

# ADCIRC模式在渤海M2分潮模拟中的应用研究

陈海军<sup>1</sup>, 姜绍材<sup>2</sup>, 王飞<sup>3</sup>

(1. 辽宁省海洋环境预报总站, 辽宁 沈阳 110001; 2. 国家海洋局北海海洋环境监测中心站, 广西 北海 536000;  
3. 辽宁省海洋与渔业厅信息中心, 辽宁 沈阳 110001)

**摘 要:**利用有限元方法的ADCIRC(Advanced Circulation Model)海洋模式,建立了渤海高分辨率的二维潮汐潮流模型,模式结果与实测资料吻合良好。模式成功模拟出了M2分潮在渤海的2个无潮点和3个圆流点,位置与前人的研究结果基本一致。M2分潮流在渤海中央为顺时针旋转的旋转流,在辽东湾、渤海湾和莱州湾基本为往复流。M2分潮的潮汐和潮流的振幅都表现为辽东湾最大,莱州湾最小。M2分潮的潮致余流主要表现在近岸和岛屿附近,最大可达10 cm/s。

**关键词:**ADCIRC; 渤海; M2分潮

**中图分类号:**P731 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2011)04-0070-06

## 1 引言

随着计算机的发展,数值模拟在海洋科学的研究中发挥着越来越重要的作用。有结构网格的数值模式在模拟岸线复杂的区域时会有很大限制,非结构网格的海洋模式由于其能很好的拟合岸线,并且能够在关心的区域灵活加密而越来越多的被用于近海和河口的数值模拟,因此,本文采用计算网格为三角形的ADCIRC<sup>[1]</sup>(Advanced Circulation Model)海洋模式来研究渤海M2分潮的传播特征。

ADCIRC(Advanced Circulation Model)是美国北卡罗来纳州大学开发的有限元海洋模式,该模式可以采用笛卡尔坐标,也可以采用球坐标,有二维和三维两种运行方式。该模式采用三角形网格,易于拟合边界,可以对岸线复杂的海域进行高分辨率的数值模拟。目前国内利用ADCIRC模式进行的研究工作还不是很多,比较有代表的是夏波<sup>[2]</sup>利用ADCIRC在渤海进行了风暴潮的数值模拟,曹永华等<sup>[3]</sup>利用该模式研究了黄骅港的二维流场。

专门针对渤海的潮汐潮流数值模拟,前人已经做了很多工作,如黄祖珂<sup>[4]</sup>利用根据二维非线性潮波微分方程模拟了渤海几个主要分潮的潮汐余流;吕咸青等<sup>[5]</sup>利用伴随模式模拟了渤海的M2分潮。本文利用ADCIRC模式,对渤海的M2潮波进行高分辨率的模拟,并且比较系统地研究了M2潮波在渤海的各种传播特征,对于进一步认识M2潮波在渤海的传播情况具有重要意义。

## 2 模式设置

本文的计算区域为渤海海域,该区域的水深场见图1,由图1可以看出,地形变化剧烈的地方都集中在近岸和岛屿附近,因此本文在形成计算网格时对近岸和岛屿附近进行了加密,模式的分辨率由渤海中央的5'逐渐过渡到近岸的1'。最后采用的计算网格见图2,本计算网格一共包含了三角形网格节点10100个,三角形单元18742个。本文采用的是二维球坐标系,边界上采用M2分潮的调和常数预报的水位来作为驱动,边界上M2分潮的调和常数来自NAO99潮汐模型<sup>[6]</sup>,该模型将5年的T/P卫星海面高度计资料和219个沿岸的潮汐观测

