

基于 FVCOM 的渤海潮波数值模拟

尼建军¹, 王新怡^{2,3}, 张凤焯^{2,3}, 王永刚^{2,3}, 连展^{2,3}

(1.中国人民解放军 海军司令部航海保证部, 天津 300042; 2.国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3.海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于有限体积法海洋数值模型(FVCOM), 对渤海当前水深岸线状况下的潮汐潮流进行了数值计算。模式采用不规则三角形网格, 较好地提高了黄河口处网格分辨率, 模拟了渤海海域 K_1 , O_1 , M_2 和 S_2 四个主要分潮。利用渤海沿岸 19 个验潮站的资料对模拟结果进行了验证, K_1 分潮振幅绝对均差 2.39 cm, 迟角绝对均差 4.36°, O_1 分潮振幅绝对均差 1.40 cm, 迟角绝对均差 4.29°, M_2 分潮振幅绝对均差为 3.55 cm, 迟角绝对均差为 5.69°, S_2 分潮振幅绝对均差 1.72 cm, 迟角绝对均差 8.86°, 结果显示各分潮模拟结果合理, 较真实地反映了渤海海域四个分潮传播情况。

关键词: 有限体积法海洋数值模型(FVCOM); 渤海; 潮汐

中图分类号: P731.23 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)02-0089-06

对渤海潮波系统的研究始于 20 世纪, 在数值研究方面, 许多工作都将渤、黄、东海作为整体开展的。沈育疆^[1]首次对渤黄东海潮汐潮流进行数值模拟, 给出了黄、渤海的潮汐同潮图及潮流椭圆图, 并对渤海 M_2 , K_1 无潮点的位置进行了分析; 沈育疆和叶安乐^[2]、赵保仁和方国洪^[3]、万振文等^[4]、王凯^[5]等都对此区域的潮汐潮流进行数值研究, 对同潮图进行了不断的修正。另外前人还开展了针对渤海区域的潮波数值研究工作, 窦振兴^[6]、山广林^[7]、Fang 和 Yang^[8]等利用二维潮波方程进行了数值模拟, 并绘制了渤海不同分潮潮汐潮流同潮图, 对渤海潮流成因及特征作了分析。于克俊和张法高^[9]利用三维 Leedertse 正压模式对渤海三维半日分潮、全日分潮潮汐潮流进行数值模拟, 给出了三维潮波结构。孙英兰和陈时俊^[10]利用三维斜压潮波运动的数值模型, 对渤海 M_2 分潮流进行了数值模拟, 由于该模型考虑了温盐效应及密度变化, 并且引入了模型网格无法分辨的湍运动能, 使得模拟结果比较理想。

尽管前人针对渤海潮波已经开展了不少的数值研究, 但由于渤海海域水深岸线的变化特别是黄河改道及淤积对潮波系统的影响, 有必要开展针对当前水深岸线状况下的潮汐潮流特征研究。另外, 本文采用不规则三角形网格的有限体积法海洋数值模型(FVCOM)对渤海潮波进行模拟计算, 该模型的最大特点就是模型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的方便性^[11]。本文利用该模

型模拟了渤海海域 K_1 , O_1 , M_2 和 S_2 四个主要分潮, 分别绘制出了各分潮的同潮图, 同时利用渤海沿岸 19 个验潮站的资料对模型结果进行了验证。

1 模式设置

FVCOM 模型计算区域及水平网格见图 1, 区域中三角形网格单元的总数为 8 890 个, 节点总数为 4 892 个。在开边界处, 模式的水平分辨率约为 9.0 km, 在渤海中部区域水平分辨率约为 10.0 km 的网格, 在岸线附件, 水平分辨率优于 4.0 km, 最小分辨率可达 1.0 km。计算区域的开边界取在 122.5°经度线上, 开边界节点数为 23 个。在垂向方向采用 σ 坐标系, 垂向分 5 层。模式的水深由渤海海域多张海图资料融合得到, 岸线则是提取自海图资料并利用卫星遥感资料进行了一定的修正(图 2)。

