

渤海岸线及水深变化对水动力影响的数值模拟

董娇娇¹, 孙 健², 陈燕珍³, 刘长根^{1*}, 马慧敏¹, 刘春宏¹

(1. 天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300350; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
3. 国家海洋局 天津海洋环境监测中心站, 天津 300457)

摘 要: 为探究渤海岸线及水深变化对水动力的影响, 基于 Delft3D 水动力学模型, 选用 2003 年和 2015 年作为围填海前后的典型年份, 建立了围填海前后岸线及水深条件下的渤海三维水动力模型, 并对水动力场进行了模拟。通过对围填海前后潮波和潮余流的分析, 得到了岸线及水深变化对渤海水动力场的影响。结果表明: 填海后, 岸线及水深变化会对渤海主导分潮 M_2 分潮产生较大影响, 秦皇岛附近无潮点向西北方向偏移, 渤海海域 M_2 分潮振幅总体减小; 潮致余流场受岸线及水深变化影响较大, 其中渤海湾曹妃甸港南部形成复杂的涡流, 沿岸海域余流增大; 滨海新区附近形成多个小范围环流, 且天津港到黄骅港北部沿海岸域 2015 年余流比 2003 年增加 3~5 cm/s; 黄骅港南部形成一个逆时针环流, 并且该处余流减小 2~5 cm/s。辽东湾辽河口附近由于水深增加导致余流减小 2~7 cm/s。莱州湾黄河口附近的逆时针环流向东南方向移动, 黄河口北部余流略有减小, 东南部余流明显增大, 增加量最多能达到 9 cm/s。刁龙嘴南侧顺时针环流减小, 北侧顺时针环流增大 4~9 cm/s。

关键词: 渤海; 岸线变化; 水深变化; 潮余流; 潮波

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)04-0676-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.011

引用格式: DONG J J, SUN J, CHEN Y Z, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics affected by coastline and bathymetry changes in the Bohai Sea[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 676-687. 董娇娇, 孙健, 陈燕珍, 等. 渤海岸线及水深变化对水动力影响的数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 676-687.

渤海是中国的内海, 主要由北部辽东湾、西部渤海湾、南部莱州湾、渤海海峡和中央浅海盆地组成, 总面积约 7.7 万 km^2 , 平均水深 18 m。随着环渤海经济圈的发展, 近 20 a 来, 大规模的围海造地工程在渤海沿岸推进, 渤海的几个主要港区如渤海湾西部的天津港、北部的曹妃甸港、西南部黄骅港和莱州湾的山东港等多是在淤泥质浅滩上吹填造陆建成的人工港。

一方面, 大规模的围海造地会缓解日益增加的人口数量与土地不足之间的矛盾, 推动沿岸城市经济的发展; 另一方面, 急剧缩减的自然岸线, 随时间改变的水深会对渤海的水动力场产生影响, 使得水交换能力更差, 污染物停留时间更长, 造成渤海海域内水质恶化, 不利于经济可持续性发展。许多学者^[1-4]就渤海的岸线和水深变化及其产生的影响展开了深入研究。孙百顺等^[1]利用遥感和地理信息系统研究了近 40 a 来渤海湾岸线的变化过程并分析了变化因素, 结果表明, 岸线变化的主要原因是围填海工程和港口建设, 变化主要集中于曹妃甸港区、天津港和黄骅港。Zhu 等^[2]利用 MIKE3 模型建立了渤海和黄海的三维潮流模型, 对渤海和黄海潮波系统进行了模拟, 结果表明, 1987—2016 年岸线及地形的变化对半日潮幅值的影响大于对全日潮的影响, 岸线变化引起的半日潮幅值变化占幅值总变化的 27.76%~99.07%, 水深变化引起的半日潮幅值变化占幅值总变化的 0.93%~72.24%。李秉天等^[3]基于 FVCOM 模型, 分别使用 1972 年和 2002 年的岸

收稿日期: 2019-06-10

资助项目: 国家重点研发计划项目——网箱养殖对底栖生态环境的影响与修复机制(2018YFD0900704); 国家重点研发计划项目——大型水库对河流-河口系统生物地球化学过程和物质运输的影响机制(2016YFA0600901); 天津大学自主创新基金项目——天津-海南海洋牧场流场特性及人工鱼礁对流场影响的对比分析(2020XZC-0097)

作者简介: 董娇娇(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋科学方面研究。E-mail: rebecca@tju.edu.cn

