

北部湾物理海洋模型的建立与验证*

The Construction and the Verification of Beibu Gulf Physical Oceanic Model

李树华 夏华永 李武全 曾家海 唐岗
Li Shuhua Xia Huayong Li Wuquan Zeng Jiahai Tang Gang

(广西海洋监测预报中心 北海市四川路 536000)

(Guangxi Ocean Monitoring and Prediction Center, Sichuanlu, Beihai, Guangxi, 536000, China)

摘要 采用坐标变换方法,在北部湾上层海洋采用正交坐标系以获得垂向高分辨率,在底层水体采用 Sigma坐标系以拟合地形,建立北部湾的物理海洋模型,并利用建立的模型分别模拟北部湾的 M_2 , K_1 , O_1 分潮. 结果计算值与实测值相比, M_2 , K_1 , O_1 分潮振幅的绝对平均误差分别为 3.4 cm, 4.7 cm, 5.1 cm, 相位绝对平均误差分别为 7.1° , 9.3° , 7.2° , 在潮波模拟可以接受的误差范围内,模拟的潮波系统与实测的潮波系统符合良好. 说明建立的模型对潮波模拟具有较高精度,模型是可靠的、稳定的,可用于有关工程计算以及环流的模拟计算.

关键词 海洋 环流 模型 建立 验证

中图法分类号 P731.21

Abstract By coordinate transformation, specifically, by using orthogonal coordinate system to obtain vertical high resolution ratio in superstratum water of Beibu Gulf and making use of Sigma coordinate system to match terrain in bottom water, the authors intend to set up Beibu Gulf Physical Oceanic Model and use the model to simulate partial tide M_2 , partial tide K_1 and partial tide O_1 respectively. Comparing by actually measured result, the absolute average errors of tidal frequency of partial tide M_2 , partial tide K_1 and partial tide O_1 are 3.4 cm, 4.7 cm and 5.1 cm respectively while phase absolute average errors are 7.1° , 9.3° and 7.2° respectively. Our analog tide wave system is in good agreement with actually measured tide wave system. It shows that our model has high precision in tide wave analog. Besides, this model is credible and steady, and can be used in engineering calculation and the analog computation of circulation.

Key words ocean, circulation, model, construction, verification.

北部湾是南海的一个主要海湾,由于环流是海洋资源开发、海洋工程建设及海洋环境管理中必须考虑的动力因素,因此,研究北部湾环流的空间结构及季节变化具有十分重要的意义.到目前为止,北部湾潮波数值研究成果已有一些报道^[1-3],但利用数学方法研究环流的成果尚不多见.由于上层海洋水文现象对人类活动的影响极大,从而受到人们普遍的关注.风生环流和密度流则是上层海水运动的主要动力因素,利用数学方法建立稳定的数学物理模型,是研究风生环流和密度流的一种主要途径^[4].

针对北部湾上层水温影响因子与环流动力因子的复杂性,为了较好地拟合海底地形,同时也使上层海洋保持足够的分辨率,更好地刻画温跃层及艾克曼深度内的流速变化,本文采用坐标变换的方法,在上层海洋采用正交坐标系以获得垂向高分辨率,在底层水体采用 Sigma坐标系以拟合地形,建立了北部湾的物理海洋模型.通过对模型的验证,显示出模拟结果与实况符合良好.在该模型的基础上,对北部湾的风生环流和密度流进行了模拟计算,分析了北部湾环流的空间结构及季节变化特征.

2003-07-17收稿,2003-10-31修回.

* 广西自然科学基金资助项目(桂科自0135048).