本文以各分潮潮汐调和常数为开边界条件, 分别模拟了渤海 K_1 , O_1 , M_2 和 S_2 四个主要分潮, 其中开边界条件由大区域模式模拟所得^[12]。在模式的时间步长上, K_1 分潮的外模时间步长取为 4.308 21 s, O_1 分潮的外模时间步长为 4.647 474 s, 计算一个潮周

收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2012-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40976016); 国家科技支撑计划项目(2010BAC69B00); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项基金项目(2010G07)

作者简介: 尼建军(1978-), 男, 新疆塔城人, 工程师, 本科, 主要从事海洋工程方面的研究, E-mail: joe_ni787@sina.com; 王新怡, 通信作者, E-mail: wangxy@fio.org.cn

期均需要 2 000 步; M_2 的外模时间步长取为 4.471 4 s, S_2 的外模时间步长取为 4.32 s, 计算一个潮周期则需要 1 000 步。模型积分 15 d 即可达到稳定, 最后利用 K_1 分潮和 O_1 分潮的第 30 个潮周期, M_2 分潮和 S_2 分潮第 60 个潮周期的水位模拟结果进行调和, 得到该四个分潮的调和常数。

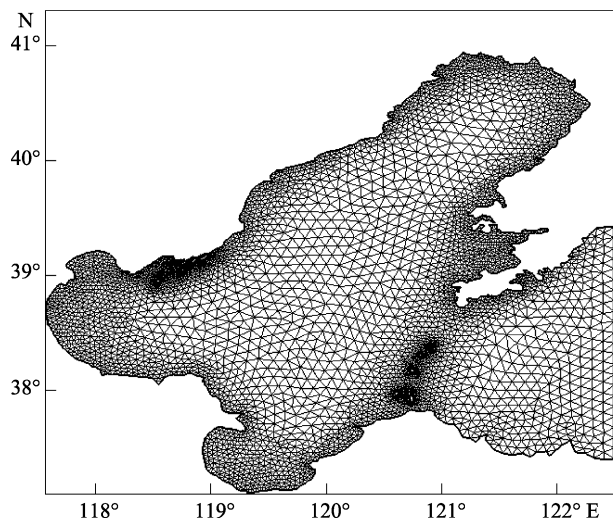


图 1 模式计算区域与网格设计
Fig. 1 The mesh of simulation region

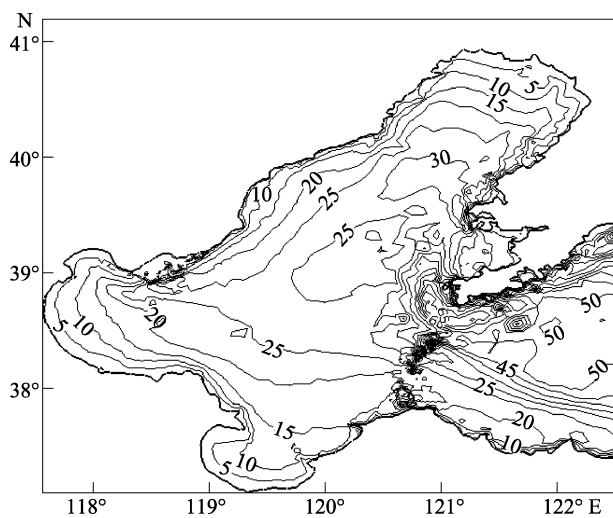


图 2 计算区域水深(m)分布图
Fig. 2 The depth of simulation region

2 模拟结果及分析

首先本文利用渤海沿岸 19 个验潮站资料对模拟所得的 O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 四个分潮的调和常数进行了检验(表 1、表 2、表 3、表 4), 验潮站位置分布见图 3。从对比结果可以看出, K_1 分潮振幅绝均差 2.39 cm, 迟角绝均差 4.36°, 其中 9 号站点处的迟角差超过 15°,

