

# 北黎湾及邻近海域潮流数值计算

孙长青, 赵可胜, 郭耀同

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 建立北黎湾及邻近海域二维潮流数值模型, 重现该海域潮波及潮流的分布规律, 计算得到  $m_1$  分潮和  $M_2$  分潮的同潮时线与等振幅线、潮流椭圆,  $m_1$  与  $M_2$  合成的潮致欧拉余流、最大潮流和不同时刻潮流场分布。

**关键词:** 北黎湾; 潮流; 潮波; 数值计算

**中图分类号:** P731. 2; P752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000- 3096(2004) 11- 0044- 05

北黎湾位于中国第二大岛—海南岛西部东方市八所镇北部, 濒临北部湾。就潮汐而言, 北部湾海域的潮汐以全日分潮为主, 半日分潮为次。而就潮流来说, 在海南岛西南海域以全日分潮流为主, 西北海域全日分潮流和半日分潮流具有相同的量值。整个北部湾的全日分潮流和半日分潮流基本上属于往复流<sup>[1]</sup>。需要说明的是, 作者所关心的北黎湾及邻近海域的潮汐性质为规则全日潮, 而潮流性质则为不规则全日潮流。

## 1 计算方法

采用不规则三角形网格的分步杂交方法<sup>[2,3]</sup>, 建立北黎湾海域二维潮流数值模型。

### 1.1 流体动力学方程

选用一个固着于“ $f$ -平面”上的直角坐标系( $XOY$ 平面)和静止海面重合, 组成右手坐标系,  $Z$ 轴向上为正, 于是描写正压海洋深度平均的运动方程组为:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fv - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} u + \frac{\tau_x}{\rho H} + \varepsilon \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fu - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} v + \frac{\tau_y}{\rho H} + \varepsilon \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中:  $u, v$  分别为对应于  $x, y$  轴的深度平均流速分量;  $t$  为时间坐标;  $f$  为柯氏参数 ( $f = 2\Omega \sin \varphi$ ,  $\Omega$  为地转角速度,  $\varphi$  为地理纬度);  $g$  为重力加速度;  $H = h + \zeta$  ( $h$  和  $\zeta$  分别为自平均海面起算的水深和水位高度);  $\tau_x, \tau_y$  分别为对应于  $x, y$  方向水面上的风应力 ( $\tau_x = r^2 w^2 \cos \theta$ ,  $\tau_y = r^2 w^2 \sin \theta$ ;  $r^2$  为风应力系数, 其值约为 0.002 6,  $w$  为风速,  $\theta$  为风向角);  $\rho$  为海水密度;  $\varepsilon$  为水平涡动粘滞系数;  $C = 4.64 / n H^{1/6}$  为 Chezy 系数 ( $\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ),  $n$  为表示海底粗糙度的 Manning 系数。

方程的定解条件为:

初始条件:  $t = 0$  时,  $u = u_0, v = v_0, \zeta = \zeta_0$

边界条件:

在开边界(水-水边界):  $\zeta = \zeta'$

在陆边界(水-陆边界):  $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$  (沿岸移动,  $\mathbf{n}$  为边界法线方向)

由方程 (1) ~ (3) 及定解条件构成了完整的二维浅海潮波的闭合定解方程组。

在实际计算中, 由于浅海较强的湍耗散作用, 总是取零值为初始条件, 而且任何初始能量经过一定时间后总要耗散掉, 故当计算达到一定时间长度后, 初始效应总会消失, 而只是由  $\zeta'$  这一谐振潮的唯一强迫函数在起作用, 显然对于  $\zeta'$  的取值, 要求具有满意的精度。

收稿日期: 2004- 02- 16 修回日期: 2004- 05- 16

作者简介: 孙长青 (1957- ), 男, 江苏新沂人, 高级工程师, 主要从事海洋环境及海洋环境影响评价等领域的研究工作, 电话: 0532- 2032983, E-mail: suntq@ouc.edu.cn