1 基本方程组

1.1 动力学方程组

北部湾是一个较小的海湾,海平面可用笛卡尔直角坐标系表示,湾内水深变化较大,为了在不同水深都获得较高的分辨率,垂直方向采用 Sigma 坐标变换. Sigma 坐标变换如下: $e = (z - Z)/(H + Z)$, $H(x, y)$ 是平均海平面到海底的距离, $Z(x, y, t)$ 是海面升降,在 $z = Z$ 时, $e = 0$, 在 $z = -H$ 时, $e = -1$, 在 e 坐标系下,斜压环流的控制方程组可写为:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial e} = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial uk}{\partial e} - f v D + g D \frac{\partial Z}{\partial x} = \\ & \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial e} \right] + \frac{\partial}{\partial x} [2A_M D \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_M D (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] - \\ & \frac{g D^2}{d_b} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial e} \right] e \frac{\partial d}{\partial e} + \frac{g D}{d_b} \frac{\partial D}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial e} \right] e \frac{\partial d}{\partial e}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial vk}{\partial e} + f u D + g D \frac{\partial Z}{\partial y} = \\ & \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial e} \right] + \frac{\partial}{\partial y} [2A_M D \frac{\partial v}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial x} [A_M D (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] - \\ & \frac{g D^2}{d_b} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial e} \right] e \frac{\partial d}{\partial e} + \frac{g D}{d_b} \frac{\partial D}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial e} \right] e \frac{\partial d}{\partial e}. \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中, d 为海水密度, D 为水深, $D = H + Z$, f 为柯氏力系数, A_M 为水平方向紊动粘滞系数, K_M 为垂直方向紊动粘滞系数, k 为坐标变换后产生的一个垂向速度. 实际上,它垂直于 Sigma 分层,三维笛卡尔直角坐标系中的垂向速度 W 与 Sigma 坐标系中的速度场有如下关系:

$$k = w - u \left(e \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial x} \right) - v \left(e \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial y} \right) - \left(e \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} \right). \quad (4)$$

1.2 紊流封闭方程

用近年来应用效果很好的紊流封闭模型计算垂直紊动粘滞系数 K_M , 以 $q^2/2$ 表示为紊流动能, l 为紊流宏观尺度,紊流方程可写为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial u q^2 D}{\partial x} + \frac{\partial v q^2 D}{\partial y} + \frac{\partial k q^2}{\partial e} = \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial e} \right] + \\ & \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial e} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial e} \right)^2 \right] + \frac{2g}{d_b} K_H \frac{\partial d}{\partial e} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + \frac{\partial}{\partial x} (DA_H \\ & \frac{\partial q^2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (DA_H \frac{\partial q^2}{\partial y}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 I D}{\partial t} + \frac{\partial u q^2 I D}{\partial x} + \frac{\partial v q^2 I D}{\partial y} + \frac{\partial k q^2 I}{\partial e} = \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{K_q}{D} \right. \\ & \left. \frac{\partial q^2 I}{\partial e} \right] + \frac{E_1 I K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial e} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial e} \right)^2 \right] + \frac{I E_1 g}{d_b} K_H \frac{\partial d}{\partial e} - \\ & \frac{D q^3}{B_1} W + \frac{\partial}{\partial x} (DA_H \frac{\partial q^2 I}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (DA_H \frac{\partial q^2 I}{\partial y}), \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, d_b 为参考密度, 取值 1000 kg m^{-3} ; d 为海水密度; W 为面壁近似函数,

$$W = 1 + E_2 \left(\frac{l}{kL} \right)^2, \quad (7)$$

$$(L)^{-1} = (Z - z)^{-1} + (H + z)^{-1}; \quad (8)$$

A_H 为水平方向的物质扩散系数; 垂向紊动粘滞系数 K_M 和垂向扩散系数 K_H 、 K_q 分别由下列公式确定,

$$K_M = l q S_M, \quad (9)$$

$$K_H = l q S_H, \quad (10)$$

$$K_q = l q S_q. \quad (11)$$

S_M 、 S_H 、 S_q 为稳定性函数, 由下列方程组求解:

$$G_M = \frac{l^2}{q^2 D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial e} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial e} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$G_H = \frac{l^2}{q^2 D} \frac{g}{d_b} \frac{\partial d}{\partial e}, \quad (13)$$

$$S_M [6A_1 A_2 G_M] + S_H [1 - 2A_2 B_2 G_H - 12A_1 A_2 G_H] = A_2; \quad (14)$$

$$S_M [1 + 6A_1^2 G_M - 9A_1 A_2 G_H] - S_H [12A_1^2 G_H + 9A_1 A_2 G_H] = A_1 (1 - 3C_1); \quad (15)$$

$$S_q = 0.20. \quad (16)$$

A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 E_1 、 E_2 为经验常数, 其值由试验所得,

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08),$$

$$(E_1, E_2) = (1.8, 1.33).$$

1.3 边界条件

动力学边界条件为:

在自由表面上满足

$$d_b \frac{K_M}{D} \left[\frac{\partial u}{\partial e}, \frac{\partial v}{\partial e} \right] = (f_x, f_y), \quad e \rightarrow 0, \quad (17)$$

