



FVCOM 模型在渤海湾潮流潮汐模拟中的应用

陈波昌, 魏 皓

(天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘 要: 浅海是潮运动占优的海域, 潮汐、潮流对物质输运和水交换有重要影响. 采用非结构有限体积近岸海洋模型 (FVCOM) 模拟渤海湾的三维潮汐潮流分布和变化规律, 非结构网格能真实地拟合岸线, 刻画出渤海湾的复杂岸线, 能够较好地计算出渤海湾的潮汐潮流的时空分布特点, 与实测值吻合较好. 模拟的 M_2 分潮振幅的平均方差为 7.33 cm, 迟角的平均方差为 11.53° . 在渤海湾, M_2 分潮的最大振幅为 120 cm, 湾内的迟角差为 70° ; 渤海湾湾中潮余流较弱, 流速在 0~0.6 cm/s. 渤海湾是潮流较强的区域, 海区的最大可能潮流流速超过 100 cm/s.

关键词: FVCOM; 潮汐; 潮流; 渤海湾

中图分类号: P76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2013)04-0040-04

Simulation of the Tide and Current in the Bohai Bay with FVCOM

CHEN Bochang, WEI Hao

(College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The shallow sea is dominated by the tidal movement, so the tides and tidal currents are important for the material transport and water exchange. The unstructured grid 3 D FVCOM (finite volume coastal ocean model) has been applied to Bohai Bay to simulate the distribution and variation of the tides. By accurately resolving the irregular coastlines and bathymetry in the coastal regions, the simulated tidal parameters agreed well with the available observation data, and can capture the tidal structure in Bohai Bay. The maximum amplitude of M_2 is about 120 cm, and the spacing of the phase is about 70° . The residual current is small in the middle of the bay, 0~0.60 cm/s. Bohai Bay is regional sea with strong tidal movements and the maximum possible tidal current velocity exceeds 100 cm/s.

Key words: FVCOM; tide; tidal current; Bohai Bay

渤海是半封闭内海, 周边地区经济发达, 人类活动频繁, 污染较为严重. 渤海湾有北方第一大港天津港, 研究渤海湾的潮汐、潮流的变化对航运、环境、水交换等问题的研究有重要的参考价值. 臧士文^[1]通过非结构有限体积近岸海洋模型 (FVCOM) 对大连湾的潮流进行了模拟; 陆永军等^[2]建立了二维泥沙数值模型, 研究了渤海湾曹妃甸开发对水动力泥沙的影响; 于晓杰等^[3]通过 FVCOM 模型对渤、黄海 M_2 分潮潮汐潮流进行了数值模拟, 基本上反映出该海域的潮流特征. 王泽良等^[4]采用分辨率为 2 000 m 的动边界二维模型模拟渤海湾潮流运动状况, 能够刻画出渤海湾的潮流结构. 王悦^[5]运用嵌套的 POM 模型模拟了渤

海湾的潮流在新旧地形下的变化, 分析了在不同地形下潮余流的变化. 在以往的研究中, 渤海湾地区的分辨率较低, 对于分辨围填海工程造成的岸线变化精确度略显不足.

FVCOM 三维潮流模型^[6-7]应用于渤海湾的三维潮流模拟, 用以分析渤海湾潮汐的变化和潮流的运动状况. FVCOM 是由美国麻州大学海洋科技学院的陈长胜博士的研究团队建立的一套非结构网格海洋模型, 其采用的有限体积法 (finite volume method) 结合了有限元法易拟合边界、局部加密的优点和有限差分法易于离散计算海洋原始方程组的优点, 由于采用了三角网格, 在岸线复杂曲折的海域应用更能体现其优

收稿日期: 2012-11-11; 修回日期: 2013-01-06

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划资助项目 (2010BAC68B00)

作者简介: 陈波昌 (1986—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生; 通信作者: 魏 皓, 教授, weihao@ouc.edu.cn.

势. 本文采用较高分辨率网格剖分, 最细网格可达 300 m, 可以精确描述出环渤海湾人类工程造成的岸线变化.