## 1.2 计算域、网格设置及水界强迫函数<sup>[4]</sup>

计算海域南起 18°58'24"N, 北至 19°13'36"N; 西起 108°31'48"E, 东至海南岛西海岸所围成的海域, 计算域及网格设置见图 1。

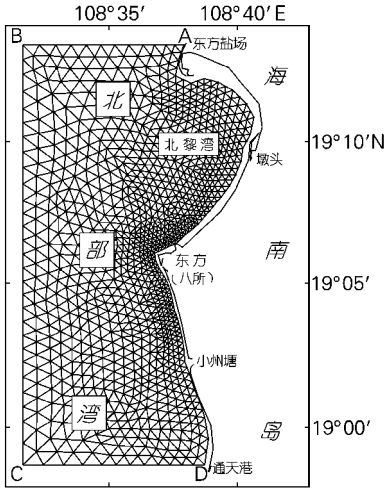


图 1 计算域与网格

Fig. 1 Computed area and compute grids

计算域内共有 1 049 个结点, 1 960 个三角形单元, 最小网格间距 214 m。计算时间步长  $\Delta t = 20.701$  s, 一个潮周期内运行 4 320 步。由于计算海域的潮汐为规则全日潮性质, 潮流为不规则全日潮流, 水界强迫函数按下式输入。本次数值计算只研究潮波运动, 未考虑海面边界条件的风应力<sup>[5]</sup>。

$$\zeta(t) = [(H_{K1} + H_{O1}/2) \cos(\alpha_{O1}t - \alpha_{K1}t/2 - (g_{O1} + g_{K1}/2) + H_{M2} \cos(\alpha_{M2}t - g_{M2})]$$

式中:  $t$  为时间;  $H_{M2}$ ,  $H_{K1}$  和  $H_{O1}$  分别为  $M_2$ ,  $K_1$  和  $O_1$  分潮潮汐调和常数振幅;  $g_{M2}$ ,  $g_{K1}$  和  $g_{O1}$  分别为  $M_2$ ,  $K_1$  和  $O_1$  分潮潮汐调和常数相位;  $\alpha_{M2}$ ,  $\alpha_{K1}$  和  $\alpha_{O1}$  分别为  $M_2$ ,  $K_1$  和  $O_1$  分潮圆频率;  $\zeta(t)$  表示合成水位值。

上式中等号右边第 1 项表示  $m_1$  平均日分潮, 第 2 项表示  $M_2$  半日分潮。 $m_1$  分潮的周期为 24.841 2 h,  $M_2$  分潮的周期为 12.420 6 h, 两者成倍数关系, 在数值计算时取 24.841 2 h 作为计算周期。

## 2 计算结果

计算结果中的同潮时线和等振幅线、潮流椭圆分布、欧拉余流场等均与曹德明的研究结果一致<sup>[1]</sup>。

### 2.1 同潮时线和等振幅线

图 2 和图 3 分别为计算  $m_1$  分潮和  $M_2$  分潮同潮时

线和等振幅线<sup>[6]</sup>, 实线为同潮时线, 虚线为等振幅线。

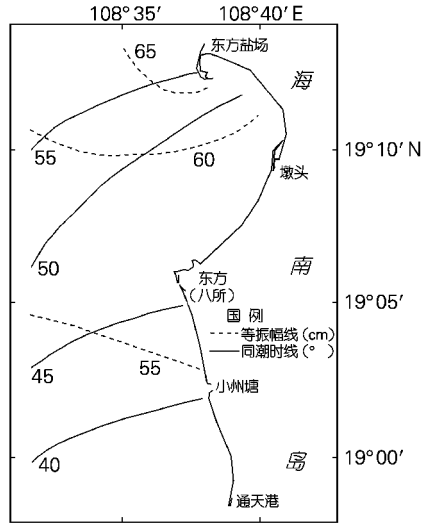


图 2  $m_1$  分潮同潮时线和等振幅线

Fig. 2 Cotidal chart and ise-amplitude curves for  $m_1$  constituent

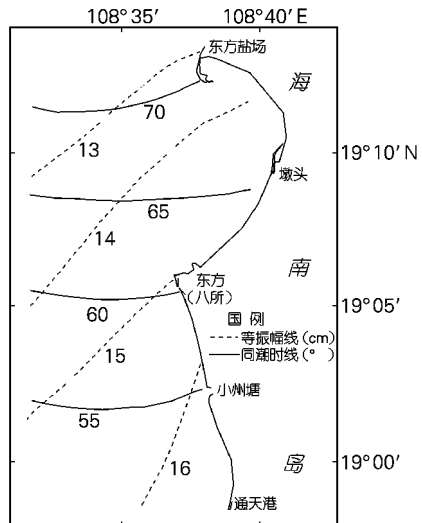


图 3  $M_2$  分潮同潮时线和等振幅线

Fig. 3 Cotidal chart and ise-amplitude curves for  $M_2$  constituent

大约在 16°~17°N 之间靠近越南沿岸附近存在一个无潮点或退化了的无潮点, 潮波的传播方向由南向北, 作者计算海域的  $m_1$  分潮属于该逆时针旋转日潮潮波系统。由图 2 可知, 同潮时线由 40° 左右增加到 55° 左右, 出现高潮的时间由南向北逐渐推迟, 大约相差 1 h 左右; 等振幅线的特征为由南向北逐渐增大,

