研究论文 · IID ARTICLE

## FVCOM 在龙口海域潮汐潮流模拟中的应用研究

冯兴如<sup>1,2,3</sup>,杨德周<sup>1,3</sup>,尹宝树<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:利用不规则三角网格和有限体积方法的 FVCOM(finite-volume coastal ocean model)模式,建立了 高分辨率的龙口海域三维潮汐潮流数值模型,模式结果与实测结果吻合良好。根据计算水位和流速得到 了精细的龙口海域 M2, S2, K1, O1 分潮的同潮图、潮汐潮流类型分布图和潮流椭圆分布图等。结果显 示,龙口海域潮汐类型主要为不规则半日潮;屺姆岛以北海域多为往复流而龙口湾内同时存在旋转方 向不同的旋转流;最大可能流速分布与岸线和等深线几乎平行,最大值出现在桑岛南侧的狭窄水道; 该海域的潮汐余流极大值出现在屺姆岛的西侧,余流流速可达 25 cm/s。该结论对于了解龙口海域的动 力过程具有重要意义。

关键词: FVCOM(finite volume coast and ocean model); 龙口海域; 潮汐; 潮流; 余流 中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2010)06-0094-06

有结构网格在模拟具有复杂岸线的河口、湖泊 和近海时会有很大的限制、而非结构网格由于其能 很好地拟合复杂边界而越来越多地被用于近海和河 口的数值模拟<sup>[1,2]</sup>。FVCOM(Finite Volume Coast and Ocean Model)模式是由美国麻州大学海洋科技学院 陈长胜教授的博士研究组建立的一套三角形网格、 有限体积、三维(3D)、预报原始方程组的近岸海洋模 式。该模式结合了有限元法易拟合边界、局部加密 和有限差分法动力学基础明确、计算高效、差分直 观的优点<sup>[3]</sup>。此外, FVCOM 还采用了干/湿网格技术, 使其能更好地模拟滩涂面积较大的海域。FVCOM 和 ECOM-si 的模拟结果<sup>[4]</sup>对比表明, 在岸线复杂的区 域 FVCOM 具有明显的优势。美国麻州大学的 Xue 等<sup>[5]</sup>利用 FVCOM 成功地模拟了长江口的盐水入侵, 国内的宋德海等<sup>[6]</sup>也用该模式精细地刻画了钦州湾 的潮汐潮流现象。

山东龙口市地处胶东半岛西北部,渤海南部, 莱州湾的东北侧。作者通过建立龙口海域的三维数 值模型精细刻画该海域的潮汐潮流性质,为龙口市 的海洋经济发展和海洋环境保护提供科学依据。

1 模型设置与驱动

#### 1.1 计算区域与模式设置

本文的计算区域为龙口市近岸海域, 具体为西起 120°10′E、东到 120°30′E、南起 37°30′N、北到

37°50′N,包括了龙口湾、屺姆岛以及桑岛、依岛等 岛屿。该区域的水深场如图1所示,由图1可以看出, 在屺姆岛与桑岛附近,地形变化剧烈并且岸线



图1 龙口海域水深和观测站点分布



收稿日期: 2009-10-30; 修回日期: 2010-04-06

基金项目:中国科学院创新项目(KZCX2-YW-201, KZCX1-YW-12) 作者简介: 冯兴如(1984-), 男,山东菏泽人,硕士,电话: 0532-82898932,主要从事浪流相互作用研究, E-mail: fengxingru07@qdio.ac.cn;尹宝树,通信作者, E-mail: bsyin@qdio.ac.cn

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 6 期

## 研究论文 • 1:00 ARTICLE

比较复杂,因此本文在形成计算网格时对这两个区 域进行了加密,其中屺姆岛附近分辨率可达 30 m, 桑岛附近分辨率可达 50 m。最后采用的计算网格如 图 2 所示。本计算网格一共包含了三角形网格节点 18 258 个,三角形单元 35 423 个,最小网格步长为 30 m。由于该区域水深比较浅,最大水深 19 m,因此 垂向设为 5 个 σ 层。内外模时间步长分别为 6 s 和 2 s。



图 2 模式计算网格 Fig. 2 Calculation mesh of the model

#### 1.2 模式驱动

本文主要是模拟该海域的潮汐潮流特征,因此 只在边界上考虑了潮位的驱动。边界上的潮位数据 来自 POM 模式(普林斯顿海洋模式)已经计算好的 M2, S2, K1, O1 共 4 个分潮的调和常数,并参考海洋 图集上的同潮图<sup>[7]</sup>,将其内插到计算网格的边界点 上。温盐初始场采用常值,分别为 1°C 和 28,没有 风、淡水通量等大气强迫。