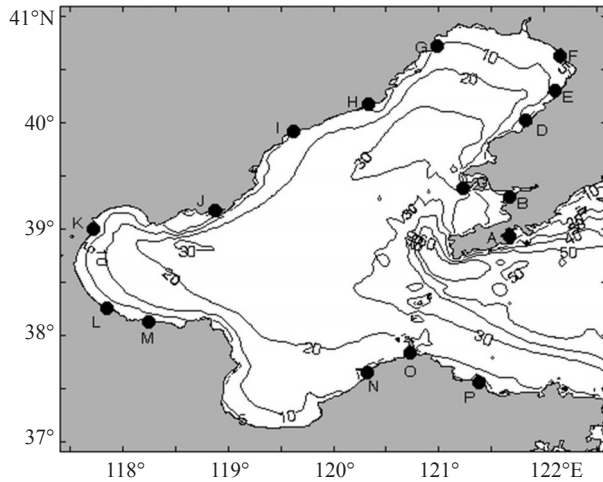


图1 渤海水深和观测站点分布

资料同化到水动力模型中,其模型区域分为全球和日本周边两部分,我们采用的是NAO99日本周边区域的潮汐模型结果。全场底摩擦系数均取为0.0014,模式时间步长为60 s,一共运行7天,采用后4天的数据进行调和分析,得到了全场M2分潮的潮汐潮流调和常数。

### 3 模式验证

为了验证模式的计算结果,我们搜集了渤海沿岸16个验潮站(见图1)的调和常数,与我们的模

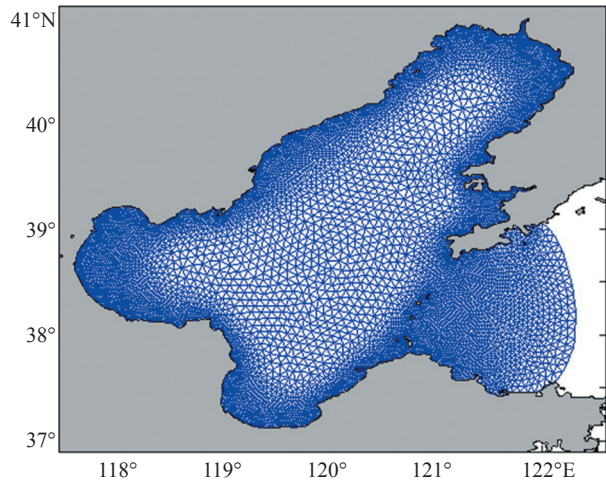


图2 模式计算网格

式结果进行对比,对比结果见表1。

从表1可以看出,模式结果与实测结果吻合良好,可以用来进一步分析M2分潮在渤海的传播情况。误差的主要来源可能有以下几种情况:第一,岸线以及地形的精度不够高,尤其是在近岸区域,可能会引起比较大的误差;第二,边界条件上采用的M2分潮的调和常数的误差,也会影响计算结果;第三,全场采用一致的底摩擦系数,不是很合理,也会造成计算结果的误差。以后的工作会从以上三方面入手,同时搜集更多海上观测数据,与模型进行对比,将结果模拟的更准确。

表1 调和常数的计算值与实测值的比较

岸边验潮站	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
A. 大连	38.93°N, 121.67°E	105.7	98.0	7.7	288.65	288	0.65
B. 长山岛	39.30°N, 121.67°E	61.7	65.0	-3.3	21.4	23.6	-2.2
C. 西长岛	39.38°N, 121.23°E	43.3	47.0	-3.7	36.4	29.0	7.4
D. 太平角	40.03°N, 121.83°E	100.4	89.0	11.4	117.8	111.0	6.8
E. 鲅鱼圈	40.30°N, 122.10°E	124.9	120.0	4.9	126.8	125.0	1.8
F. 营口	40.63°N, 122.15°E	142.1	129.0	13.1	136.9	143.0	-6.1
G. 葫芦岛	40.72°N, 122.98°E	113.5	96.0	17.5	152.5	150.0	2.5
H. 娘娘庙	40.18°N, 120.33°E	31.6	25.0	6.6	168.4	162.0	6.4
I. 秦皇岛	39.92°N, 119.62°E	10.6	11.0	-0.4	286.4	311.0	-24.65
J. 大清河	39.17°N, 118.87°E	52.1	45.9	6.2	28.2	55.7	-27.5
K. 塘沽	39.00°N, 117.72°E	114.5	117.0	-3.5	80	90.9	-10.9
L. 大口河	38.25°N, 117.85°E	108.8	112.0	-3.2	98.3	109.0	-10.7
M. 洼拉沟	38.13°N, 118.25°E	83.9	84.0	-0.1	102.7	127.0	-24.3
N. 龙口	37.65°N, 120.32°E	33.2	40.0	-6.8	305.6	316.0	-10.4
O. 蓬莱	37.83°N, 120.73°E	48.9	53.0	-4.1	287.6	292.0	-4.4
P. 烟台	37.55°N, 121.38°E	80.0	76.0	4	296.3	290.0	6.3
近岸验潮站个数: 16		振幅差的平均值: 2.9			迟角差的平均值: -5.6		
		振幅差的绝对平均: 6.0			迟角差的绝对平均: 9.6		

