

罗源湾全日潮汐和潮流数值计算

孙长青¹, 郭耀同¹, 陈斌林², 王学昌¹, 赵可胜¹

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

提要: 采用不规则三角形网格的分步杂交法, 建立罗源湾海域二维变边界全日潮汐和潮流数值模型。将计算值与实测资料比较, 结果表明符合程度良好。给出了同潮时线与等振幅线、潮流椭圆、最大潮流及不同时刻潮流场分布。应用该模型可以较系统地了解罗源湾全日潮的潮汐、潮流状况。

关键词: 罗源湾; 全日潮; 数值计算

中图分类号: P731.2; P752 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2006)10-0048-04

罗源湾位于福建省东北部沿海, 西南距福州 55 km。由可门水道与东海相通, 海岸线总长 155 km, 最大水深 74 m, 湾口宽度 2 km, 海湾总面积 179 km², 其中潮间带滩涂面积约为 104 km², 口小腹大, 属于隐蔽性较好的半封闭海湾。

2004 年 9 月 15 日~2004 年 9 月 17 日在计算域内进行了 3 个站的潮位和 2 个站的潮流连续观测, 观测资料经调和分析后作为本次计算的水界输入和验证。观测站经纬度如下:

潮位观测站 A1: 26°26.410' N, 119°49.047' E;
A2: 26°25.545' N, 119°49.477' E; A3: 26°26.363' N, 119°43.835' E

潮流观测站 C1: 26°23.722' N, 119°45.418' E;
C2: 26°26.229' N, 119°42.297' E

观测站位见图 1。

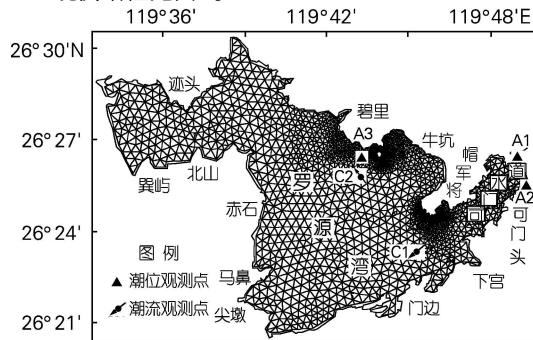


图 1 计算域及网格设计

Fig. 1 Computed area and grid layout

1 计算方法

根据罗源湾滩涂广的特点, 采用不规则三角形网格的分步杂交方法^[1], 建立罗源湾海域二维变动边界全日潮汐潮流数值模型。

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^[2]:

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

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

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

式中: u, v 分别为对应于 x, y 轴的深度平均流速分量;

收稿日期: 2006-02-28; 修回日期: 2006-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30200211)

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, 电话:

0532-82032983, E-mail: sunty@ouc.edu.cn

t 为时间坐标; f 为柯氏参数($f = 2\Omega\sin\varphi$, Ω 为地转角速度, φ 为地理纬度); g 为重力加速度; $H = h + \zeta$ (h 和 ζ 分别为自平均海面起算的水深和水位高度); τ_x , τ_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, θ 为风向角); ρ 为海水密度; ε 为水平涡动粘滞系数; $C = 4.64/nH^{1/6}$ 为 Chezy 系数 ($\text{cm}^{1/2}/\text{s}$), n 为表示海底粗糙度的 Manning 系数^[3]。
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): $\zeta = \xi$

在陆边界(水-陆边界): $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$ (沿岸移动, $\vec{n}$ 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是要耗散掉, 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 ξ 这一谐振潮的唯一强迫函数在起作用, 显然对于 ξ 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^[4]

以湾口 A1, A2 两点连线为开边界, 两点连线及岸线所包括海域为计算海域, 计算域及网格设计见图 1, 经对 A1, A2 站潮位观测资料调和分析, 所得调和常数作为水界输入。计算域内共有 1 901 个结点, 3 449 个单元, 最小网格步长 50 m 左右。计算时间步长 $\Delta t = 3.45$ s, 一个潮周期内运行 12 960 步, 经过 5 个日潮周期的运行后, 计算趋于稳定。由于仅研究全日分潮的潮波运动, 故本文未考虑海面边界条件的风应力。开边界水位根据下式计算:

$$\zeta(t) = (H_{O_1} + H_{K_1}) \cos[(\sigma_{O_1} + \sigma_{K_1})t/2 - (g_{O_1} + g_{K_1})/2] \quad (4)$$

式中: $\zeta(t)$ 表示水位值; t 为时间; H_{O_1} , H_{K_1} 分别为 O_1 分潮和 K_1 分潮调和常数振幅; g_{O_1} , g_{K_1} 分别为 O_1 分潮和 K_1 分潮调和常数迟角; σ_{O_1} , σ_{K_1} , H_{K_1} 分别为 O_1 分潮和 K_1 分潮角速度。

