在浅水区, 正流速梯度使波浪损失波能较慢。

沿岸流流速度大小对波高的向岸传播影响不大, 只是浅水作用稍有差别。沿岸流流速梯度绝对值越大, 波高损失越剧烈。当没有流速梯度并且  $1.5 \text{ m/s} < v <$

3.3m/s 时, 波浪在向岸传播过程中波高有突变点, 并且这个点的水深排序和流速排序不一致。

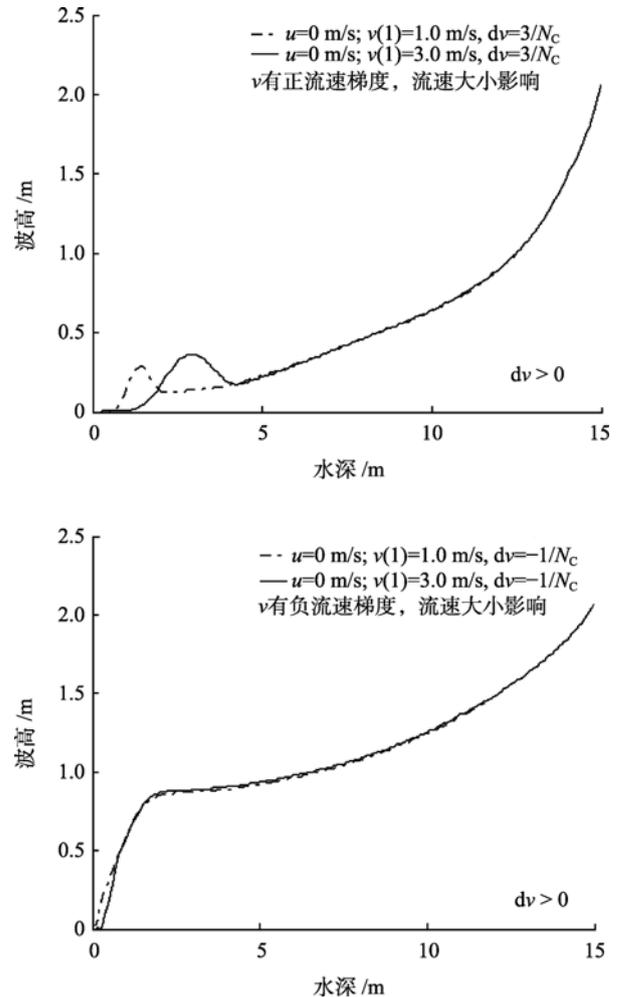


图 4 沿岸流梯度相同时波高随水深变化

Fig. 4 Variation of wave height (non-uniform longshore currents, identical gradient)

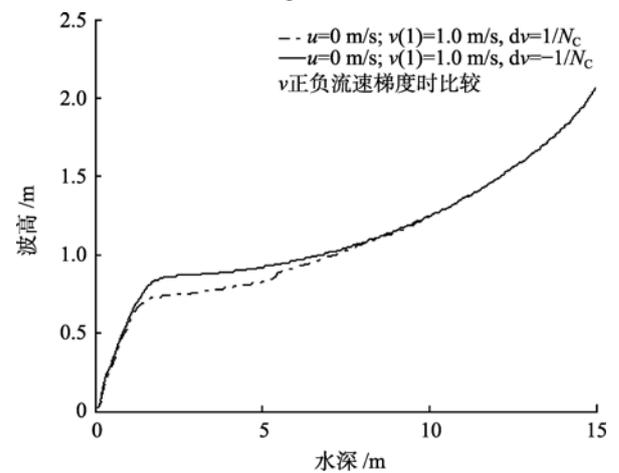


图 5 沿岸流正负梯度情况下波高变化

Fig. 5 Variation of wave height (non-uniform longshore currents, different gradient signs)