## 4 模式结果分析

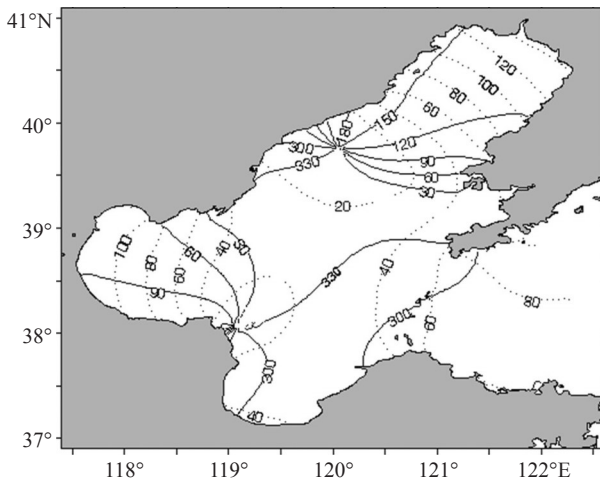
### 4.1 M2分潮潮汐结果分析

根据计算结果,进行调和分析,得到了渤海的M2分潮的同潮图(见图3),由图3可以看出,模式成功模拟出了M2分潮在渤海的两个无潮点,一个位于秦皇岛外海,一个位于老黄河口附近,M2分潮波绕着这两个无潮点逆时针旋转。本文模拟出的无潮点位置与前人的计算结果对比见表2:

表2 渤海M2分潮无潮点位置

分潮	无潮点位置	作者	无潮点经纬度
M2分潮	秦皇岛附近	沈育疆 <sup>[7]</sup>	39.87°N, 120.25°E
		小仓伸吉 <sup>[7]</sup>	39.92°N, 120.17°E
		鲍利斯 <sup>[7]</sup>	39.75°N, 120.50°E
		方国洪 <sup>[8]</sup>	39.67°N, 120.17°E
	老黄河口	本文	39.75°N, 120.07°E
		沈育疆 <sup>[7]</sup>	38.37°N, 119.33°E
		小仓伸吉 <sup>[7]</sup>	38.33°N, 119.00°E
		鲍利斯 <sup>[7]</sup>	38.33°N, 119.17°E
		方国洪 <sup>[8]</sup>	38.08°N, 119.00°E
		本文	38.07°N, 119.08°E

由表2可以看出,本文得出的M2分潮在渤海的无潮点位置与方国洪的结果最为接近。同时由图3可以看出,M2分潮的等振幅线分别由渤海湾、辽东湾和莱州湾的湾口向湾顶逐渐增加。相比较而言,辽东湾的振幅最大,渤海湾次之,莱州湾最小。