* **通信作者:** 刘长根(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事水动力及水环境方面研究。E-mail: lchg@tju.edu.cn

(王 燕 编辑)

线及地形对渤海的 4 个主要分潮(M_2 , S_2 , K_1 和 O_1)进行模拟,研究了岸线及地形对主要分潮的影响,发现渤海岸线及地形变化已明显影响到潮波系统;渤海湾湾顶潮波振幅明显减弱。

潮余流在水交换及海水中物质的输运方面发挥着极其重要的作用^[4]。研究水深及岸线对潮余流的影响可以帮助我们更深入地了解污染物输移扩散规律的变化情况。在渤海的潮余流方面,已有学者^[6-7]做了大量的研究工作,如 Wei^[6]基于 HAMSOM 模拟了渤海湾潮致拉格朗日余流和欧拉余流,发现拉格朗日余流沿南岸流入渤海湾,在黄河口附近形成泥沙的沉积,这与实际观测结果一致。秦延文等^[7]研究了 2003—2011 年渤海湾岸线变化对近岸海域水质的影响,研究表明,由于岸线改变导致的水动力变化致使渤海湾主要污染物的高值区向渤海湾东北方向偏移。

目前,关于岸线及水深变化对水动力的影响研究多限于渤海湾内,对莱州湾、辽东湾两个海湾的关注较少。本文将通过对比 2003 年和 2015 年渤海岸线及水深的变化,分析岸线及水深的改变对渤海潮波和潮余流场的影响,进而探讨水动力场的变化,以期为进一步研究渤海污染物输移扩散规律及计算渤海环境容量提供科学依据。

1 渤海三维水动力模型

1.1 模型简介

Delft3D 是由荷兰 Delft 大学 WL Delft Hydraulics 开发的一种开源的三维有限差分软件,是目前国际上最先进的三维水动力及水质模型之一。该模型的水动力模块(Delft3D-FLOW)在 Boussinesq 假设下求解不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程,通过交替方向隐格式(Alternating Direction Implicit, ADI)方法对控制方程进行离散求解。该模型水平方向采用正交曲线网格,垂向采用 Sigma 坐标,其计算稳定且精度高,可以很好地贴合复杂的地形和自由表面。

1.2 岸线的变化

选用的 2003 年岸线和水深取自海军司令部航保部 2003 年渤海湾纸质版海图^[9],经数字化仪采集等深线和散点完成;选用的 2015 年岸线和水深取自海军司令部航保部电子海图:C1311500 辽东湾海图、C1311800 歧河口至龙口港海图、C1311300 外长山列岛至复州湾海图、C1311700 秦皇岛港至歧河口海图、C1311900 大连港至烟台港海图和 C1411910 渤海海峡海图,对六幅海图进行拼接,利用 Arcgis 提取等深线和散点。根据渤海周围各验潮站的水深基准面与 1985 国家高程基准面之间的关系将渤海水深统一到 1985 国家高程基准面。处理得到围填海前后,即 2003 年和 2015 年的岸线及水深,其中岸线如图 1 所示。

2003 年至 2015 年期间渤海海域累计填海面积达到 1 806.91 km²^[9]。其中,渤海湾天津滨海新区累计填海造地面积约 320 km²,河北曹妃甸区域完成填海造地 210 km²,黄骅港沿岸陆域面积增长约 75.6 km²^[10],人工岸线增长 551 km^[1]。辽东湾围填海面积约 360 km²,辽宁省人工岸线增长 499 km^[11]。莱州湾围填海面积 371.46 km²^[12],人工岸线增长 135.1 km。随着围填海面积的增加,沿岸生态环境问题愈发严重,因而国家逐步叫停新增围填海工程。