#### 2 模型的验证

为了验证所建模型,作者分别在 2009 年 3 月份 在屺姆岛以北的海域进行了两次短期观测,观测内 容包括水位和流速,观测的具体位置如图 1 所示。同

表1 调和常数的计算值与实测值的比较 Tab. 1 Comparison of the simulated and observed harmonic constants of tide

时为了验证屺姆岛以南的龙口湾内的计算结果,利 用龙口验潮站的实测调和常数,与本文的模式结果 进行比较。

#### 2.1 潮位验证

潮位和调和常数比较结果分别如图 3 和表 1 所 示。图 3 表明,除了 3 月 8 日 12 时到 18 时之间由于 特殊天气原因,实测值大于计算值外,其他时间段 计算值和实测值吻合得非常好,由表 1 可见,在龙口 验潮站处,模拟的调和常数和实测的调和常数的误 差也在允许的范围内。

#### 2.2 潮流验证

模式模拟的表层观测点流速与两次观测的流速 的对比如图 3 所示。由图 3 可知,观测点处潮流主要 为东西分量,南北分量比较小,模式也很好地刻画 了这一现象。在 *u* 分量的峰值处绝对误差不超过 5 cm/s,位相也基本一致;对 *v* 分量的模拟,量级和 位相也都基本一致。

综合潮位和潮流的比较,可以认为,作者在该 海域利用 FVCOM 模拟的潮汐潮流结果是可信的。

#### 3 模式结果与分析

#### 3.1 潮汐结果与分析

根据计算结果,进行调和分析,得到了该海域的 M2,S2,K1 和 O1 的同潮图 (图 4(以 M2 和 K1 为 代表)),根据公式  $k = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2}$ , $(H_{K1}, H_{O1}, H_{M2})$ ,根据公式  $k = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2}$ , $(H_{K1}, H_{O1}, H_{M2})$ ,根据公式  $k = (H_{K1} + H_{O1})/H_{M2}$ , $(H_{K1}, H_{O1}, H_{M2})$ 分别是分潮 K1,O1 和 M2 的振幅)得到了该海区的潮汐性质判别系数分布图 (图 5a),由图 4 可以看出,该海域 M2 潮波为从龙口海域东北方向传入,然后以屺姆岛为支点逆时针旋转,折向龙口湾内。而 K1 潮波则是由该海域的西北方向传入,这是由于在渤海海峡中部存在一个逆时针旋转的 K1 无潮点<sup>[7]</sup>的缘故。4 个分潮的等振幅线的分布趋势大体相同,皆表现为屺姆岛以北海域的振幅小于龙口湾内的振

分潮	振幅(cm)			迟角(°)		
	计算值	实测值	绝对误差	计算值	实测值	绝对误差
M2	42.7	39.3	3.4	344.3	359.1	14.8
S2	14.2	11.4	2.8	60.1	83.2	23.1
K1	15.8	18.3	2.5	206.1	213.3	7.2
01	16.3	16.0	0.3	147.9	150.4	2.5

Marine Sciences / Vol. 34, No. 6 / 2010



Fig. 5 Distributions of tidal characteristics (a) tidal current characteristics (b), and maximum possible current velocities (c)

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 6 期

幅。4 个分潮的振幅相比较, 总体来看是 M2 的振幅最大, K1 次之, O1 第三, S2 的最小。同时由图 5a 可以看出, 龙口海域的潮汐性质判别数基本都处在 0.5 到 0.75 之间, 因此该海域表现为不规则半日潮的性质。

#### 3.2 潮流性质

根据表层各分潮的潮流的调和常数, 计算出各分 潮的椭圆要素, 并根据公式  $k = (W_{K1} + W_{O1}) / W_{M2}$ ( $W_{O1}$ ,  $W_{K1}$ ,  $W_{M2}$ 分别代表 O1, K1, M2 分潮的潮流椭 圆半长轴长度)得到了该海域的潮流性质判别系数分 布(图 5b)。由图 5b 可以看出, 屺姆岛以北海域的潮 流性质判别系数基本上都在 0.7 附近, 表现为不规则 半日潮流性质; 屺姆岛以南的龙口湾内的潮流性质 比较复杂, 在屺姆岛以南,37°36'N 线以北存在一个 系数为 0.3 ~ 0.5 的区域, 其表现为规则半日潮流的 性质, 在龙口湾口的南侧, 存在一个系数为 2 ~ 2.5 的区域, 其表现为不规则全日潮流的性质, 龙口湾 其他区域的潮流性质系数则处在 0.5 ~ 2 之间, 表现 为不规则半日潮流性质。

