

林 緬, 范奉鑫, 李 勇等. 南海北部沙波运移的观测与理论分析. 地球物理学报, 2009, 52(3): 776~784  
Lin M, Fan F X, Li Y, et al. Observation and theoretical analysis for the sand-waves migration in the North Gulf of South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 776~784

## 南海北部沙波运移的观测与理论分析

林 緬<sup>1</sup>, 范奉鑫<sup>2</sup>, 李 勇<sup>1</sup>, 阎 军<sup>2</sup>, 江文滨<sup>1</sup>, 龚德俊<sup>2</sup>

1 中国科学院力学研究所, 北京 100190

2 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

**摘 要** 针对南海北部海域特点建立了模拟该区域小尺度沙波运移过程的准三维力学模型. 以多波束海底地貌扫描数据和水文资料为基础, 预测了研究区域沙波的运移, 其结果在沙脊脊沟处与实际观测一致, 而在脊背上与实际观测值存在差异. 分析表明, 本文所提出的物理模型可以用于预测南海海域以推移质泥沙运动为主的小尺度沙波运移规律. 这一结果对该区域海底管线等工程设计是很有意义的.

**关键词** 南海北部, 小尺度沙波, 准三维力学模型, 多波束海底地貌扫描

文章编号 0001-5733(2009)03-0776-09

中图分类号 P731

收稿日期 2008-09-17, 2009-02-24 收修定稿

### Observation and theoretical analysis for the sand-waves migration in the North Gulf of South China Sea

LIN Mian<sup>1</sup>, FAN Feng-Xin<sup>2</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>2</sup>,

JIANG Wen-Bin<sup>1</sup>, GONG De-Jun<sup>2</sup>

1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

**Abstract** According to the environmental characteristic of the north gulf of South China Sea, a quasi-3D mechanics model has been built for simulating the small scale sand-waves migration in the seas of southwest of Hainan Island. Based on the submarine micro-geomorphic data induced by multi-beam system and hydrographic survey record, the migrations of the sand-waves in the study area are predicted. The results show that calculation is consistent with the observation data in the groove of sand ridge, but not well in the crest of sand ridge. It is indicated that the mechanics model should be used to predict the migration of the small scale sand-waves which are dominated by bed load in the seas. This paper is very meaningful to project the route of submarine pipeline.

**Keywords** The North Gulf of South China, Small scale sand-waves, Quasi-3D mechanics model, Submarine micro-geomorphic data

**基金项目** 国家自然科学基金委自然科学基金项目(40576046)、国家科技部“863”项目(2006AA09Z301)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-212-2)联合资助.

**作者简介** 林 緬, 女, 1960 年出生, 中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师, 现从事海洋工程与环境方面的研究.

E-mail: linmian@imech. ac. cn

## 1 引言

认识海底沙波运动特征,预测沙波运动规律是油气输送管道路由设计中必不可少的重要环节。在我国南海北部的琼西南海域,海底沙波活动异常活跃,东方1-1气田管线正好穿越该海区。海底地质勘探表明沙波运动已造成的海管多处悬跨,极易发生海管断裂事故。因此认识该海域海底沙波运动特征一直是工程师关注的焦点。同时,研究该海域海底微地貌的沉积特征及其成因机理也是地学界关心的课题。

长期以来潮流是沙波运动主要动力一直是大家的共识<sup>[1~6]</sup>。起初人们把潮流简化为单向流预测沙波运动<sup>[7~10]</sup>,然而所得结果远远大于实测值。之后Hulscher<sup>[11~13]</sup>又提出了环状潮波模型解释大尺度沙波(沙波波长长达几百米)的成因。近几年陆续有一些文章提出在环状潮波模型基础上考虑风生流的影响<sup>[15~18]</sup>,建立起了大尺度沙波运动的力学模型<sup>[16]</sup>。然而在实际中还有一些海域分布着小尺度沙波(即沙波波长仅有几十米)。我国南海北部的琼西南海域就分布着这种小尺度的沙波。很显然,环状潮波模型无法描述小尺度沙波的运动。因此建立恰当的小尺度沙波运动力学模型是关键。本文将以南海北部琼西南海域的小尺度沙波为例对这一问题展开讨论。

首先我们根据北部湾海域海洋环境的基本特征给出了描述小尺度沙波运动的准三维物理模型,然后通过与现场实测数据比较分析,获得了该海域的沙波运动规律,最后指出了该模型的适用范围。

## 2 琼西南海域基本情况调查

20世纪80年代中后期因海洋油气开采的需要,美国、英国、加拿大等国家开始采用海底地质过程的原位监测来解决活动海底地质过程的量化评估问题。近几年我们国家也开展了这方面的工作。自2004年起,中国科学院海洋研究所通过海底原位测量和多波束全覆盖测量对琼西南海域进行了多次现场观测。观测范围从 $18^{\circ}50.75'N$ ,  $108^{\circ}15.45'E$ ~ $18^{\circ}52.96'N$ ,  $108^{\circ}18.49'E$ (图1a)。本文选取 $18^{\circ}51.84'N$ ,  $108^{\circ}16.23'E$ 至 $18^{\circ}52.73'N$ ,  $108^{\circ}17.81'E$ 作为研究区(图1b)。研究区内大致有30多个沙波,平均波长33 m,波高 $\leq 1.2$  m,沙波属于小尺度沙波,分布在沙脊脊沟和脊背上。