这可能与模式对 9 号站附近岸线及水深的刻画还不够精细有关; O_1 分潮振幅绝均差为 1.40 cm, 迟角绝均差为 4.29°; M_2 分潮振幅绝均差为 3.55 cm, 迟角绝均差为 5.69°, 其中 7 号和 9 号站点的 M_2 分潮的振幅差较大, 分别为 9.71 cm 和 -10.92 cm, 但其余站点模拟结果较理想, 分析 9 号站点误差较大的可能原因是 9 号站点位于莱州湾, 黄河口岸线的向内海延伸, 导致了大的振幅差的出现。 S_2 分潮振幅绝均差为 1.72 cm, 迟角绝均差 8.86°, 该分潮的迟角在 9 号和 10 号站差异较大, 这是由于该站点在无潮点附近所致, 如果扣除这两个站点, 迟角的绝均差下降到 6.48°。

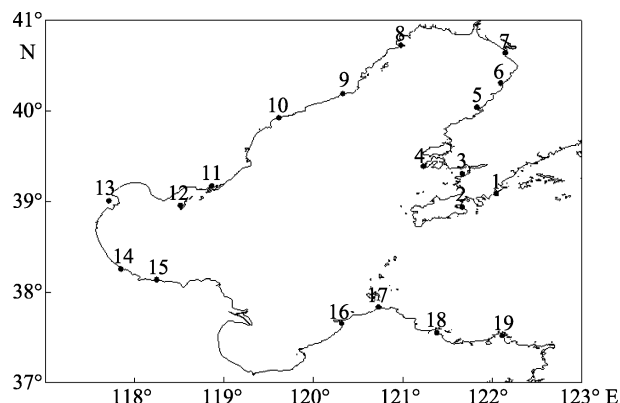


图 3 渤海沿岸验潮站分布
Fig. 3 The tidal stations in the Bohai Sea

图 4 为模拟得到的渤海 K_1 , O_1 , M_2 和 S_2 四个主要分潮的同潮图。由图可见, 模拟得到的各分潮同潮图基本结构与前人的结果一致。在全日潮中, K_1 与 O_1 分潮的同潮图有点相似, 分别是在渤海海峡中央的地方存在一个无潮点, O_1 分潮振幅略小于 K_1 分潮振幅, 全日潮潮波在渤海呈逆时针方向传播。在半月潮中, M_2 分潮模拟结果见图 4, 本文模拟的 M_2 分潮在黄河口附近无潮点较前人模拟结果更靠近陆地。前人的模拟结果在黄河口及其邻近海域多采用早期的岸线, 而在该区域随着大量的泥沙入海, 海岸线向海延伸显著, 该变化必然会导致该海域潮波的变化^[13]。黄祖珂^[14]的研究显示, 随着黄河口泥沙的沉积, 由海岸向外推移, 渤海南部水深变浅, 使得波长变短, 而无潮点是位于离湾底四分之一波长的地方, 因而无潮点向西迁移, 又加上岸线向外延伸, 使得无潮点更接近岸边, 这可能是本文模拟的无潮点更为靠近陆地的原因。由于莱州湾地形比较平缓的缘故, 该海区潮时与潮差变化很小。模拟的 S_2 分潮在渤海有两个无潮点, 振幅的量值要小于 M_2 分潮振幅。

表 1 K_1 分潮调和常数观测值与模拟值

Tab. 1 The observed and simulated values of K_1 harmonic constant

验潮站编号	$H(\text{cm})$			$g(^{\circ})$		
	模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差
1	22.30	24.00	-1.70	352.08	352.00	0.08
2	28.13	26.00	2.13	358.93	1.00	-2.07
3	28.01	27.00	1.01	64.22	66.60	-2.38
4	26.71	33.00	-6.29	70.93	71.00	-0.07
5	37.08	36.00	1.08	86.49	86.00	0.49
6	39.52	43.00	-3.48	90.09	85.00	5.09
7	41.68	38.00	3.68	93.58	101.00	-7.42
8	38.08	38.00	0.08	102.88	104.00	-1.12
9	31.23	33.00	-1.77	107.37	91.00	16.37
10	28.47	29.00	-0.53	114.54	111.00	3.54
11	27.42	32.00	-4.58	138.32	151.40	-13.08
12	29.40	31.00	-1.6	146.14	153.00	-6.86
13	33.27	36.00	-2.73	152.09	154.00	-1.91
14	33.46	38.00	-4.54	160.86	161.00	-0.14
15	31.39	29.00	2.39	163.85	174.00	-10.15
16	20.38	20.00	0.38	204.34	200.00	4.34
17	10.76	12.00	-1.24	236.96	233.00	3.96
18	12.44	16.00	-3.56	298.02	295.00	3.02
19	18.29	21.00	-2.71	307.29	308.00	-0.71
绝均差		2.39			4.36	

