

# 湄洲湾潮流数值计算

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:** 采用不规则三角形网格的分步杂交法, 建立了湄洲湾海域二维变动边界潮流数值模型, 通过计算得到最大潮流分布、同潮时线与等振幅线、潮流椭圆、潮致欧拉流分布及不同时刻潮流场分布。

**关键词:** 湄洲湾; 潮流; 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)12-0035-04

湄洲湾位于台湾海峡西侧, 是中国福建省的一个封闭性海湾, 海流以潮流为主, 潮汐、潮流均属正规半日潮。湄洲湾的特点是潮差大、滩涂广、岛屿多, 根据秀屿潮位站 (118°59' E, 25°13' N) 1978-1980 年的观测资料显示, 其最大潮差为 7.59 m, 最小潮差为 2.22 m, 平均潮差为 5.12 m。M<sub>2</sub> 分潮潮差在 4 m 以上。湄洲湾的总面积为 516 km<sup>2</sup>, 其中潮间带滩涂面积约为 160 km<sup>2</sup>, 占总面积的近三分之一。作者计算的是湄洲湾的一部分, 计算域及网格设计见图 1。

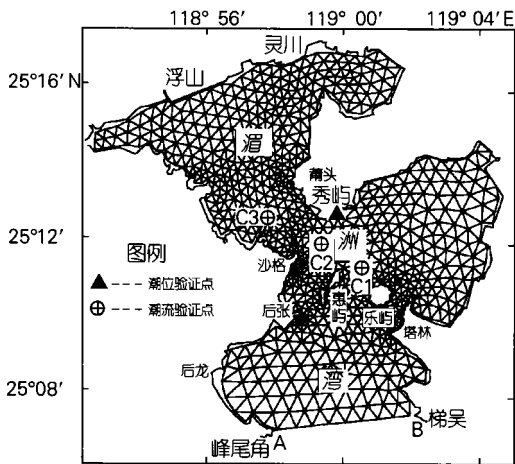


图 1 计算域及网格设计

Fig. 1 Computation domain and grid

## 1 计算方法

根据湄洲湾潮差大、滩涂广的特点, 作者采用不规则三角形网格的分步杂交方法<sup>[1]</sup>, 建立湄洲湾海域

二维变动边界潮流数值模型。

### 1.1 流体动力学方程<sup>[2]</sup>

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:

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

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

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

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

收稿日期: 2004-04-29; 修回日期: 2004-08-18

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: sunty@ouc.edu.cn

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 0.0026,  $w$  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。

### 1.2 计算域、网格设置及水界强迫函数<sup>[3]</sup>

取峰尾角(A点)至梯吴(B点)一线为开边界,以 A, B 两点连线及岸线所包括海域为计算海域,计算域及网格见图 1,计算域内共有 782 个结点,1268 个单元,最小网格步长 132.6 m。计算时间步长  $\Delta t = 10.35 \text{ s}$ ,一个潮周期内运行 4320 步。由于计算海域潮汐性质为正规半日潮且只研究潮波运动,故作者只考虑半日潮且不考虑海面边界条件的风应力。

水界强迫函数按<sup>[4]</sup>  $\zeta(t) = H_{M2} \cos(\sigma_{M2} t - g_{M2})$  输入式中:  $t$  为时间,  $H_{M2}, g_{M2}$  分别为  $M_2$  分潮调和常数振幅和位相;  $\sigma_{M2}$  为  $M_2$  分潮角速度;  $\zeta(t)$  表示水位值。

## 2 计算结果

### 2.1 潮位、潮流验证

2003 年 3 月 20 日至 21 日在计算域内进行了潮流、潮位同步观测(位置见图 1)。C1, C2 和 C3 为潮流观测站<sup>[5]</sup>, 秀屿、峰尾角和梯吴为潮位观测站。经对峰尾角和梯吴站潮位观测资料调和与分析,所得调和常数作为水界输入,秀屿潮位, C1, C2 和 C3 潮流作为计算结果的验证。

以秀屿验潮站的潮位实测资料对计算潮位进行验证,由图 2 的潮位验证曲线可看出,计算潮时略落后于实测潮时,计算潮差小于实测潮差大约 5 cm 左右。

图 3 为潮流验证玫瑰图,3 个点均为往复流性质, C1, C2 点流速较大, C3 点流速较小。计算值与实测值比较,主流方向相差不超过  $5^\circ$ , 主流大小的相对误差不超过 4%。

