

文章编号: 1674-5566(2020)06-0921-07

DOI:10.12024/jsou.20190702730

基于 FVCOM 渤海浅水分潮的特征分析

张志康, 刘 浩

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘 要: 基于非结构有限体积法海洋模型 FVCOM (finite volume coast and ocean model), 对渤海潮波系统进行数值模拟。利用渤海沿岸共 19 个潮位站的资料对模拟结果进行验证, 计算结果均与实测结果吻合良好。基于此进一步研究渤海 3 个主要浅水分潮 M_4 、 MS_4 和 M_6 的主要特征, 并与前人的研究结果进行对比。结果表明: M_4 和 MS_4 分潮传播特征相似, 都存在 5 个无潮点, 其中 1 个为顺时针旋转, 而其余 4 个为逆时针旋转; 对于 M_6 分潮, 存在 9 个无潮点, 2 个为顺时针, 其余 7 个为逆时针。 M_4 分潮振幅在近岸处可达 25 cm, 约为 M_2 分潮振幅的 10%, MS_4 振幅次之, M_6 振幅最小, 仅为 M_4 分潮振幅的 18% 左右。3 者振幅均为从外海向近岸迅速增大, 表明浅水分潮振幅分布特征与海底地形关系密切。

关键词: FVCOM 模型; 渤海; 浅水分潮; 无潮点

中图分类号: P 722.4 **文献标志码:** A

渤海是嵌入中国北部大陆的半封闭型浅海, 主要包括辽东湾、渤海湾以及莱州湾等 3 个海湾, 其总面积大约为 7.7 万 km^2 , 是我国最大的内海, 除了渤海海峡以北的深槽外, 其他海域的水深都比较浅, 平均水深约为 18 m^[1]。对于被海岸线环绕的海洋, 等潮线的点会快速地向内并汇聚在一个共同的点, 称为无潮点, 是由入射潮波与反射潮波相互抵消所形成的。由于科里奥利力效应, 这种转动通常在南半球是顺时针方向的, 而在北半球是逆时针方向的^[2]。

随着计算机技术以及数值模拟方法的不断发展, 海洋数值模式在海洋物理的研究中已取得了诸多成果。1980 年, 沈育疆^[3]首次对东中国进行了潮汐数值模拟, 并给出了东海的潮汐同潮图以及黄渤海的潮流椭圆图; 而后赵保仁等^[4]、万振文等^[5]、王凯等^[6]对渤海海域的潮汐潮流进行数值模拟研究, 并且不断对同潮图进行修正。1981 年, 孙文心等^[7]采用三维空间非线性潮波模型, 实现了渤海中 M_4 和 MS_4 两个主要浅水分潮的数值模拟; 方国洪等^[8]使用二维非线性微分方程组的有限差分方法, 对渤海全日分潮、半日分

潮以及浅水分潮进行了模拟计算, 得出浅水分潮近似关系; KANGSK 等^[9]采用基于子网格尺度 (SGS) 应力建模的二维数值模型, 研究了东海 5 个主要分潮特征以及以 M_4 和 MS_4 为代表的非线性浅水潮汐现象。2004 年, HE 等^[10]采用 T/P 卫星数据, 通过数值伴随模式对黄渤海 3 个浅水分潮 M_4 、 MS_4 和 M_6 进行了研究; 康鸿轩等^[11]采用 POM 海洋模式模拟了渤海潮汐的主要特征, 对 M_4 、 MS_4 和 M_6 浅水分潮特征进行了研究。吕喆等^[12]采用 FVCOM 精细化地模拟苏北浅滩潮汐主要特征, 并且在平滑地形的基础上进一步模拟主要浅水分潮 M_4 。

采用 FVCOM 模式对渤海潮汐进行模拟, 利用非结构化三角形网格对渤海近岸线区域进行局部加密, 着重对 M_4 、 MS_4 和 M_6 浅水分潮进行分析, 旨在对渤海浅水分潮的特征有一个全面细致的了解。

1 模型的介绍和设置

1.1 模型介绍

FVCOM (finite volume coast and ocean model)