### 3.2 离岸流 $u$ 的影响

#### 3.2.1 均匀离岸流, 流速对波能传播的影响

模拟结果见图 6。均匀流流速绝对值越大, 波能损失越剧烈。离岸流  $u=0$  m/s 时, 浅水作用较明显, 波浪从深水往浅水传播时, 先吸收能量波高增加, 水深变浅使波浪发生破碎后, 波高减小。和上面结果比较, 离岸流不为零时, 在传播的初始阶段波能损失较快, 波浪将波能传递给流。顺流时, 波高的变化有不连续点。

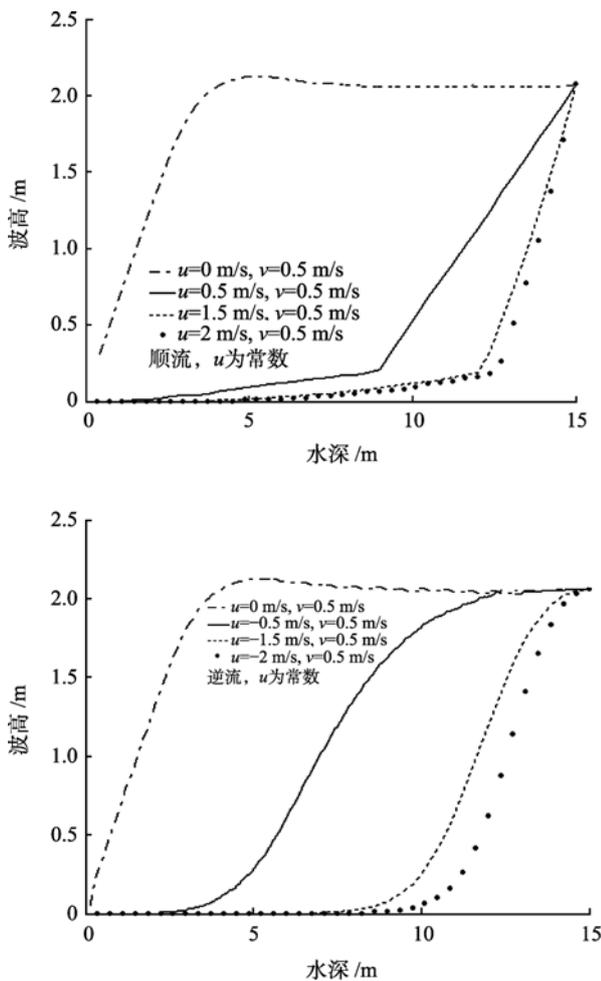


图 6 离岸流为均匀流时波高变化

Fig. 6 Variation of wave height (uniform offshore currents)

#### 3.2.2 非均匀离岸流, 梯度对波能传播的影响

模拟结果见图 7。梯度  $du$  越大, 波能随水深变浅损失越缓慢。在顺流时, 波高随水深大致呈指数变化, 并且梯度较小时, 变化有不连续点。在逆流时, 波能在传播的初始阶段迅速减小到零附近, 梯度较大这个趋势会较缓慢。