南海海域位于印度洋和太平洋接合部,被我国大陆、越南、菲律宾、婆罗洲等陆地所包围,是连接亚洲季风与澳洲季风的桥梁,盛行于南海的季风为推动海流的主要外力。据气象资料调查可知<sup>[19]</sup>,研究区每年10月到次年3月盛行NE向风,平均风速为5.83 m/s;5月到8月盛行S-SSW向风,平均风速为7.19 m/s;4月和9月为风向转换季节。水文资料调查表明,北部湾的日潮振幅大于半日潮振幅,主要分潮属正规日潮性质。另外,研究区平均水深42 m,波浪高度大约 $\leq 1.2$  m,波周期在3.1~5.0 s之间,水波波长在15~39 m之间。下面我们将根据以上研究区海洋环境特点提出描述小尺度沙波的物理模型。

## 3 基本物理模型

由琼西南海域基本情况调查可知,研究区受到风、潮流、波浪的共同作用。风生流流速、潮流流速和波浪传质速度是影响沙波发生、发展、运动的关键因素。我们预估这三个物理量的大小。参照目标海域海洋环境参数可估算出底床附近三者的平均流速,其中潮流0.2 m/s,风生流0.1 m/s,波浪传质速度为 $3.1 \times 10^{-6}$  m/s。由此可见,除风暴潮或台风等极端海况,一般海况下波浪对沙波成形和运动的贡献非常小,可忽略不计。潮流和风生流应该是研究区海底沙波运动的主要动力。本文主要仅研究二者对沙波运动的贡献。

考虑到研究区沙波平均波长仅33 m,而潮波波长上千米,比沙波波长大两个量级,由此我们认为研究区沙波的形成不是环状潮波作用的结果,而应该是底床附近近壁层流层不稳定性所产生,与水深关系不大。所以上层水体我们采用浅水波假定描述潮流场<sup>[20]</sup>:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = fv - g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \epsilon \nabla^2 u - \frac{1}{\rho H} \tau_x^b \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -fu - g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \epsilon \nabla^2 v - \frac{1}{\rho H} \tau_y^b \quad (3)$$

式中, $\xi$ 为波面, $H$ 为水深, $u$ 和 $v$ 分别为沿经线和纬线两个方向的速度, $g$ 为重力加速度, $\epsilon$ 为涡黏系数, $\tau_x^b$ 和 $\tau_y^b$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向的床面切应力; $f$ 是柯氏系数。

由于研究区域位于海南岛东方岸外海域,地处北部湾浅海陆架,风生流受柯氏力作用形成 Ekman 环流. 因此在床面附近我们采用风生环流模型获得流速沿垂向分布<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} u(z) = \left( \frac{U_* \varepsilon}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_b}\right) + 8.5U_* \right) \cos\gamma \\ v(z) = \left( \frac{U_* \varepsilon}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_b}\right) + 8.5U_* \right) \sin\gamma \end{cases} \quad (4)$$

通过潮流场与风生流场联合作用就可以实现对研究区域的准三维流场数值模拟. 其中  $U_* =$

$$\begin{aligned} & \left( \sqrt{\frac{f\varepsilon(\rho\cos\alpha\cos\gamma)}{(\rho_a c_d c_{da})}} \right) \sin\gamma (\cosh H \sqrt{2f/\varepsilon} - \cos H \sqrt{2f/\varepsilon}) \\ & = 2Q\cos\gamma \left[ \sin(\alpha - \pi/4) \sinh H \sqrt{f/2\varepsilon} \cos H \sqrt{f/2\varepsilon} - \cos(\alpha - \pi/4) \cosh H \sqrt{f/2\varepsilon} \sin H \sqrt{f/2\varepsilon} \right] \\ & \quad - Q\cos\alpha \left[ \sin(\alpha - \pi/4) \sinh H \sqrt{2f/\varepsilon} - \cos(\gamma - \pi/4) \sin H \sqrt{2f/\varepsilon} \right] \end{aligned}$$

沙波运移是以推移质泥沙输移为主. 我们这里采用两种模型:

模型 1:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

模型 2:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( q_x - \lambda_m |q_x| \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( q_y - \lambda_m |q_y| \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0, \quad (6) \end{aligned}$$

式中,

$$q = \begin{cases} B\sqrt{d} (|u|/u_0)^n (u - u_0) (d/\alpha |h|)^{1/m} & |u| > u_0 \\ 0 & |u| \leq u_0 \end{cases}$$

其中  $u_0 = Ad^{1/3} (\alpha |h|)^{1/m}$ ,  $\eta$  为沙波波面,  $u$  为近床水质点速度,  $h$  为沙波波高;  $A=3.6, B=0.8, n=3, \alpha=0.7, m=10.0, \lambda_m=2.0, d$  为泥沙粒径. 很明显, 模型 1 仅考虑海水深度对泥沙推移量的影响, 而模型 2 则是在此基础上又考虑了沙波坡度的影响.

下面我们将讨论潮流和风生流联合作用下泥沙的运移, 并与实际观测资料对比, 从而分析以上基本物理模型的合理性.