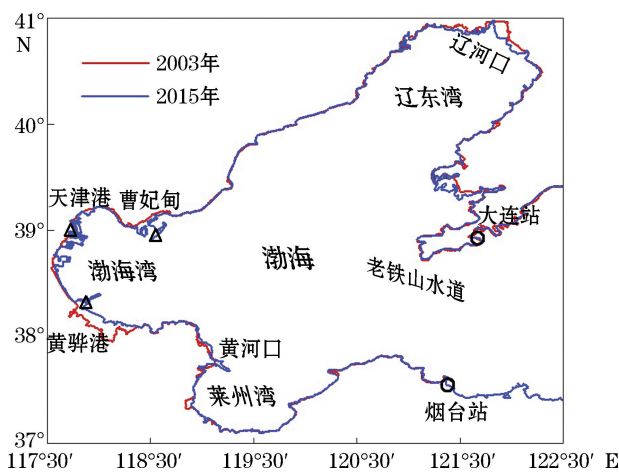


图 1 2003 年和 2015 年岸线对比

Fig.1 Shoreline comparison in 2003 and 2015

1.3 水深的变化

2003 年和 2015 年水深分别如图 2 a 和图 2 b 所示,将 2015 年的水深值减去 2003 年的水深值得到的水深差值如图 2c 所示,水深差为负值表示 2015 年与 2003 年相比水深变浅,地形有所抬升。由图 2 c 可知,2015 年与 2003 年相比,水深变化较大处位于天津港附近、曹妃甸南部、黄骅港附近、辽河口及黄河口处。天津港附近海域因建设用地进行围填海^[13],导致海域面积明显减小;曹妃甸南部深槽处于冲刷环境中,冲淤速率较大^[14],导致深槽西南部水深增加约 2 m;由于填海造地工程,黄骅港东部浅滩被填成陆地;辽东湾辽河口附近受河口三角洲冲淤的影响^[15],水深增加 1~2 m;莱州湾黄河口附近由于黄河三角洲的迁移变化,泥沙淤积,水深减少 4~6 m。

