文章编号:1002-3682(2016)01-0016-08

渤、黄、东海8个主要分潮的数值模拟研究^{*}

宋泽坤^{1,2},俞亮亮^{1,2*},向芸芸^{1,2},施伟勇^{1,2},许雪峰^{1,2},杨万康^{1,2},潘 冲^{1,2} (1.国家海洋局第二海洋研究所,浙江杭州 310012;2.工程海洋学重点实验室,浙江杭州 310012)

摘 要:应用 MIKE 数值模拟软件,采用无结构三角形网格,建立一套计算区域包括整个渤 海、黄海、东海以及东海大陆架和琉球群岛的高分辨率数值模型,考虑了实际水深和岸线,外 海开边界采用西北太平洋大模型结果的潮位提供,模拟了东中国海潮波的波动过程,对潮波 垂直运动过程进行调和分析,得到了渤海、黄海、东海的 M₂,S₂,K₁,O₁以及 N₂,K₂,P₁,Q₁八 个主要分潮的传播和分布特征。利用中国沿海 14 个潮位站的调和常数对模型结果进行了验 证,验证结果显示模型较为准确可靠。研究结果表明:4 个主要半日潮(全日潮)在渤、黄、东 海的传播情形基本相似,即潮波在渤海、黄海、东海沿岸的传播性质上类似沿岸开尔文波的传 播形态,并且成功再现了计算海域的 4 个半日分潮无潮点和 2 个全日分潮无潮点。全日潮振 幅各无潮点附近振幅最小,而海湾的波腹区振幅最大,东海潮差呈现近岸方向振幅大、离岸方 向振幅小,浙陶沿海振幅也较大,黄海振幅相对较小,渤海振幅在辽东湾和渤海湾顶最大,两 个无潮点周边振幅较小。

关键词:渤、黄、东海;湖汐;数值模拟;同湖图 中图分类号: P731.2 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2016.01.002

对渤海、黄海、东海的潮流潮汐研究最早是在 20 世纪 30 年代由 Ogura 基于实测资料 进行的^[1]。自 20 世纪 80 年代开始,随着计算机技术的发展和计算效率的进步,许多学者 采用数值模拟方法,将渤海、黄海、东海作为一个整体对象,对潮汐、潮流做了大量的研究, 并取得了丰富的成果。沈育疆等^[2]将渤、黄、东海作为一个整体,对 M₂,S₂,K₁,O₁四个主 要分潮进行数值模拟计算,绘制了东中国海的潮汐同潮图以及潮流椭圆图等。赵保仁 等^[3]和叶安乐等^[4]利用初值法,并综合考虑水平对流项和天体引潮力项,对渤、黄、东海的 潮汐进行了模拟;上述学者都是采用二维水平数值模式对潮流潮汐进行的研究,之后更多

* 收稿日期:2015-08-12

(王 燕 编辑)

资助项目:国家自然科学青年基金项目——土地资源约束下海岛系统的适应性管理研究(41506140);浙江省自然科学基金青年基金项目——基于机制分解方法的分汊型强潮海湾水沙输运及分汊系统稳定性研究——以三门湾为例(LQ16D060007);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项——海平面上升背景下浙江沿海工程水位的修正(JG1408);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项——典型海湾风暴潮数值预报与漫堤风险研究(JG1409)

作者简介:宋泽坤(1986-),男,工程师,硕士,主要从事河口海岸工程环境方面研究. E-mail:zekunsong@126. com

^{*} 通讯作者: 俞亮亮(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事河口海岸工程环境方面研究. E-mail: yuliangliang_nju@126. com