### 4 计算结果

本文采用 2004 年 7 月和 2005 年 10 月两次实测结果进行分析计算. 为分析问题方便, 我们将研究区域划分为 A、B、C 三个区域(图 2), 其中区域 A 和 C 位于沙脊两侧, 区域 B 位于沙脊脊上.

$\sqrt{\tau_c/\rho_t}, \tau_c = c_d R |R|$ ,  $R$  为底部滑移速度, 通过风速  $Q$  和风向  $\alpha$  来确定:  $R = \sqrt{Q^2 c_{da} \rho_a \cos\alpha / c_d \rho_t \cos\gamma}$ , 这里  $\rho_a$  为空气密度;  $\rho_t$  为海水密度;  $c_{da}$  为底床表面拖曳系数;  $c_d$  为底床拖曳系数. 根据北部湾水文资料可获得每个季风段的平均风速和风向, 计算得到相应时间段的风生流场在底床附近沿水深分布特征. 本文取冬季季风风向为 NE 方向, 平均风速为约 5.83 m/s, 夏季季风风向取为 S-SSW 方向, 平均风速为 7.19m/s.  $\gamma$  为滑移速度方向, 由下式确定:

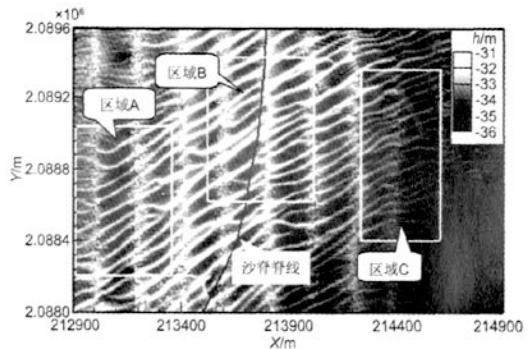


图 2 A、B、C 三个区域的位置图

Fig. 2 The locations of zone A, zone B and zone C

首先我们模拟整个南海北部湾海域的潮流场. 计算时在湾口以及琼州海峡处取开边界条件, 即沿开边界流速分量为零, 垂直于开边界流速的偏导数为零. 输入 O1+K1+M2 潮位的第一类边界条件. 底部摩擦系数取为  $(2.6 - H/200) \times 10^{-3}$ . 为了保证计算稳定性, 计算中采用 Ramp 函数, 潮位由零开始逐渐增加, 经过 4 个潮周期后形成稳定的潮波. 而后通过对计算结果进行调和分析得到大域(整个北部湾)内各节点的振幅和迟角值, 再利用其插值确定小域(研究区域)周边的边界条件, 从而就可以计算得到小域内的随时间变化的流场信息.

以 2004 年 7 月多波束海底地形实测结果为初始底床形状, 由速度场与沙波运移方程的耦合计算, 获得海底沙波随时间变化形态. 为了和实测数据比较, 我们从 2004 年 7 月 1 日开始计算一直到 2005 年 10 月 1 日为止. 图 3 给出本文物理模型预测的 2005 年 10 月(15 个月)后的沙波位置, 同时还给出

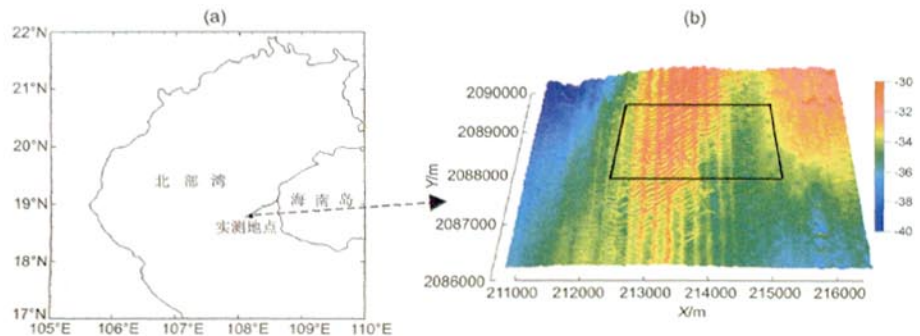


图1 调查海域

(a) 图中圆点为调查海域; (b) 图中方框为本文研究区。

Fig.1 The survey area

(a) The round spot shows survey area ;(b) The square is the study area in this paper.