收稿日期: 2019-07-08 修回日期: 2020-01-08

基金项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室开放课题 (XDA11020305.2)

作者简介: 张志康 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋数值模型。E-mail: 316304503@qq.com

通信作者: 刘 浩, E-mail: haoliu@shou.edu.cn

是由以陈长胜教授领导的麻省大学海洋生态系统实验室 (UMASSD) 和伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI) 合作开发的自由表面、有限体积法、非结构网格、三维原始方程的海洋模式^[13]。FVCOM 模式在垂向上采用广义地形跟随坐标系对不规则底部地形进行拟合,在水平上则采用非结构化三角网格,能够较好拟合复杂的岸线,这种三角化网格的空间离散法还能够更为灵活地提高特定区域的分辨率。横向水平混合计算使用的是 Smagorinsky 湍流闭合模型,而垂向混合使用 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流闭合模型。模式计算采用内外模分裂算法,节约了计算效率。FVCOM 采用干湿网格法,能很好地模拟运动边界,在模式中能够较好地体现海湾、滩涂等浅水区域对于水动力环境的影响。

1.2 模型设置

模式计算区域为 117.5°E ~ 122.5°E 和 37°N ~ 41°N,模型采用非结构化三角形网格,近开边界区域空间分辨率为 0.05°,近岸线区域加密,空间分辨率为 0.01°,如图 1 所示。

海底地形数据采用中国海洋信息网提供的 topo 15 数据,渤海地形和验证点的分布如图 2 所示。垂向上采用 σ 坐标系,垂向上分为 5 层。计算区域的开边界只有 1 条,取在 122.5°E 经度线上。模式在开边界上使用预报的水位作为开边界的条件,通过 OTIS (OSU Tidal Inversion Software) 模式^[14]中的 China Seas 1/30°大区域潮汐数值模式获得 M_2 、 N_2 、 S_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 8 个

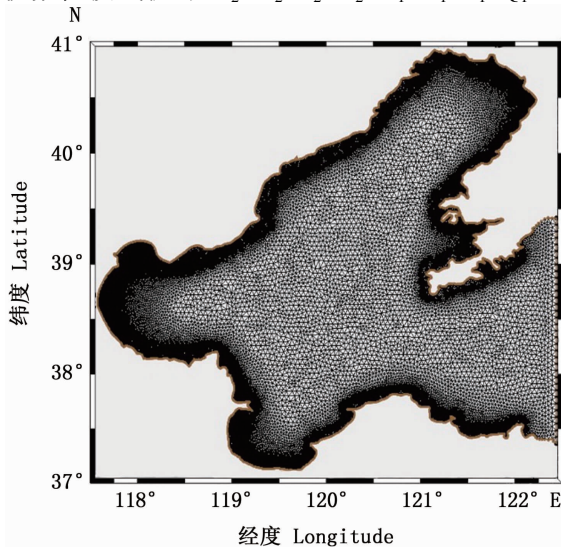


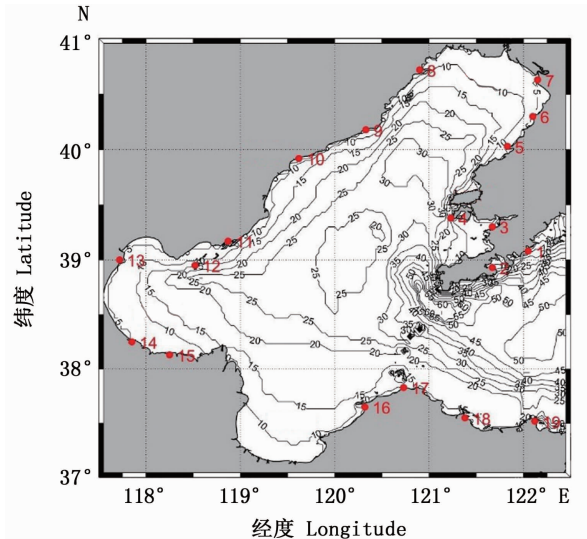
图 1 三角形网格分布

Fig. 1 Triangular grid distribution

主要分潮的调和常数,采用 MATLAB 中 T_TIDE 进行潮汐调和与分析得到的预报水位^[15]计算公式为

$$\zeta = \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\omega_i t + V_{0i} + u_i - g_i) \quad (1)$$

