



底摩擦系数对渤海潮波系统数值模拟的影响

姚兆辰, 丁磊, 刘文岭
(天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 采用非结构有限体积近岸海洋模型 (finite volume coastal ocean model, FVCOM), 对渤海潮波系统进行 1 年的数值模拟. 分析了不同底摩擦系数对渤海潮波系统数值模拟的影响, 并选取潮波系统误差较小的结果, 进行 15 天、1 月和 1 年的调和分析, 以比较不同调和分析时间对结果准确性的影响. 结果表明: 模拟结果与实测调和常数分布有较好的一致性; 开边界条件一定, 当底摩擦增大时整体海域振幅值相对减小, 无潮点也向潮波传入方向左偏; 底摩擦系数为 0.002 时潮波系统整体模拟结果较好; 调和分析的时间不宜少于 1 月.

关键词: 底摩擦系数; 渤海潮波系统; 数值模拟; 调和分析

中图分类号: P76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2013)04-0044-06

Effects of Bottom Friction Coefficients on Bohai Tidal System Simulation

YAO Zhaochen, DING Lei, LIU Wenling

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

Abstract: FVCOM (finite volume coastal ocean model) was applied in this research to the simulation of the Bohai tidal system for a period of 1 year. The effects of bottom friction coefficients on the Bohai tidal system simulation were analyzed. Harmonic analysis was performed every 15 days, 1 month and then 1 year in order to know the differences caused by the length of time. The results indicate that the simulated and observed harmonic constants are consistent with one another. When the open boundary conditions were the same, the amplitudes of the tide in the entire sea waters decreased as bottom friction increased. Also, the amphidromic point drifted left along with the direction of the tide propagation. The simulation systems gave better results when the bottom friction coefficients was 0.002. The time of the harmonic analysis should not be less than 1 month.

Key words: bottom friction coefficient; Bohai tidal system; numerical simulation; harmonic analysis

潮波运动是海水运动的基本形式之一, 潮汐和潮流是潮波运动的基本要素^[1]. 潮汐混合与余流决定了近海环流与污染物输运, 准确理解潮波运动是沿海人类活动之必需, 数值模型是能够进行潮波预测的重要手段.

底摩擦是潮波能量耗散的主要因素, 对潮波的振幅和相位分布有极其重要的影响. 底摩擦系数是根据边界层理论提出来的, 其在周期运动中随时间变化^[2]. 在潮波数值模拟中, 对底摩擦系数的处理是, 简化为在整个海域里取一个常数^[3-4], 或者在不同的海

区取不同的常数^[5-8], 选取的常数或者是根据经验, 或者是经过反复调试给出的, 数据同化方法采用动力插值可减少参数确定的人为性^[9-10].

调和分析是将实际观测到的潮汐 (潮流) 视为一系列分潮 (分潮流) 的叠加, 求出它们的调和常数 (振幅和迟角)^[11-12]. 要准确地进行调和分析, 首先需要根据具体区域确定适用的底摩擦系数、最佳调和时长.

本文利用非结构有限体积近岸海洋模型 (finite volume coastal ocean model, FVCOM), 采用不同底摩擦系数对渤海潮波系统进行数值模拟, 比较了其对于潮

收稿日期: 2013-01-22; 修回日期: 2013-05-16

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

作者简介: 姚兆辰 (1988—), 男, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 丁磊, 助理研究员, leiding2012@tust.edu.cn.

波系统的影响. 将计算结果进行调和与分析, 并与岸边验潮站和海中高度计的测量资料进行对比.

1 数值模型及调和与分析方法

1.1 FVCOM 模型

FVCOM 模型采用有限体积数值离散方法求解三维水动力原始控制方程组, 模型的水平方向采用不规则三角形网格, 可以对地形较复杂区域进行局部加密; 垂直方向上采用 σ 坐标系, 有助于处理变化显著的地形; 采用二维外模、三维内模分离技术求解, 并根据 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件控制时间步长, 对二维外模方程通过改进的四阶龙格-库塔格式求解, 而三维内模动量方程则采用显隐结合的差分格式求解; 潮间带动边界采用干湿网格处理技术.