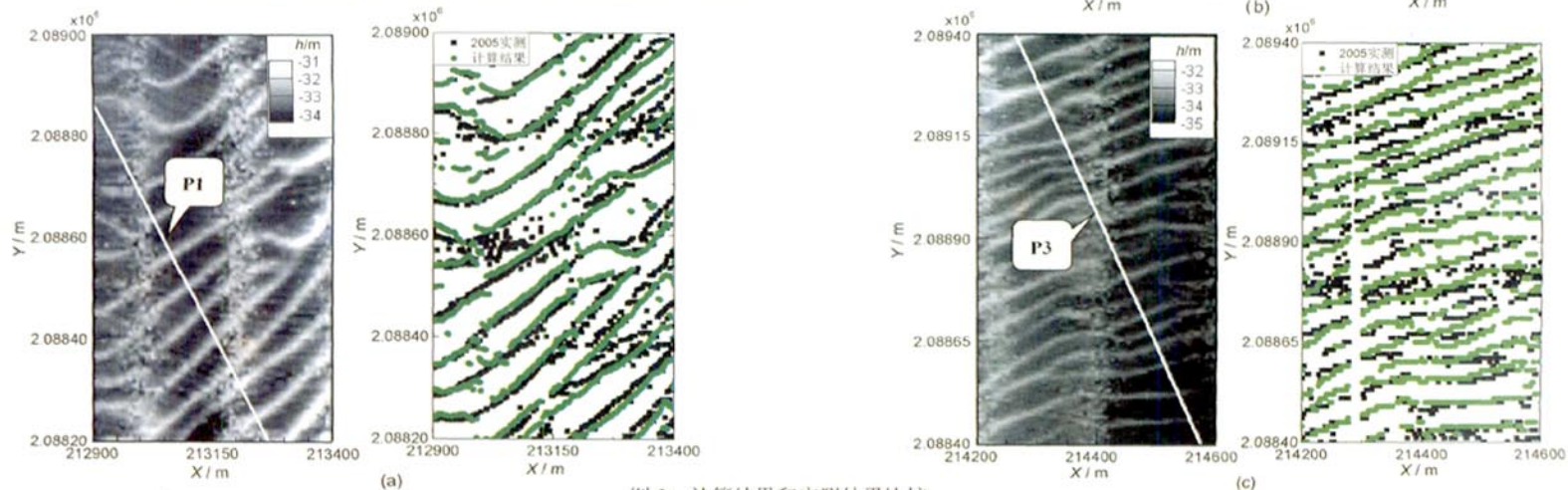


图3 计算结果和实测结果比较

(a) 区域A; (b) 区域B; (c) 区域C。左侧图为2004年7月实测结果,P1、P2、P3垂直于沙波波峰;右侧图只标出沙波波峰所在位置,绿色圆点为2005年10月实测结果,黑色方点为计算结果

Fig.3 Comparison the calculation with observation data in zone A,B,C

Left figure shows the observation data in July 2004, P1,P2,P3 are perpendicular to the sand-waves crest, right figure here only marks the location of sand-waves crest, green dots denote the observation data in Oct. 2005, black quadrate dots denote the calculation results

了 2004 年和 2005 年的实测结果. 从沙波整体走势来看预测结果和实测比较一致. 比较每个区域可以看出, 区域 A 和 C 的模拟结果与实测值基本相符(图 3a 和图 3c), 而区域 B 有明显差异(图 3b), 其原因在后文还要讨论.

为了便于分析研究区沙波的基本特征, 我们在 A、B、C 三个区域内分别划了三条垂直于沙波波峰的直线 P1、P2 和 P3. 沿着这些直线可以具体考察沙波特征和运移速度及方向的关系.

首先定义两个基本特征量: 对称指数  $\alpha = (L_1 - L_2)/L$ , 陡峭度  $\beta = \max(h/L_1, h/L_2)$ . 如图 4 所示. 这里  $L$  为沙波波长,  $L_{1,2}$  表征迎(背)水面在 X 轴上的投影. 一般而言沙波形状预示着沙波移动方向. 本文定义对称指数  $\alpha$  为正, 表征沙波左端为迎水面, 沙波右移; 反之  $\alpha$  为负则表征沙波左移. 下面分别考察沿 A 区 P1 和沿 C 区 P3 两条直线上沙波的基本特征.

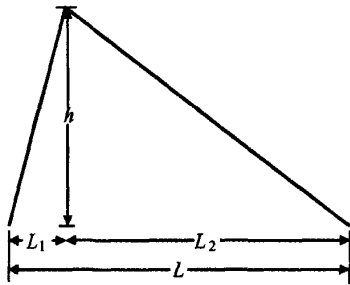


图 4 定义沙波特征量示意图

Fig. 4 Sketch map of defining sand-waves characteristic parameters

**对称指数** 图 5 分别给出沿 P1 线和 P3 线上的沙波波形以及每个沙波相应的对称指数. 可以看出沿 P1 和 P3 线的沙波对称指数基本上以负数为主, 均值分别是  $-0.36$  和  $-0.20$ , 说明 A 区和 C 区的沙波向左移动(即向东南方向). 从沙波波峰移动距离和相应沙波对称指数的大小来看, 沙波运移速度和对称指数成正比. 由局部放大图上可以很明显的看出, 计算结果与实测沙波的形状和位置都吻合的比较好. 观察 2004 年至 2005 年沙波波峰线之间的距离, 可以得到 A 区和 C 区沙波移动速度的预测值分别是  $12.53 \text{ m/a}$  和  $7.52 \text{ m/a}$ , 实测值分别是  $12.05 \text{ m/a}$  和  $7.84 \text{ m/a}$ . 这也证明了本文计算模型能够比较好地预测沙波运移.