1 计算区域和模型设置

模型的计算区域覆盖整个渤海, 以减小开边界对渤海湾潮汐和潮流的影响, 计算范围设定为 37.13°N 、 40.92°N 、 117.57°E 、 122.91°E . 开边界设置在图 1 中 AB 连线的地方. 模型采用三角网格, 并对渤海湾地区的网格进行了局部加密, 分辨率最小约为 300 m, 逐渐向外海增大, 到开边界网格分辨率约为 10 km, 整个计算海域共包含网格节点 71 069 个, 三角形网格数为 138 966 个. 模型计算的外时间步长为 2.0 s, 内时间步长为 20 s. 垂向 σ 层设为 5 层. 底摩擦系数设置为常数 0.001.

模型中水深采用的是 Choi^[8](Laboratory for Coastal and Ocean Dynamics Studies Sungkyunkwan Univ.) 提供的 $1' \times 1'$ 的东中国海的水深数据插值到网格点上. 渤海湾地区的岸线数据是通过卫星反演获得 2010 年的高分辨率岸线, 分辨率为 0.001° (课题组成员提供^[9]). 开边界给定了潮位的边界条件, 采用 OTPS (OSU Tidal Prediction Software) 预报的实时水位进行驱动, 包括了 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 和 Q_1 8 个主要分潮. 模式初始计算从 2010 年 5 月 1 日 0 时开始, 计算了 17 d.

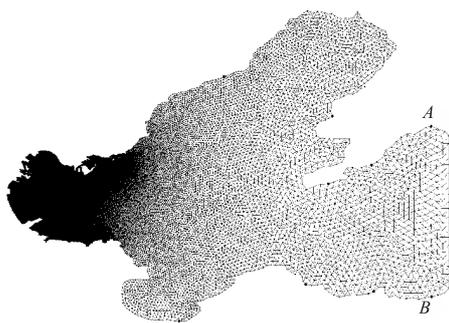
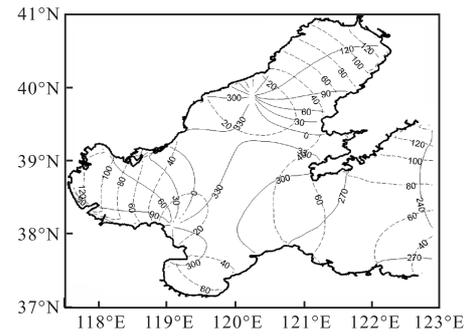


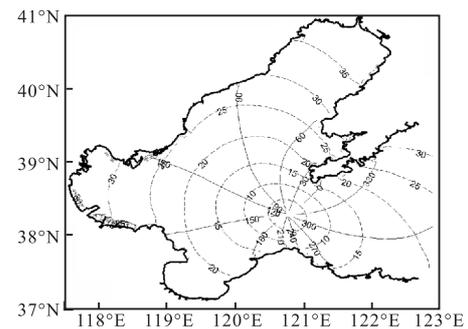
图 1 模式计算域和网格图示意图
Fig. 1 Model domain and mesh grid

2 结果与讨论

本文在模式达到稳定后, 对最后 15 d 的结果进行调和与分析^[10]. 图 2 给出了模拟的 M_2 和 K_1 的分潮的等振幅线和等迟角线的分布.



(a) M_2



(b) K_1

图 2 模拟的 M_2 和 K_1 分潮的等振幅 (cm) 和等迟角图
Fig. 2 Distribution of co-amplitude (cm) and co-phase lag lines of M_2 and K_1 constituent

秦皇岛和黄河口附近分别存在两个 M_2 分潮无潮点, 潮波围绕这两个无潮点逆时针进入辽东湾和渤海湾, 莱州湾海域潮汐相位差别很小, 渤海海峡和渤海中部潮波系统则表现为行进波. 渤海湾和辽东湾湾顶潮汐振幅为 120 cm, 莱州湾湾顶的潮汐振幅较小, 仅为 60 cm. Fang^[11]通过大量实测数据和数值试验绘制的渤、黄、东海的同潮图. 同 Fang 的模拟结果相比, 模拟的 M_2 分潮的同潮图如图 2 所示, 就计算所得到的两个无潮点而言, 在秦皇岛外海的无潮点与 Fang 的结果经纬度最大偏差在 $10.8'$. 在黄河口附近的无潮点与 Fang 的结果经纬度最大偏差 $6.0'$, 这可能是由于黄海口附近岸线的变化导致的. 在渤海湾的振幅最大为 120 cm, Fang 的结果振幅最大为 100 cm. 其他地方均与 Fang 等的结果较一致. 从海洋图集给出的 M_2 分潮结果看, 在渤海湾湾顶的振幅可以达到 110 cm.