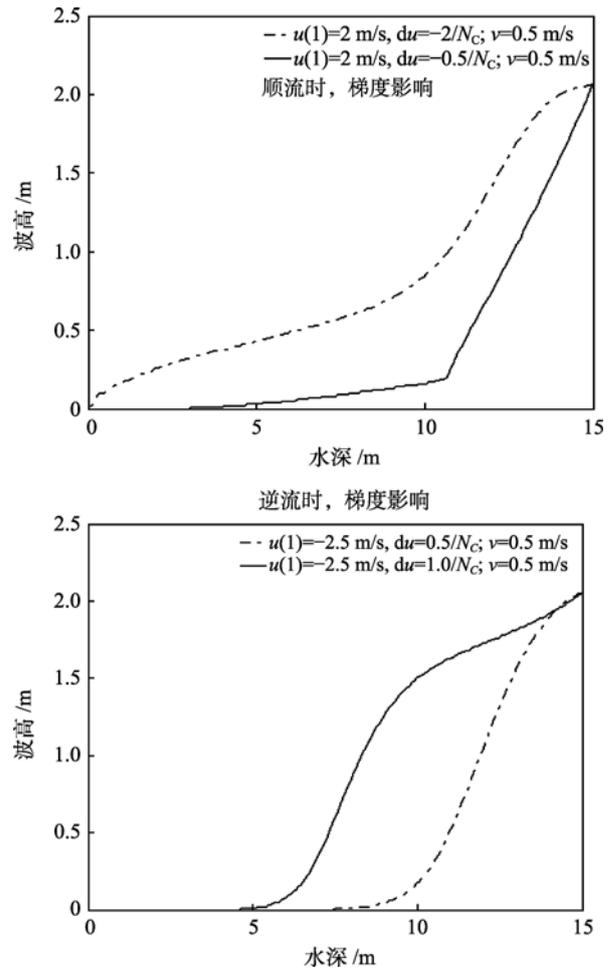


图 7 离岸流梯度不同时波高变化

Fig. 7 Variation of wave height (non-uniform offshore currents, different gradients)

#### 3.2.3 非均匀沿岸流, 入射流速对波能传播的影响

模拟结果见图 8。顺流时流速越大, 波能随水深变浅损失越剧烈。逆流时, 入射流速大于 1.0 m/s 时, 流速愈大, 波能随水深变浅损失越剧烈; 入射小于 1.0 m/s 时, 流速越小波能随水深变浅损失越剧烈; 当入射流速在 1.0 m/s 附近时, 浅水效应较明显。

#### 3.2.4 顺逆流对波能传播的影响

模拟结果见图 9。波浪向岸传播在逆流条件下波高损失较顺流时慢。逆流, 波浪受到波浪的挤压作用变陡, 波能损失较慢; 顺流, 波浪受流的拉伸作用变平坦, 波能损失较快。和前面结果比较得出, 顺流离岸流速较大时, 波高随水深呈线性变化, 且有折点。