从南边界到北边界振幅由 50 cm 左右增加到 65 cm 左右, 两者相差 15 cm, 在北边界的东方盐场附近可增加近 70 cm。

在  $20^{\circ}45'N$  左右靠近越南沿岸附近存在一个退化了半日潮无潮点, 旋转方向为逆时针, 作者计算海域的  $M_2$  分潮属于该潮波系统, 潮波的传播方向也是由南向北, 从图 3 可看出, 同潮时线由  $50'$  左右增加到  $70'$  以上, 出现高潮的时间大约相差 40 min 左右; 计算域西北部的振幅在 13 cm 左右, 东南部的振幅在 16 cm 左右, 两者相差仅 3 cm。

## 2.2 潮流椭圆

潮流椭圆长轴方向表示最大流方向, 长半轴长度表示最大流量值, 短轴方向表示最小流方向, 短半轴长度表示最小流量值。

图 4 为  $m_1$  分潮流流椭圆分布, 整个计算域内均为往复流, 岸边附近流速较小, 离岸较远区域流速较大, 椭圆长轴方向, 即最大流方向为南北向, 基本平行于海岸线, 强流区发生在计算域的西边。

图 5 为  $M_2$  分潮流流椭圆分布, 其特点也为往复流, 最大流方向也为南北向, 基本平行于海岸线, 强流区发生在计算域的南边。

由图 4 和图 5 可见,  $m_1$  分潮流速明显大于  $M_2$  分潮, 但就岸边附近的流速而言,  $M_2$  分潮流的量值已非常接近  $m_1$  分潮流速。

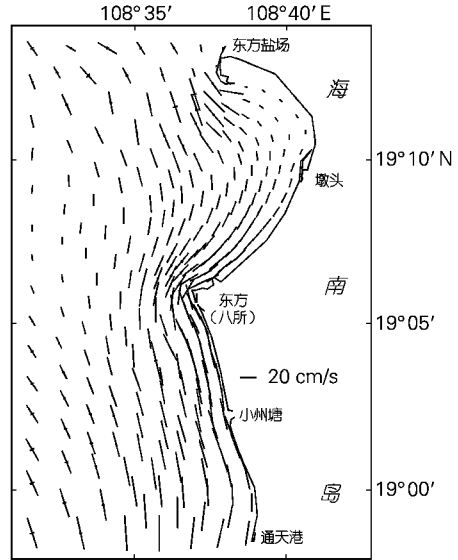


图 5  $M_2$  分潮流流椭圆分布  
Fig. 5 Distribution of tidal current ellipses for  $M_2$  constituent

## 2.3 最大流速分布

根据 (8) 式给出的水界强迫函数, 计算得到最大流速, 图 6 中等值线代表最大流速分布。

从图中可以非常明显地看出, 等值线的走向是与岸线平行的, 且岸边流速较小, 离岸越远流速越大, 岸边的流速一般在  $20\text{ cm/s}$  以下, 在计算域西边的中部流速可达  $80\text{ cm/s}$  以上, 这一区域是本计算的强流区。

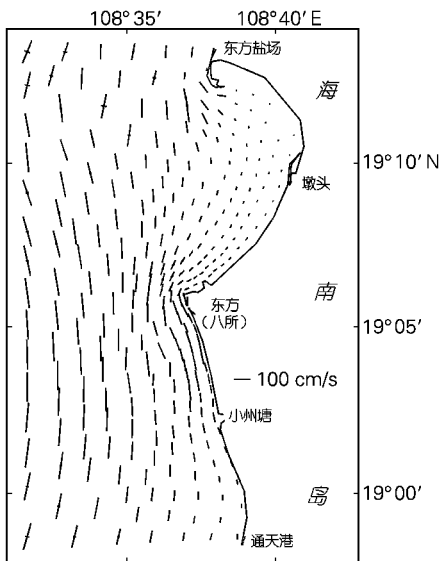


图 4  $m_1$  分潮流流椭圆分布  
Fig. 4 Distribution of tidal current ellipses for  $m_1$  constituent