模拟的 K_1 分潮的无潮点位于渤海海峡附近, 在渤海湾湾顶的最大振幅为 30 cm 左右, 辽东湾的最大振幅为 35 cm 左右, 莱州湾的最大振幅为 25 cm 左右. 同 Fang 的 K_1 分潮结果相比, 在莱州湾模拟的结果比 Fang 的偏小, 其他地方较一致. 与海洋图集相对比, 其在渤海湾湾顶的最大振幅为 35 cm 左右, 辽

东湾最大振幅为 35 cm 左右, 莱州湾最大振幅为 25 cm 左右. 对比的结果是, 模拟的结果与 Fang 的结果较接近, 从海洋图集给出的结果看, 振幅在渤海湾顶处相差 5 cm 左右.

表 1 给出了计算的 M_2 调和常数 and 由验潮站^[12] 观测给出的 M_2 调和常数的比较.

表 1 M_2 分潮调和常数观测站和模拟值的比较

Tab. 1 Comparison between the simulated and observed harmonic constants of M_2 constituent

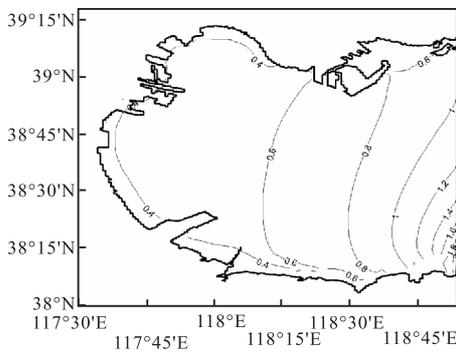
| 验潮站 | 振幅/cm | | | 迟角/(°) | | |
|-------------------|-------|-------|------------------|--------|-------|------|
| | 观测 | 模拟 | 绝对误差 | 观测 | 模拟 | 绝对误差 |
| 塘沽 | 117.0 | 114.0 | 3.0 | 90.9 | 84.2 | 6.7 |
| 曹妃甸 | 73.0 | 74.3 | 1.3 | 74.0 | 58.1 | 15.9 |
| 秦皇岛 | 11.0 | 18.8 | 7.8 | 311.0 | 298.2 | 12.8 |
| 龙口 | 40.0 | 37.8 | 2.2 | 316.0 | 325.5 | 9.5 |
| 营口 | 126.0 | 131.1 | 5.1 | 143.0 | 125.1 | 17.9 |
| 烟台 | 76.0 | 63.0 | 13.0 | 290.0 | 266.7 | 23.3 |
| 振幅差的绝对平均: 5.40 cm | | | 迟角差的绝对平均: 14.35° | | | |
| 振幅差的均方差: 7.33 cm | | | 迟角差的均方差: 11.53° | | | |

其振幅差的绝对值最大为 13 cm, 均方差为 7.33 cm; 迟角差的绝对值最大为 23.3°, 均方差为

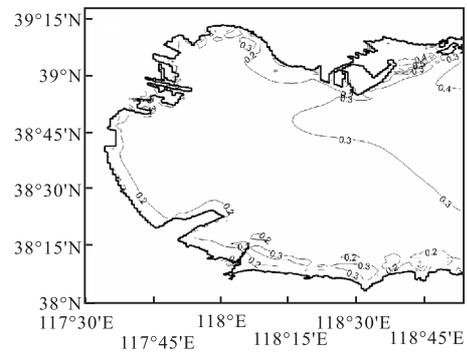
11.53°. 从总体来看, 模式能比较好地模拟出渤海湾的潮波系统.