式中: ζ 为水位; f_i 为分潮的交点因子; H_i 为第 i 个分潮的振幅; ω_i 为角速度; t 为时间; V_{0i} 为分潮的天文初位相; u_i 是分潮的交点订正角; g_i 是迟角。



等值线代表水深, m; 红色圆点代表潮位站

The isoline and red solid circle represent the water depth (m) and the position of tidal station respectively

图 2 渤海地形及潮位站分布

Fig. 2 Distribution of topography and tidal stations in Bohai Sea

2 模型验证

由于渤海是半封闭型浅海,计算区域仅需采用 1 条开边界,而对近岸线区域加密,空间分辨率为 0.01°,能更加精确地模拟计算区域浅水分潮的特征。模型计算时间为 2016 年 1 月 1 日 0 时开始,到 2016 年 2 月 10 日 0 时结束,共 40 d。为避免冷启动带来的初始振荡,对后 30 d 的潮位计算结果进行准调和与分析,得到计算区域的 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 这 4 个主要分潮的调和常数(图 3)。朱学明等^[16]的计算结果表明在秦皇岛外部海域处以及黄河口附近, M_2 分潮无潮点位置坐标为 119.89°E、39.75°N。对比而言,图 3 给出的结果 M_2 分潮无潮点离岸较远,符合万振文等^[5]认为黄河口岸形以及海底地形的改变影响无潮点的位置的观点。 O_1 分潮无潮点的位置比 K_1 分潮偏东,与朱学明等^[16]的计算结果相似。