实线为同迟角线,虚线为等振幅线

图3 M2分潮同潮图

### 4.2 M2分潮潮流结果分析

在本节,文章将分别从M2分潮的潮流椭圆要素、圆流点及潮致余流等方面来讨论M2分潮在渤海的潮流特征。

#### 4.2.1 M2分潮在渤海的潮流椭圆要素

M2分潮在渤海的潮流椭圆及潮流的旋转率分布分别见图4和图5。由图5可知,M2分潮潮流的旋转率在渤海中央最大,可达-0.8,同样,在图4中渤海中央的潮流椭圆已经很接近一个圆,因此,M2分潮流在渤海中央为顺时针旋转的旋转流。图5中,辽东湾和渤海湾的湾口各有一条旋转率为0的等值线,除了辽东湾和渤海湾的湾顶,整个辽东湾和渤海湾的旋转率几乎为0,同样,图4中辽东湾和渤海湾的潮流椭圆图也几乎为直线,因此在辽东湾和渤海湾,M2分潮流主要为往复流,方向大体为:渤海湾为东-西向,辽东湾为西南-东北向。莱州湾内龙口市西侧有一旋转率极大值大约在-0.8附近,潮流方向按顺时针旋转,莱州湾的其他区域旋转率比较小,大体在-0.2—0.2之间,基本为往复流。M2分潮的最大可能潮流等振幅线见图6,最大可能潮流等振幅线的变化趋势与潮汐的等振幅线变化趋势相反,表现为由辽东湾、渤海湾和莱州湾的湾口向湾顶逐渐减小。相比较而言,辽东湾的M2分潮流最大,渤海湾次之,莱州湾最小。