**陡峭度** 图 6 分别给出了 P1 和 P3 线上的沙波波峰与其对应的陡峭度, 其中 P1 上沙波平均陡峭度为  $0.065$ , P3 上平均陡峭度是  $0.039$ . 与对称指

数不同的是沙波陡峭度似乎与沙波移动速率关系不大. 为了更好地了解陡峭度对沙波运移的影响, 我们比较模型 1 和模型 2 的计算结果(图 7). 很明显, 考虑陡峭度之后沙波运移速率增加, 而且陡峭度越大沙波侵蚀现象越明显. 总体来看, 陡峭度大于  $0.05$  时, 陡峭度的影响开始显现, 而陡峭度低于  $0.05$  的沙波, 其影响可以忽略, 这时采用模型 1 即可.

## 5 讨论与结果

Knaapen<sup>[23]</sup>曾由英国北海和英吉利海峡的实测数据给出了沙波运移速率与沙波形状的关系式为

$$c = 9.78 \times 10^{-4} \frac{L^2}{h} |\alpha|. \quad (7)$$

将 Knaapen 的这一关系式应用到本文研究区, 得到 A 区和 C 区沙波移动速度分别为  $5 \text{ m/a}$  和  $2 \text{ m/a}$ . 这与实际观测结果相差很大.

另外, 采用日本学者 Shinohara 提出的沙波运动速度公式进行计算<sup>[24]</sup>:

$$c = 76.1 \left( \frac{u_*^2}{g^2 dh} \right) \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right) \left( \frac{\tau_e}{\tau_0} \right)^{2.5}, \quad (8)$$

其中  $\gamma_s$  为泥沙比重;  $\gamma_w$  为水比重;  $u_*$  为水流摩阻速度;  $\tau_e$  为床面有效剪应力;  $\tau_0$  为平均剪应力. 由研究区水文和地质数据可得到沙波运移速度为每年  $0.18 \text{ m/a} \sim 0.29 \text{ m/a}$ . 与实测结果相差也比较大.

究其原因有二. 其一、Knaapen 的关系式仅考虑了沙波形状的影响; 其二、筱原一郎公式仅限于讨论单向均匀流情况. 实际中沙波运移速度既受加载流场的影响, 又和底床泥沙特性密切相关, 仅考虑某一方面因素不能确切地反映沙波运移规律. 一些现场观测资料也表明, 沙波运移速度和方向与风速、风向密切相关<sup>[7]</sup>. 如, 在澳大利亚的托雷斯海峡, 海底沙波运移方向每年都会由于季风方向的反转而反向. 下面我们由本文模型分析风生流和泥沙粒径对沙波运移速度的影响.

为了考察季风影响我们比较两种加载流场: i. 仅有潮流场; ii. 潮流场与风生流共同作用. 由图 8a 可以清楚地看到, 在潮流 + 风生流共同作用下的沙波运移速度反而低于仅潮流场情况, 前后相差近  $10 \text{ m}$ . 这是因为在两次观测的 15 个月时间间隔内, 季风有两次转向, 使得沙波运移速度降低. 图 8b 我们又给出了三种泥沙粒径下沙波的运移状态. 可以看出, 若泥沙粒径仅差  $0.04 \text{ mm}$ , 15 个月 after 相差接近  $5 \text{ m}$ .

由此可见, 研究沙波移动速率仅考虑沙波形状

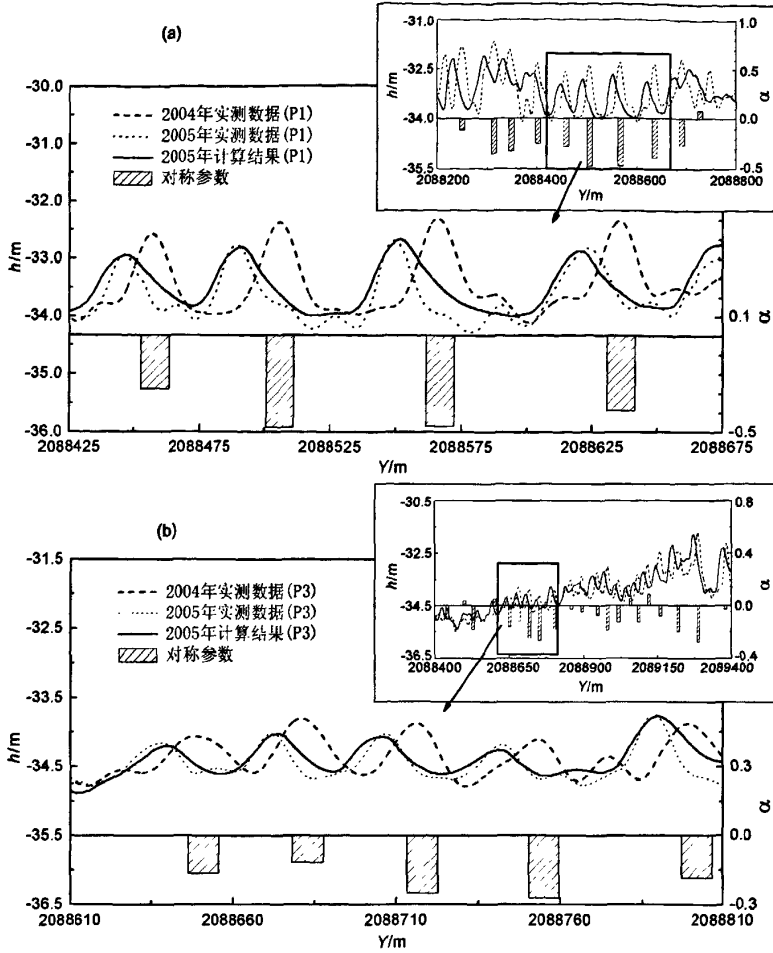


图 5 以对称指数为参考量比较计算结果与实测结果

(a)区域 A 沿 P1 线; (b) 区域 C 沿 P3 线.