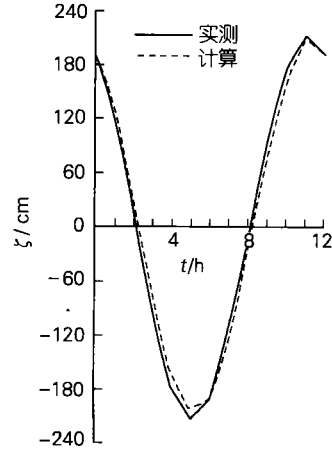


图 2 潮位验证曲线

Fig. 2 Observed and computed tidal curves

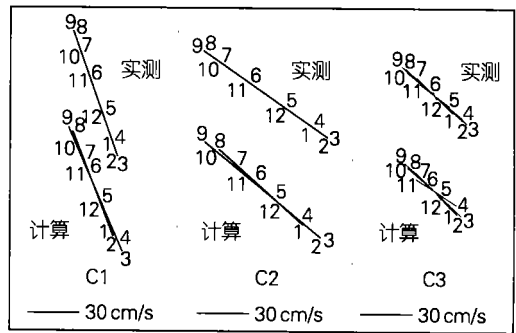


图 3 潮流验证玫瑰图

Fig. 3 Observed and computed roses of tidal current

以上验证结果说明,本数值计算是正确可信的。

### 2.2 最大流速分布

图 4 中等值线为计算所得最大流速分布,最大流速发生在湾口的峰尾角附近海域,流速可达  $60 \text{ cm/s}$ 。由湾口向湾内流速有减小的趋势,但由于受到“狭管”效应的影响,岛屿之间的狭窄水道区域流速较大,可达  $45 \text{ cm/s}$ 。

### 2.3 同潮时线和等振幅线

图 5 为计算同潮时线和等振幅线,实线为同潮时线,虚线为等振幅线。同潮时线表明:潮波主体由南向北传播,受到湄洲湾地形的影响而分为两个分支,一支向东传播,另一支向西北传播。潮时由湾口的  $340^\circ$  到达湾内增加到  $346^\circ$  以上,两者相差  $6^\circ$  以上,即湾口半日分潮发生高潮的时间比湾底部分早 12 min

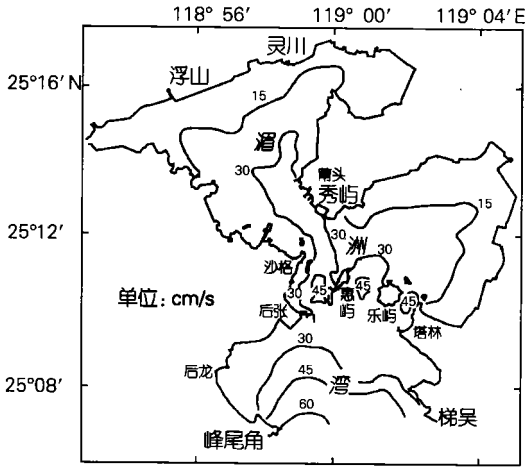


图 4 最大流速分布

Fig. 4 Distribution of maximum current speed

2.5 计算潮致欧拉余流

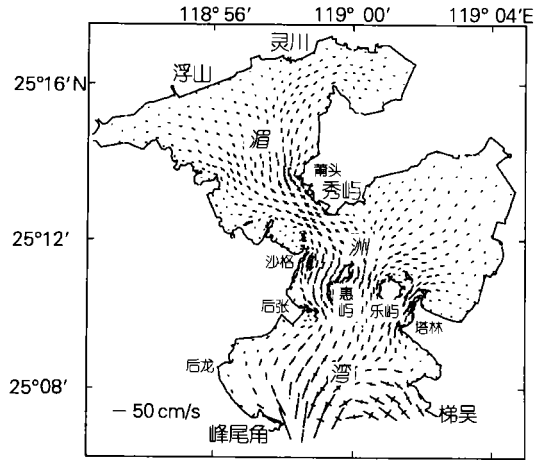


图 6 潮流椭圆分布

Fig. 6 Distribution of tidal current ellipses

左右。

等振幅线的特征为由南向北逐渐增大, 湾口附近振幅 206 cm 左右, 到达莆头西北海域振幅增至 236 cm 以上, 两者相差 30 cm 左右。

2.4 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。潮流椭圆分布见图 6, 由图可看出强流区出现在湾口, 整个海湾大部分区域椭圆短轴与长轴之比很小或接近为零, 为典型往复流性质, 仅在秀屿西南海域短轴略有增大。

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, 表示在确定位置上流体周期平均的迁移趋势。图 7 为计算潮致欧拉余流分布, 在惠屿南部、乐屿东北部及莆头西北部海域各存在一个明显的顺时针向流涡, 在秀屿及浮山南部海域各存在一个逆时针向流涡。计算域中余流速度一般小于 4 cm/s。

2.6 计算潮流场

为体现变边界数值计算的效果, 给出秀屿港为参考港的低潮时(图 8)和高潮时(图 9)流场分布。在低潮时刻, 湾底的灵川滩和乐屿东北边的大片滩涂已经退出, 东、西两片滩涂退出的距离均在 3~ 4 km 左右, 计算海域此时处于转流状态, 流速普遍很小, 一般在 10 cm/s 以下; 高潮时刻, 整个海域充满海水, 滩涂被完全淹没, 潮流又一次进入转流状态, 仅湾口附近流速较大。