研究者采用三维数值模式。例如王凯等^[5]采用地球坐标系下的潮波运动方程,并考虑了 天体引潮力,对东中国海的潮波运动形式进行了数值模拟;于克俊等^[6]利用三维 Leedertse 正压模式对渤海的潮波进行模拟,并给出了潮波的垂向结构;万振文等^[7]利用 POM 数 值模式对渤、黄、东海的潮汐进行了三维模拟,取得了较为不错的结果。虽然之前学者取 得了丰富的研究成果,但过去总体因受限于计算机的运算性能,模型的计算网格较粗,且 多为矩形网格,所以对岸线和海底地形的分辨率不够高,对模拟精度有一定的影响;除此 之外,大部分学者只针对渤、黄、东海的4个主要分潮 M₂,S₂,K₁,O₁进行模拟,很少有对 其他4个次要分潮 N₂,K₂,P₁,Q₁做过研究。

为此,针对上述的问题,本文应用 MIKE 三维数值模拟软件,建立一套基于无结构三 角形网格的、高分辨率的模型,计算范围包括整个渤海、黄海、东海以及东海大陆架和琉球 群岛,运用沿海潮位站调和常数对模型计算结果进行验证,最后对计算结果进行调和分 析,绘制出包括 M₂,S₂,K₁,O₁以及 N₂,K₂,P₁,Q₁八个主要分潮的同潮图。另外,在一些 河口和近岸的局部工程小区域数学模型中,由于缺乏长期的实测潮位资料,小区域模型的 外海边界的选择往往困扰着一些河口海岸工程研究者。因此本工作主要为河口海岸局部 工程小区域模型提供准确可靠的外海开边界潮位条件,具有重要的实际意义。

1 模型的介绍及设置

利用 MIKE 数学模型^[8-10],采用无结构三角形网格,建立了一套区域包括渤、黄、东海 以及东海大陆架计算模型(图 1),计算网格水平方向南至 24°N,东至 131°30′E,最小网格 分辨率在 2′左右,在垂向上采用 σ 坐标系,垂向分为 10 层。模型水深下载自 National Geophysical Data Center 的全球 2′分辨率的资料,陆地岸线则取自 Google Earth。模型 外海开边界条件以潮位的形式由各个分潮潮位组合给出, $\zeta = a_{\zeta} \cos(\omega t + \varphi_{\zeta})$,其中 a_{ζ} 为分 潮振幅, φ_{ζ} 为分潮初位相,边界调和常数由西北太平洋大模型结果提供^[8-10]。模拟采用正 压,不考虑海表面风应力对潮位的影响。模拟了渤海、黄海、东海的 8 个主要分潮 M₂,S₂, K₁,O₁,N₂,K₂,P₁和 Q₁。待模型计算达到稳定后继续模拟计算一个月,而后采用最小二 乘法对潮位进行调和分析,得到 8 个分潮的调和常数最终绘制出各个分潮的同潮图。

2 模拟结果分析

2.1 结果验证

为了对模型模拟结果的准确性和精确度进行检验,本文利用渤、黄、东海的沿海潮位站 的调和常数资料对模拟所得 8 个分潮的调和常数进行验证。本研究选取了中国沿海 14 个 潮位站的调和常数,统计模拟值与实测值的振幅 RMS(H)和迟角的均方根差 RMS(G):

$$RMS(H) = \left[\frac{1}{K} \sum_{n=1}^{K} (H_{a,n} - H_{o,n})^2\right]^{1/2},$$
(1)

$$RMS(G) = \left[\frac{1}{K} \sum_{n=1}^{K} (G_{a,n} - G_{o,n})^2\right]^{1/2},$$
(2)

式中,H和G分别代表各个分潮调和常数的振幅和迟角;下标 a 和 o 分别代表模拟结果和实测结果;n 为第 n 个站位;K 则代表所统计的站位个数。验证潮位站位置见图 1,各个