FVCOM 模型中的底摩擦系数按式 (1) 给出^[13].

$$C_d = \max[k^2 / \ln(\frac{Z_{ab}}{Z_0})^2, 0.0025] \quad (1)$$

式中: $k^2 = 0.4$ 为 von Karman 常数; Z_0 是海底粗糙度; Z_{ab} 是离海底最近的 σ 层与海底之间的距离.

参考已有的数值模型中关于渤海底摩擦系数的取值^[6,14-15], 本文将对底摩擦系数的研究范围选为 0.001 ~ 0.01.

1.2 FVCOM 在渤海的应用配置

利用 FVCOM 模型对渤海的潮汐进行模拟, 计算区域为 37°07' ~ 41°N 和 117°35' ~ 121°10'E, 水平网格分辨率 3' × 3', 外模计算的时间步长为 10 s, 内外模时间步长比为 10 : 1. 模型采用 1' × 1' 的东中国海的水深数据 (Laboratory for Coastal and Ocean Dynamics Studies, Dungkynkwan University) 插值到网格点上; 开边界 32 个节点, 潮位数据来源为 OTPS 模型 (OSU Tidal Data Inversion), 考虑 M_2 、 S_2 、 N_2 、 J_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 8 个主要分潮, 输入潮位时间为 2000 年. 图 1 和图 2 分别为 FVCOM 模型在渤海区域的计算网格和地形及潮位站位置标注.

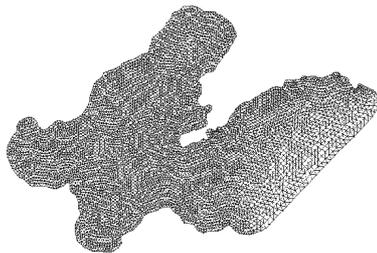


图 1 渤海区域的计算网格

Fig. 1 Calculation mesh of the Bohai Sea area

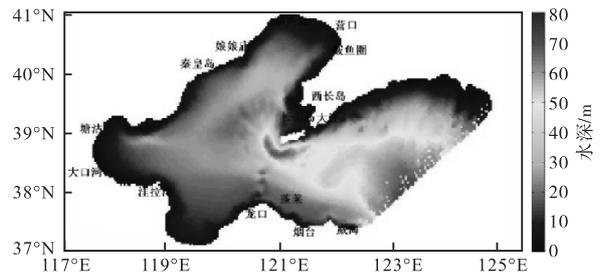


图 2 渤海区域的地形及潮位站位置

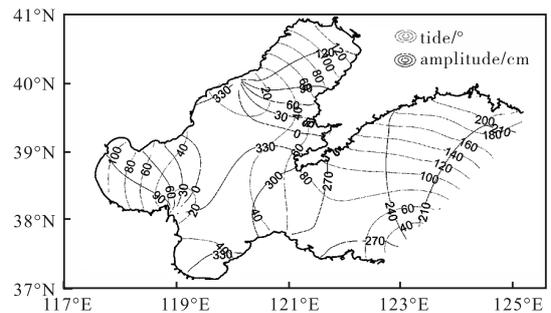
Fig. 2 Topography of the Bohai Sea area and the positions of tidal station

2 结果分析

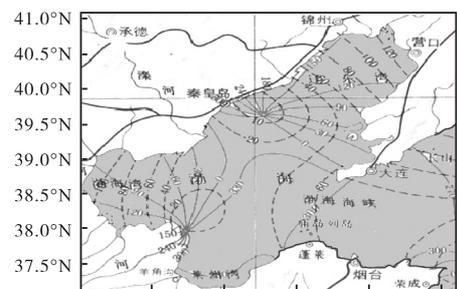
2.1 渤海潮波模拟与验证

图 3 (a) 给出了渤海 M_2 分潮同潮图的模拟结果: 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, 渤海海峡和渤海中部潮波系统则表现为行进波; 渤海湾潮汐最大振幅为 100 cm, 辽东湾潮汐最大振幅为 120 cm, 莱州湾潮汐最大振幅较小, 仅为 40 cm.

图 3 (b) 为文献[16]中的渤海 M_2 分潮同潮图. 与图 3 (b) 相比, 图 3 (a) 秦皇岛外海无潮点的经纬度最大偏差为 10.8', 黄河口附近无潮点的经纬度最大偏差为 6'. 同时, M_2 分潮等振幅线和等迟角线的分布也与图 3 (b) 的结果较为一致, 表明 FVCOM 模型能够较好地模拟渤海潮波系统.