式中, f_x 为海面风应力, 其值由如下公式计算,

$$f_x = d_b C_D |W| W. \quad (18)$$

式中, d 为空气密度, C_D 为风曳力系数, C_D 采用 ECOMSI 程序中的公式确定,

$$10^3 C_D \begin{cases} = 1.2, & |W| \leq 11 \text{ m/s}, \\ 0.49 + 0.065 |W|, & 11 < |W| \leq 25 \text{ m/s}, \\ 0.21, & |W| > 25 \text{ m/s}. \end{cases} \quad (19)$$

对于纯天文潮, $f_x = 0$ 在近海底处满足

$$\frac{K_M}{D} \left[\frac{\partial u}{\partial e}, \frac{\partial v}{\partial e} \right] = C_z (u^2 + v^2)^{1/2} (u, v), \quad e \rightarrow -1. \quad (20)$$

式中, $C_z = \text{Max} \left[\frac{k^2}{\ln^2(z/z_0)}, 0.0025 \right];$ (21)

k 是卡门常数, $k = 0.4$; z_0 是海底粗糙度, 在潮流模拟中 z_0 可取为 $0.002 \sim 0.01 \text{ m}$; z 是离海底最近网格与海底的距离.

垂直边界条件满足

$$k(0) = k(-1) = 0, \quad (22)$$

海岸边界条件满足

$$uv(x, y, e, t) = 0, \quad (23)$$

N 为岸线外法线方向.

在开边界上, 给定潮位值,

$$Z = \sum a_i f_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} t - \theta_i - h_i\right), \quad (24)$$

对于紊流模型, 海面及海底边界条件分别为:

$$[q^2(0), q^2 l(0)] = [B_1^{2/3} u_*^2(0), 0], \quad (25)$$

$$[q^2(-1), q^2 l(-1)] = [B_1^{2/3} u_*^2(-1), 0], \quad (26)$$

式(25)、(26)中, u_* 为摩阻流速, $u_* = \sqrt{f/d}$.

2 模型的计算

将二维模拟中应用较多的 Casulli 半隐式差分格式^[5]推广到三维计算中. Casulli 半隐式差分格式将动量方程中的正压梯度项和连续方程中的速度散度处理成隐式, 将动量方程代入连续方程, 获得一个在当前时刻只有自由表面的五对角方程组, 只要保证计算点的水深大于零, 方程组就是对称、正定的, 其有唯一解, 且方程的稳定性不取决于潮波的传播速度, 计算时间步长不受 CFL 条件限制, 可取数倍于该限制的时间步长.

为表达离散方程的方便起见, 先定义如下差分求和算子:

$$\overline{f(x, y, e, t)}^x = [f(x + \Delta x / 2, y, e, t) + f(x - \Delta x / 2, y, e, t)] / 2; \quad (27)$$

$$\mathbb{W}f(x, y, e, t) = [f(x + \Delta x / 2, y, e, t) - f(x - \Delta x / 2, y, e, t)] / \Delta x; \quad (28)$$

$$\overline{\overline{f(x, y, e, t)}^{xy}} = \overline{\overline{f(x, y, e, t)}^x}^y = \overline{\overline{f(x, y, e, t)}^y}^x. \quad (29)$$

变量分布在交错网格上, 其相对位置如图 1 所示.

在动量方程(2)中, 简记

$$\begin{aligned} A(u) &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} D + \frac{\partial u v}{\partial y} D + \frac{\partial u k}{\partial e}, \\ B(u) &= \frac{\partial}{\partial x} [2A_M D \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_M D (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})], \\ C(u) &= -\frac{g D^2}{d_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_e^0 d d e + \frac{g D}{d_0} \frac{\partial D}{\partial x} \int_e^0 e \frac{\partial d}{\partial e} d e, \end{aligned}$$

在动量方程(3)中, 同样将对流项、水平摩擦项及斜压项简记成 $A(v)$ 、 $B(v)$ 、 $C(v)$. 按所定义的算子, 将方程(1)~(3)分别离散成如下形状:

$$\frac{Z^{n+1}}{\Delta t} + \mathbb{W}(D^x u)^{n+1} + \mathbb{W}(D^y v)^{n+1} + \mathbb{W}(k)^{n+1} = 0; \quad (30)$$