表 2 O_1 分潮调和常数观测值与模拟值

Tab. 2 The observed and simulated values of O_1 harmonic constant

验潮站编号	$H(\text{cm})$			$g(^{\circ})$		
	模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差
1	15.76	17.00	-1.24	310.69	304.00	6.69
2	19.85	19.00	0.85	318.35	320.00	-1.65
3	21.45	20.00	1.45	20.75	25.80	-5.05
4	20.70	20.00	0.70	26.88	30.00	-3.12
5	27.56	27.00	0.56	39.95	35.00	4.95
6	29.09	30.00	-0.91	43.15	46.00	-2.85
7	30.52	29.00	1.52	46.26	51.00	-4.74
8	28.20	29.00	-0.80	55.04	54.00	1.04
9	23.92	25.00	-1.08	59.21	53.00	6.21
10	22.30	23.00	-0.70	65.46	61.00	4.46
11	21.95	21.40	0.55	85.57	96.60	-11.03
12	23.27	25.00	-1.73	92.47	94.00	-1.53
13	25.89	27.00	-1.11	97.80	99.00	-1.20
14	26.05	31.00	-4.95	105.86	111.00	-5.14
15	24.63	27.00	-2.37	108.65	116.00	-7.35
16	16.83	17.00	-0.17	143.28	138.00	5.28
17	8.420	10.00	-1.58	164.09	160.00	4.09
18	6.820	9.00	-2.18	237.48	234.00	3.48
19	10.90	13.00	-2.10	252.40	254.00	-1.60
绝均差		1.40			4.29	

表 3 M₂ 分潮调和常数观测值与模拟值

Tab. 3 The observed and simulated values of M₂ harmonic constant

验潮站编号	H(cm)			g(°)		
	模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差
1	82.30	84.00	-1.70	275.77	275.00	0.77
2	100.33	98.00	2.33	284.80	288.00	-3.20
3	61.67	65.00	-3.33	16.99	23.60	-6.61
4	40.82	47.00	-6.18	30.36	29.00	1.36
5	91.91	89.00	2.91	118.32	111.00	7.32
6	117.40	120.00	-2.60	128.96	125.00	3.96
7	135.71	126.00	9.71	139.76	143.00	-3.24
8	95.58	96.00	-0.02	156.24	150.00	6.24
9	25.86	25.00	0.86	176.28	162.00	14.28
10	15.37	11.00	4.37	307.47	311.00	-3.53
11	52.07	45.90	6.17	46.31	55.70	-9.39
12	74.64	73.00	1.64	69.82	74.00	-4.18
13	117.37	117.00	0.37	88.69	90.00	-1.31
14	112.33	112.00	0.33	108.01	109.00	-0.99
15	86.93	84.00	2.93	111.59	127.00	-15.41
16	29.08	40.00	-10.92	324.78	316.00	8.78
17	47.46	53.00	-5.54	285.75	292.00	-6.25
18	73.35	76.00	-2.65	284.52	290.00	-5.48
19	64.98	62.00	2.98	294.22	300.00	-5.78
绝均差		3.55			5.69	