虚线为 2004 年 7 月的实测结果,点划线为 2005 年 10 月的实测结果,实线为用模型 2 预测的 2005 年 10 月沙波运移结果,方柱图为每个沙波的对称指数  $\alpha$ .

Fig. 5 Comparison the calculation with observation data regarding symmetry index as reference parameter

(a) Zone A along line P1; (b) Zone C along line P3.

Dash line denotes the observation data in July 2004, dash dot line denotes the observation data in Oct. 2005, solid line denotes the calculation result in Oct. 2005 by model II, and the histograms show the sand-waves symmetry  $\alpha$ .

影响是不够的,必须综合考虑目标海域水文地质情况.从前面分析可知,本文力学模型预测的 A 和 C 两个区域沙波的运移速度和方向与实测值基本吻合,然而 B 区的预测结果与实测相差比较大.从沙波运移方向来看,计算结果和实际沙波运移方向相反(图 9).也就是说沙波运移方向和余流方向相反.从直观上理解沙波移动方向和余流主方向相反很难解释.然而这一现象在其他海域也出现过. Besio<sup>[5]</sup> 和 Lanckneus 等<sup>[24]</sup> 在文章中都先后提到. Besio 认

为这是由于不同分潮的非线性作用引起的.我们认为这一观点并不适合 B 区,还应该考虑其他影响因素.

为了探究 B 区沙波移动方向变化原因,首先我们统计了 2004 和 2005 两年间研究区域台风经过情况. 2004 年没有台风经过该海域,2005 年有达维、韦森特和天鹰三个台风经过,尤其是台风达维中心距研究区仅 20km 左右.然后考察沙波总体移动趋势,可以发现从 2004 年到 2005 年,区域 A 和区域 C 沙波一直向 SE 方向移动;而区域 B 沙波在 2004 年向

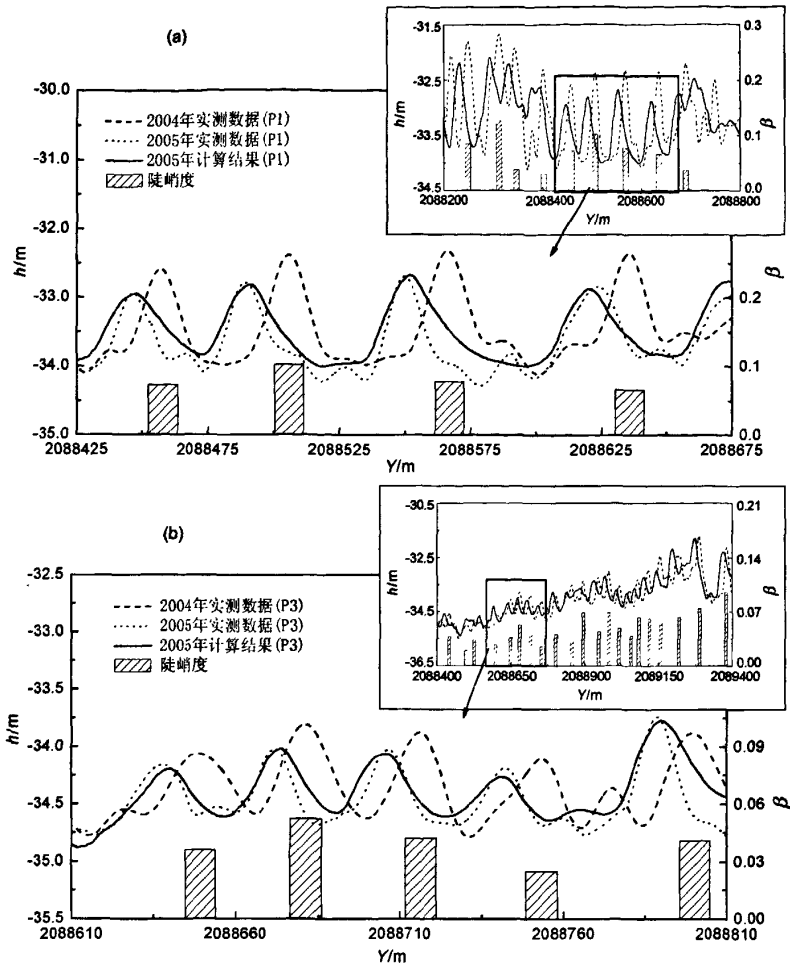


图 6 以陡峭度为参考量比较计算结果与实测结果

(a)区域 A 沿 P1 线;(b)区域 C 沿 P3 线,虚线为 2004 年 7 月的实测结果,点划线为 2005 年 10 月的实测结果,实线为用模型 2 预测的 2005 年 10 月沙波运移结果,方柱图为每个沙波的陡峭度  $\beta$ 。

Fig. 6 Comparison the calculation with observation data regarding steep ratio as reference parameter (a)Zone A along line P1;(b) Zone C along line P3.