#### 3.3 最大可能流速

根据《港口工程技术规范》的规定,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:

$$V_{\rm max} = 1.29W_{\rm M2} + 1.23W_{\rm S2} + W_{\rm K1} + W_{\rm O1} \qquad (1)$$

$$V_{\rm max} = W_{\rm M2} + W_{\rm S2} + 1.68W_{\rm K1} + 1.46W_{\rm O1} \qquad (2)$$

式中 $W_{M2}$ , $W_{S2}$ , $W_{K1}$ , $W_{O1}$ 分别为 M2, S2, K1, O1 这 4 个主要分潮流的椭圆长半轴矢量,若同时存在 半日潮流和全日潮流,则最大可能流速按照上述两 式中的最大值计算。本文根据上述方法,计算了龙口 海域的最大可能流速分布(图 5c)。由图 5 可以看出, 最大可能流速主要受地形的约束,在屺姆岛的西北 侧,地形变化比较剧烈,流速最大值可达 100 cm/s 以上;此外由于 37°44'N 线以北,海域开阔,潮流受 地形阻扰比较小,流速最大值也都在 100 cm/s 左右; 在桑岛的南侧,由于水道狭窄,最大可能流速可以 达到 150 cm/s 以上;龙口湾内最大可能流速比较小, 在 10~20 cm/s。

#### 3.4 潮流运动形式及椭圆要素

本文以 M2 和 K1 分潮分别代表半日潮流和全日 潮流,绘制了这两个分潮的潮流椭圆图(图 6),以此 来分析龙口海域的潮流运动规律(由于篇幅限制,没 有给出旋转率的分布图)。

M2 分潮流椭圆长轴的分布与地形密切相关, 基 本上与等深线和岸线走向一致。在屺姆岛以北的海 域 M2 分潮流比较大, 基本上处于 0.3~0.5 m/s 之间, 最大值出现在屺姆岛的西北侧和桑岛以南的狭窄水 道。龙口湾内由于屺姆岛的阻挡, M2 分潮流比较小, 湾内大部分小于 0.1 m/s。在屺姆岛以北海域, 除了 桑岛东北侧呈现顺时针的旋转流外, 其他区域基本 为往复流, 方向为西南-东北向, 旋转率在 - 0.2~0 之间。在屺姆岛以南的龙口湾, M2 分潮流性质比较 复杂, 在屺姆岛周围海域, M2 椭圆长轴基本与岸线 平行, 表现为很强的往复流, 旋转率在 0~0.1 之间, 在龙口湾口的南部, M2 分潮流表现为顺时针的旋转 流, 旋转率在 - 0.6~ - 0.4 之间, 而在龙口湾的东部



图 6 表层分潮流椭圆分布图 Fig. 6 Distributions of calculated tidal current ellipses

Marine Sciences / Vol. 34, No. 6 / 2010

近岸处, M2 分潮流则表现为逆时针的旋转流, 旋转 率在 0.4~0.6 之间。

K1 分潮流椭圆长轴的分布规律与 M2 分潮流的 基本一致,基本上与岸线和等深线平行。和 M2 分潮 流的不同之处在于其流速比较小,在屺姆岛以北海 域一般在 0.1 ~ 0.2 m/s 之间,而且桑岛的东北侧不存 在旋转流,完全为往复流。K1 分潮流在龙口湾内比 较小,大都小于 0.05 m/s,在 37°36'N 线以北, 屺姆 岛以南表现为逆时针的旋转流,旋转率在 0.4~0.8 之间,而在 37°36'N 线以南则表现为顺时针的旋转流, 旋转率在 - 0.6~ - 0.4 之间。

#### 3.5 涨落潮流场

从模式计算结果中分别挑选出该区域涨急与落 急时的流场(图 7),来分析其涨落流场的特征。由图 7 可以看出,在涨急时,屺姆岛以北海域的流场大体 呈西或西南向,由于桑岛的阻挡,桑岛的西南侧流 速比较小,海水绕过屺姆岛进入龙口湾时,在屺姆 岛的西侧形成一个逆时针的涡旋。龙口湾内流速较 弱,流向以界河入海口为界,北侧大体为南或东南 向,南侧则为东北向。



图 7 表层涨急和落急时的流场 Fig. 7 Distributions of calculated flood tide current and ebb tide current

落急时, 屺姆岛以北海域的流场大体呈东或东 北向, 由于桑岛的阻挡, 桑岛的东北侧流速比较小, 海水绕过屺姆岛时, 在屺姆岛的北侧形成一个顺时 针的涡旋。龙口湾内流速较弱, 流向以界河入海口为 界, 北侧大体为北或西北向, 南侧则为西南向。