海区的 8 个分潮误差统计结果见表 1。从误差统计结果来看,模型不仅可以较好地模拟 出渤海、黄海、东海的 4 个主要分潮,而且对其余 4 个次要分潮的模拟也达到了一定的精 度。M₂ 分潮振幅的均方根差中,东海的模拟振幅与观测结果偏差最大,为 13.9 cm,其次 为黄海,振幅偏差为 12.4 cm,渤海的振幅相对较小,其振幅偏差为 8.4 cm。渤海、黄海、 东海相位偏差分别为 6.7°,7.7°和 6.2°;S₂ 分潮中,渤海、黄海、东海振幅误差分别为 2.3, 4.5 和 5.5 cm,相位误差分别为 6.4°,8.8°和 5.1°;N₂ 分潮中,渤海、黄海、东海振幅误差 分别为 2.6,2.5 和 3.1 cm,相位误差分别为 7.2°,7.5°和 8.4°;K₂ 分潮中,渤海、黄海、东 海振幅误差分别为 2.5,2.0 和 2.4 cm,相位误差分别为 8.3°,9.7°和 8.5°;4 个全日潮中, K₁ 分潮的渤海、黄海、东海振幅误差分别为 1.5,1.9 和 4.1 cm,相位误差分别为 7.6°, 8.4°和 6.0°;O₁ 分潮的渤海、黄海、东海振幅误差分别为 0.6,1.6 和 1.8 cm,相位误差分 别为 5.9°,5.8°和 7.5°;P₁ 分潮的渤海、黄海、东海振幅误差分别为 1.2,0.7 和 0.9 cm,相 位误差分别为 10.1°,10.1°和 8.0°;Q₁ 分潮的渤海、黄海、东海振幅误差分别为 1.2,0.7 和 0.9 cm,相



Fig. 1 The domain of the model and the locations of the tide stations

表 1 各个分潮调和常数实测值与模拟比较

 Table 1
 Comparison between the measured harmonic constants of the tidal components and those calculated with the model

分潮	渤海(潮位站1~4)		黄海(潮位站 5~9)		东海(潮位站 10~14)	
	振幅/cm	相位/°	振幅/cm	相位/°	振幅/cm	相位/°
M_2	8.4	6.7	12.4	7.7	13.9	6.2
S_2	2.3	6.4	4.5	8.8	5.5	5.1
K_1	1.5	7.6	1.9	8.4	4.1	6.0
O_1	0.6	5.9	1.6	5.8	1.8	7.5
N_2	2.6	7.2	2.5	7.5	3.1	8.4
K_2	2.5	8.3	2.0	9.7	2.4	8.5
\mathbf{P}_1	1.2	10.1	0.7	10.1	0.9	8.0
\mathbf{Q}_1	0.5	9.5	0.4	12.7	0.5	9.7

潮波的传播过程和潮汐分布性质分别可以由潮汐同潮图的等振幅线和同潮时线反映 出来,其次,无潮点也是潮汐分布的一个重要特征。因此,下面本文结合模拟结果得出的 同潮图对半日潮和全日潮的潮波传播过程、潮汐性质以及无潮点进行详细分析。

2.2 半日潮模拟结果分析

模型成功地模拟出了半日分潮在渤、黄、东海的传播和分布特征,并根据计算结果绘制了4个半日分潮的同潮图(图2)。从半日潮波传播情况来看,4个主要半日潮在渤、黄、 东海的传播情形基本相似,即4个主要分潮的潮波系统大致相同。

来自西北太平洋的半日潮波基本以平行等深线方向向西北传入东海,在传播至三门 湾附近时同潮时线随即分为两条路径,呈八字形向南北两侧伸展,且波峰线明显突出。靠 近台湾东岸的一小部分半日潮波沿浙江、福建岸线向左旋转进入台湾海峡,形成"退化旋 转潮波系统"^[11]。而主要的一条半日潮波继续向西北方向传播进入东海北部,随后少部 分半日潮波经过对马海峡传向日本海,大部分进入黄海的前进波由于受山东半岛的阻挡 而产生反射、相互叠加、从而在连云港附近海域形成南黄海左旋(逆时针)的旋转潮波系 统。传播至黄海的半日潮波再往北在山东乳山外侧海域形成北黄海旋转潮波系统。然后 继续传播经过渤海海峡后进入渤海,又分别向北和向西分为两支继续传播,向北和向西两 支分别形成了北渤海旋转潮波系统和南渤海旋转潮波系统。经分析可知,由于科氏力在 北半球的作用各旋转潮波系统均呈左旋(逆时针)方向旋转。