(a) 本文模拟结果



(b) 文献数据

图 3 渤海 M_2 分潮同潮图

Fig. 3 Co-tidal chart of M_2 tide in Bohai Sea

2.2 底摩擦系数对渤海潮波系统的影响(以 M_2 分潮为例)

在 FVCOM 模型计算中,底摩擦系数在 0.001 ~ 0.01 间隔 0.001 取值,观察底摩擦系数的变化对于渤海潮波系统模拟的影响.然后,从中选取符合较好的结果所对应的底摩擦系数范围,进一步细化间隔至 0.000 1 再进行计算,同时选取 13 个验潮站和 31 个观测点的高度计实测资料与模拟结果进行对比^[7],以

选择对于模拟渤海潮波系统最优的底摩擦系数值.

图 4 为底摩擦系数为 0.001 ~ 0.009 时渤海 M_2 分潮的同潮图.可以看出,底摩擦系数增大时,潮波沿着潮波传入的方向左偏,渤海湾、辽东湾、莱州湾的最大振幅从 100、120、60 cm 分别减小至 40、80、40 cm.与图 3(b) 比较可知,在底摩擦系数为 0.001 ~ 0.002 时,数据的模拟结果较好.当底摩擦系数取 0.01 时,模拟值与实测值差别较大,故在图中没有列出.