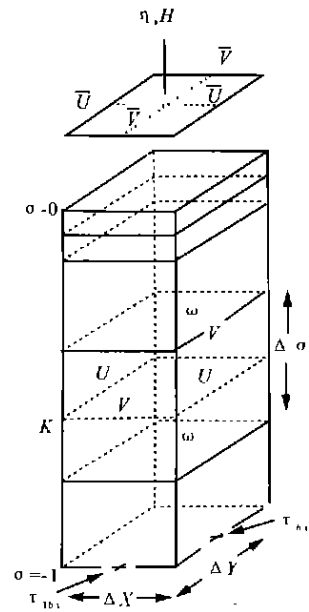


图 1 变量位置示意图

Fig. 1 Diagram showing the variable location

$$\begin{aligned} & \frac{(Du)^{n+1} - (Du)^n}{\Delta t} + A^n(u) - \mathbb{T}(\overline{f v^y} D)^n - (1 - \mathbb{T})(\overline{f v^y} D)^{n-1} = -g D^x \mathbb{W}(Z)^{n+1} + C^n(u) + B^n(u) + \\ & \mathbb{W}e \left[\frac{K_M}{D^x} \mathbb{W}(u)^{n+1} \right]; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(Dv)^{n+1} - (Dv)^n}{\Delta t} + A^n(v) + \mathbb{T}(\overline{f u^x} D)^n + (1 - \mathbb{T})(\overline{f u^x} D)^{n-1} = g D^y \mathbb{W}(Z)^{n+1} + C^n(v) + B^n(v) + \\ & \mathbb{W}e \left[\frac{K_M}{D^y} \mathbb{W}(v)^{n+1} \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

离散方程(30)~(32)中, 对流项、水平摩擦项及斜压项分别离散成如下形式:

$$\begin{aligned} A(u) &= \mathbb{W}(D^x u \bar{u}^x) + \mathbb{W}(D^y v \bar{u}^y) + \mathbb{W}(D^x \bar{u}^e), \\ B(u) &= \mathbb{W}(2 \overline{A_M D^x} \mathbb{W}(u)) + \mathbb{W}(\overline{A_M D^y} (\mathbb{W}(u) + \mathbb{W}(v))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C(u) &= -\frac{g(D^x)^2}{d_0} \mathbb{W} \sum_{m=1}^k \frac{d_{m-1/2}^e \Delta e_{m-1/2}^e}{d_0} + \\ & \frac{g D^x}{d_0} \mathbb{W}(D) \sum_{m=2}^k e_m (d_m - d_{m-1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A(v) &= \mathbb{W}(D^x u \bar{v}^x) + \mathbb{W}(D^y v \bar{v}^y) + \mathbb{W}e(k \bar{v}^e), \\ B(v) &= \mathbb{W}(2 \overline{A_M D^y} \mathbb{W}(v)) + \mathbb{W}(\overline{A_M D^x} (\mathbb{W}(u) + \mathbb{W}(v))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C(v) &= -\frac{g(D^y)^2}{d_0} \mathbb{W} \sum_{m=1}^k \frac{d_{m-1/2}^e \Delta e_{m-1/2}^e}{d_0} + \\ & \frac{g D^y}{d_0} \mathbb{W}(D) \sum_{m=2}^k e_m (d_m - d_{m-1}). \end{aligned}$$

紊流模型(5)、(6)离散成如下形式:

$$\frac{(q^2 D)^{n+1} - (q^2 D)^n}{\Delta t} + W(\bar{u}^e \bar{D}^x \bar{q}^x) + W_y(\bar{v}^e \bar{D}^y \bar{q}^y) + W(\bar{k}^e \bar{q}^e) = W(\frac{K_g}{D} W q^2)^{n+1} + \frac{2K_M}{D} [(W u^x)^2 + (W v^y)^2] + \frac{2g}{\rho_0} K_H W d - \frac{2D q^3}{B_{il}} + W(\bar{D}^x \bar{A}_H \bar{W} q^2) + W(\bar{D}^y \bar{A}_H \bar{W} q^2), \quad (33)$$

$$\frac{(q^2 ID)^{n+1} - (q^2 ID)^n}{\Delta t} + W(\bar{u}^e \bar{D}^x \bar{q}^x I) + W(\bar{v}^e \bar{D}^y \bar{q}^y I) + W(\bar{k}^e \bar{q}^e I) = W(\frac{K_g}{D} W q^2 I)^{n+1} + I E_1 \frac{K_M}{D} [(W u^x)^2 + (W v^y)^2] + I E_1 \frac{g}{\rho_0} K_H W d - \frac{D q^3}{B_1} \{1 + E_2 [\frac{I}{KD} (\frac{1}{e} + \frac{1}{1+e})]^2\} + W(\bar{D}^x \bar{A}_H \bar{W} q^2 I) + W(\bar{D}^y \bar{A}_H \bar{W} q^2 I). \quad (34)$$