提取计算区域内 19 个潮位站(图 2)包含的 4 个主要分潮的调和常数,采用均方根误差来描述调和常数的吻合程度,其计算公式为

$$A = \sqrt{\sum_{i=1}^N (F_{ci} - F_{oi})^2 / N} \quad (2)$$

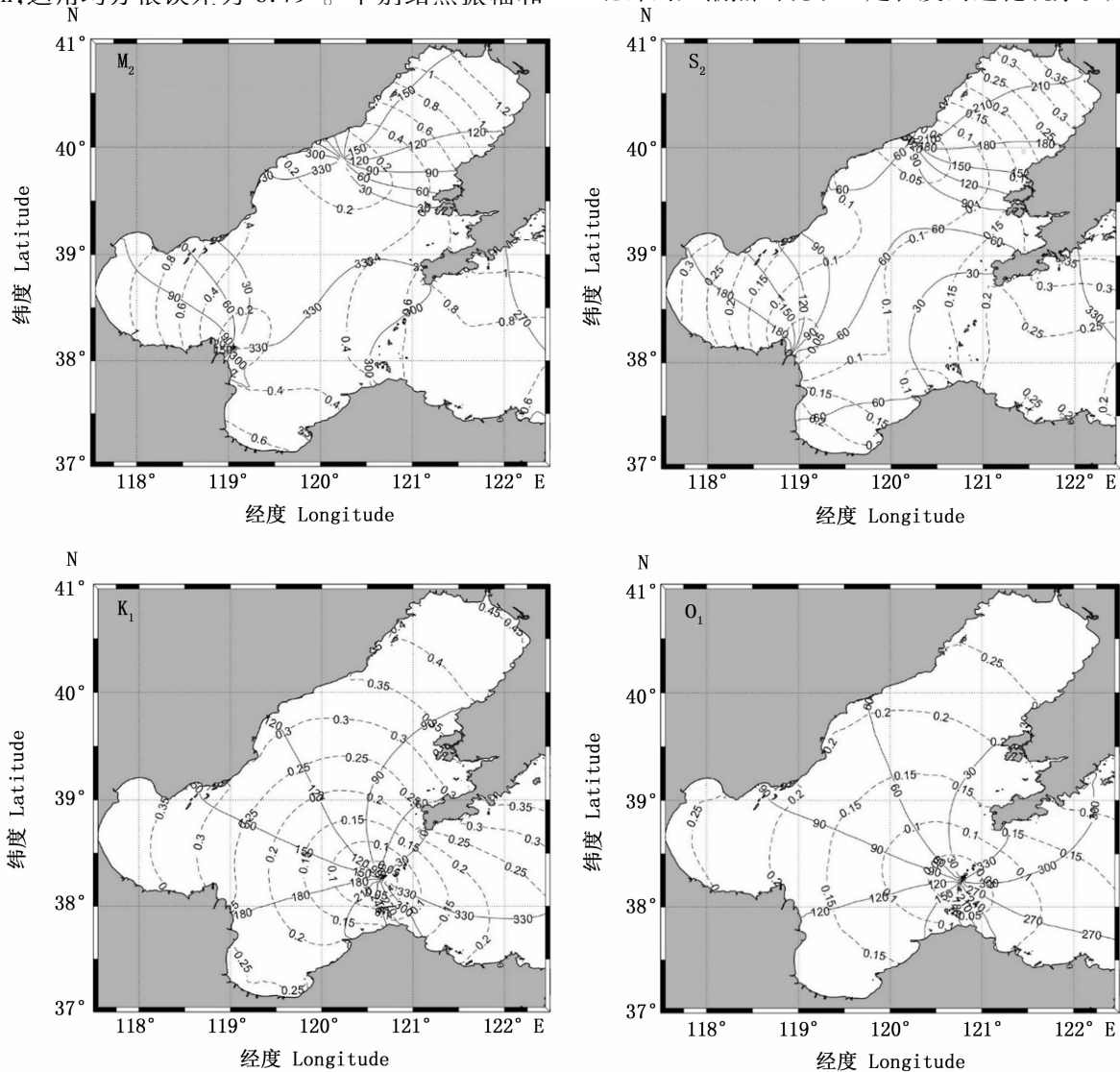
式中: F_{ci} 为调和常数计算值; F_{oi} 为调和常数观测值; N 为观测站点数。4 个主要分潮调和常数(振幅和迟角)计算结果与观测数据的比较见表 1。从结果可以看出: M_2 分潮振幅均方根误差为 4.69 cm,迟角均方根误差为 9.49°; S_2 分潮振幅均方根误差为 2.76 cm,迟角均方根误差达到 11.37°; K_1 分潮振幅均方根误差为 4.00 cm,迟角均方根误差为 10.23°; O_1 分潮振幅均方根误差为 2.34 cm,迟角均方根误差为 6.79°。个别站点振幅和

迟角的偏差较大,主要是由于渤海海区地形复杂,模型采用的地形数据和真实情况不能完全相同。从整体结果来看,本次模拟结果可靠,满足对渤海海域的研究要求,可以用来进一步探究渤海浅水分潮的特征。

3 渤海浅水分潮分布特征

3.1 M_4 分潮

浅水分潮一般以 M_4 分潮为主,图 4 是 M_4 分潮的同潮图,显示了在渤海共计有 5 个无潮点,依次位于大连长兴岛北部、辽东湾东南部、渤海中部、渤海湾以及莱州湾,其中位于大连长兴岛北部的无潮点出现了一定程度的退化现象。只有



图中虚线和实线分别代表振幅(m)和迟角(°)

Dotted lines and the solid lines in the figure represent amplitude and phase lag respectively

图 3 数值模拟的同潮图

Fig.3 Ctidal chart of numerical simulation

表 1 M_2, S_2, K_1 和 O_1 分潮调和常数模拟值和观测值的比较结果

Tab. 1 Compared results of the simulate and observed harmonic constants of M_2, S_2, K_1 and O_1 constituents