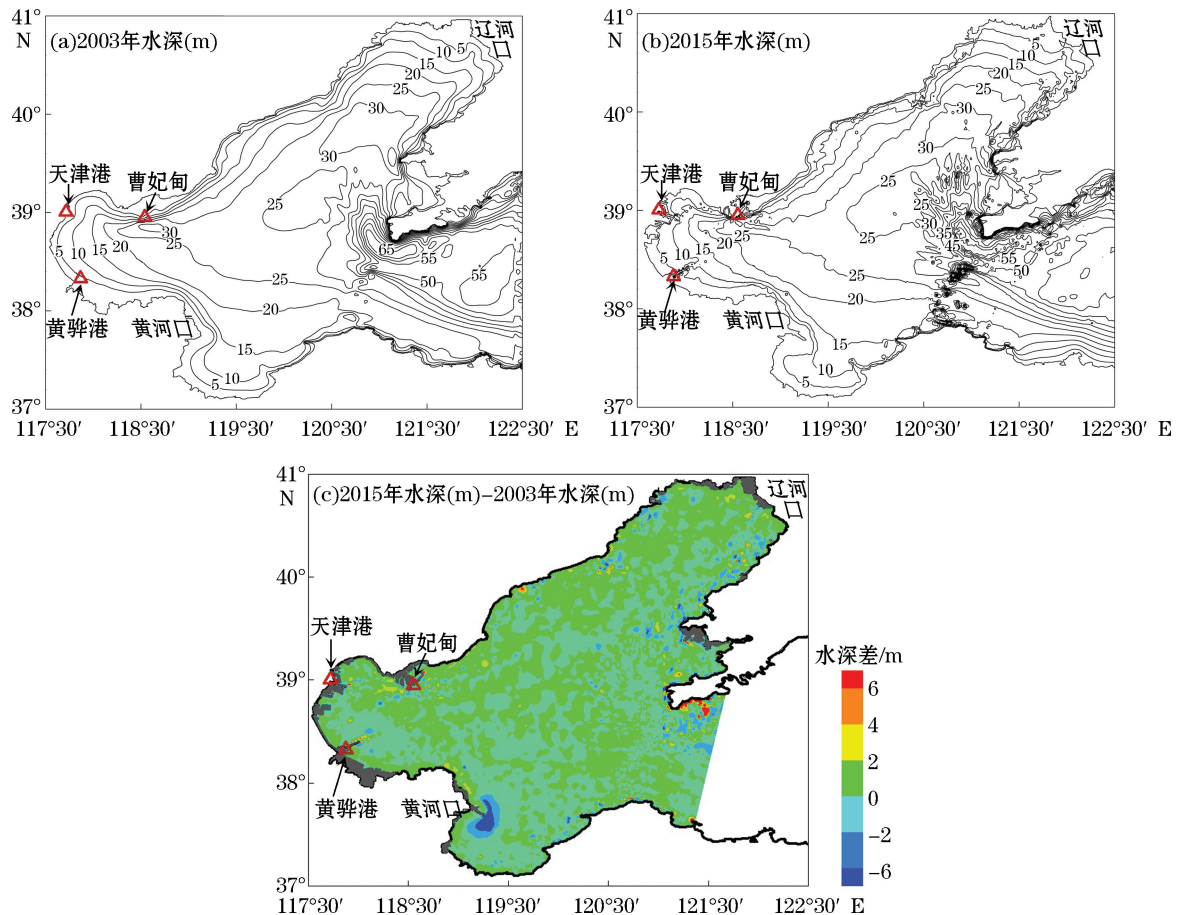


图 2 2003 年和 2015 年水深及二者的差值

Fig.2 Bathymetry in 2003 and 2015 and their difference

1.4 模型计算配置

分别构建 2003 年和 2015 年岸线与水深条件下的水动力模型,以大连 (121°39'E, 39°56'N) 与烟台 (121°23'E, 37°33'N) 连线为边界以西的整个渤海海域作为模型计算区域。模型水平方向,使用 Delft3D 自带的 RGFRID 网格模块生成正交网格;垂向,采用 Sigma 坐标均匀地分为 10 层,计算时间步长为 5 min。为更好地研究岸线变化最大的渤海湾水动力的变化情况,在渤海湾地区局部加密,使得最小网格分辨率约为 300 m,进而分辨天津港附近复杂岸线。2003 年和 2015 年模型水平方向网格数分别为 483 个×386 个和 483 个×384 个。

模型开边界设置在大连和烟台两个验潮站的连线,为天文潮驱动的水位开边界,给定大连和烟台两个站长期观测所得 8 个主要天文分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , P_1 , K_2 , Q_1 和 N_2)的调和常数,合成潮位作为边界驱动。模型计算采用冷启动,域内水位和流速初始值均设为零。模型运行时间为一年。

1.5 模型验证

利用天津大学力学系计算流体力学课题组现场观测的 2003-07-13T14:00—16T12:00 全潮水文资料验证模型计算结果。对比验证 3 个同步连续观测站位 B1 ($117^{\circ}44'E, 38^{\circ}53'N$), B2 ($118^{\circ}07'E, 38^{\circ}51'N$) 和 B3 ($118^{\circ}07'E, 38^{\circ}35'N$) 的观测数据与 2003 年模型的计算结果,结果如图 3 所示。可以看出,除 B1 站位的流向

