

渤海湾海域潮流数值计算

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: 采用不规则三角形网格的分步杂交法, 建立渤海湾海域二维变边界潮流数值模型, 重现该海域潮汐及潮流的时空分布, 计算得到 M_2 分潮和 K_1 分潮的同潮时线与等振幅线、潮流椭圆及不同时刻潮流场分布。计算结果与实测资料对比验证吻合良好。

关键词: 渤海湾; 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)-08-0033-05

渤海湾海域大部分区域的潮汐性质属不规则半日潮, 惟有黄河口附近属不规则全日潮性质, 最大可能潮差 3~4 m; 潮流性质基本呈规则半日潮流, 惟有渤海湾口北部一小区域属不规则半日潮流性质, 最大可能潮流 100 cm/s 左右; 最大海图水深 25 m 左右, 位于渤海湾中部偏北海域。

潮流数值模型建成后, 可以对模型海域的水动力状况进行更为细致的定量分析研究, 并可在此基础上对海岸工程建成后物理自净能力的变化、泥沙运动、污染物扩散、排污口选址以及人为造成的海水温升等进行预测, 在科学地保护海洋环境的前提下, 充分利用海洋的自净能力, 开发利用海洋自然资源。

1 计算方法

作者采用不规则三角形网格的分步杂交方法^[1], 建立渤海湾海域二维变边界潮流数值模型, 计算网格见图 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:

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

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

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

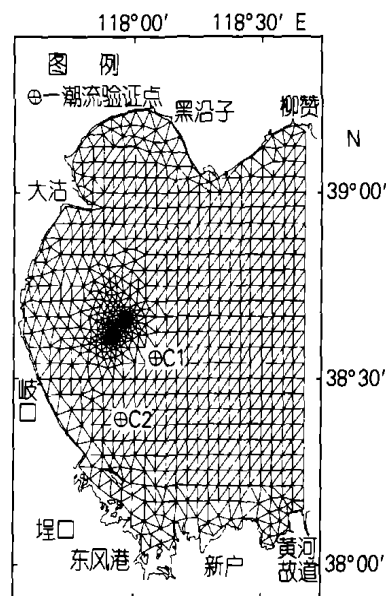


图 1 计算域与网格图

Fig. 1 Computed area and compute grids

收稿日期: 2004-01-16; 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: sunty@ouc.edu.cn

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, 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。

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。

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' 这一谐振潮的惟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 分步杂交方法

此方法是将方程(2)和(3)分为两步求解。

在前半步长, $n\Delta t < t \leq (n + \frac{1}{2})\Delta t$ 时, 用特征线方法求解方程:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial t} + u^{(1)} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} + v^{(1)} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial v^{(1)}}{\partial t} + u^{(1)} \frac{\partial v^{(1)}}{\partial x} + v^{(1)} \frac{\partial v^{(1)}}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

在后半步长, $(n + \frac{1}{2})\Delta t < t \leq (n + 1)\Delta t$ 时, 用集中质量有限元方法求解方程:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial u^{(2)}}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f v^{(2)} - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} u^{(2)} + \frac{\tau_x}{\rho H} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial v^{(2)}}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - f u^{(2)} - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} v^{(2)} + \frac{\tau_y}{\rho H} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 v^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^{(2)}}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

1.3 连续方程

对连续方程(1), 则在一个整时间步长中采用与 (u, v) 时间交错的有限体积守恒格式。

1.4 计算域、网格设置及水界强迫函数^[2]

计算海域位于 118°40'E 以西的渤海湾海域(图1), 计算域内共有 822 个结点, 1 533 个单元, 最小网格步长 200 m。计算时间步长 $\Delta t = 11.644$ s, 一个潮周期内运行 7 680 步。由于本文开头提到的该计算海域的潮汐、潮流性质, 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。

$$\zeta(t) = [(H_{K_1} + H_{O_1})/2] \cos[(\sigma_{O_1} + \sigma_{K_1})t/2 - (g_{O_1} + g_{K_1})/2] + H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2}t - g_{M_2})$$

式中: t 为时间; H_{M_2} , H_{K_1} 和 H_{O_1} 分别为 M_2 , K_1 和 O_1 分潮潮汐调和常数振幅; g_{M_2} , g_{K_1} 和 g_{O_1} 分别为 M_2 , K_1 和 O_1 分潮潮汐调和常数位相; σ_{M_2} , σ_{K_1} 和 σ_{O_1} 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, 对 m_1 分潮和 M_2 分潮均能得到正确的潮致余流。水边界 m_1 分潮和 M_2 分潮调和常数是整个渤海潮流数值计算获得。