海区的潮汐和潮流类型可以分别根据公式 $k = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2}$ (H 代表的是各个分潮的振幅) 和 $k = (W_{K1} + W_{O1})/W_{M2}$ (W 代表各个分潮的潮流椭圆半长轴长度) 计算得到. 根据计算得到的潮汐类型分布 (图 3 (a)), 渤海湾的 k 值大部分在 0.4 ~ 1.0 之间, 半日潮占优, 潮汐类型多属于不规则半日潮, 而靠近黄河口的东南角 k 值大于 2.0, 为不规则全日潮, 恰是半日分潮无潮点区域. 根据计算得到的潮流类型分布 (图 3 (b)) 可以看出, 渤海湾海域 k 值在 0.2 ~ 0.4 之间, 其属于规则半日潮流性质. 渤海湾的潮汐潮流类型并不一致.

在渤海湾海域 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 各潮波都是通过外海传入, 而且都是从湾口的北部传入, 逆时针方向旋转. 在这 4 个分潮中, M_2 分潮的振幅在湾内是最大的, 湾口与湾南部的迟角差最大为 90°, 即湾口与湾南部海区高潮时刻相差 3 h (图 2 (a)). 在渤海湾内, 从湾口 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 4 个分潮的振幅逐渐增大, 湾顶最大潮振幅分别为 120、25、30、25 cm.



(a) 潮汐类型



(b) 潮流性质

图 3 潮汐性质与潮流性质

Fig. 3 Characteristics of the tide and tidal current

通过对模拟的潮流结果进行流速调和分析, 可以得到各个分潮的椭圆长短轴分布 (见图 4). 本文选取 M_2 和 K_1 分潮代表半日分潮和全日分潮, 用以分析渤海湾地区的潮流运动规律. 根据调和分析的结果, 在渤海湾的南部近岸区域以及天津港的北部区域、曹妃甸浅滩既有往复流也有旋转流, 而在其他的大部分海域多是往复流为主. 在该海域半日分潮是优势分潮, 在渤海湾的湾口以及中部地区, M_2 分潮的椭圆长轴方向一般沿着东西方向, 而在天津港以北海域、曹妃甸浅滩, 椭圆长轴的方向主要是沿着西北—东南方

向. 该海域的潮波系统旋转方向一般为逆时针旋转. M_2 分潮流的流速在 40 ~ 60 cm/s, 最大流速在渤海湾湾口北部, 流速最高达 140 cm/s. K_1 分潮的椭圆长轴变化规律与 M_2 分潮类似, 受到岸线以及地形地势的影响, 在湾口以及湾内地形比较平坦的地方, 潮流均为往复流, 椭圆的长轴走向为东西方向; 渤海湾的南北部分的潮流大小差别较大, 在湾北部流速在 50 ~ 70 cm/s, 而在南北流速为 30 ~ 40 m/s.

图 5(a) 是根据《港口工程技术规范》规定的算法计算的渤海湾最大可能潮流分布.