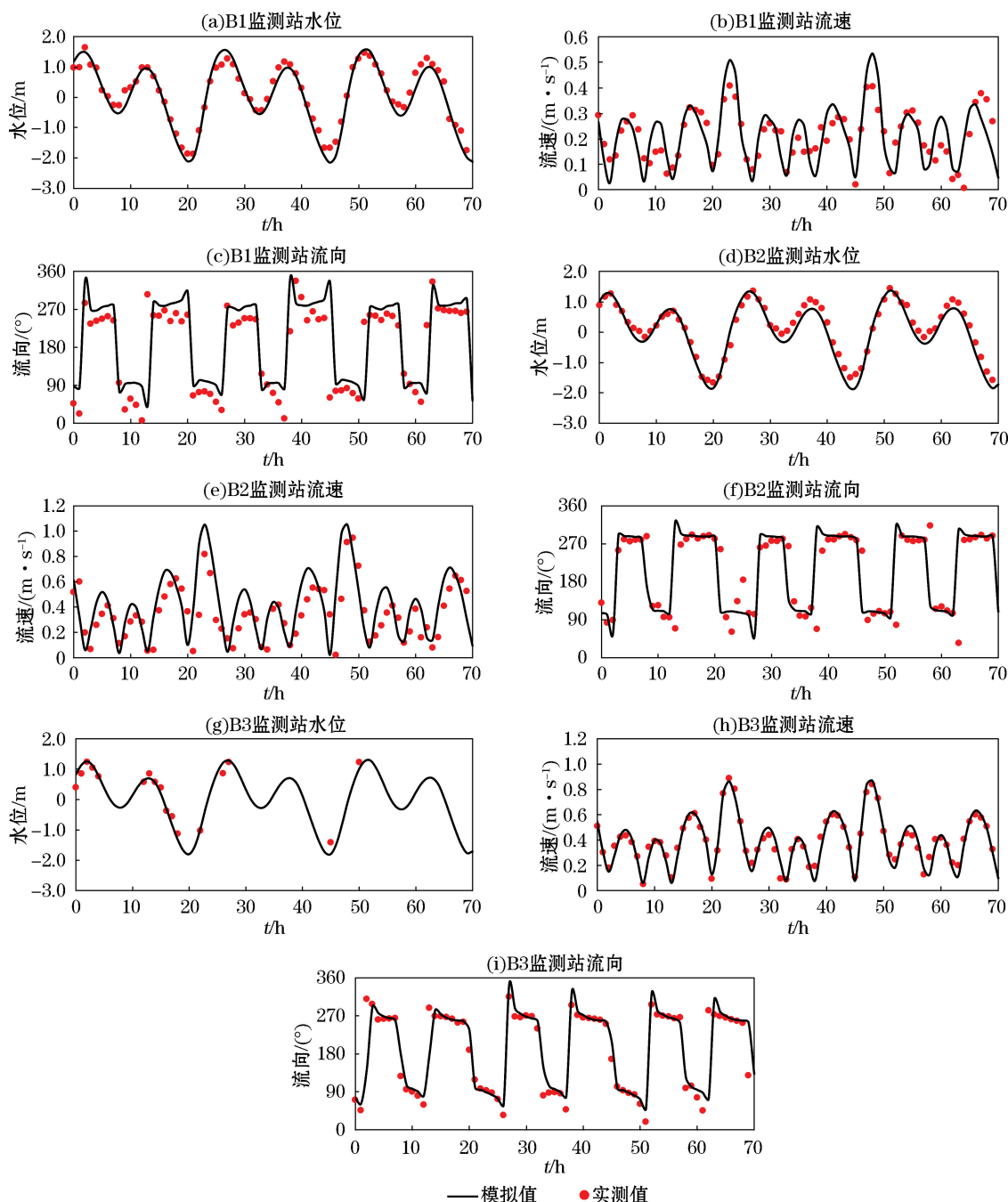


图 3 B1, B2 和 B3 监测站水动力模拟结果与观测点实测数据对比

Fig.3 Comparison between hydrodynamic simulation results and observation data at B1, B2 and B3 stations

因计算中未考虑天津港当时已存在防波堤的影响而导致稍有差异外,其他由模型模拟的水位、流速和流向与实测资料整体较为符合,这表明模型能较准确地模拟渤海的流场。

为进一步验证模型模拟潮波的准确性,本文在渤海沿岸选择了 10 个主要验潮站^[16],将模拟得到的 10 个验潮站水位进行准调和和分析,即可得到这些验潮站的调和常数。表 1 为渤海沿岸验潮站的主要分潮即 M_2 分潮的振幅和迟角模拟值,并将其与长期观测值进行比较,可以看出: M_2 分潮振幅差最大值为 10.13 cm,迟角差最大为 7.99° ,模拟值与长期观测值吻合较好。