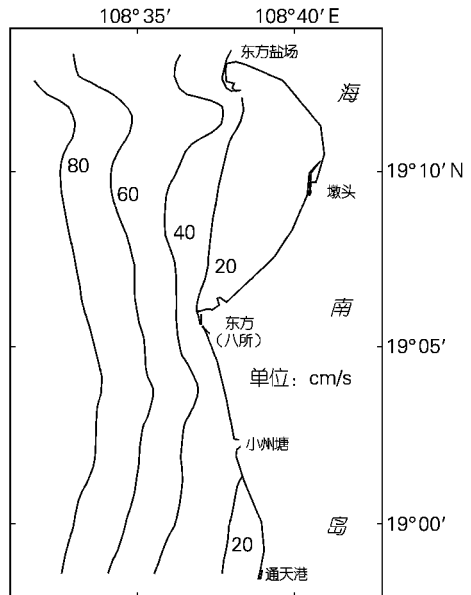


图 6 计算最大流速分布  
Fig. 6 Distribution of Computed maximum current speed

## 2.4 计算潮致欧拉余流

潮致欧拉余流速度是指海域内某一确定点一个潮周期内潮流速度的时间平均值, 由于是在欧拉意义下研究流体的运动, 因此定义为欧拉余流, 它表示在确定位置上流体周期平均的迁移趋势。

图 7 为按 (8) 式水界强迫函数计算的潮致欧拉余流分布, 由于岬角效应的缘故, 在东方市西北方向大约离岸 2.0 km 处存在一个顺时针向流涡; 在东方市西南方向大约离岸 3.5 km 处存在一个逆时针向流涡。就整个计算域而言, 以西边界中部至东方市一线来划分的话, 北边存在一个非常大的逆时针向流涡; 南边有一大的顺时针向流涡, 流涡半径均在 10 km 以上, 在这 2 个大的流涡系统中最大余流速度一般在 11~15 cm/s 之间。

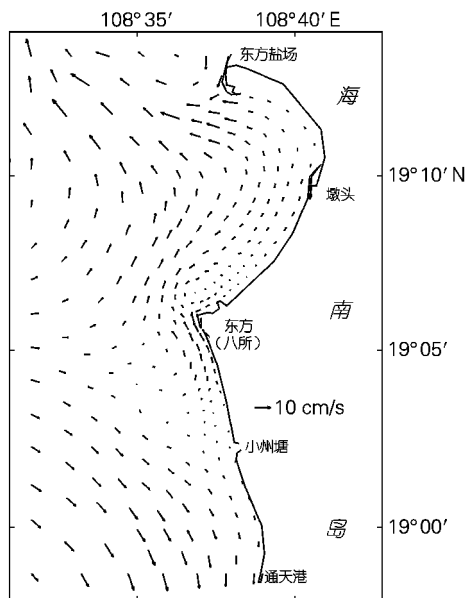


图 7 计算欧拉余流场

Fig. 7 Computed eulerian residual current

## 2.5 计算潮流场

由于该计算海域的潮汐为规则全日潮, 但半日潮流的影响也不能忽略, 因此水界强迫函数如 (8) 式所示输入, 即  $m_1 + M_2$ , 给出的计算潮流场为两者的合成流场。

选东方市 (八所港) 为参考港, 给出落潮中间时和涨潮中间时两个代表时刻的计算潮流场分布图。见图 8 和图 9。由图可见, 落潮时海水由北边界流入计算

域, 从南边界流出, 涨潮时流向正好相反。无论涨潮流还是落潮流, 靠近岸边的流速均比较小, 向外海流速逐渐增大, 流向基本与岸线平行。最大涨潮流速 74.9 cm/s, 发生在 22.2 时, 最大落潮流速 85.4 cm/s, 发生在 7.3 时。

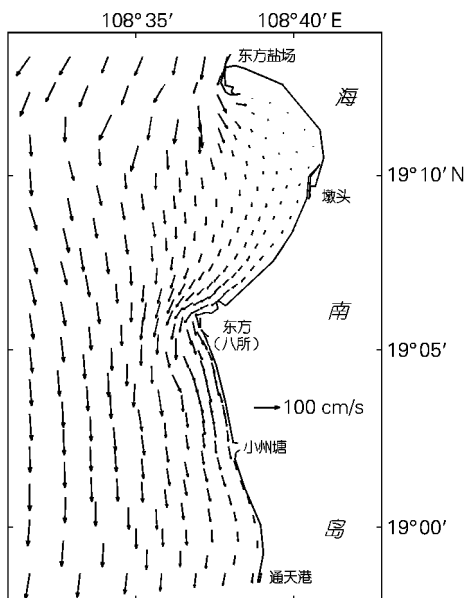


图 8 计算潮流流场(落潮中间时)