离岸流的流速和梯度对波浪向岸传播时的波高变化都有较大的影响。流速愈大, 梯度越小, 波能损

失越剧烈。非均匀逆流入射小于 1.0 m/s 时，流速越小波能随水深变浅损失越剧烈。顺流时，在一定离岸流速范围内，波高变化会出现不连续点。

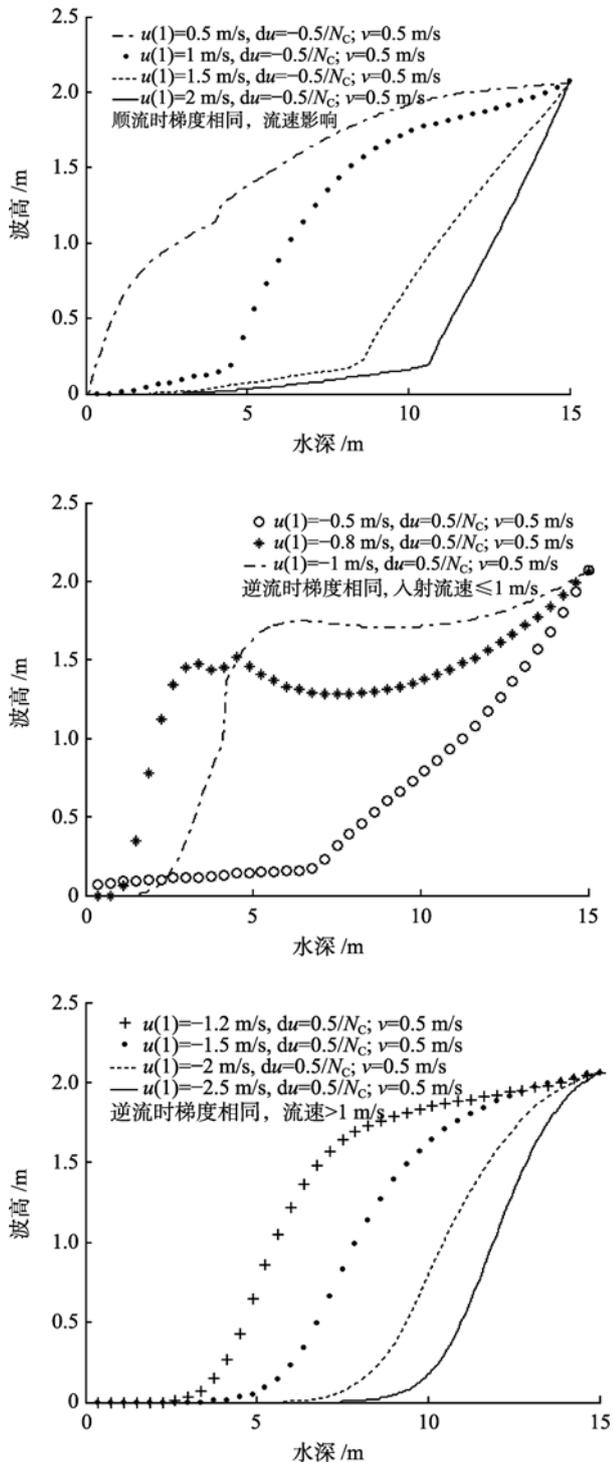


图 8 离岸流梯度相同时波高变化

Fig. 8 Variation of wave height (non-uniform offshore currents, identical gradient)

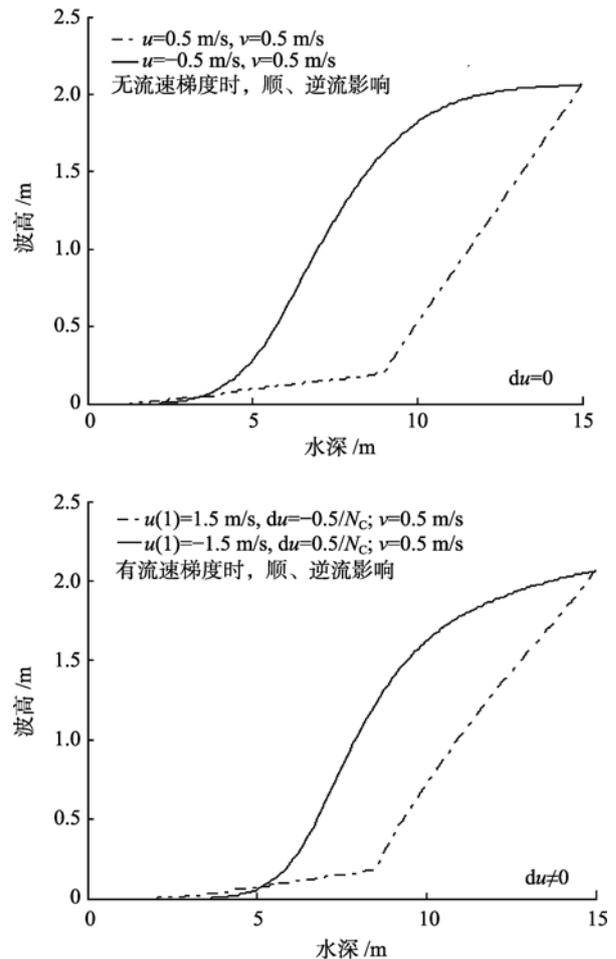


图 9 顺逆流时波高变化

Fig. 9 Variation of wave height (concurrent & counter-current)

## 4 结论

作者使用 SWAN 模型，分别模拟了近岸流系中的沿岸流和离岸流作用下，波浪向岸传播过程中波高沿途的变化，得到以下结果：(1) 离岸流的流速和梯度对波浪向岸传播时的波高变化都有较大的影响。流速较大时，波高随水深呈线性变化，并且在中途有一个变化的折点。(2) 沿岸流流速大小对波高的向岸传播影响不大，只是浅水作用稍有差别，流速越小浅水作用越明显。沿岸流流速梯度绝对值越大，波高向岸传播时损失越剧烈。(3) 均匀沿岸流并且  $1.5 \text{ m/s} < v < 3.3 \text{ m/s}$  时，波浪在向岸传播过程中波高有突变点，并且这个点的水深排序和流速排序不一致。离岸流逆流存在流速梯度情况下，大概以  $u=1.0 \text{ m/s}$  为分界，波高变化速度相应于入射流大小的规律有差异。