从振幅的分布特征来看,各无潮点附近振幅最小,而海湾的波腹区振幅最大,如杭州 湾、三门湾、福建沿海、朝鲜半岛等都是振幅较大区域。东海潮差呈现近岸方向振幅大、离 岸方向振幅小;浙闽沿海振幅也较大;黄海振幅因无潮点向江苏和山东沿岸靠近使得山东 和江苏的黄海区域振幅相对较小;渤海振幅在辽东湾和渤海湾顶最大,2个无潮点周边振 幅较小。



图 2 M₂, S₂, N₂, K₂分潮同潮图



每个半日旋转潮波系统的中心都伴随着一个无潮点,各旋转潮波系统以及无潮点的 位置分布形成了渤海、黄海、东海的潮波系统主要特征。本研究成功模拟出渤、黄、东海的 4 个无潮点,渤海和黄海分别存在 2 个半日分潮的无潮点,无潮点位置见表 2。

表 2 半日分潮无潮点位置

Table 2	The positions	of the ampl	hidromic points	of the se	midiurnal tide	e components
---------	---------------	-------------	-----------------	-----------	----------------	--------------

无潮点位置	南黄海	北黄海	黄河口附近	秦皇岛附近
经度	121°24′06″E	123°09′30″E	118°56′54″E	119°51′48″E
纬度	34°44′30″N	37°32′06″N	38°08′48″N	39°54′48″N

2.3 全日潮模拟结果分析

第 35 卷

模型模拟出了全日分潮在渤、黄、东海的传播和分布特征,并根据计算结果绘制了4 个全日分潮的同潮图(图3)。由于全日潮的角频率为半日潮的一半,因而其传播和分布 特征与半日潮相比差别较大。从全日潮波传播的模拟结果来看,4个主要全日潮波在渤、 黄、东海的传播情形基本相似,西北太平洋全日潮波向西南方向传播进入东海后,部分潮 波继续向西南方向传播,经过台湾海峡以及台湾以东的海区进入南海;部分潮波则朝北传 播,在黄海中南部形成黄海旋转潮波系统;在渤海中部也形成一个旋转潮波系统。4个全 日潮波传播情形较为相似,但其分布特征以及振幅有着较大的区别。



Fig. 3 The cotidal charts of K_1 , O_1 , P_1 and Q_1 components predicted with the model

每个全日旋转潮波系统的中心都伴随着一个无潮点,本研究成功模拟出渤、黄、东海的2个无潮点,分别位于渤海中部(122°49′06″E,38°08′12″N)和黄海中南部(120°30′06″E,38°15′48″N)。

3 结 语

本文采用无结构三角形网格,考虑实际岸线和水深地形,建立了一套计算范围包括 渤、黄、东海以及东海大陆架计算模型,模拟了渤海、黄海、东海的8个主要分潮 M₂,S₂, K₁,O₁以及 N₂,K₂,P₁,Q₁。计算模型成功模拟出8个分潮在渤海、黄海、东海的传播和分 布特征。利用中国沿海14个潮位站的调和常数对模型结果进行了验证,验证结果显示模 型较为准确可靠。研究结果表明:4个主要半日潮(全日潮)在渤、黄、东海的传播情形基 本相似,即潮波在渤海、黄海、东海沿岸的传播性质上类似沿岸开尔文波的传播形态,并且 成功再现了计算海域的4个半日分潮无潮点和2个全日分潮无潮点,由于科氏力在北半 球作用的结果,各旋转潮波系统均呈左旋(逆时针)方向旋转。本研究得出的同潮图分布 与前人研究结果基本一致^[11-44]。模型模拟的结果可以为今后河口海岸局部小区域模型提 供准确可靠的外海开边界潮位条件。