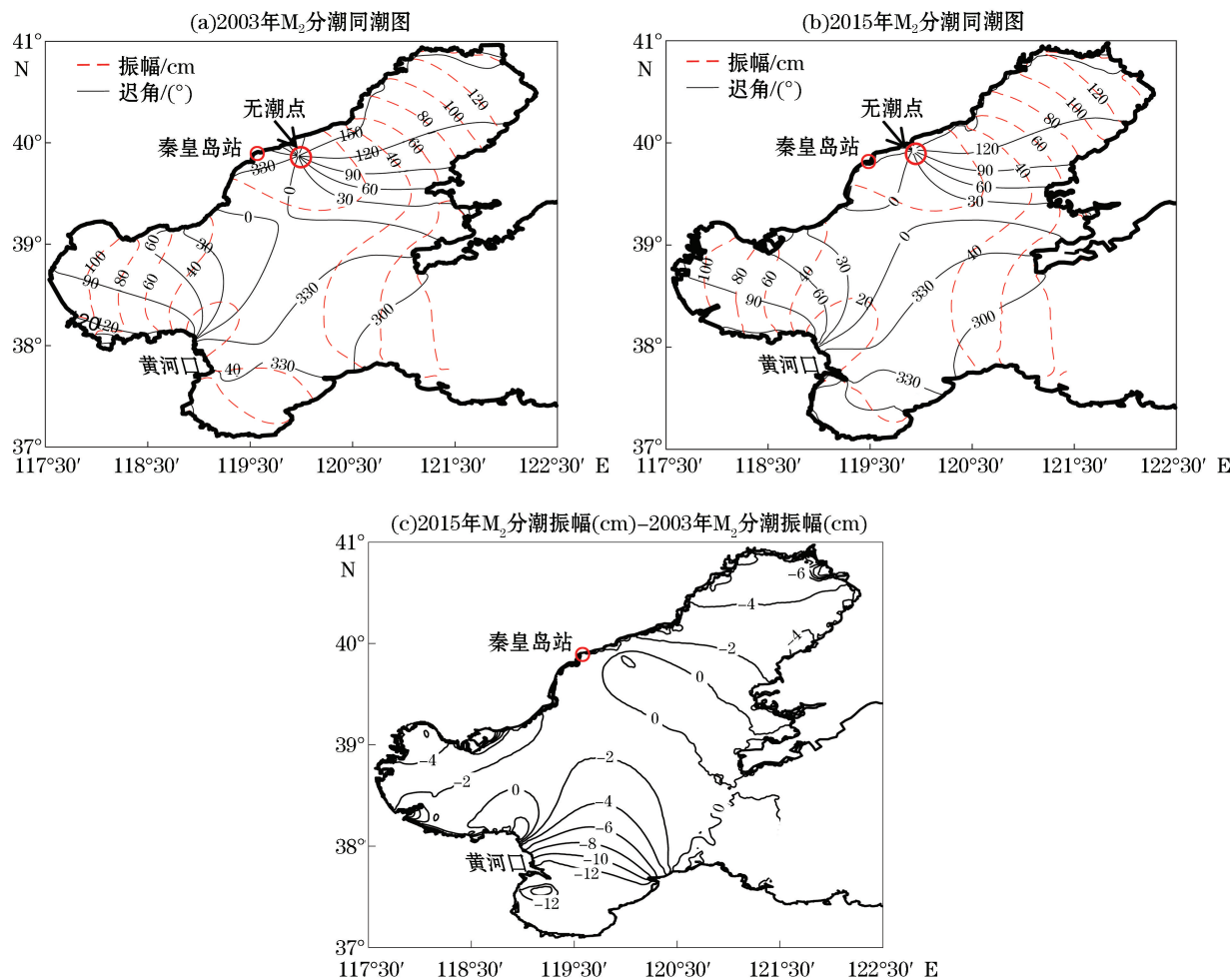
表 1 M_2 分潮模型与验潮站潮汐调和常数结果对比
Table 1 Comparison between M_2 moisture model and tidal harmonic constant at tidal stations

验潮站	位 置	M_2 振幅/cm			M_2 迟角/ $^\circ$		
		模拟值	观测值	振幅差	模拟值	观测值	迟角差
塘沽	117°44'E, 39°00'N	111.76	117.00	-5.24	82.91	90.90	-7.99
秦皇岛	119°33'E, 39°55'N	9.06	11.00	-1.94	305.23	311.00	-5.77
娘娘庙	120°11'E, 40°11'N	28.92	25.00	3.92	159.08	162.00	-2.92
葫芦岛	120°55'E, 40°44'N	105.28	96.00	9.28	148.22	150.00	-1.78
长山岛	121°44'E, 39°11'N	61.71	65.00	-3.29	24.87	23.00	1.87
大口河	117°55'E, 38°11'N	101.87	112.00	-10.13	105.97	109.00	-3.03
洼拉沟	118°11'E, 38°77'N	78.00	84.00	-6.00	126.30	127.00	-0.70
龙口	120°11'E, 37°33'N	33.01	40.00	-6.99	323.59	316.00	7.59
烟台	121°22'E, 37°33'N	77.12	76.00	1.12	290.74	290.00	0.74
大连	121°44'E, 38°55'N	97.87	98.00	-0.13	285.01	288.00	-2.99

2 模拟结果分析

2.1 潮波分析

建立 2003 年和 2015 年岸线及水深条件下的水动力模型,将其计算时间均设定为一年。为更深入地探究岸线及水深变化对潮汐的影响,分别对 2 个模型模拟的水位结果进行进一步准调和和分析,并比较分析结果(图 4)。由图 4 可知,2003 年和 2015 年的 M_2 分潮同潮时线和等振幅线具有相似的分布规律,但是随着岸线及水深的变化,尤其是曹妃甸围填海工程以及秦皇岛以北海域水深的变化,位于秦皇岛附近的 M_2 分潮无潮点向西北方向偏移。为进一步了解各海湾内潮波变化规律,利用 2015 年 M_2 分潮振幅减去 2003 年 M_2 分潮振幅得到振幅差(图 4c),可以看出:2015 年 M_2 分潮振幅比 2003 年整体减小,表明渤海潮动力有所减弱;莱州湾黄河口附近 M_2 分潮振幅变化较大,最大振幅差能达到 12 cm,且振幅差自渤海中部向黄河口呈逐渐增大的趋势,这是由黄河口南侧水深减小所致;在渤海湾和辽东湾内, M_2 分潮振幅差较小,为 2~4 cm,并呈现从湾口到湾顶增大趋势。