参考文献:

- [1] 李玉成. 不规则波在逆流中的破碎[J]. 港口工程, 1993, 5: 15-20.
- [2] 李玉成, 腾斌, 陈兵. 波浪在水流作用下的变形[J]. 水动力学研究与进展, 1995, 10(2): 173-180.
- [3] 练继建, 赵子丹. 非均匀流动中的波能耗散[J]. 海洋通报, 1994, 13(1): 15-24.
- [4] 吴永胜, 练继建, 王兆印, 等. 波浪与水流相互作用模型[J]. 水利学报, 2002, 4: 13-17.
- [5] 张洪生, 丁平兴, 吴中, 等. 曲线坐标系下非均匀水流中波浪传播的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1261-1265.
- [6] 张洪生, 赵红军, 丁平兴, 等. 非均匀水流水域波浪的传播变形[J]. 力学学报, 2007, 39(3): 325-332.

## Numerical study of the influence of coastal current on wave propagation

XIE Yuan-yuan<sup>1</sup>, LIANG Bing-chen<sup>2</sup>, MA De-pei<sup>3</sup>

(1. Offshore Oil Engineering (Qingdao) Corporation Limited, Qingdao 266520, China; 2. Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Ningde Maritime Safety Administration, Ningde 352100, China)

Received: Dec., 6, 2007

Key words: wave propagation; longshore current; offshore current; SWAN

**Abstract:** We simulated propagation of coastal waves coupled with longshore currents and offshore currents. Firstly, we investigated how the velocities and the gradients of uniform or non-uniform longshore currents affect wave heights in the propagation, when the offshore currents were assigned to be zero. Secondly, we investigated how the velocities and the gradients of uniform or non-uniform offshore currents affect the variation of wave heights in the propagation, when the longshore offshore currents were assigned to be a constant. As a result, the correlation between wave height and the velocity and the gradient of coastal currents was obtained.

(本文编辑: 刘珊珊)

(上接第 31 页)

## Herbicide basta resistant gen *bar* as a new selective marker for genetic engineering of *Phaeodactylum tricornutum*

BIAN Shu-guang<sup>1,2</sup>, JIANG Peng<sup>2</sup>, CUI Yu-lin<sup>2,3</sup>, LIU Zhao-pu<sup>1</sup>, QIN Song<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Biology of Jiangsu Province, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jun., 6, 2009

Key words: *Phaeodactylum tricornutum*; phosphinothricin; *bar* gene; selective marker

**Abstract:** Zeocin, a routine selective reagent in diatom genetic engineering, is not suitable for the construction of expression system of diatoms, due to its photosensitivity and mutagenicity. In order to find a suitable selective reagent for photobioreactor-based culture of transformed *Phaeodactylum tricornutum*. The sensitivity of *P. tricornutum* to five antibiotics (Chloramphenicol, Kanamycin, Penicillin, Streptomycin, and Hygromycin) and phosphinothricin (PPT) was tested. The results showed that *P. tricornutum* was sensitive to PPT, with a 72-h half death concentration of 22 mg/L. The expression vector pSVB, which contained PPT-resistant gene *bar*, was transformed into *P. tricornutum* cells by particle bombardment; and the resistant *P. tricornutum* was selected by PPT screening. It was perimentally confirmed that the transformed *P. tricornutum* was resistant to PPT. This research indicates that phosphinothrin is suitable for constructing a safe, efficient, low cost expression system of *P. tricornutum*.

(本文编辑: 康亦兼)