表 4 S₂ 分潮调和常数观测值与模拟值

Tab. 4 The observed and simulated values of S₂ harmonic constant

验潮站编号	H(cm)			g(°)		
	模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差
1	23.97	26.00	-2.03	329.20	331.00	-1.80
2	29.65	29.00	0.65	338.79	344.00	-5.21
3	18.82	22.00	-3.18	68.21	82.70	-14.49
4	11.50	14.00	-2.50	77.19	78.00	-0.81
5	24.34	23.00	1.34	173.90	175.00	-1.10
6	31.70	37.00	-5.30	186.54	188.00	-1.46
7	37.11	34.00	3.11	196.22	206.00	-9.78
8	25.57	27.00	-1.43	214.87	210.00	4.87
9	5.37	5.00	0.37	244.91	205.00	39.91
10	5.76	5.00	0.76	18.69	37.00	-18.31
11	14.47	13.40	1.07	106.60	122.40	-15.80
12	20.44	20.00	0.44	138.61	148.00	-9.39
13	33.61	34.00	-0.39	159.85	165.00	-5.15
14	32.33	32.00	0.33	180.29	186.00	-5.71
15	24.55	24.00	0.55	185.33	196.00	-10.67
16	8.260	13.00	-4.74	42.14	38.00	4.14
17	12.98	14.00	-1.02	344.44	357.00	-12.56
18	18.86	22.00	-3.14	341.11	345.00	-3.89
19	18.33	18.00	0.33	351.66	355.00	-3.34
绝均差		1.72			8.86	