在紊流模型离散方程 (33)、(34) 中, 对流项中的流量通量用 $n+1$ 时刻的值, 其它没有时间指标的变量全部为 n 时刻的值。

得到各未知变量的代数方程后, 按如下步骤求解各方程:

- (i) 将各动量方程 (31)、(32) 中的柯氏力及底摩擦项取 n 时刻的值;
- (ii) 将动量方程 (31)、(32) 代入连续方程 (30), 再将连续方程沿水深方向积分, 组成一个在 $n+1$ 时刻的变量中, 只有自由表面 Z 的 5 对角方程组, 然后用迭代法求解自由表面 Z ;
- (iii) 以 Z 作为 Z^{n+1} 的近似值, 代入方程 (31)、(32), 求解动量方程, 得到流速 u^*, v^* ;
- (iv) 以 u^*, v^* 作为 u^{n+1}, v^{n+1} 的近似值, 计算柯氏力及底摩擦项, 重复步骤 (ii)、(iii), 求得 $Z^{n+1}, u^{n+1}, v^{n+1}$;
- (v) 以连续方程 (30) 计算 k^{n+1} ;
- (vi) 利用方程 (4) 求解笛卡尔坐标系下的垂向流速 W^{n+1} ;
- (vii) 计算紊流方程 (33)、(34) 得到 $q^2, q^2 I$, 并进一步计算垂向阻力系数及扩散系数 K_M^{n+1}, K_H^{n+1} 和 K_q^{n+1} ;
- (viii) 计算海水密度 ρ ;
- (ix) 进入下一次循环。

3 模型的验证

利用上述建立的数学模型, 分别模拟北部湾的 M_2, K_1, O_1 分潮, 以检验模型的合理性。计算范围南到 $16^\circ N$, 北至广西沿岸, 西以 $106^\circ N$ 以北的越南东界为界, 东至雷州半岛、海南西岸及 $110^\circ E$ 。水平方向计算网格为 $13200 m \times 13750 m$, 垂直方向空间步长为 Δz

$= 0.2$ 。北部湾海底地形从《南海水深图》(青岛海洋水产研究所, 1973年5月)中读出, 水深分布如图 2。 M_2 分潮模拟时间步长为 $300 s$, 对于 K_1, O_1 分潮, 时间步长为 $600 s$ 。在琼州海峡和湾口开边界潮汐调和常数从《中越合作北部湾海洋综合调查报告》(附图, 1964年)中的同潮图读出, 以此为基础进行反复调试。模拟从静态开始, 初始潮位和潮流都为零, 为了保证计算的稳定性, 边界潮位在一个时间步长的变化从零开始并逐步增加, 输出结果取第 5 个潮流周期的模拟值。

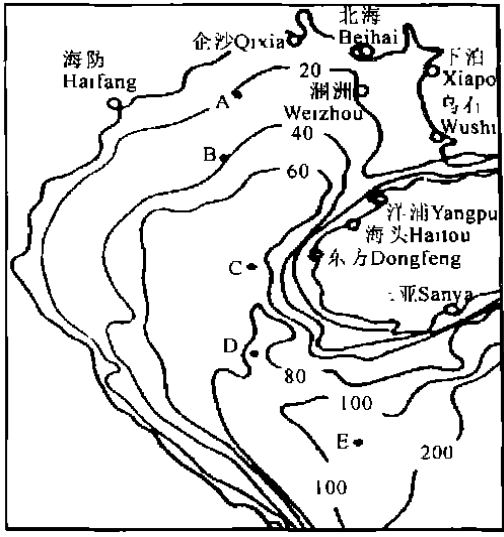


图 2 北部湾水深分布

Fig. 2 Distribution of depth from the Beibu Gulf

为了验证模拟精度, 我们收集主要计算域沿岸的 23 个验潮站的调和常数以供对照, 计算值与实测调和常数列于表 1。从表可知, 计算值和实测值相比, M_2, K_1, O_1 分潮振幅的绝对平均误差分别为 $3.4 cm, 4.7 cm, 5.1 cm$, 相位绝对平均误差分别为 $7.1^\circ, 9.3^\circ, 7.2^\circ$, 在潮波模拟可以接受的误差范围之内。