本研究虽然成功模拟出渤海、黄海、东海的 8 个主要分潮的同潮时图,但是还存在一些不足,例如对近海潮汐的模拟计算除了模型本身的因素以外,水深地形的准确度、网格的分辨率、边条件等都是制约计算精度的因素。对于本研究来讲,下一步需要采用更加精确的水深资料以及边界条件来提高模型的计算精度和准确率。除此之外,本文只模拟了潮动力过程,对大洋的实际情况比如风应力、斜压梯度力、漫滩等小的动力因素未予考虑。因此本研究今后将综合考虑海洋动力因素对潮波的运动进行更加准确的模拟。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] 王凯,方国洪,冯士筰.渤海、黄海、东海 M₂ 潮汐潮流的三维数值模拟[J].海洋学报,1999,21(4): 1-13.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 宋泽坤,程和琴,胡浩,等.长江口北支滩涂围垦对水动力影响的数值模拟分析[J].人民长江, 2012,43(15):59-63.
- [9] 宋泽坤,程和琴,刘昌兴,等.长江口溢油数值模拟及对水源地影响[J].长江流域资源与环境, 2013,22(8):1055-1062.
- [10] 宋泽坤,王松,程和琴,等.长江口北支缩窄工程对水动力环境影响数值分析[J].人民长江,2014, 45(1):11-15.
- [11] 章卫胜.中国近海潮波运动数值模拟[D].南京:河海大学,2005.
- [12] 张衡,朱建荣,吴辉.东海黄海渤海 8 个主要分潮的数值模拟[J].华东师范大学学报(自然科学

22

版),2005,8(3):71-77.

[13] 王永刚,魏泽勋,方国洪,等.印度尼西亚海域潮波的数值研究[J].海洋学报,2014.36(3):1-8.

[14] 李磊,杜凌,左军成,等. 渤、黄、东海 M₂和 K₁ 分潮潮流场的有限元模拟[J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版),2006,36(6):851-858.

A Numerical Simulation Study on Eight Major Tidal Components in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea

SONG Ze-kun^{1,2}, YU Liang-liang^{1,2}, XIANG Yun-yun^{1,2}, SHI Wei-yong^{1,2}, XU Xue-feng^{1,2}, YANG Wan-kang^{1,2}, PAN Chong^{1,2}

The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 300012, China;
 Key Laboratory of Engineering Oceanography, Hangzhou 300012, China)

Abstract: A high resolution grid model is established for the calculated areas including the Bohai Sea, the Yellow Sea, the East China Sea, the East China Sea continental shelf and the Ryukyu Islands by using the MIKE software and a nonstructural triangular mesh, in which the actual water depth and shoreline are considered and the open boundary is resulted from the comprehensive Northwest Pacific tidal model. Based on this model, the tidal wave processes in the China seas are simulated, a harmonic analysis is made for the vertical motion processes of the tidal waves and thus the propagation and distribution characteristics of eight tidal components like M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , P_1 and Q_1 in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea are obtained. The results from the model have been validated by using the harmonic constants of 14 tide stations located along the coast of China, indicating that the model is more accurate and reliable. The research results show that the propagation of the 4 major semidiurnal tides (also the diurnal tides) are similar in the above seas, that means, the propagation property of the tidal waves along the coasts of the above seas is similar to that of the coastal Kelvin Wave. Moreover, 4 amphidromic points of the semidiurnal tide component and 2 amphidromic points of the diurnal tide component in the calculated areas are reproduced successfully. The diurnal tidal amplitude is minimal around the amphidromic points and maximal at the free zone of the bay. The tidal range amplitude is large towards the coast and small towards the sea in the East China Sea. It is large along the coasts of Zhejiang and Fujian and relatively small in the Yellow Sea. In the Bohai Sea, it is maximal at the tops of the Bohai Bay and the Liaodong Bay and smaller in the area around the two amphidromic points of the diurnal tide component.

Key words: the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea; tide; numerical simulation; cotidal chart