

罗源湾潮流数值计算

孙长青, 郭耀同, 赵可胜

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要:研究罗源湾潮汐、潮流及潮波的传播, 对罗源湾的开发及海岸工程建设具有一定的实际意义。为系统地了解罗源湾的潮汐、潮流状况, 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潮流数值模型, 通过计算得到同潮时线与等振幅线、潮流椭圆、潮致欧拉余流分布及不同时刻潮流场分布。该海湾海流具往复流性质, 潮汐、潮流均属正规半日潮, 最大流速发生在可门水道。

关键词:罗源湾; 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(2005)09-0019-04

罗源湾位于福建省东北部沿海, 西南距福州 55 km, 北侧、西北侧为罗源县, 西侧、南侧为连江县。由可门水道与东海相同, 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 个点的潮位观测 (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), 观测的潮汐资料显示, 罗源湾潮汐形态数为 0.28 左右, 属正规半日潮, 最大潮差为 7.64 m, 最小潮差为 2.27 m, 平均潮差为 4.98 m, M₂ 分潮潮差为 4.37 m。观测站位见图 1。

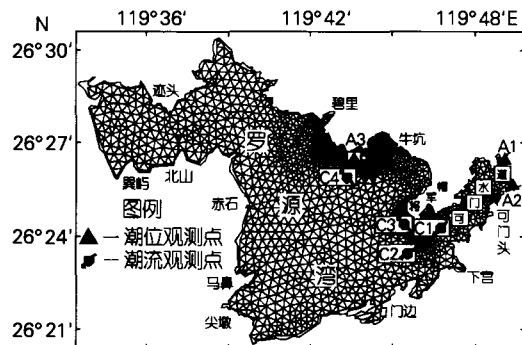


图 1 计算域及网格设计

Fig. 1 Computed area and grid layout

根据与潮汐观测同步进行的 C1、C2、C3 和 C4 (C1: 26°26.674' N, 119°47.096' E; C2: 26°23.722' N,

119°45.418' E; C3: 26°24.342' N, 119°45.398' E; C4: 26°26.229' N, 119°42.297' E) 点潮流实测资料的分析, 罗源湾潮流性质属正规半日潮流, 潮流性质形态系数平均为 0.16, M₂ 分潮流在潮流组成中占主导成分, 潮流运动形式为由地形控制的稳定的往复流。潮流观测站位见图 1。

1 计算方法

根据罗源湾潮差大、滩涂广的特点, 采用不规则三角形网格的分步杂交方法, 建立罗源湾海域二维变边界潮流数值模型^[1]。

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]:

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

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - f u - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} v$$

收稿日期: 2005-04-30; 修回日期: 2005-07-09

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

$$+\frac{\tau_y}{\rho H}+\varepsilon\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \quad (3)$$

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 ($f=2\Omega\sin\varphi$, Ω 为地转角速度, g 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 ($\tau_x=r^2w^2\cos\theta$, $\tau_y=r^2w^2\sin\theta$; 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; τ 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。

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): $\vec{v} \cdot \vec{n}=0$ (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^[3]。

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 ζ' 这一谐振潮的唯一强迫函数在起作用,显然对于 ζ' 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。由于计算海域潮汐性质为正规半日潮且只研究潮波运动,故本文仅考虑 M_2 分潮且不考虑海面边界条件的风应力。由于篇幅所限,全日分潮、浅水分潮有待于以后进行计算研究。

水界强迫函数按 $\zeta(t)=H_{M_2}\cos(\sigma_{M_2}t-g_{M_2})$ 输入。

式中: t 为时间, H_{M_2} 、 g_{M_2} 分别为 M_2 分潮调和常数振幅和位相; σ_{M_2} 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