Dash line denotes the observation data in July 2004, dash dot line denotes the observation data in Oct. 2005, solid line denotes the calculation result in Oct. 2005 by model II, and the histograms show the steep parameter  $\beta$ .

SE 方向移动,2005 年则向 NW 方向移动。所以我们认为台风的影响是至关重要的,特别是处于沙脊上的区域 B 比区域 A 和 C 高出近 3 m,B 区沙波受台风影响更为明显,可能会有泥沙被风生浪掀起。已有研究发现<sup>[25,26]</sup>,一定波流条件下推移质和悬移质泥沙共同存在,对细砂质底床还会出现沙波运移方向和主流方向相反的情况。由此我们认为对 B 区沙波运移来说仅考虑推移质泥沙是不够的,应综合考虑推移质和悬移质泥沙对沙波运移的贡献。台风可能

是造成沙波运移反向的最主要因素。

综上所述,本文针对琼西南海域沙波特征建立的小尺度沙波运移的准三维物理模型,可以比较好地预测出以推移质为主要运移形式的沙波运移(本文划分的区域 A 和 C),但针对推移质和悬移质共同存在的情况,本模型还有待于进一步改进。大量资料分析表明<sup>[27]</sup>,长期以来南海海域的风暴年生成频数总体呈线性增长趋势,所以今后进一步考虑风暴潮的影响对更好地预测南海北部海底沙波运移是十分必要的。

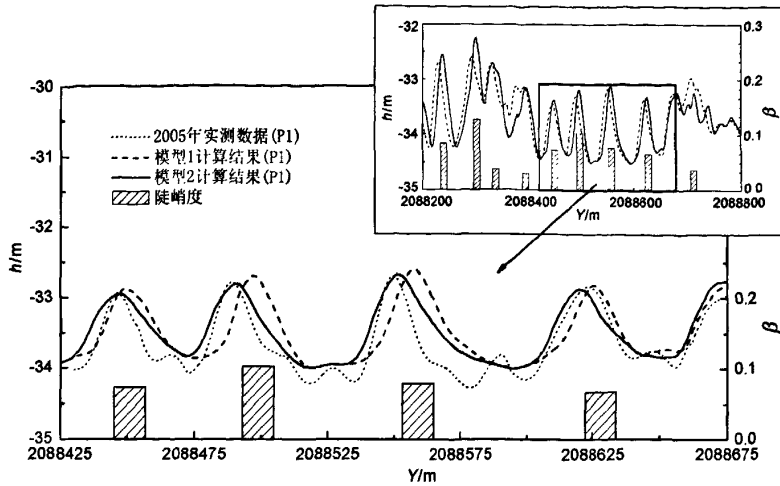


图7 比较不同模型下沙波迁移

点划线为2005年10月的实测结果,实线为模型2计算结果,虚线为模型1计算结果,方柱图为每个沙波的陡峭度  $\beta$

Fig. 7 Comparison calculation by different models

Dash dot line denotes the observation data in Oct. 2005, solid line denotes the result by model II, dashed line by model I, and the histograms show the steep parameter  $\beta$ .

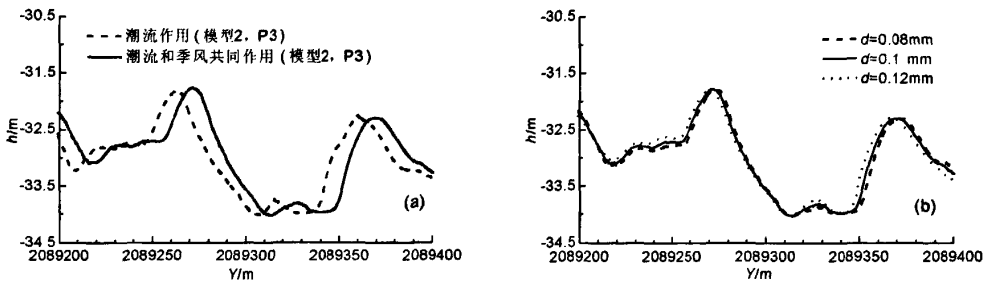


图8 风生流(a)和泥沙粒径(b)对沙波迁移的影响

Fig. 8 The influence of wind-driven current and sediment diameter to sand-waves migration

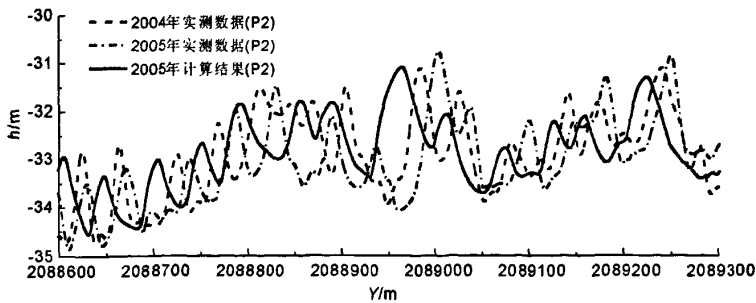


图9 比较B区P2线上计算结果与实测值

(虚线为2004年7月的实测结果,点划线为2005年10月的实测结果,实线为用模型2预测的2005年10月沙波迁移结果)