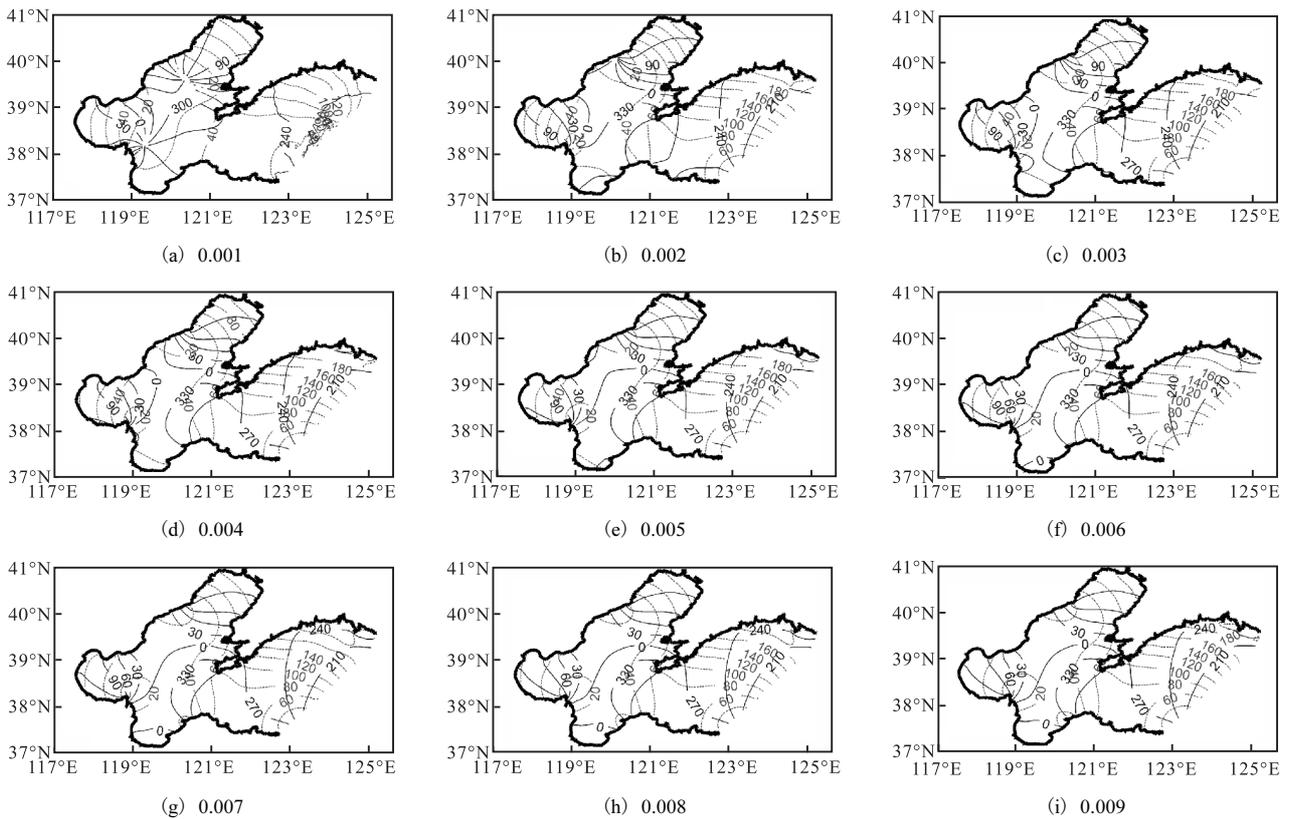


图 4 底摩擦系数为 0.001 ~ 0.009 时渤海 M_2 分潮的同潮图

Fig. 4 Co-tidal chart of M_2 tide in Bohai Sea when the bottom friction coefficients is from 0.001 to 0.009

表 1 与表 2 分别给出了 1 年调和和时间长度下(调和时长为 1 年时,调和出的分潮数最多,结果更准确),底摩擦系数为 0.002 时, M_2 分潮调和常数模拟值与 31 个观测点高度计和 13 个验潮站实测资料^[7]的结果比较,同时计算了两者差值的绝对平均值和均方差.表 3 进一步给出了底摩擦系数在 0.001 ~ 0.002 时振幅差、迟角差的绝对平均值和均方差.需要说明的是,当底摩擦系数小于 0.001 3 时,模拟值与实测值差别较大,故在表中没有列出.

从表 3 中可以看出,当底摩擦系数取 0.002 时,模拟结果整体上较好,振幅差值的绝对平均值分别从底摩擦系数为 0.001 3 时的 8.6 cm 和 6.1 cm 减小为

7.3 cm 和 4.0 cm.

2.3 底摩擦系数对其他分潮的影响

底摩擦系数对渤海其他主要分潮(K_1 、 O_1 、 S_2)的影响,这里仅给出相关结论.在底摩擦系数从 0.001 增加到 0.01 的过程中, K_1 分潮的最大振幅在辽东湾、渤海湾、莱州湾的值从 35、35、25 cm 减小为 25、25、15 cm, O_1 分潮最大振幅在辽东湾、渤海湾、莱州湾的值从 25、25、17 cm 减小为 20、20、7 cm, S_2 分潮最大振幅在辽东湾、渤海湾、莱州湾的值从 30、25、15 cm 减小为 20、15、5 cm;同时,无潮点也明显向着潮波传入的方向左偏.以上结果表明,底摩擦增加对潮波传播的耗散增大,使得海域整体振幅值减小.

表 1 M_2 调和常数的观测值(高度计)与模拟值
 Tab. 1 Simulated and observed (height gauge) tidal harmonic constants of M_2