A3 作为潮位验证点, C1、C2、C3 和 C4 为潮流验证

点,上述点的实测资料经调和分析后作为计算结果的验证。

图 2 是 A3 点相应位置的潮位验证,由潮位验证曲线可看出,计算潮时超前于实测潮时 5 min 左右,计算潮差大于实测潮差大约 8 cm 左右。

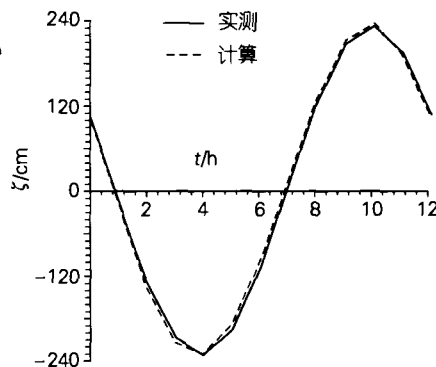


图 2 潮位验证曲线

Fig. 2 Observed and computed tidal curves

图 3 为潮流验证玫瑰图^[5],四个点均为往复流性质,最大流速在 45~60 cm/s 之间。C1、C2 和 C3 点主流方向一致, C1 点和 C3 点计算流速值略小于实测值,相对误差在 6% 左右。C4 点流速大小相当,主流方向相差 6° 左右。

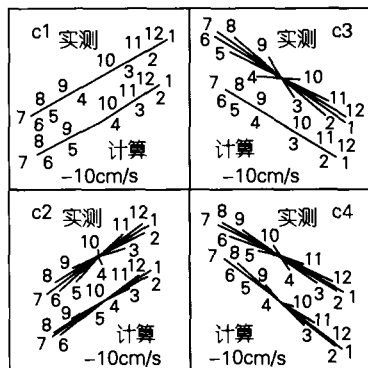


图 3 潮流验证玫瑰图

Fig. 3 Observed and computed roses of tidal current

2.2 同潮时线和等振幅线

图 4 为计算所得罗源湾潮波分布,实线为同潮时线,虚线为等振幅线。同潮时线表明外来潮波由湾口经狭窄的可门水道向湾内传播。潮时由湾口可门头附近的 292° 到达湾底附近的迹头增加到 296°, 这表明潮波在此传播 25 km 左右,大约历时 12 min。

研究报告 REPORTS

等振幅线表明湾口振幅 225 cm 左右,到达迹头附近海域振幅增至 240 cm 以上,两者相差 15 cm 以上。

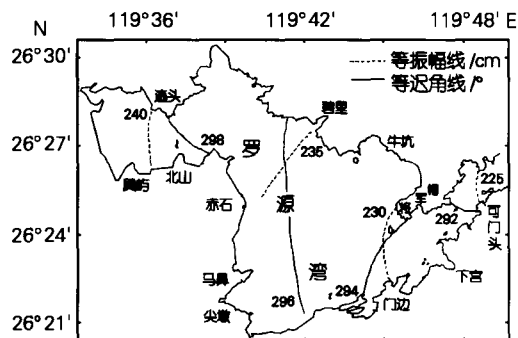


图 4 同潮时线和等振幅线

Fig. 4 Dotidal chart and iso-amplitude curves

2.3 潮流椭圆

计算潮流椭圆分布见图 5,可见整个罗源湾的潮流呈现出典型的往复流性质,椭圆短轴相当短。狭窄的可门水道为强流区,湾内流速大小比较均匀。

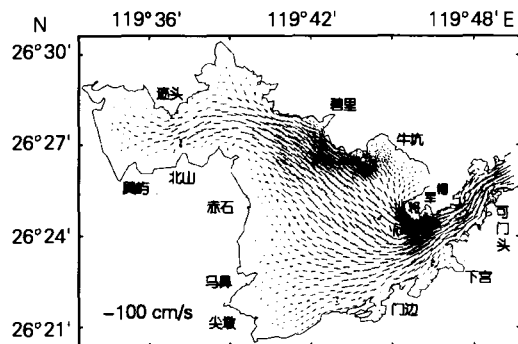


图 5 潮流椭圆分布

Fig. 5 Distribution of tidal current ellipses

2.4 计算潮致欧拉余流

图 6 为计算潮致欧拉余流分布,在将军帽西南向海域存在一个较大的顺时针向涡旋;而赤石东北部海域存在一个较小的逆时针向涡旋;在 6~7 km 狭长的可门水道中,由于受到特定地形的影响,一字形存在着三个涡旋,两端的涡旋为逆时针向,中间的为顺时针向,这也是罗源湾的一个特点。将军帽西南向涡旋的余流速度较大,一般在 6 cm/s 左右。