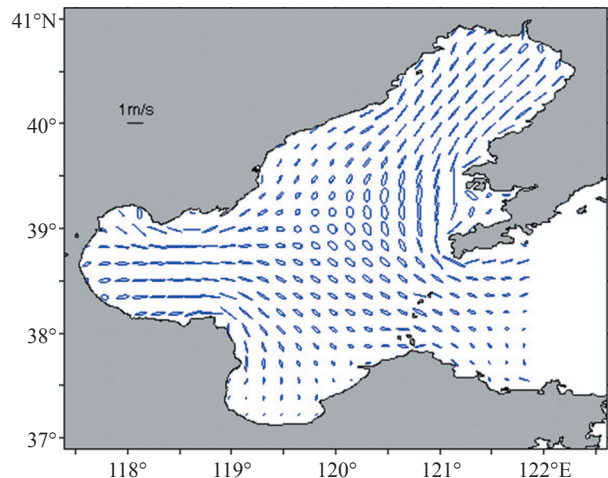


图4 潮流椭圆分布图



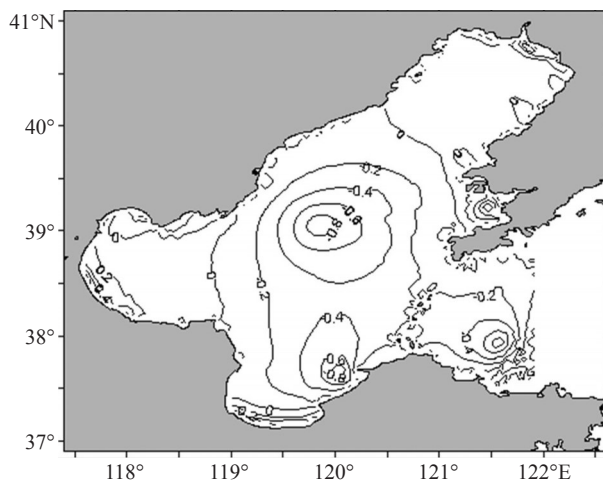


图5 M2分潮旋转率分布图

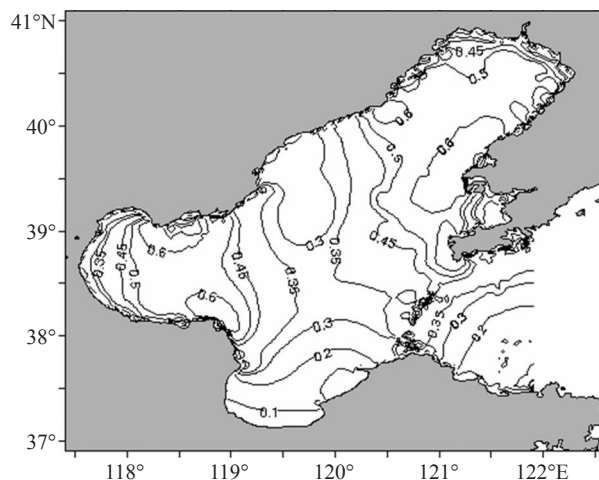


图6 M2分潮最大可能潮流振幅分布

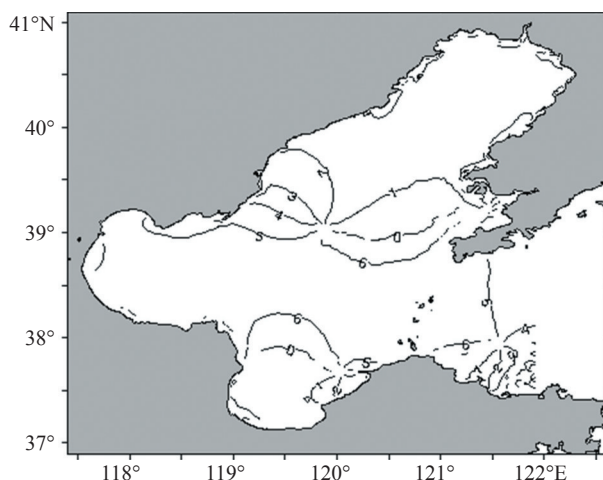


图7 M2分潮最大潮流同潮时线图

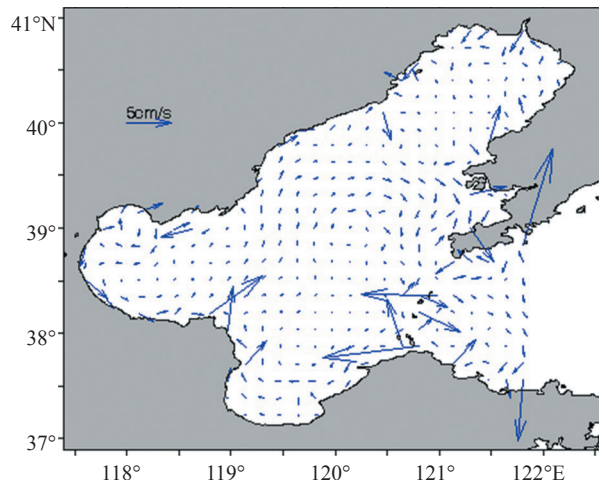


图8 潮汐余流场分布

#### 4.2.2 M2分潮在渤海的圆流点

图7是M2分潮的最大潮流同潮时图,由图7可以看出,模式成功模拟出了M2分潮在渤海的三个圆流点。同潮流时线绕圆流点旋转,旋转方向为逆时针。本文模拟出的无潮点位置与前人的计算结果对比见表3。

由表3可以看出,在秦皇岛附近的圆流点位置,本文计算结果同FANG、赵保仁等和万振文等的结果比较一致,在莱州湾口的圆流点位置,本文更接近FANG的结果。在山东半岛北部,对于圆流点的个数,不同的学者得出的结论不一样,本文可能是受计算区域的限制,只算出了一个圆流点,该位置与赵保仁等的计算结果中的一个比较

接近。此外,通过对比图7与图5可以发现,圆流点的位置,都基本对应着旋转率的极大值。

#### 4.2.3 M2分潮在渤海的潮致余流

潮致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,一部分周期性能量变成了非周期的能量。本文对模式输出的一个M2周期的潮流数据进行平均,剔除周期性信号,得到了渤海的M2分潮的潮致余流分布,如图8所示。由图8可以看出,M2分潮的余流在渤海普遍比较小,余流主要在近岸和岛屿附近比较明显,最大值大约在10 cm/s左右。渤海中央有一个顺时针旋转的余流,但是量级比较小,大约在2 cm/s,这与赵保仁<sup>[4]</sup>的结果比较一致。