观测点位置		振幅/cm			迟角/(°)		
		模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差
38.76°N	117.96°E	90.5	82.1	8.4	87.8	92.0	-4.2
38.50°N	118.13°E	77.0	72.6	4.4	95.2	97.8	-2.6
38.65°N	118.02°E	85.0	80.8	4.2	92.2	92.3	-0.1
38.29°N	118.26°E	69.6	68.8	0.8	106.0	112.5	-6.5
38.39°N	118.19°E	71.0	70.4	0.6	101.7	103.1	-1.4
37.82°N	119.55°E	35.4	38.4	-3.0	322.5	321.3	1.2
37.98°N	119.65°E	31.8	34.8	-3.0	322.5	322.7	-0.2
38.13°N	119.75°E	30.7	31.5	-0.8	321.7	320.3	1.4
38.24°N	119.81°E	30.4	33.6	-3.2	321.6	321.4	0.2
38.28°N	119.84°E	30.4	33.2	-2.8	322.1	321.7	0.4
38.44°N	119.98°E	33.4	35.2	-1.8	318.7	324.4	-5.7
38.47°N	120.01°E	33.8	37.1	-3.3	321.1	324.3	-3.2
38.65°N	120.11°E	35.8	38.4	-2.6	319.9	322.3	-2.4
38.70°N	120.14°E	36.0	38.3	-2.3	322.0	324.3	-2.3
38.81°N	120.21°E	36.8	38.6	-1.8	324.1	323.5	0.6
38.97°N	120.32°E	36.4	35.9	0.5	327.0	327.5	-0.5
39.12°N	120.42°E	34.8	31.2	3.6	332.2	335.9	-3.7
39.33°N	120.37°E	25.6	17.1	8.5	350.9	1.3	-10.4
38.96°N	120.64°E	45.0	35.3	9.7	318.8	326.8	-8.0
39.12°N	120.54°E	36.2	27.1	9.1	332.9	336.2	-3.3
39.17°N	120.51°E	32.5	24.8	7.7	340.6	341.9	-1.3
39.43°N	120.66°E	26.9	21.7	5.2	4.7	9.2	-4.5
38.80°N	120.75°E	51.4	45.9	5.5	311.4	315.4	-4.0
38.91°N	120.67°E	47.1	39.5	7.6	316.6	323.6	-7.0
39.48°N	120.69°E	25.0	19.8	5.2	12.4	19.6	-7.2
39.64°N	120.79°E	24.4	20.9	3.5	42.3	62.2	-19.9
39.69°N	120.83°E	25.8	23.0	2.8	57.7	76.0	-18.3
38.50°N	120.95°E	60.9	60.2	0.7	289.3	296.0	-6.7
38.65°N	120.85°E	57.9	53.7	4.2	297.8	306.1	-8.3
39.80°N	120.90°E	33.4	29.8	3.6	88.3	87.1	1.2
39.90°N	120.97°E	36.6	34.7	1.9	88.2	100.2	-12.0

注: 振幅差的绝对平均和均方差分别为 4.0 cm 和 4.1 cm; 迟角差的绝对平均和均方差分别为 4.8° 和 5.2°。

表 2 M_2 调和常数的观测值(验潮站)与模拟值
 Tab. 2 Simulated and observed (tidal stations) tidal harmonic constants of M_2

验潮站	验潮站位置	振幅/cm			迟角/(°)			
		模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差	
塘沽	39.00°N	117.72°E	105.0	117.0	-12.0	92.0	90.9	1.1
大口河	38.25°N	117.85°E	97.0	112.0	-15.0	109.7	109.0	0.7
秦皇岛	39.92°N	119.62°E	18.0	11.0	7.0	322.6	311.0	11.6
龙口	37.65°N	120.32°E	30.5	40.0	-9.5	320.8	316.0	4.8
娘娘庙	40.18°N	120.33°E	18.3	25.0	-6.7	145.0	162.0	-17.0
蓬莱	37.83°N	120.73°E	44.3	53.0	-8.7	276.3	292.0	-15.7
葫芦岛	40.72°N	120.98°E	96.7	96.0	0.7	140.5	150.0	-9.5
西长岛	39.38°N	121.23°E	50.1	47.0	3.1	14.9	29.0	-14.1
烟台	37.55°N	121.38°E	75.8	76.0	-0.2	268.2	290.0	-21.8
大连	38.93°N	121.67°E	110.3	98.0	12.3	267.9	288.0	-20.1
营口	40.63°N	122.15°E	135.4	126.0	9.4	126.6	143.0	-16.4
威海	37.52°N	122.12°E	69.6	62.0	7.6	273.5	300.0	-26.5
鲅鱼圈	40.30°N	122.10°E	122.6	120.0	2.6	114.6	125.0	-10.4

注: 振幅差的绝对平均和均方差分别为 7.3 cm 和 8.5 cm; 迟角差的绝对平均和均方差分别为 13.1° 和 11.0°。

表3 不同底摩擦系数的模拟值与观测数据间差值的分布
Tab.3 Distribution of the difference between simulated and observed tidal harmonic constants of M₂ in response to different bottom friction coefficient