2.5 计算潮流场^[6]

为体现变边界数值计算的效果,本文仅给出低潮

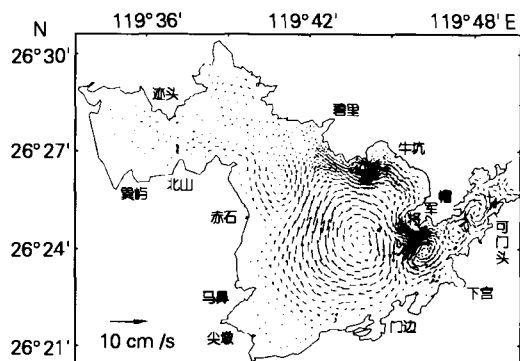


图 6 计算欧拉余流场

Fig. 6 Computed eulerian residual current

时(图 7)和高潮时(图 8)流场分布,该海湾高低潮时为转流时刻,流速较小,一般在 5~8 cm/s。低潮时尖墩至迹头一线的大片滩涂已经退出,滩涂退出的距离均在 2.5~4.5 km 之间;高潮时,整个海湾充满海水,滩涂被完全淹没。

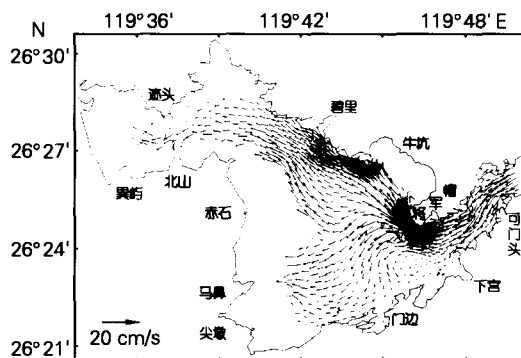


图 7 计算低潮时潮流场

Fig. 7 Computed tidal current field at low water

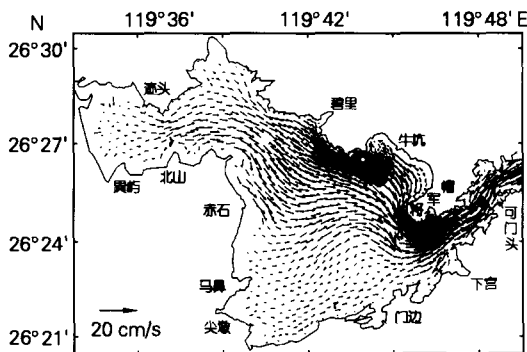


图 8 计算高潮时潮流场

Fig. 8 Computed tidal current field at high water

3 结语

罗源湾口小腹大,属于隐蔽性较好的半封闭海湾^[7],潮波由外海传入,从湾口到湾底大约需要 12 min,振幅相差 15 cm 以上;海流以潮流为主,且为往复流性质,潮汐、潮流均属正规半日潮。 M_2 分潮潮差为 4.37 m。最大流速发生在可门水道,流速可达 60 cm/s 以上,受到特定地形的影响,可门水道存在 3 个欧拉余流流涡,低潮时退出 2.5~4.5 km 宽的滩涂,高潮时海水充满整个海湾。

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[M]: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输运影响的数值计算[J]. 海洋科学,2002,26(10):47-50.

[7] 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 simulation of tidal current in Luoyuan Bay

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

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

Received: Jun., 30, 2005

Key words: Luoyuan Bay; tidal current; numerical simulation

Abstract: For engineering purpose in Luoyuan Bay, tide and tidal current in the is bay studied. Using split step finite element method, the varied-boundary two-dimensional numerical model of the tidal current was constructed. The tidal current at different times and the Eulerian residual current were calculated, also the co-tidal line, iso-amplitude curves and distribution of tidal current ellipses in the bay were given in this paper. In the bay, the gulf current is back-and-forth in wature, the tide and tidal current are normal M_2 type with the maximum flow speed in Kemen Channel.

(本文编辑:张培新)