图4 2003年和2015年 M_2 分潮同潮图及二者的振幅差Fig.4 Cotidal charts of M_2 tidal constituent in 2003 and 2015 and their amplitude difference

2.2 潮余流分析

流场空间定点潮流的一个或数个潮周期时均向量称为“欧拉(Euler)潮余流”,其表达式为

$$[\bar{u}, \bar{v}] = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T [u, v] dt, \quad (1)$$

式中, $u = u(x, y, z)$, $v = v(t, x, y, z)$, 分别为空间点 (x, y, z) 上某时刻 (t) 流动速度的东分量和北分量; T 为统计时间, 通常为一个或数个潮周期, 本文取 $T = 1$ a; $\bar{u} = \bar{u}(x, y, z)$, $\bar{v} = \bar{v}(x, y, z)$, 代表该空间点东方向和北方向的欧拉潮余流。

2003年和2015年的渤海表层潮余流如图5a和图5b所示。由图5a可知:渤海海域整体上余流较小, 渤海中部余流只有1~2 cm/s; 余流较大处出现在渤海海峡、辽东湾北部、渤海湾南部和莱州湾黄河口附近, 余流平均大小为5~10 cm/s, 其中渤海海峡北部老铁山水道附近余流最大, 达20 cm/s, 这是由老铁山水道附近岛屿多、地形复杂所致。

2015年渤海表层潮余流(图5b)与2003年渤海表层潮余流(图5a)相比可以看出:围填海前后渤海表层潮余流的流向及流速分布结构总体相似。为进一步得到余流大小变化量, 将2015年余流减去2003年余流得到的余流差值如图5c所示。由图5c可以看出:整体上看, 渤海潮余流改变不大, 但岸线和水深变化较大

的局部海域余流变化较大,如渤海海峡由于局部水深的变化,余流大小增加了约 10 cm/s。由于天津近岸海域大规模的围填海及黄骅港防波堤的修建,渤海湾西侧沿岸潮余流有小幅度增加,而黄骅港南部余流减小;黄河口附近和辽东湾湾顶处由于地形冲淤的影响致使余流减小 2~5 cm/s。同时,由图 5c 可以看出渤海中部余流变化量不到 1 cm/s,这是因为各湾内岸线和水深变化对余流的影响多限制在邻近海域,对较远海域及其它海湾影响较小。由此可知:局部区域的岸线及水深变化才是影响水动力变化的主要因素。