以 K_1 分潮和 M_2 分潮的变化简述模拟结果图 3 ~ 8。

从图 3 中可知, 在湾口 $17^\circ 30' N, 107^\circ 45' E$ 附近有一个无潮点, K_1 分潮是一个逆时针方向旋转的潮波系统, 海南的三亚至东方一带以及湾口的越南沿岸同潮时线密集。 K_1 分潮具有驻波性质, 在湾口振幅较小, 属波节区, 湾北部属波腹区, 湾顶 (广西近海) 的振幅最大, 达 $80 cm$ 以上。与实测同潮图^[6]相比, 无潮点位置一致。 M_2 分潮也具有驻波性质。从图 4 中可看出, 同潮时线的走向基本上与湾轴垂直, 在越南沿岸的海防附近, 同潮时线密集, 振幅较小。在此附近, 出现一个退化的无潮系统。 M_2 分潮与实测同潮图^[6]符合良好。

表1 潮汐调和常数计算值与实测值对照表

Table 1 Contrast between computative value in the harmonic constant of tidal and observational value on the spot

站号 Station	位置 Location	M_2		K_1		O_1	
		H (cm)	g (°)	H (cm)	g (°)	H (cm)	g (°)
1	109°30'E 18°14'N	19.6 (22.3)	317.0 (319.9)	34.4 (28.7)	332.5 (333.3)	31.8 (27.7)	281.0 (283.2)
2	108°37'E 19°07'N	15.7 (18.3)	53.2 (59.7)	50.3 (54.0)	72.5 (71.2)	57.9 (63.3)	16.3 (10.3)
3	109°11'E 19°44'N	19.4 (18.8)	135.2 (130.2)	71.3 (69.7)	87.5 (85.7)	78.9 (81.4)	27.9 (19.4)
4	110°00'E 20°28'N	26.4 (25.5)	174.0 (174.7)	76.0 (66.1)	82.5 (88.2)	85.5 (78.5)	25.5 (29.4)
5	109°50'E 20°33'N	26.4 (23.6)	174.0 (159.8)	76.0 (72.3)	82.5 (90.7)	88.4 (73.5)	27.9 (28.0)
6	109°46'E 21°16'N	54.8 (52.0)	181.2 (179.7)	95.4 (91.0)	92.5 (90.9)	100.9 (105.0)	34.8 (28.8)
7	109°33'E 21°36'N	58.2 (58.7)	186.0 (193.9)	96.8 (93.2)	95.0 (99.7)	101.7 (99.9)	34.8 (38.9)
8	109°05'E 21°29'N	41.3 (46.2)	179.0 (180.3)	91.2 (89.3)	97.5 (97.3)	96.8 (96.9)	37.2 (34.7)
9	108°13'E 21°30'N	31.6 (31.4)	186.0 (180.8)	87.7 (83.2)	102.5 (98.9)	94.2 (90.5)	39.5 (37.6)
10	109°07'E 21°02'N	33.9 (37.9)	171.5 (171.3)	85.2 (84.3)	95.0 (92.9)	92.6 (93.1)	34.8 (30.7)
11	107°57'E 21°15'N	24.0 (20.0)	181.0 (179.0)	83.6 (80.0)	102.5 (85.0)	89.7 (80.0)	39.5 (33.0)
12	107°37'E 21°08'N	23.7 (19.0)	188.5 (179.0)	80.6 (72.0)	105.0 (96.0)	87.0 (81.0)	44.1 (30.0)
13	107°44'E 20°58'N	15.7 (25.0)	179.0 (174.0)	80.6 (80.0)	102.5 (83.0)	84.6 (79.0)	41.8 (32.0)
14	107°43'E 20°08'N	7.2 (10.0)	106.0 (129.0)	63.2 (65.0)	100.0 (95.0)	71.0 (71.0)	37.2 (26.0)
15	107°22'E 21°02'N	5.0 (14.0)	190.9 (193.0)	75.6 (76.0)	107.5 (89.0)	82.3 (68.0)	44.1 (37.0)
16	106°40'E 20°52'N	2.8 (4.0)	85.0 (99.0)	71.9 (64.0)	107.5 (124.0)	78.8 (73.0)	46.5 (57.0)
17	106°38'E 20°21'N	10.6 (10.0)	31.4 (49.0)	63.7 (70.0)	110.0 (105.0)	71.3 (70.0)	48.8 (36.0)
18	105°59'E 19°55'N	24.7 (18.0)	27.0 (20.0)	54.2 (69.0)	115.0 (107.0)	63.0 (69.0)	51.1 (31.0)
19	105°53'E 19°26'N	26.4 (20.0)	29.0 (26.0)	51.0 (60.0)	115.0 (107.0)	59.0 (60.0)	53.4 (52.0)
20	105°46'E 18°48'N	27.9 (30.0)	29.0 (31.0)	44.2 (50.0)	120.0 (102.0)	53.5 (59.0)	55.7 (45.0)
21	105°54'E 18°28'N	26.2 (20.0)	29.0 (39.0)	41.5 (40.0)	122.5 (145.0)	50.8 (40.0)	55.7 (51.0)
22	106°36'E 17°30'N	20.1 (13.0)	360.0 (36.0)	15.3 (16.0)	130.0 (144.0)	24.5 (27.0)	60.4 (51.0)
23	107°38'E 16°34'N	15.8 (18.0)	336.0 (351.0)	11.3 (3.0)	302.5 (270.0)	5.9 (2.0)	292.6 (19.0)