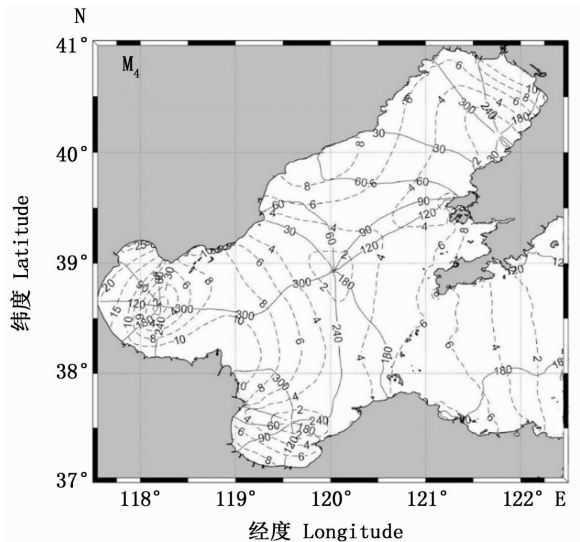
站点位置 Stations location			M_2		S_2		K_1		O_1	
编号 No.	北纬 N/(°)	东经 E/(°)	振幅差 $\Delta H/cm$	迟角差 $\Delta g/(°)$	振幅差 $\Delta H/cm$	迟角差 $\Delta g/(°)$	振幅差 $\Delta H/cm$	迟角差 $\Delta g/(°)$	振幅差 $\Delta H/cm$	迟角差 $\Delta g/(°)$
1	39.08	122.05	1.27	-6.74	0.40	-2.34	4.12	1.44	-1.13	-2.32
2	38.93	121.67	5.68	-9.76	4.35	-5.12	8.20	-0.57	1.02	-11.33
3	39.30	121.67	1.25	-16.66	-3.42	-12.13	1.73	-5.48	-1.89	-4.83
4	39.38	121.23	-0.72	-7.55	1.07	5.62	-2.77	2.89	-1.55	-6.61
5	40.03	121.83	5.60	2.25	2.82	5.22	5.16	8.50	-0.85	5.06
6	40.30	122.10	2.30	1.96	-3.34	9.04V	0.81	15.34	-2.03	-0.71
7	40.63	122.15	12.27	-4.90	4.18	4.55	7.27	4.66	-0.23	-1.20
8	40.72	120.98	2.28	4.72	-0.95	13.85	4.28	7.62	-2.24	1.54
9	40.18	120.33	-0.68	14.65	-0.56	25.10	2.16	19.66	-3.10	2.36
10	39.92	119.62	0.46	-4.69	0.34	15.88	-6.30	8.63	-2.35	-7.51
11	39.17	118.87	9.22	-26.12	1.68	-14.07	-1.45	-10.38	-0.89	-14.98
12	38.95	118.52	-4.59	-7.60	-2.32	1.40	1.88	1.74	-2.90	0.09
13	39.00	117.72	-2.02	2.54	-3.22	16.68	1.73	13.12	-1.53	6.75
14	38.25	117.85	-4.76	2.77	-3.63	15.24	-0.18	14.65	-5.43	3.26
15	38.13	118.25	2.57	-7.78	-1.77	12.29	6.81	4.38	-2.70	1.14
16	37.65	120.32	-4.77	5.06	-3.83	11.54	0.01	6.55	-3.61	1.97
17	37.83	120.73	-5.19	-3.58	-0.97	-6.27	-0.22	10.34	-2.52	8.47
18	37.55	121.38	-0.11	-6.39	2.66	2.65	2.66	14.90	1.47	13.42
19	37.52	122.12	2.42	-7.12	4.10	0.31	1.95	14.55	0.71	6.68
均方根误差 RMSE			4.69	9.49	2.76	11.37	4.00	10.23	2.34	6.79

位于渤海中部的无潮点是顺时针方向旋转的,而其余 4 个无潮点均为逆时针旋转,这与 HE 等^[10]采用 T/P 卫星数据得出的结果相近但仍有不同。渤海中部、渤海湾以及莱州湾处的无潮点与 HE 等的研究结果相近,但在大连长兴岛附近的无潮点,HE 等的文章中没有出现退化现象,且没有显示辽东湾处的无潮点。对比康鸿轩等^[11]的计算结果差别不大,可以起到很好的对照作用,主要差别在于:与康鸿轩等的研究结果相比,在辽东湾和莱州湾的无潮点有一定的南移,且位于大连长兴岛北部的无潮点出现了一定程度的退化现象,这与应用的研究模式不同、采用的计算网格结构不同有关。