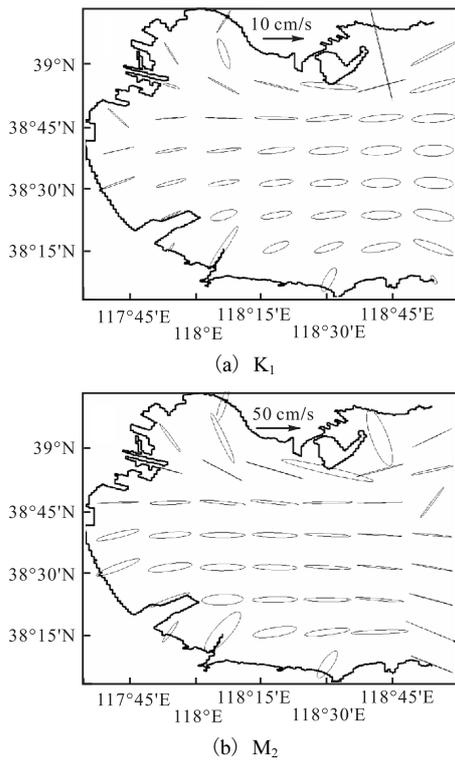


图 4 表层 M₂ 和 K₁ 分潮潮流椭圆分布

Fig. 4 Distributions of simulated M₂ and K₁ tidal current ellipses

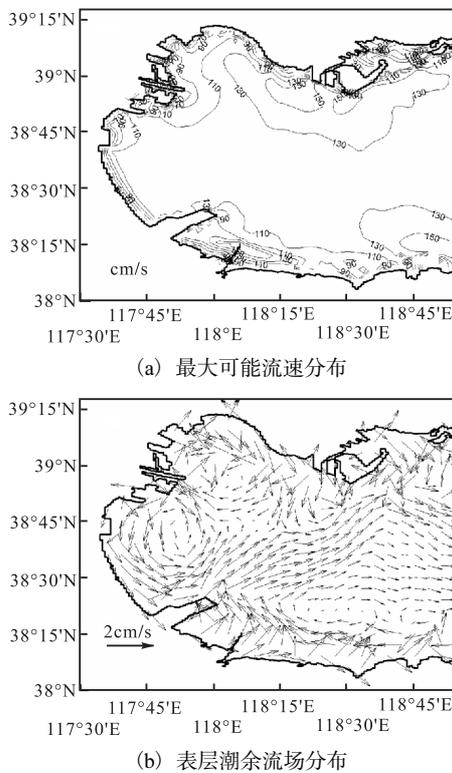


图 5 渤海湾最大可能流速分布和表层潮余流场分布

Fig. 5 Maximum possible current velocities and distributions of calculated residual currents at the surface of Bohai Bay

对于规则半日潮海区, 最大可能流速按式 (1) 计算, 而对于规则全日潮海区, 最大可能流速按式 (2) 计算.

$$V_{\max} = 1.29 W_{M_2} + 1.23 W_{S_2} + W_{K_1} + W_{O_1} \quad (1)$$

$$V_{\max} = W_{M_2} + W_{S_2} + 1.68 W_{K_1} + 1.46 W_{O_1} \quad (2)$$

式中 W 代表的是各个分潮流的椭圆长半轴矢量. 如果海区同时存在全日分潮和半日分潮, 则根据计算结果取上式中的最大值作为该海区的最大可能流速. 图 5(a) 可以看出, 渤海湾是潮流较强的区域, 大部分海区最大可能潮流流速超过 100 cm/s. 最大潮流流速受到地形的影响很大, 在一些岸线条件复杂的地区, 比如曹妃甸地区, 地形变化剧烈, 最大流速可以达到 110 cm/s 以上. 东南部黄河口半日潮无潮点附近, 最大可能潮流流速超过 150 cm, 是强潮流区. 而在湾内比较开阔的海域, 流速的变化很平缓.

对模型输出 28 个潮周期的表层潮流结果进行平均, 得到该海域的表层的欧拉潮余流场分布 (图 5 (b)), 在绘图中为了分辨出余流流向, 余流流速大于 1 cm/s 的海区都设为 1 cm/s. 从图 5(b) 中可以得出, 湾中心以及湾口潮余流很小, 流速在 0 ~ 0.6 cm/s, 而在曹妃甸地区、天津港、黄骅港以东等岸线变化剧烈的海区的潮余流较强, 最大在 11 cm/s. 黄骅港以东海域以及曹妃甸浅滩的余流场, 既存在顺时针余流涡也有逆时针余流涡.

3 结 论

通过 FVCOM 模型模拟了渤海湾的潮汐和潮流, 能较好地模拟出渤海湾的潮波系统的分布, M₂ 分潮在渤海湾的最大振幅为 120 cm, 湾内迟角差最大为 70°, 湾北部和南部高潮时刻相差 2 h 以上; 在渤海湾, M₂、S₂、K₁ 和 O₁ 4 个分潮的最大潮振幅分别为 120、25、30、25 cm. 模拟的 M₂ 分潮振幅的平均方差为 7.33 cm, 迟角平均方差为 11.53°.

渤海湾的潮汐类型是不规则半日潮类型, 潮流性质为规则半日潮流性质, 两者类型并不一致. 潮流的变化受到地形和岸线的影响较大, 如曹妃甸地区, 流速变化范围在 30 ~ 150 cm/s. 潮流的运动方向也同样受到了地形、岸线的影响, 渤海湾的湾中余流较弱, 流速在 0 ~ 0.6 cm/s. 渤海湾是潮流较强的区域, 大部分海区最大可能潮流流速超过 100 cm/s.

(下转第 69 页)