#### 3.6 潮汐余流

潮余流通常是由于潮流的非线性项受到侧向岸 线和底摩擦的作用,一部分周期性能量转变成了非 周期性能量。本文对模式输出的两个月的表层潮流 数据进行平均,剔除周期性的信号,得到该海域的 表层潮汐余流场(图 8),由图 8 可知,潮汐余流在地 形变化剧烈,潮流强的区域比较明显。一个极大值位 于屺姆岛的西侧,最大值可达 25 cm/s,方向为东南向, 其他区域余流较小,一般在 5~10 cm/s 之间。余流的 具体方向为,在屺姆岛以北海域,余流大部分为向南 流向近岸,最后大约在观测位置处分叉,东侧部分向 东流,西侧部分向西流。龙口湾内,以界河入海口为界, 北侧余流向为南或西南,南侧流向为北或东北,最后 两部分在界河入海口处相汇,向西流出龙口湾。此外, 余流还在桑岛的周围形成了几个环状结构,其西南侧 为顺时针方向,东南侧为逆时针方向。





海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 6 期



### 4 结论

FVCOM 的模拟和实测结果的对比表明, 该模 式可以很好地刻画近岸的潮汐潮流现象。对于地形 陡峭, 岸线复杂的区域, 该模式更能体现出它的优 势所在。

FVCOM 对龙口海域的模拟结果表明, 该海域潮 汐类型为不规则半日潮, M2 等半日潮波为从龙口东北 方向传入, 而 K1 等日潮波则是由该海域的西北方向传 入; 屺姆岛以北海域表现为不规则半日潮流性质, 而 屺姆岛以南的龙口湾内的潮流性质比较复杂, 同时存 在规则半日潮流、不规则半日潮流以及不规则全日潮 流; 龙口海域的最大可能流速主要受地形的约束, 极 大值分别出现在屺姆岛的西北侧(达 100 cm/s)、桑岛的 南侧(达 150 cm/s 以上), 龙口湾内最大可能流速比较小 (10~20 cm/s); 屺姆岛以北海域的潮流主要为往复流 而龙口湾内同时存在往复流和旋转方向相反的旋转 流。潮汐余流在地形变化剧烈, 潮流强的区域比较明 显。极大值出现在屺姆岛的西侧(25 cm/s), 其他区域余 流较小, 一般在 5~10 cm/s 之间。 参考文献:

- [1] 王志力, 陆永军, 耿艳芬. 基于非结构网格有限体积 法的二维高精度物质输运模拟[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 531-536.
- [2] 潘存鸿. 三角形网格下求解二维浅水方程的和谐 Godunov 格式[J]. 水科学进展, 2007, **18**(2): 204-209.
- [3] Chen Changsheng, Robert C, Beardsley R C. An unstructured grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM user manual[EB/OL]. http://fvcom.smast. umassd.edu/FVCOM/index.html, 2009-02-18.
- [4] Chen Changsheng, LIU Hedong, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume. Three-dimensional, primitive equations ocean model:Application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Ocean Technology. 2003, 20(1): 159-186.
- [5] Xue Pengfei, Chen Changsheng, Ding Pingxing, et al. Saltwater intrusion into the Changjiang River: A model-guided mechanism study[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: C02006, doi:10.1029/ 2008JC004831.
- [6] 宋德海, 鲍献文, 朱学明. 基于 FVCOM 的钦州湾三维 潮流数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2009, **28**(2): 7-14.
- [7] 海洋图集编委会. 渤海 黄海 东海 海洋图集(水 文)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 429-432.

# **Application of FVCOM in tidal modeling of the seas adjacent to Longkou City**

## FENG Xing-ru<sup>1,2,3</sup>, YANG De-zhou<sup>1,3</sup>, YIN Bao-shu<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

#### Received: Oct., 30, 2009

Key words: FVCOM(finite volume coast and ocean model); sea area of Longkou; tidal elevation; tidal current; residual current

**Abstract:** With the application of FVCOM(finite volume coast and ocean model), a high resolution of three-dimensional tidal model of the seas adjacent to Longkou City was built, and the model results were conformable to the field observations. Based on the calculated tidal level and current, the distributions of co-tidal lines, distributions of tidal characteristic, and distributions of the tidal current ellipses of M2, S2, K1 and O1 were obtained. The results showed that, the main tidal characteristics in the study area were mixed semidiurnal tide; On the north of the Qimu Peninsula the rectilinear current dominated, while in the Longkou Bay the rotary current dominated with both clockwise and anticlockwise directions; the distribution of the maximum possible current velocities was basically the same as that of isobaths, and the maximum possible current velocity there could reach 25 cm/s. These results are very useful for the understanding of the mechanical processes in the seas adjacent to Longkou City.

(本文编辑: 刘珊珊)