M_4 分潮振幅整体由外海向近岸迅速增大。其在辽东湾、渤海湾以及莱州湾处较大,在渤海湾处甚至达到了 25 cm,整体振幅相当于 M_2 分潮振幅的 10% 左右,而在渤海海峡东部,从东往西, M_4 分潮振幅逐渐增大,表明 M_4 分潮振幅分布特征与地形分布密切相关。

3.2 MS_4 分潮

由图 5 可知,共有 5 个无潮点,依次位于大连长兴岛西北部、辽东湾东南部、渤海中部、渤海湾



图中虚线和实线分别代表振幅(m)和迟角(°)
The dotted lines and the solid lines in the figure represent amplitude and phase lag respectively

图 4 M_4 分潮同潮图

Fig. 4 Cotidal chart of M_4

以及莱州湾。位于渤海中部的无潮点是顺时针方向旋转,而其余 4 个无潮点都为逆时针旋转的。对比 M_4 与 MS_4 的分潮同潮图,二者十分相似,不过相比 M_4 分潮, MS_4 分潮在大连长兴岛附

近的低潮点出现明显的西移,旋转潮波系统并没有出现退化现象。 MS_4 分潮振幅与 M_4 分潮振幅分布特征相似,整体偏小但仍在同一个量级上。整体是由外海向近岸迅速增大。对比图 3 中的 M_2 分潮与 S_2 分潮分布特征,可知 M_2 与 S_2 分潮分布特征也相似,且振幅量级相当,符合方国洪等^[8] 给出的浅水分潮近似关系:

$$H_{MS_4}/H_{M_4} \approx 2H_{S_2}/H_{M_2} \quad (3)$$

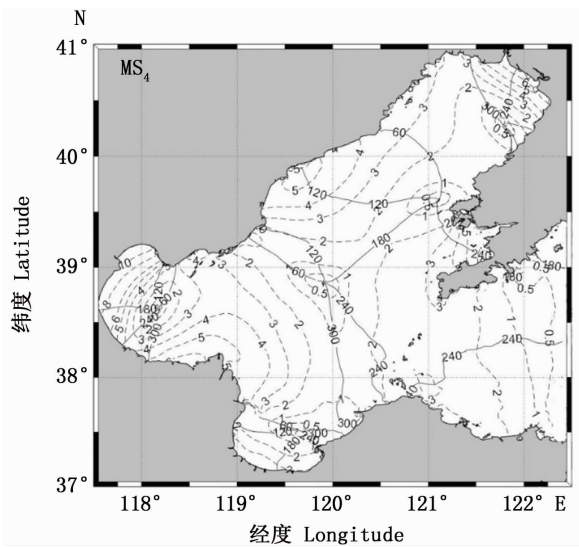
$$g_{MS_4} - g_{M_4} \approx g_{S_2} - g_{M_2} \quad (4)$$

式中: H_{M_2} 、 H_{S_2} 、 H_{M_4} 、 H_{MS_4} 分别为 M_2 、 S_2 、 M_4 、 MS_4 的振幅, g_{M_2} 、 g_{S_2} 、 g_{M_4} 、 g_{MS_4} 分别为 M_2 、 S_2 、 M_4 、 MS_4 的迟角。

进一步验证了计算结果的准确性,也表明了 MS_4 与 M_4 分潮传播过程类似且振幅量级相当的原因,揭示了 M_2 和 S_2 这 2 个主要分潮对浅水分潮,特别是 MS_4 分潮存在一定的影响。