Fig. 9 Comparison calculation with observation data along line P2 in B zone

(Dash line denotes the observation data in July of 2004, dash dot line denotes the observation data in Oct. of 2005, solid line denotes the prediction result in Oct of 2005 by model two)



## 参考文献(References)

- [1] Whitehouse R J S, Damgaard J S, Langhorne D N. Sand waves and seabed engineering: application to submarine cables. *Marine Sandwave Dynamics, International Workshop, March 23-24 2000, University of Lille 1, France Proceedings*, Trentesaux A and Garlan T Ed; 227~234
- [2] Morelissen R, Hulscher S J M H, Knaapen M A F, Németh A A, Bijker R. Mathematical modeling of sand wave migration and the interacting with pipelines. *Coastal Engineering*, 2003, **48**:197~209
- [3] Thiéne A G P D, Maarten G K. Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**, F04S10, doi:10.1029/2004JF000173
- [4] Besio G, Blondeaux P, Frisina P. A note on tidally generated sand waves. *Journal Fluid Mechanics*, 2003, **485**:171~190
- [5] Besio G, Blondeaux P, Brocchini M, Vittori G. On the modeling of sand wave migration. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109** (C4), doi: 10.1029/2002JC001622 C04018
- [6] Besio G, Blondeaux P, Brocchini M, et al. The morphodynamics of tidal sand waves: A model overview. *Coastal Engineering*, 2008, **55**:657~670
- [7] Richards K J, Taylor P A. A numerical model of flow over sand waves in water of finite depth. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, **65**:103~128
- [8] Johns B, Soulsby R L, Chesher T J. The modelling of sand wave evolution resulting from suspended and bed load transport of sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 1990, **28**(3):355~374
- [9] Stansby P K, Zhou J G. Shallow water flow solver with non-hydrostatic pressure: 2D vertical plane problems. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 1998, **28**:541~563
- [10] Idier D, Astruc D. Numerical modelling of large scale rhythmic bedforms in shallow water. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, IAHR, Obihiro, Japan, 2001. 565~574
- [11] Hulscher S J M H. Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(C9):20727~20744
- [12] Gerkema T. A linear stability analysis of tidally generated sand waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, **417**:303~322
- [13] Komarova N L, Hulscher S J M H. Linear instability mechanics for sand wave formation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, **413**:219~246
- [14] Németh A A, Hulscher S J M H, De Vriend H J. Modelling sand wave migration in shallow shelf seas. *Continental Shelf Research*, 2002, **22**:2795~2806
- [15] Veen H H V D, Hulscher S J M H, Knaapen M A F. Grain size dependency in the occurrence of sand waves. *Ocean Dynamics*, 2006, **56**:228~234
- [16] Passchier S, Kleinans M G. Observations of sand waves, megaripples, and hummocks on the Dutch coastal area and their relation to currents and combined flow conditions. *Journal Geophysics Research*, 2005, **110**, F04S15, doi: 10.1029/2004JF000215
- [17] Zhou S M, Lin M. Influence on migration of sand waves. The 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 2006. 527~532
- [18] 林 緬, 李 勇, 邹舒冕. 不同尺度海底沙波运移动力学模型研究. 第二十一届水动力学研讨会, 2008. 859~864
- Lin M, Li Y, Zou S M. Investigation the dynamic models of the migration of varying scale sand-waves. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> National Conference on Hydrodynamics (in Chinese)*, 2008. 859~864
- [19] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟. *海洋学报*, 2001, **23**(6):11~23
- Xia H Y, Li S H, Shi M C. A 3-D numerical simulation of wind-driven currents in the Beibu Gulf. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 2001, **23**(6):11~23
- [20] 曹德明, 方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟. *海洋与湖沼*, 1990, **21**(2):105~113
- Cao D M, Fang G H. A numerical model of the tides and the tidal currents in Beibu Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica (in Chinese)*, 1990, **21**(2):105~113
- [21] Cookman J L, Flemings P B. STORMSEDL. 0: hydrodynamics and sediment transport in a 2-D, steady-state, wind and wave-driven coastal circulation model. *Computers Geosciences*, 2001, **27**:647~674
- [22] Knaapen M A F. Sandwave migration predictor based on shape information. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**, F04S11, doi:10.1029/2004JF000195
- [23] Shinohara K, Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the bed of the open channels and rivers. *Rep., Res. Inst. Applied Mech.*, Kyushu Univ. Japan, 1959, **7**(25):15~45
- [24] Lanckneus J, De Moor G. Present-day evolution of sand waves on a sandy shelf bank. *Oceanologia Acta*, 1991, SP-11: 123~127
- [25] Lin M, Yuan Z D. Estimating the speed of cross shore sand waves. The 16th International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, USA, 2006. 717~722
- [26] Lin M, Yuan Z D. Investigation of characteristics of fluid field over wavy beds under oscillatory flow. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, **48**(6):1526~1534
- [27] 王金博, 钱维宏. 半个世纪来热带海洋风暴对中国大陆的影响. *地球物理学报*, 2005, **48**(5):992~999
- Wang J B, Qian W H. Statistic analysis of tropical cyclone impact on China mainland during the last half century. *Chinese. J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, **48**(5):992~999

(本文编辑 汪海英)