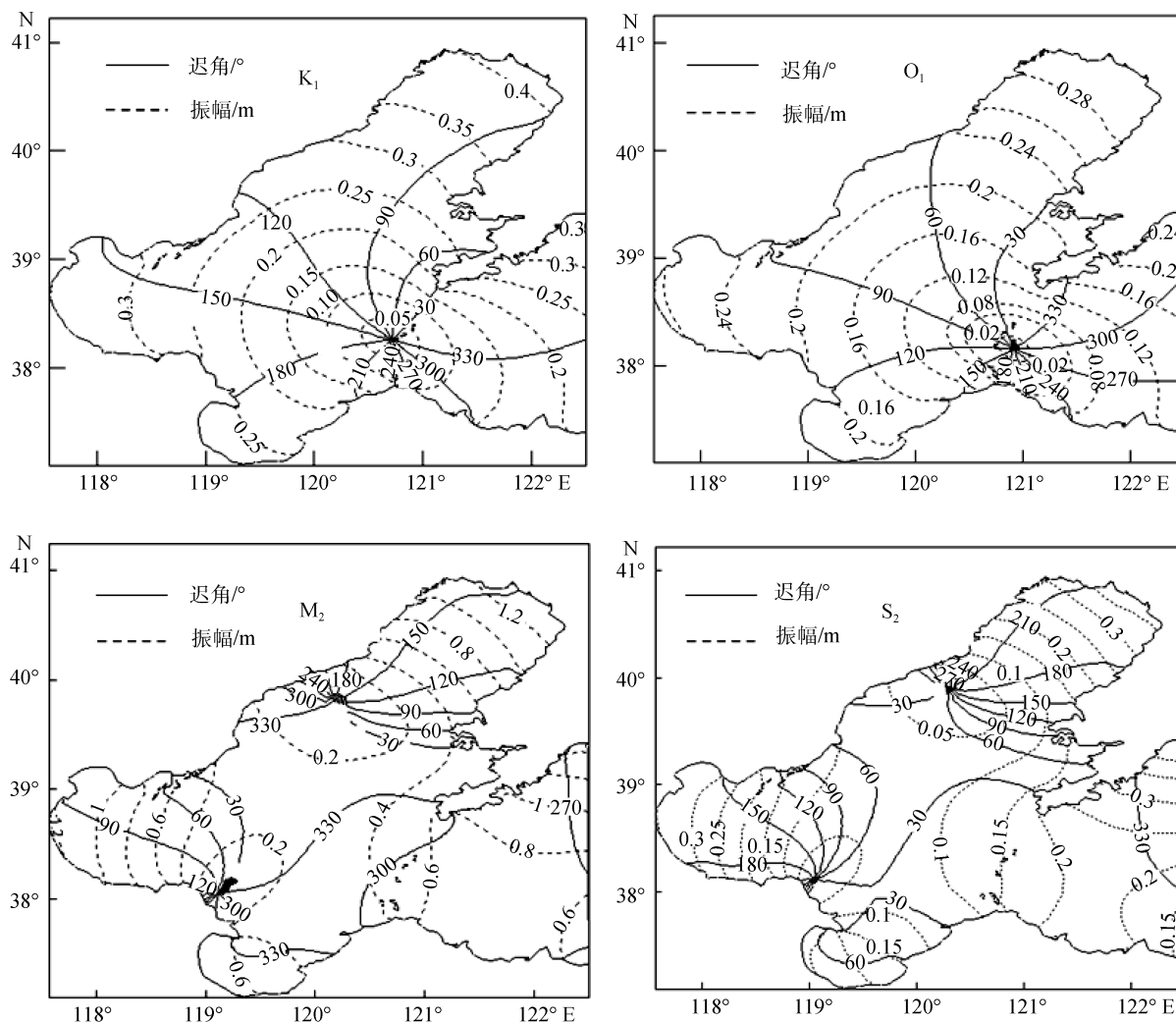


图4 K_1 , O_1 , M_2 , S_2 分潮同潮图

Fig. 4 The cotidal chart of K_1 , O_1 , M_2 , S_2 tidal constituents

3 结语

本文利用 FVCOM, 加入干湿网格动边界条件, 模拟了渤海 K_1 , O_1 , M_2 和 S_2 四个主要分潮传播情况, 得到了四个分潮的同潮图。结果显示 M_2 分潮在渤海潮波系统中占据主要地位, 其在渤海有两个无潮点, 由于黄河口岸地形的变化, 黄河口附近的无潮点明显靠近岸边。 O_1 分潮和 K_1 分潮在渤海分别有一个无潮点, 位于渤海海峡附近。通过对验潮站观测值与模拟值的对比分析, 表明基于存在空间变化的底摩擦系数模拟的 O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 分潮调和常数观测值与模拟值符合较好, 但个别站点的模拟情况与实际情况稍有出入。从更合理的角度来看, 更为精细的水深岸线数据和资料同化技术的引入尤为重要, 这也是本文后续的研究工作。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 沈育疆, 叶安乐, 1985. 东中国海三维半月潮流的计算[J]. 海洋湖沼通报, 1985, 1: 1-11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王凯, 方国洪, 冯士筭. 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.
- [6] 窦振兴. 渤海潮流及潮余流的数值计算[J]. 海洋学报, 1981, 3(3): 355-369.

- [7] 山广林. 渤海潮混合数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(15): 419-431.
- [8] Fang Guohong, Yang Jingfei. A two-dimensional numerical model of the tidal motions in the Bahai Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and liminology, 1985, 3(2): 30-35.
- [9] 于克俊, 张法高. 渤海潮波运动的三维数值计算[J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(3): 26-30.
- [10] 孙英兰, 陈时俊. 沿岸海域三维斜压场的数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 1990, 20(3): 11-24.
- [11] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [12] 方国洪, 魏泽勋, 王永刚. 我国潮汐潮流区域预报的发展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 331-336.
- [13] 乐肯堂, 刘兴泉, 史久新. 黄河口的变迁对邻近海区潮波运动影响的数值研究[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(36). 北京: 科学出版社, 1995: 33-46.
- [14] 黄祖珂. 渤海的潮波系统及变迁[J]. 青岛海洋大学学报, 1991, 21(2): 1-12.

Numerical simulation of tide in the Bohai Sea based on the finite-volume coastal ocean numerical model (FVCOM)

NI Jian-jun¹, WANG Xin-yi^{2,3}, ZHANG Feng-ye^{2,3}, WANG Yong-gang^{2,3}, LIAN Zhan^{2,3}

(1. The Navigation Guarantee Department of Chinese Navy Headquarters, Tianjin 300042, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Sep., 25, 2012

Key words: the finite-volume coastal ocean numerical model (FVCOM); the Bohai Sea; tide

Abstract: Based on the finite-volume coastal ocean numerical model (FVCOM), we simulated K_1 , O_1 , M_2 and S_2 tidal constituents in the Bohai Sea by new coastline and topography. It can fit well with the shoreline in the Yellow River Estuary by using irregular triangle meshes for the model. Compared with the observation data obtained from 19 stations, we found that the result is reasonable to reflect the tidal transmission. For K_1 , the mean absolute difference of the amplitude is 2.39 cm, the mean absolute difference of the phase-lag is 4.36° . For O_1 , they are 1.40 cm and 4.29° . For M_2 , they are 3.55 cm and 5.69° . For S_2 , they are 1.72 cm and 8.86° respectively.

(本文编辑: 刘珊珊)