2 计算结果

2.1 潮流验证

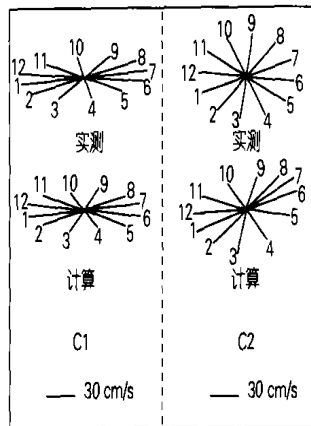
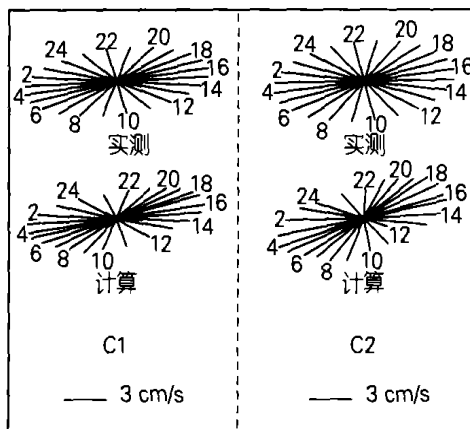
潮流验证共有两个^[3], 实测位置见图 1 中的 C1 (38°32'36", 118°05'08") 和 C2 (38°25'00", 117°57'12") 点, C1 点观测时间为 1989 年 7 月 5 日, C2 点观测时间为 2001 年 4 月 28 日。

首先建立 M_2 分潮和 K_1 分潮的数值模型, 分别进行调试计算和验证。图 2 为 M_2 分潮潮流验证玫瑰图, 图 3 为 K_1 分潮潮流验证玫瑰图。从图中可看出无论是 M_2 分潮还是 K_1 分潮均为逆时针向旋转, 实测与计算潮流玫瑰图的主轴方向一致, 最大流量值、位相等吻合良好。

2.2 同潮时线和等振幅线

图 4 和图 5 分别为计算 M_2 分潮和 K_1 分潮同潮时线和等振幅线, 实线为同潮时线, 虚线为等振幅线。

就 M_2 分潮而言, 潮波由北向南传播, 属于黄河口

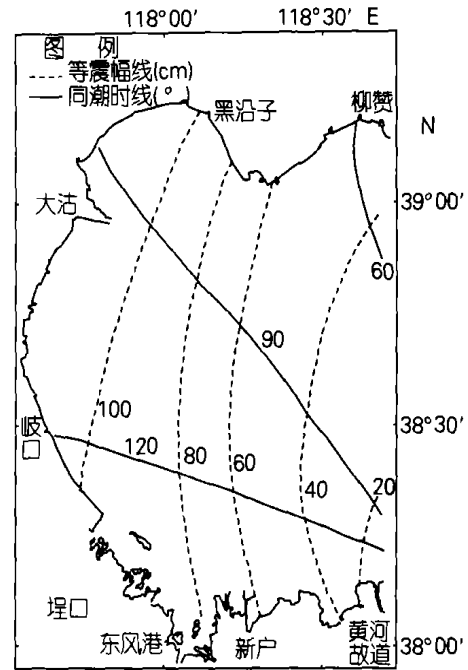
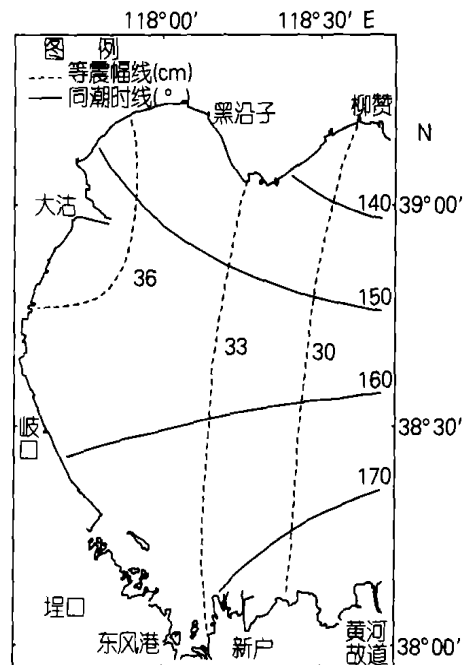
图 2 M_2 分潮潮流验证玫瑰图Fig. 2 Observed and computed roses of tidal current for M_2 constituent图 3 K_1 分潮潮流验证玫瑰图Fig. 3 Observed and computed roses of tidal current for K_1 constituent