底摩擦系数	振幅差的绝对平均/cm		迟角差的绝对平均/(°)	
	验潮站	高度计	验潮站	高度计
0.001 3	8.6	6.1	11.7	8.1
0.001 4	7.8	5.7	11.4	7.4
0.001 5	7.4	5.3	11.2	6.7
0.001 6	7.7	5.2	11.1	5.3
0.001 7	7.7	4.9	11.4	4.9
0.001 8	7.5	4.5	12.0	4.9
0.001 9	7.4	4.2	12.5	4.8
0.002 0	7.3	4.0	13.1	4.8
底摩擦系数	振幅差的均方差/cm		迟角差的均方差/(°)	
	验潮站	高度计	验潮站	高度计
0.001 3	7.9	6.9	7.8	4.2
0.001 4	7.7	6.1	8.0	4.2
0.001 5	7.6	5.4	8.4	4.2
0.001 6	8.0	5.0	9.0	4.4
0.001 7	8.0	4.6	9.5	4.6
0.001 8	8.1	4.3	10.0	4.8
0.001 9	8.2	4.1	10.5	5.0
0.002 0	8.5	4.1	11.0	5.2

2.4 调和和分析时间的影响

在相同的底摩擦条件下,调和不同时间也会对模拟结果造成影响.表4为底摩擦系数为0.002时,调和和分析采用15天(17个分潮)、1月(29个分潮)和1年(59个分潮)的振幅、迟角模拟值与验潮站、高度计测量值对比,可以看出1月与1年的数据相差不大,均好于15天的数据结果.

表4 调和和分析时间对模拟值与观测数据间差值分布的影响
Tab.4 Effect of time span of harmonic analysis on distribution of the difference between simulated and observed tidal harmonic constants of M₂

调和和分析时间	振幅差的绝对平均/cm		迟角差的绝对平均/(°)	
	验潮站	高度计	验潮站	高度计
15天	8.2	4.4	15.3	5.1
1月	7.5	4.0	13.2	4.9
1年	7.3	4.0	13.1	4.8
调和和分析时间	振幅差的均方差/cm		迟角差的均方差/(°)	
	验潮站	高度计	验潮站	高度计
15天	8.9	4.8	11.5	5.2
1月	8.7	4.1	11.0	5.2
1年	8.5	4.1	11.0	5.2

图5为底摩擦系数为0.002时不同调和时间的M₂分潮同潮图.为便于分析,采用两点间距离D表征不同调和和分析时间间的区别(不同调和时间时同一点的数据差值),公式^[17-18]为

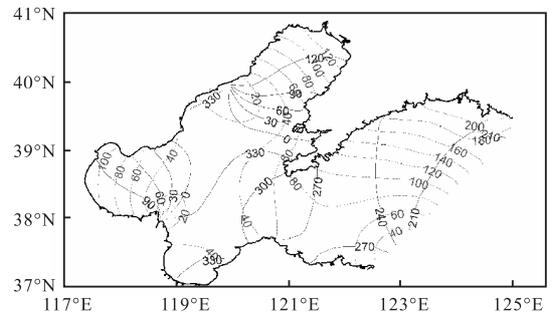
$$D = \sqrt{H_c^2 + H_s^2} \quad (2)$$

其中

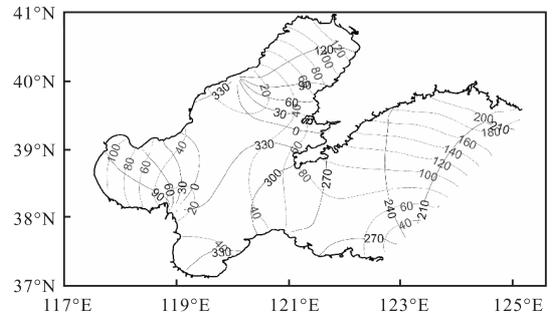
$$H_c = h_1 \cos g_1 - h_2 \cos g_2$$

$$H_s = h_1 \sin g_1 - h_2 \sin g_2$$

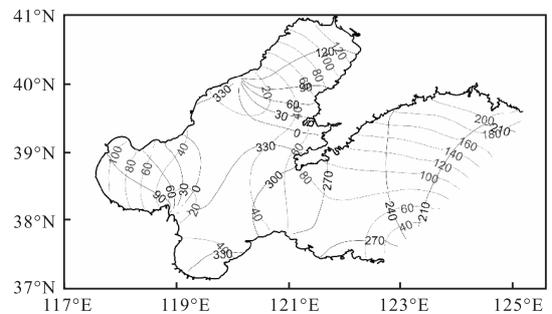
式中: h₁、h₂ 分别是两点的振幅; g₁、g₂ 分别是两点的迟角.