3.3 M_6 分潮

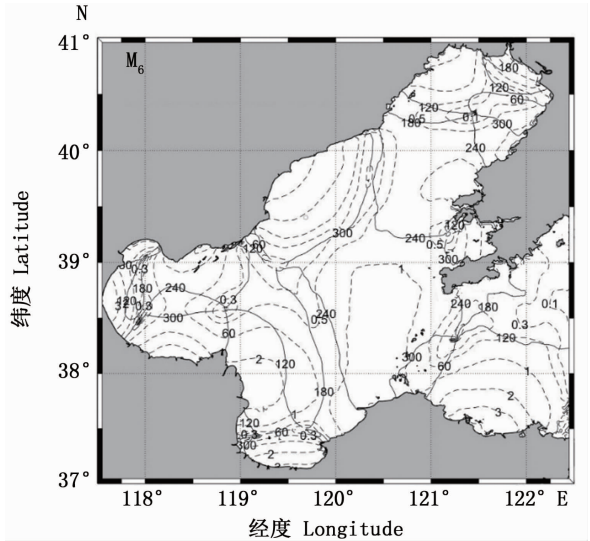
与 M_4 和 MS_4 四分之一分潮相比, M_6 分布更为复杂,由图 6 可以看出:渤海共存在 9 个无潮点,1 个位于渤海海峡东侧,1 个位于大连长兴岛西北部西南侧,1 个位于辽东湾,2 个在渤海中部海域,2 个位于渤海湾,还有 2 个位于莱州湾。除莱州湾东侧以及渤海湾南侧的两个无潮点为顺时针旋转外,其余的无潮点都为逆时针。这与康鸿轩等^[11] 所得的 M_6 同潮图大体上相似,但有一些



图中虚线和实线分别代表振幅(m)和迟角(°)
The dotted lines and the solid lines in the figure represent amplitude and phase lag respectively

图 5 MS_4 分潮同潮图

Fig. 5 Cotidal chart of MS_4



图中虚线和实线分别代表振幅(m)和迟角(°)
The dotted lines and the solid lines in the figure represent amplitude and phase lag respectively

图 6 M_6 分潮同潮图

Fig. 6 Cotidal chart of M_6

差别,主要差别在于:康鸿轩等所得的 M_6 分潮同潮图中位于渤海海峡北部以及渤海湾的 3 个无潮点都出现了退化现象,而在图 6 得出的结果中没有体现;在 M_6 分潮同潮图中,位于辽东湾北部的无潮点出现了退化现象,但康鸿轩等研究结果并没有表明这一点。对于 M_6 分潮振幅,也呈现由外海向近岸迅速增大的态势,但比 M_4 和 MS_4 振幅小很多,在渤海湾中达到了极大值,仅为 3 cm,振幅仅为 M_4 分潮振幅的 18% 左右。

4 结论

基于 FVCOM 模型模拟渤海海域的潮波,与康鸿轩等^[11] 的模拟方式相比,采用了非结构化三角形网格对渤海近岸线区域进行局部加密,提高区域网格精度,有利于对渤海海域的浅水分潮特征的研究。对于海湾等浅水地区例如渤海海域,浅水分潮对整个潮波系统有着重要影响, M_4 浅水分潮整体振幅已经达到了 M_2 分潮振幅的 10%。随着潮波从外海的传入,渤海的几个主要浅水分潮都呈现整体由外海向近岸迅速增大的态势。与前人的研究成果进行对比,结果显示在渤海海域存在 5 个 M_4 和 MS_4 分潮无潮点,且二者无潮点位置分布十分相似,而 M_6 分潮共存在 9 个无潮点。模拟的结果与前人的研究成果大体上相似但也有一些区别,地形和岸线数据的逐年变化

以及所采用研究方法的不同是导致差异的主要原因。对于未来的研究,更为精细的水深岸线数据和数据同化算法的引入可以更为精确地模拟渤海海域浅水分潮的特征。

参考文献:

- [1] 冯士筴, 张经, 魏皓, 等. 渤海环境动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2007:3-5.
FENG S Z, ZHANG J, WEI H, et al. Introduction to environmental dynamics of Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2007:3-5.
- [2] 吴 岷. 泰国湾潮汐潮流的数值模拟与理论模型研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013: 7-10.
WU D. Numerical simulation and theoretical modeling of tidal currents in the gulf of Thailand[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, 2013: 7-10.
- [3] 沈育疆. 东中国海潮汐数值计算[J]. 山东海洋学院学报, 1980, 10(3): 26-35.
SHEN Y J. Numerical computation of tides in the east China Sea[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1980, 10(3): 26-35.
- [4] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(5): 1-10.
ZHAO B R, FANG G H, CAO D M. Numerical modelling of tide and tidal currents in the Bohai, Yellow and east China Seas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(5): 1-10.
- [5] 万振文, 乔方利, 袁业立. 渤、黄、东海三维潮波运动数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 611-616.
WAN Z W, QIAO F L, YUAN Y L. Three-dimensional numerical modelling of tidal waves in the Bohai, Yellow and east China Seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 611-616.
- [6] 王凯, 方国洪, 冯士筴. 渤海、黄海、东海 M_2 潮汐潮流的三维数值模拟[J]. 海洋学报, 1999, 21(4): 1-13.
WANG K, FANG G H, FENG S Z. A 3-D numerical simulation of M_2 tides and tidal currents in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the east China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 21(4): 1-13.
- [7] 孙文心, 陈宗镛, 冯士筴. 一种三维空间非线性潮波的数值模拟(I)——渤海 M_4 和 MS_4 分潮波的试算[J]. 山东海洋学院学报, 1981, 11(1): 23-31.
SUN W X, CHEN Z Y, FENG S Z. Numerical Simulation of the three-dimensional nonlinear tidal waves (I)——a numerical study for M_4 and MS_4 waves in the Bohai Sea[J]. Journal Shandong College of Oceanology, 1981, 11(1): 23-31.
- [8] 方国洪, 杨景飞. 渤海潮运动的一个二维数值模型[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(5): 337-346.
FANG G H, YANG J F. A two-dimensional numerical model of the tidal motions in the Bohai Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(5): 337-346.
- [9] KANG S K, LEE S R, LIE H J. Fine grid tidal modeling of the Yellow and east China Seas [J]. Continental Shelf Research, 1998, 18(7): 739-772.
- [10] HE Y J, LU X Q, QIU Z F, et al. Shallow water tidal constituents in the Bohai Sea and the Yellow Sea from a numerical adjoint model with TOPEX/POSEIDON altimeter data[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24 (13/14): 1521-1529.
- [11] 康鸿轩, 刘浩. 渤海主要浅水分潮的模型研究[J]. 海洋通报, 2016, 35(2): 149-156.
KANG H X, LIU H. Model study of main shallow water tides in Bohai Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(2): 149-156.
- [12] 吕喆, 胡松. 苏北浅滩浅水分潮特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2017(2): 31-38.
LYU Z, HU S. Characteristics of shallow water tidal constituents along north Jiangsu Coast [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017(2): 31-38.
- [13] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system [J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [14] EGBERTG D, EROFEEVAS Y. Efficient inverse modeling of Barotropic ocean tides [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [15] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [16] 朱学明, 鲍献文, 宋德海, 等. 渤、黄、东海潮汐、潮流的数值模拟与研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1103-1113.
ZHU X M, BAO X W, SONG D H, et al. Numerical study on the tides and tidal currents in Bohai Sea, Yellow sea and east China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(6): 1103-1113.

Characteristics analysis of shallow water tidal constituents in the Bohai Sea based on FVCOM

ZHANG Zhikang, LIU Hao

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The Bohai tidal wave system was numerically simulated by FVCOM (finite volume coast and ocean model). Data from 19 tidal stations along the Bohai Sea coast were used to verify the simulation results, which are in good agreement with the measured results. Based on this, the main characteristics of M_4 , MS_4 and M_6 of three main shallow water tidal constituents in Bohai Sea were further studied and compared with previous research results. The results show that: the propagation characteristics of M_4 and MS_4 are similar, and there are 5 amphidromic points, one of which rotates clockwise, while the other four rotate counterclockwise; and for the M_6 tidal constituent, there are 9 amphidromic points, two are clockwise and the other seven are counterclockwise. The amplitude of M_4 component can reach 25 cm near the shore, which is about 10% of the amplitude of M_2 , followed by the amplitude of MS_4 , and the amplitude of M_6 is the smallest, which is only about 18% of the amplitude of M_4 . The amplitude distribution of shallow water tides is closely related to the seabed topography.

Key words: FVCOM model; Bohai Sea; shallow water tidal constituent; amphidromic point