表 3 渤海 M2 分潮圆流点位置

分潮	圆流点位置	作者	圆流点经纬度
M2 分潮	秦皇岛附近	FANG <sup>[8]</sup>	39.08°N, 120.0°E
		陈国珍 <sup>[9]</sup>	约 39.33°N, 119.33°E
		赵保仁等 <sup>[10]</sup>	约 39.08°N, 120.00°E
		万振文等 <sup>[11]</sup>	约 39.08°N, 120.00°E
		王凯等 <sup>[12]</sup>	39.22°N, 119.95°E
		林琿等 <sup>[13]</sup>	约 39.08°N, 120.00°E
		本文	约 39.02°N, 119.87°E
	莱州湾口	FANG <sup>[8]</sup>	37.75°N, 119.83°E
		陈国珍 <sup>[9]</sup>	约 37.92°N, 120.00°E
		赵保仁等 <sup>[10]</sup>	约 37.83°N, 119.08°E
		王凯等 <sup>[12]</sup>	37.02°N, 119.9°E
		本文	约 37.66°N, 120.05°E
	山东半岛北部	FANG <sup>[8]</sup>	37.75°N, 121.67°E
		陈国珍 <sup>[9]</sup>	约 37.92°N, 121.50°E
		赵保仁等 <sup>[10]</sup>	约 37.92°N, 121.5°E 约 38.02°N, 122.25°E
		万振文等 <sup>[11]</sup>	约 37.92°N, 121.83°E 约 38.00°N, 122.25°E
		王凯等 <sup>[12]</sup>	38.02°N, 119.90°E 38.07°N, 121.60°E
		林琿等 <sup>[13]</sup>	约 38.08°N, 121.5°E 38.17°N, 122.33°E
		本文	37.92°N, 121.57°E

5 结 论

ADCIRC 的模拟和实测结果的对比表明, 该模式可以很好地刻画渤海的潮汐潮流现象。模式成功地模拟出了 M2 分潮在渤海的两个无潮点和 3 个圆流点, 位置与前人的结果基本一致。对模式结果分析发现: M2 分潮的振幅在辽东湾最大, 渤海湾次之, 莱州湾最小, 分布规律都是由湾口向湾顶逐渐增大; 渤海的中央为顺时针旋转流, 旋转率可达-0.8, 辽东湾、渤海湾和莱州湾内主要为往复流, 旋转率在 0 附近; 最大可能潮流等振幅线的变化趋势与潮汐的等振幅线变化趋势相反, 表现为由辽东湾、渤海湾和莱州湾的湾口向湾顶逐渐减小, 潮流的强弱同样是辽东湾最强, 莱州湾最弱。M2 分潮的潮致余流主要在近岸比较明显, 最大可达 10 cm/s。

参考文献:

[1] Luettich R, Westerrink J. ADCIRC user manual:a(parallel) advanced circulation model for oceanic[R]. Coastal and Estuarine Water, 2006.

[2] 夏波. 风暴潮过程中的波流耦合数值模式研究[D]. 天津大学, 2005.

[3] 曹永华. 黄骅港海域二维流场分析[J]. 中国港湾建设, 2005, 3: 1-4.

[4] 黄祖珂. 渤海的潮汐余流[J]. 海洋湖沼通报, 1992, 3: 1-8.

[5] 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.

[6] Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan[J]. Journal of Oceanography, 2000, 56: 567-581.

[7] 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): 28-35.

[8] Fang G. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1986, 4(1): 1-16.

- [9] 陈国珍.渤、黄、东海海洋图集(水文分册)[M].北京:海洋出版社,1992.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王凯,方国洪,冯士侗.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.
- [13] 林琿,闰国年,宋志尧等.东中国海潮波系统与海岸演变模拟研究[M].北京:科学出版社,2000.

## Application of ADCIRC in M2 tide modeling in the Bohai Sea

CHEN Hai-jun<sup>1</sup>, JIANG Shao-cai<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>3</sup>

(1. Marine Environmental Forecasting Central Station of Liaoning Province, Shenyang 110001, China; 2. Beihai Environmental Monitoring Station of State Oceanic Administration, Beihai 536000, China; 3. Ocean and Fishery Department of Liaoning Province Information Center, Shenyang 110001, China)

**Abstract:** With the application of ADCIRC, a high resolution of two-dimensional tidal model in the Bohai Sea was built up, and the model results are conformable to the field observations. Two amphidromic points and three tidal current non-phase points for M2 tide were successfully modeled, whose positions were basically conformable to the previous studies. The style of the M2 tidal current is rotary current in the middle of the Bohai Sea, while rectilinear current in the Liaodong, Bohai and Laizhou Bay. The amplitude of the M2 tide and tidal current are largest in the Liaodong Bay, while smallest in the Laizhou Bay. The M2 tidal reduced residual current is only evident along the coastal region and at the area near the islands, which can reach as much as 10 cm/s.

**Key words:** ADCIRC; Bohai Sea; M2 tide