附近的反时针半日潮潮波系统, 同潮时线由 60° 左右增加到 120° 以上。等振幅线的特征为由东向西逐渐增大, 振幅由湾口的 20 cm 左右增加到湾底的 100 cm 以上, 两者相差 80 cm 左右, 在大沽附近可增加到近 120 cm 。

对 K_1 分潮来说, 潮波也是由北向南传播的, 但它属于渤海海峡中部砣矶岛附近的反时针日潮潮波系统, 同潮时线由 140° 左右增加到 170° 以上。振幅由湾口的 30 cm 左右增加到湾底的 36 cm 左右。

2.3 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 M_2 分潮同潮时线和等振幅线Fig. 4 Cotidal chart and iso-amplitude curves for M_2 constituent图 5 K_1 分潮同潮时线和等振幅线Fig. 5 Cotidal chart and iso-amplitude curves for K_1 constituent

M_2 分潮潮流椭圆分布见图 6, 整个渤海湾内均为往复流, 岸边附近流速较小, 离岸较远区域流速较大, 但总的来说流速大小较均匀, 最大流速发生在黄河故道以北海域。

图 7 为 K_1 分潮潮流椭圆分布, 其特点也为往复流, 岸边附近流速较小, 但在黄河故道以北海域的流速明显大于其他区域, 其量值是其他区域的 2~5 倍。

2.4 计算潮流场

由于该计算海域的潮汐、潮流性质, 所给计算潮流场的水界强迫函数按 1.4 节中所示函数输入,

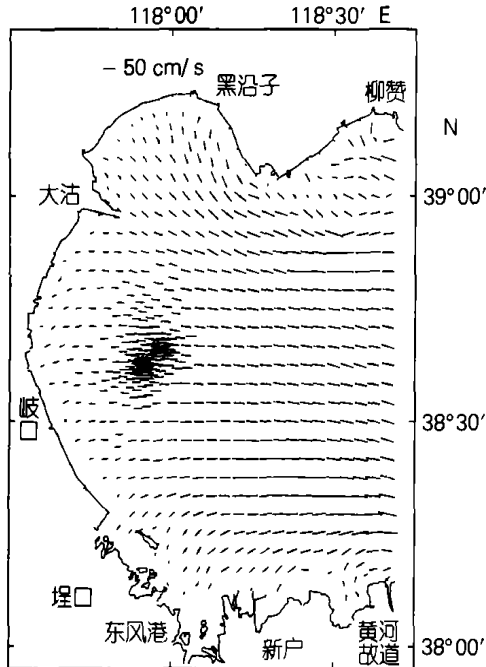


图 6 M_2 分潮潮流椭圆分布

Fig. 6 Distribution of tidal current ellipses for M_2 constituent

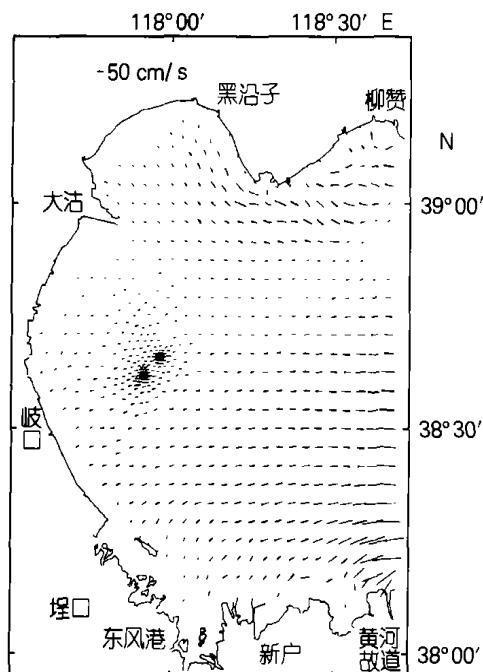


图 7 K_1 分潮潮流椭圆分布

Fig. 7 Distribution of tidal current ellipses for K_1 constituent

即 $m_1 + M_2$ 。选东风港为参考港, 给出涨潮中间时(图 8)和落潮中间时(图 9)两个时刻的计算潮流场分布图。

涨潮中间时海水由渤海中部海域流入计算域, 计算域中部潮流流速大于岸边附近的流速。而落潮中间时海水由渤海湾内向东流出计算域, 进入渤海中部海域, 其趋势与涨潮流对应时刻相同, 但方向相反。最大涨潮流速为 92.3 cm/s, 最大落潮流速为 94.3 cm/s, 均发生在黄河故道以北海域。篇幅所限, 给出的图 8 和图 9 为最大流时刻的潮流场, 而未给出高低潮时刻的流场, 故水陆边界变动的有效性没能得到充分体现。