(a) 15天



(b) 1月



(c) 1年

图5 不同调和时间的渤海M₂分潮的同潮图

Fig.5 Co-tidal chart of M₂ tide in Bohai Sea with different time of harmonic analysis

表5给出了底摩擦系数为0.002时不同调和时间两点间距离的分布百分比.

表5 不同调和时间两点间距离的分布百分比 %

Tab.5 Distribution of the space length between different time span of harmonic analysis

调和时间	D ≤ 0.2 cm	D ≤ 0.5 cm	D ≤ 1.0 cm	D > 1.0 cm
a与b	0.0	0.0	0.0	100.0
a与c	0.0	0.0	0.0	100.0
b与c	38.7	96.8	96.8	3.2

注: a、b、c 分别表示调和时间为15天、1月和1年.

由表5可以看出,1月和1年调和与分析时间下的数据,两者间距分布集中于1cm以内(占总数的96.8%),而与15天调和与分析时间下的数据的间距均大于1cm(占总数的100.0%)。可知相同底摩擦系数条件下,调和与分析采用1月和1年的数据相差较小,均与15天的数据相差较大,从而建议调和与分析的时间最好不要少于1月。

3 结 论

采用FVCOM模型在不同底摩擦系数条件下对渤海潮波系统进行计算,并与实测值进行比较,结果表明:当底摩擦系数取0.002时整体模拟效果较好;并且在随着地形的改变,在海中区域模拟结果要好于近岸部分。底摩擦系数增加时,底摩擦对潮波传播的耗散也相对增大,使得整体海域振幅值相对减小,同时无潮点也向潮波传入方向左偏。

对相同底摩擦系数、不同调和时间的数据进行调和与分析的结果表明,调和与分析的时间最好不要少于1月,因为少于1月调和出分潮数量较少,导致结果精确度下降,模拟结果会相对较差。

参考文献:

- [1] 章卫胜. 中国近海潮波运动数值模拟[D]. 南京:河海大学,2005.
- [2] Liu Zhiyu, Wei Hao. Estimation to the turbulent kinetic energy dissipation rate and bottom shear stress in the tidal bottom boundary layer of the Yellow Sea[J]. *Progress in Nature Sciences*, 2007, 17(3): 289–297.
- [3] 叶安乐, 梅丽明. 渤黄东海潮波数值模拟[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(1): 63–69.
- [4] Doos K, Nycander J, Sigra P. Slope-dependent friction in a barotropic model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C1): 1–13.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 吕咸青, 方国洪. 渤海 M₂ 分潮的伴随模式数值实验[J]. *海洋学报*, 2002, 24(1): 17–24.
- [8] Lardner R W, Al-Rabeh A H, Gunay N. Optimal estimation of parameters for a two-dimensional hydrodynamical model of the Arabian Gulf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(C10): 18229–18242.
- [9] 张继才, 吕咸青. 空间分布底摩擦系数的伴随法反演研究[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(9): 1086–1093.
- [10] Heemink A W, Mouthaan E E A, Roest M R T, et al. Inverse 3 D shallow water flow modelling of the continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(3): 465–484.
- [11] 叶安乐, 李凤歧. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992.
- [12] 张凤焯, 魏泽勋, 王新怡, 等. 潮汐调和与分析方法的探讨[J]. *海洋科学*, 2011, 35(6): 68–75.
- [13] Chen Changsheng, Liu Hedong, Robert C. Beardsley. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159–186.
- [14] 曲大鹏. POM 海洋数值模式及对渤、黄、东海潮汐潮流模拟试验的初步分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
- [15] Zhang Jicai, Zhu Jianguo, Lü Xianqing. Numerical study on the bottom friction coefficient of the Bohai, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 23(6): 731–737.
- [16] 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.
- [17] 孙丽艳. 渤黄东海潮汐底摩擦系数的优化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [18] 孙丽艳, 吕咸青. 渤黄东海海底摩擦系数的研究(II)[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(增刊2): 49–54.

责任编辑: 常涛