括号内为实测值。 Observation in bracket.

K_1 分潮表层潮流 ($e = -0.1$) 基本上是往复流 (见图5), 潮流椭圆长轴方向与岸线大致平行, 在琼州海峡西口处潮流最强, 流速超过 1 m/s , 海南岛中部外海域潮流较强, 最大值近 0.6 m/s , 离海南岛西

岸越远, 潮流流速逐渐减小. 底层 ($e = -0.9$) 潮流 (见图6) 与表层潮流有些相似, 但又有重要变化: 第一, 底层潮流椭圆长轴有所衰减, 水深越小的海域衰减幅度越大, 在湾顶的浅水海域, 其值尚不及表层的一半; 第二, 在浅水海域, 底层潮流椭圆的椭圆率增大, 底层潮流是旋转流, 而表层潮流是往复流, 底层潮流的旋转方向主要是右旋, 局部海域是左旋, 这可能是潮波干涉的结果; 第三, 和表层相比, 底层潮流椭圆长轴方向有所变化, 在湾内离岸较近的海域, 长轴方向多为左偏, 离湾顶越近, 近岸海域左偏程度越大, 最大左偏角达 20° , 在湾轴两侧的中心海域, 长轴方向右偏, 在湾轴附近偏离最大, 偏离角一般大于 10° , 最大值近 25° , 离湾轴越远, 右偏角度越小.

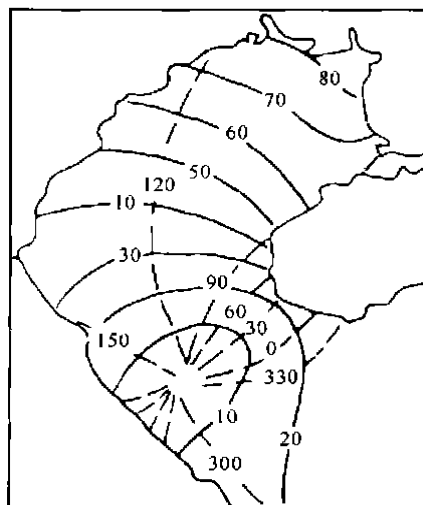


图3 K_1 分潮同潮

Fig. 3 Tidal constituent K_1

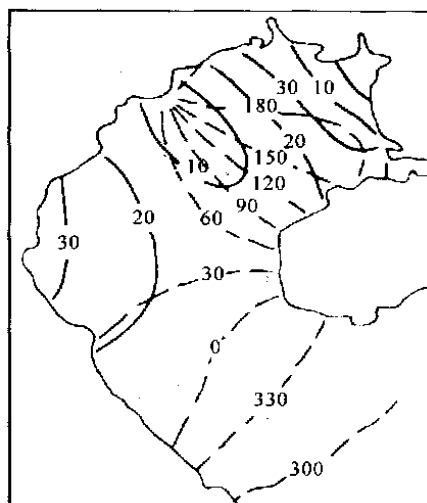


图4 M_2 分潮同潮

Fig. 4 Tidal constituent M_2

M_2 分潮潮流椭圆长轴方向 (见图7) 与 K_1 分潮大致相同, 但湾的西部海域长轴方向几乎与岸垂直, 北部湾是以全日潮为主的海湾, 半日潮潮流不及全日

潮潮流的一半。在湾口和波节区内，潮流为往复流，而在波腹区则为旋转流，旋转方向一般为右旋，在琼州海峡西口外和中部海域湾轴附近，潮流椭圆率很大，因而可能有圆流点存在。潮流在东岸较强，在雷州半岛东岸最强。底层潮流椭圆（见图8）与表层相似，只是椭圆长轴衰减，和表层相比，底层椭圆长轴方向一般右偏，但偏转幅度不大，右偏角一般 5° 左右，在湾顶局部海域，方向左偏，偏转幅度也不大。