3 结语

渤海湾海域的半日分潮属于黄河口附近反时针潮波系统, 而日分潮属于渤海海峡中部砣矶岛附

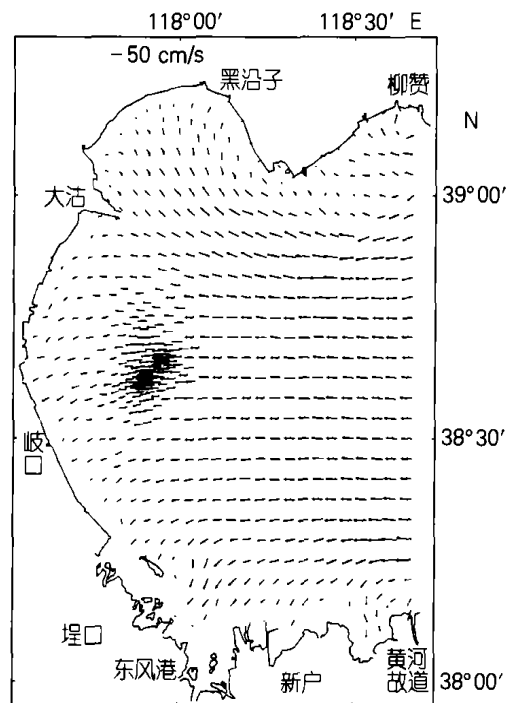


图 8 计算潮流场(涨潮中间时)

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

近的反时针潮波系统, 半日分潮振幅可达近 120 cm, 日分潮振幅仅 36 cm 左右, 半日分潮在此海域起主导作用。

从潮流椭圆分布来看, M_2 分潮流速大小较均匀, 而 K_1 分潮流速变化较大, 但二者的往复流性质均较明显, 最大流速均发生在黄河故道以北海域。

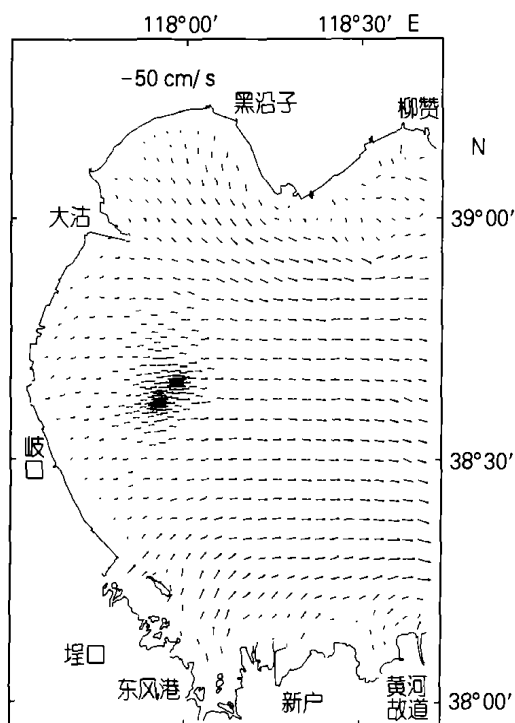


图9 计算潮流场(落潮中间时)

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

计算所得 ($m_1 + M_2$) 涨潮中间时和落潮中间时流场, 涨潮流大小与落潮流大小基本相同, 只是流向相反, 最大涨潮流速 92.3 cm/s , 最大落潮流速 94.3 cm/s 。

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.
- [3] 王学昌, 姜安刚, 孟伟, 等. 大鵬湾潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2001, 25(12): 37 - 40.

Numerical computation of tidal current in Bohai Bay

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

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

Received: Jan. , 16, 2004

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

Abstract: Using the split steps finite element method, the varied - boundary two - dimensional numerical model of the tidal current in the Bohai Bay is constructed. The tidal wave and tidal current distributing pattern of the Bay is analyzed. Cotidal chart and iso - amplitude curves for M_2 constituent, Cotidal chart and iso - amplitude curves for K_1 constituent, distribution of tidal current ellipses as well as computed tidal current field has been received by calculation. The result of calculation is conformable to the field observations.

(本文编辑: 刘珊珊)