Fig. 8 Computed tidal current field (half tide during ebb)

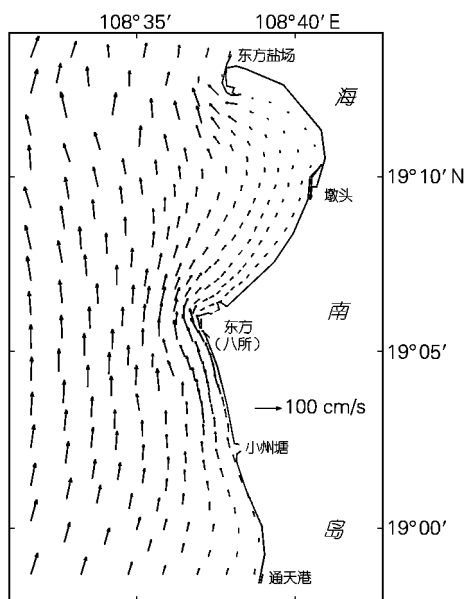


图 9 计算潮流流场(涨潮中间时)

Fig. 9 Computed tidal current field (half tide during flood)

### 3 结语

作者所计算的北黎湾及邻近海域是北部湾的一部分,潮汐性质为规则全日潮,而潮流性质则为不规则全日潮流。无论是  $m_1$  分潮还是  $M_2$  分潮,潮波的传播方向都是由南向北,且都是逆时针旋转潮波;不同的是  $m_1$  分潮的等振幅线由南向北逐渐增大,而  $M_2$  分潮则相反由北向南逐渐增大。但  $m_1$  分潮是该海域的主要分潮,起着主导作用,  $M_2$  分潮次之,这由等振幅线可明显看出。

在近岸区域,  $M_2$  分潮最大流的量值接近  $m_1$  分潮最大流;其它区域,  $m_1$  分潮最大流量值是  $M_2$  分潮最大流的 4~5 倍。最大流速等值线与岸线平行,岸边流速较小,离岸越远流速越大,流速最大值可达 80 cm/s 以上。

计算海域存在两大余流涡旋,北边涡旋为逆时针向旋转,南边涡旋为顺时针向旋转,总的趋势都是由岸边向外海,这样有利于污染物的向外迁移,从潮致欧拉余流分布看,该海域水交换比较活跃<sup>[7,8]</sup>。

计算结果,最大落潮流速 85.4 cm/s 大于最大涨

潮流速 74.9 cm/s,两者相差 10.5 cm/s,都发生在半潮面附近,说明该海域的潮流具有明显的驻波性质。

参考文献:

- [1] 曹德明,方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 105-113.
- [2] 孙文心,江文胜,李 磊. 近海环境流体力学数值模型[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 117-163.
- [3] 吴江航,韩庆书. 计算流体力学的理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [4] 孙长青,郭耀同,赵可胜,等. 海州湾及邻近海域潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2003, 27(10): 54-58.
- [5] 孙长青,赵可胜,郭耀同,等. 渤海湾海面溢油数值计算[J]. 海洋科学, 2003, 27(11): 63-67.
- [6] 王学昌,姜安刚,孟 伟,等. 大鹏湾潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2001, 25(12): 37-40.
- [7] 孙长青,王学昌,孙英兰,等. 填海造地对胶州湾污染物运输影响的数值计算[J]. 海洋科学, 2002, 26(10): 47-50.
- [8] 王学昌,孙长青,孙英兰,等. 填海造地对胶州湾水动力环境的数值计算[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(3): 55-59.

## Numerical computation of tidal current for Beili Bay and near sea area

SUN Chang-qing, ZHAO Ke-sheng, GUO Yao-tong

(Ocean University of China, Environment Science and Engineering College, Qingdao 266003, China)

Received: Feb., 16, 2004

Key words: Beili Bay; tidal current; tidal wave; numerical computation

**Abstract:** Using split steps finite element method, a two-dimensional numerical model of the tidal current in the Beili Bay and adjacent area is constructed. The distribution of tidal wave and tidal current in this area is simulated. The tidal current at different times and the Eulerian residual current are calculated, also the distribution of maximum tidal current speed, the cotidal line, the iso-amplitude curves and the distribution of tidal current ellipses are given in this paper.

(本文编辑:张培新)