M_2 分潮的流态与文献 [1]比较，两文均在越南沿岸形成一个退化了的无潮系统，只是文献 [1]的日分潮取 K_1 分潮与 O_1 分潮的平均值，而本文日分潮取 K_1 分潮作为代表，文献 [1]的无潮点更靠近湾口，但总的流态两文的结果是相似的。

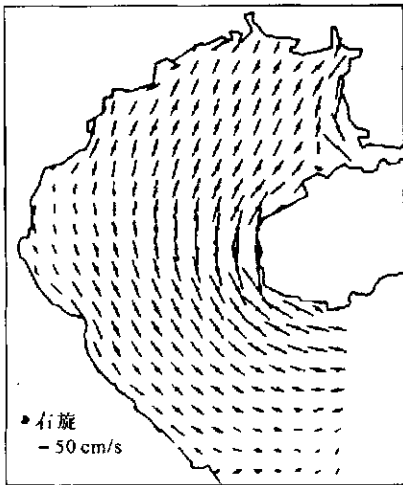


图5 K_1 分潮表层潮流椭圆

Fig. 5 Surface layer tidal ellipse in the tidal constituent K_1

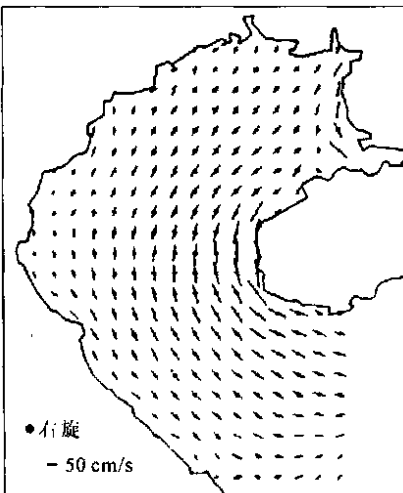


图6 K_1 分潮底层潮流椭圆

Fig. 6 Bottom layer tidal ellipse in the tidal constituent K_1

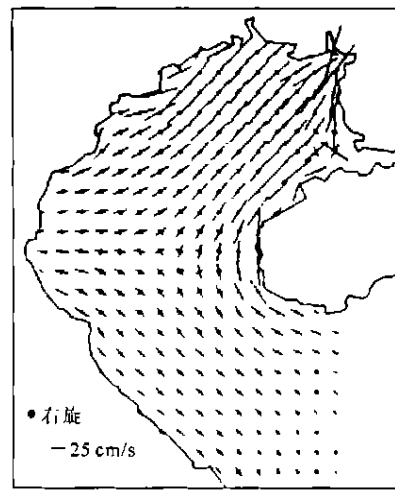


图7 M_2 分潮表层潮流椭圆

Fig. 7 Surface layer tidal ellipse in the tidal constituent M_2

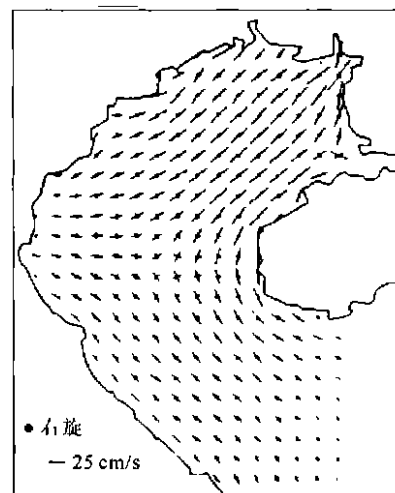


图8 M_2 分潮底层潮流椭圆

Fig. 8 Bottom layer tidal ellipse in the tidal constituent M_2

从上述分析可知，所建立的模型对潮波模拟具有较高的精度，模拟的潮波系统与实测的潮波系统符合良好，模型是可靠的、稳定的，可用于有关工程计算以及环流的模拟计算。

参考文献

- 曹徽明, 方同洪. 北部湾潮汐与潮流的数值模拟. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 105-113.
- 李树华. 北部湾潮汐的数值模拟试验. 热带海洋, 1986, 5(3): 7-14.
- 夏华永, 段忠斌, 郭芝兰, 等. 北部湾三维潮波数值模拟. 海洋学报, 1997, 19(2): 21-31.
- 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.
- 李树华, 夏华永, 陈明剑. 广西近海水文及水动力环境研究. 北京: 海洋出版社, 2001.
- 中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室. 中越北部湾海洋综合调查报告. 1964.

(责任编辑: 邓大玉)