2 计算结果

2.1 潮位、潮流验证

潮位验证点位置见图 1 中 A3; 潮流验证点位置见图 1 中 C1, C2, 利用经调和分析的同步观测资料对计算结果进行验证。

图 2 是潮位验证曲线, 图中实线为实测值, 虚线为计算值, 由图可见罗源湾全日潮 ($O_1 + K_1$) 的振幅小于 50 cm, 计算潮时与实测潮时几乎完全重合; 计算潮位略大于实测潮位, 大约在 1 cm 左右。说明潮位计算值与实测值吻合很好。

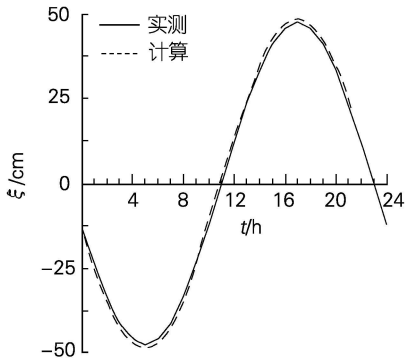


图 2 潮位验证曲线

Fig.2 Observed and computed tidal curves

图 3 给出潮流验证玫瑰图, 两个验证点均为往复流性质, C2 点短轴大于 C1 点。就 C1 点而言, 实测与计算潮流主流向相同, 计算流速值略大于实测值, 相差大约在 0.6 cm/s 左右; C2 点实测与计算主流方向相差 7° 左右。计算流速值小于实测值 0.5 cm/s 左右。潮流计算值与实测值吻合良好^[5]。

以上分析表明数值计算具有良好的重现性。

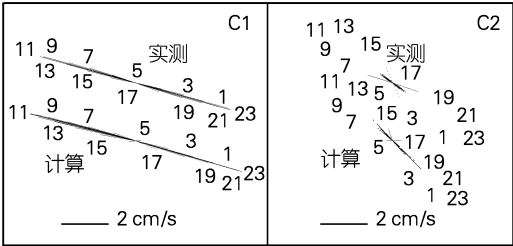


图 3 潮流验证玫瑰图

Fig.3 Observed and computed roses of tidal current

2.2 同潮时线和等振幅线

计算全日分潮潮波分布见图 4, 图中实线为同潮时线, 虚线为等振幅线。外来潮波在湾口处为 253° , 经可门水道向湾内传播, 到达赤石一线为 256° , 传播至湾底大约需要 18 min。湾口振幅 49 cm 左右, 到达赤石与北山之间海域时, 振幅增至 50 cm, 两者仅相差 1 cm。与 M2 分潮计算结果比较可见^[6], 全日分潮在罗源湾海域处于次要位置。

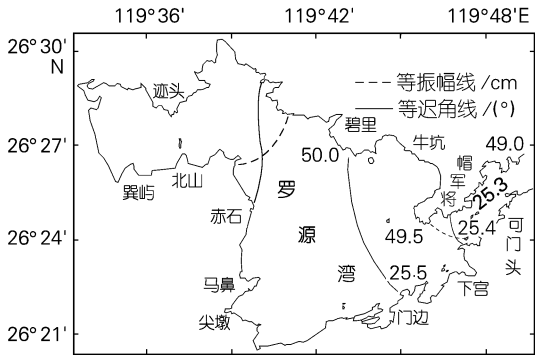


图 4 同潮时线和等振幅线

Fig. 4 Dotidal chart and isor amplitude curves

2.3 潮流椭圆

计算潮流椭圆长短轴之比表明, 罗源湾全日分潮流呈现出典型的往复流性质, 椭圆短轴非常短, 长轴方向几乎同海岸线平行, 这与 M2 分潮相同^[6], 强流区位于长 6.5 km 左右的可门水道, 这是流体的连续性和罗源湾口小腹大的海湾地形决定的, 而湾内流速变化比较均匀, 计算潮流椭圆分布见图 5。

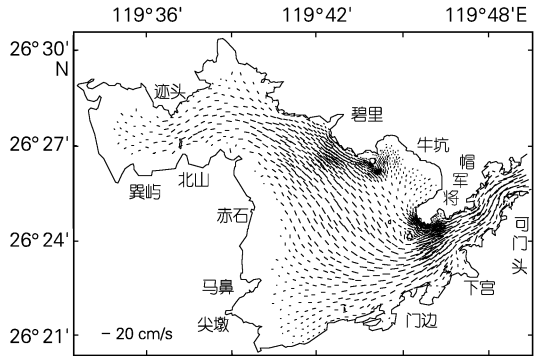


图 5 潮流椭圆分布

Fig. 5 Distribution of tidal current ellipses

2.4 计算最大潮流分布

最大潮流分布可以直观地表示罗源湾日潮流量值的分布情况, 图 6 为计算最大流速分布, 从图中可以清楚地看出, 等直线走向与岸线一致, 呈平行状态, 最大流速发生在湾口海域, 流速达到 10 cm/s, 由湾口向湾内流速逐渐减小, 靠近岸边的流速小于湾中部的流速, 湾中部的流速一般为 4~6 cm/s。