3 结语

湄洲湾是一个封闭性海湾<sup>[6]</sup>, 海流以潮流为主, 潮汐、潮流均属正规半日潮。最大潮差 7.59 m, 最小潮差 2.22 m, 平均潮差 5.12 m。M<sub>2</sub>分潮潮差在 4 m 以上。潮波由外海向湾内传播, 从湾口到湾底大约需要 12 min, 振幅相差 30 cm 左右; 最大流速发生在湾口附近, 流速可达 60 cm/s; 大部分区域的潮流, 为往复流性质; 受到岸线和岛屿的影响, 存在 5 个以上的欧拉余流流涡, 顺时针和逆时针向旋转流涡皆有; 低潮时 3~ 4 km 滩涂退出, 高潮时海水可淹没整个滩涂。

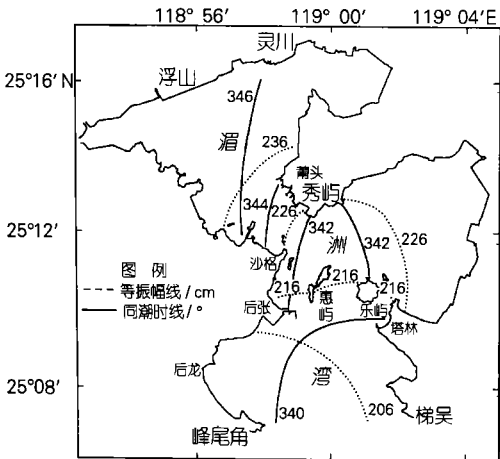


图 5 同潮时线和等振幅线

Fig. 5 Cotidal chart and iso-amplitude curves

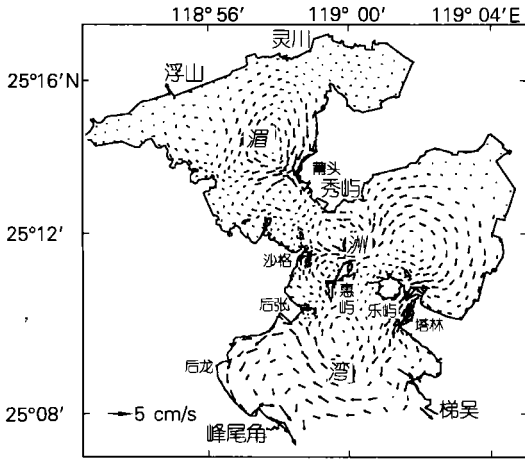


图 7 计算欧拉余流场

Fig. 7 Computed eulerian residual current

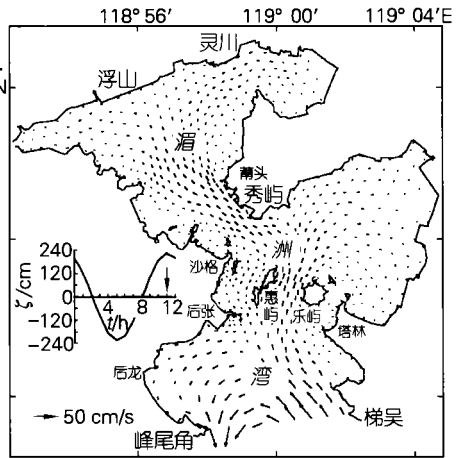


图 8 计算低潮时潮流场

Fig. 8 Computed tidal current field in low tide

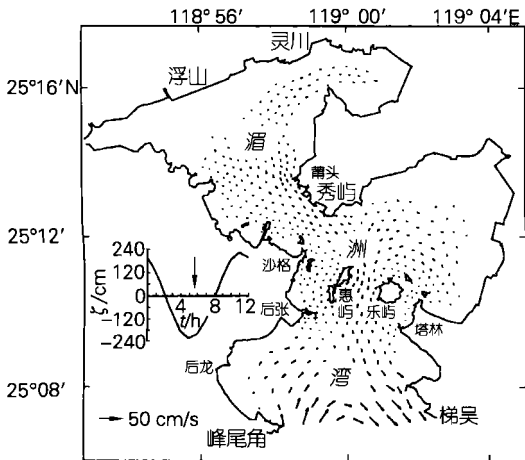


图 9 计算高潮时潮流场

Fig. 9 Computed tidal current field in high tide

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙文心, 江文胜, 李磊. 近海环境流体动力学数值模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

## Numerical computation of tidal current in Meizhou Bay

SUN Chang- qing, ZHAO Ke- sheng, GUO Yao- tong  
(Environment Science and engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Received: Apr., 29, 2004

Key words: Meizhou Bay; tidal current; numerical computation

**Abstract:** Using split steps of finite element method, various boundaries in two- dimensional numerical model of the tidal current in Meizhou Bay were constructed. The tidal current in different times and the eulerian residual current were calculated. The distribution of maximum tidal current speed, cotidal line, iso- amplitude curves and distribution of tidal current ellipses are also given in this paper.  
( 本文编辑: 刘珊珊)