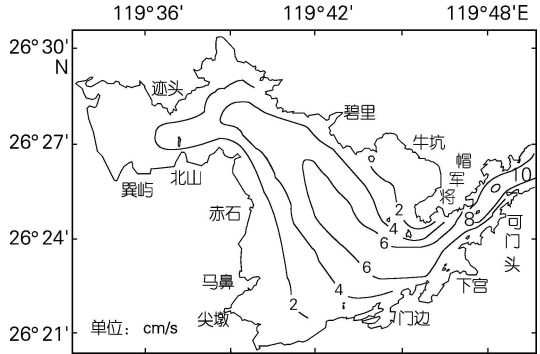


图 6 计算最大流速分布

Fig. 6 Distribution of computed maximum current speed

2.5 计算潮流场

根据 (4) 式给出的开边界水位计算条件和罗源湾日潮流计算结果^[7], 绘制了涨潮中间时和落潮中间时潮流场分布图, 图 7 为涨潮中间时潮流场, 图 8 为落潮中间时潮流场。从这两张图上可以看出, 日潮流速度以可门水道为最强, 其次是海湾中部。图 7 是涨潮流速最大的时刻, 海水通过可门水道由外海涌入罗源湾, 此时水道像是一个‘源’, 而图 8 是落潮流速最大的时刻, 此时的流场结构与图 7 相同, 只是流向相反, 海水‘汇’入可门水道向东流向外海。

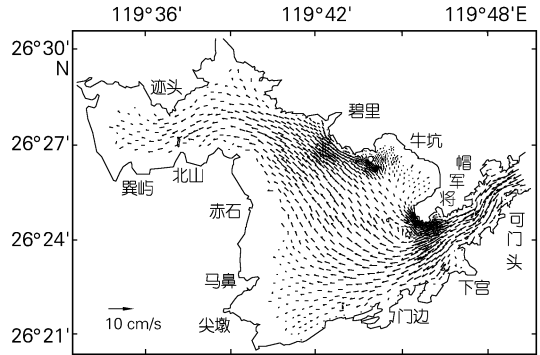


图 7 计算潮流场(涨潮中间时)

Fig. 7 Computed tidal current field (half tide during flood)

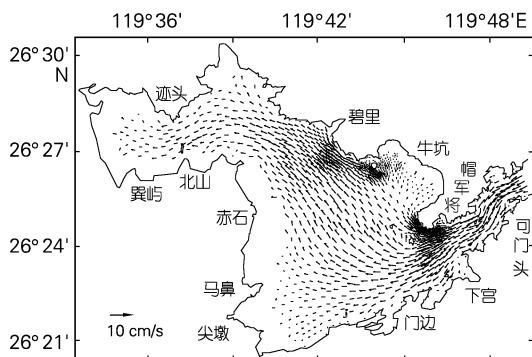


图 8 计算潮流场(落潮中间时)

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

3 结语

罗源湾属正规半日潮和正规半日潮流海区^[8], M_2 分潮占主导成分。作者对处于次要位置的全日分潮进行计算, 以了解日潮在罗源湾的潮波性质、潮位振幅、流场结构、流速大小等。 M_2 分潮计算可参看文献^[6]。

由潮位验证曲线(图 2)和潮流验证玫瑰图(图 3)可以看出, 潮位处于中间时刻潮流最大, 说明罗源湾日潮潮波据有明显的驻波性质; 计算所得半日潮

(M_2 分潮) 平均潮位振幅 225 cm 左右, 全日潮($K_1 + O_1$) 平均振幅 45 cm 左右, 全日潮只是半日潮的 20% 左右; 全日潮与半日潮流场结构相同, 只是流速大小不同, 最大流速均发生在可门水道, 半日潮最大流速可达 60 cm/s 以上, 全日潮最大流速仅 10 cm/s 略强, 无论半日潮流还是全日潮流均为往复流性质。

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, 郭耀同, 赵可胜. 渤海湾海域潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2004, 28(8): 33-37.
- [5] 王学昌, 娄安刚, 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, 郭耀同, 赵可胜, 等. 罗源湾潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2005, 29(9): 19-22.
- [7] 孙长青, 王学昌, 孙英兰, 等. 填海造地对胶州湾污染物输运影响的数值计算[J]. 海洋科学, 2002, 26(10): 47-50.
- [8] 孙长青, 赵可胜, 郭耀同. 湄洲湾潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 35-38.

Numerical computation of diurnal tide and tidal current in Luoyuan Bay

SUN Chang-qing¹ GUO Yao-tong¹ CHEN Bir-lin² WANG Xue-chang¹ ZHAO Ke-sheng¹

(1. Ocean University of China, Environment Science and Engineering College, Qingdao 266003, China; 2. East China Normal University, State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Shanghai 200062, China)

Received: Feb., 26, 2006

Key words: Luoyuan Bay; diurnal tide; numerical computation

Abstract: Using the split steps finite element method, the varied boundary two dimensional numerical model of diurnal tide and tidal current in the Luoyuan Bay is constructed. The tally of computation and observation is in a good agreement. The tide and the tidal current in Luoyuan Bay can be known from the numerical model calculation. Diurnal tide and tidal current at different times and the eulerian residual current are calculated, also the cotidal line, the isor amplitude curves and the distribution of tidal current ellipses are given in this paper.