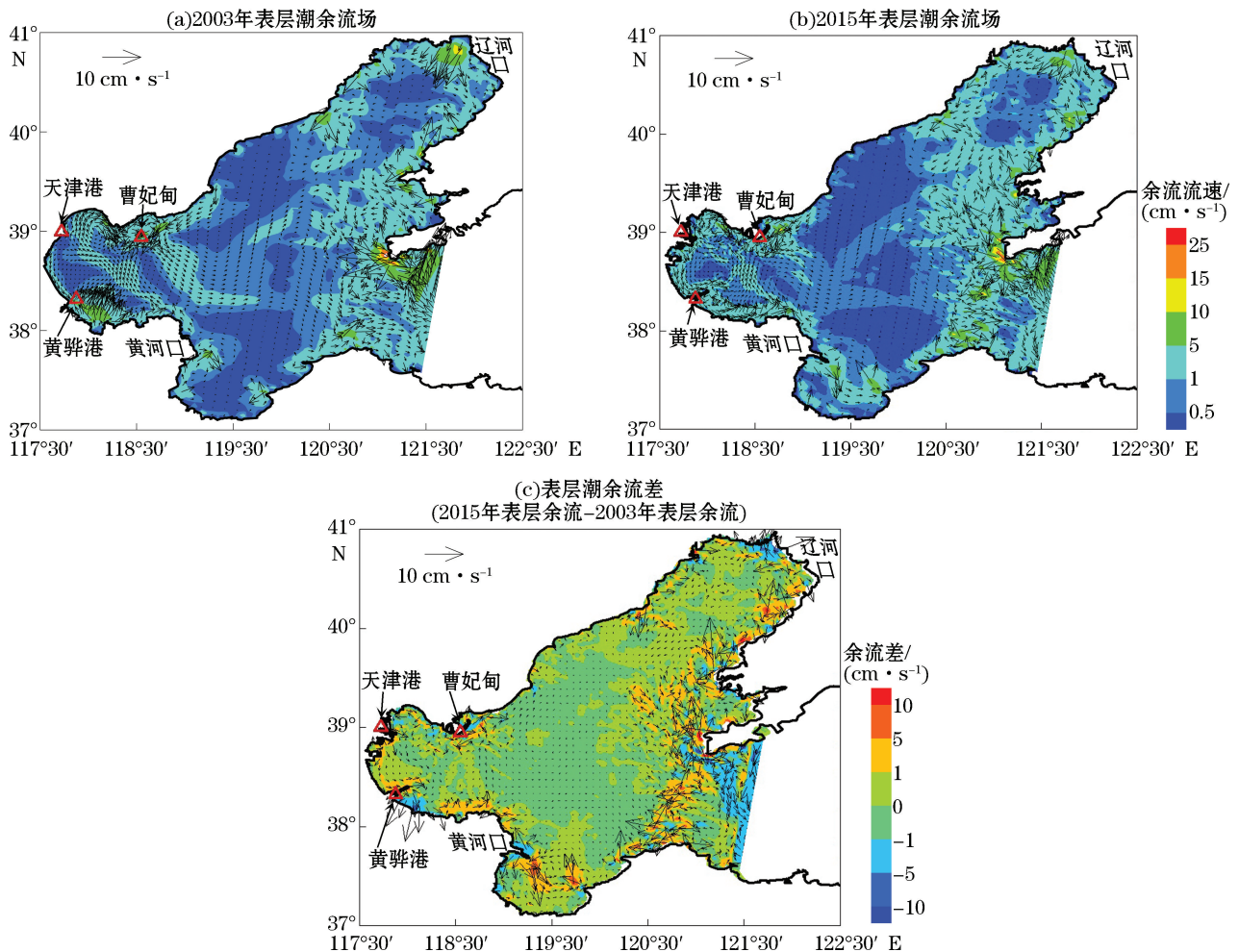


图 5 2003 和 2015 年渤海表层潮余流场及余流差

Fig.5 Surface tide-induced residual current in 2003 and 2015 and their difference of the Bohai Sea

由 2003 年渤海湾潮余流场可知,天津港北部至曹妃甸为顺时针沿岸余流,大小为 2~6 cm/s(图 6a),此结论与秦延文等^[7]的模拟结果一致;而天津港南部至黄骅港为逆时针沿岸余流;渤海湾口南北分别有一较小顺时针环流和一较大逆时针环流,2 个环流构成一个双环结构,这与袁德奎等^[5]结果一致;曹妃甸南部有较大的余流,大小为 5~10 cm/s;黄骅港南部浅滩处余流流入湾内,余流大小为 5~10 cm/s。

渤海湾 2015 年的余流场(图 6b)与渤海湾 2003 年余流场(图 6a)相比:天津港南部至黄骅港的逆时针沿岸余流几乎不发生变化,但由于黄骅港防波堤的修建及其南部岸线的变化,在黄骅港南部形成一逆时针环流;天津港及曹妃甸港附近海域余流发生不规则变化;渤海湾口附近的较大逆时针环流结构在曹妃甸港附近也发生了不规则变化,但整体上仍是一个双环结构。对比渤海湾余流差(图 6c)与渤海湾水深差(图 6d)可知:天津港至黄骅港北部沿岸余流增加了 3~5 cm/s,这是由天津近岸的围填海工程所致;黄骅港东南侧余流减小 2~5 cm/s,这是由于修建了黄骅港及防波堤;此外,由于曹妃甸深槽西南部水深增加了 2~4 m,所以

余流减小了 $1\sim 2\text{ cm/s}$,但整体而言,曹妃甸港附近海域余流增大 $1\sim 3\text{ cm/s}$;渤海湾南部沿岸海域余流向湾口流出,围填海后增大 $2\sim 5\text{ cm/s}$ 。

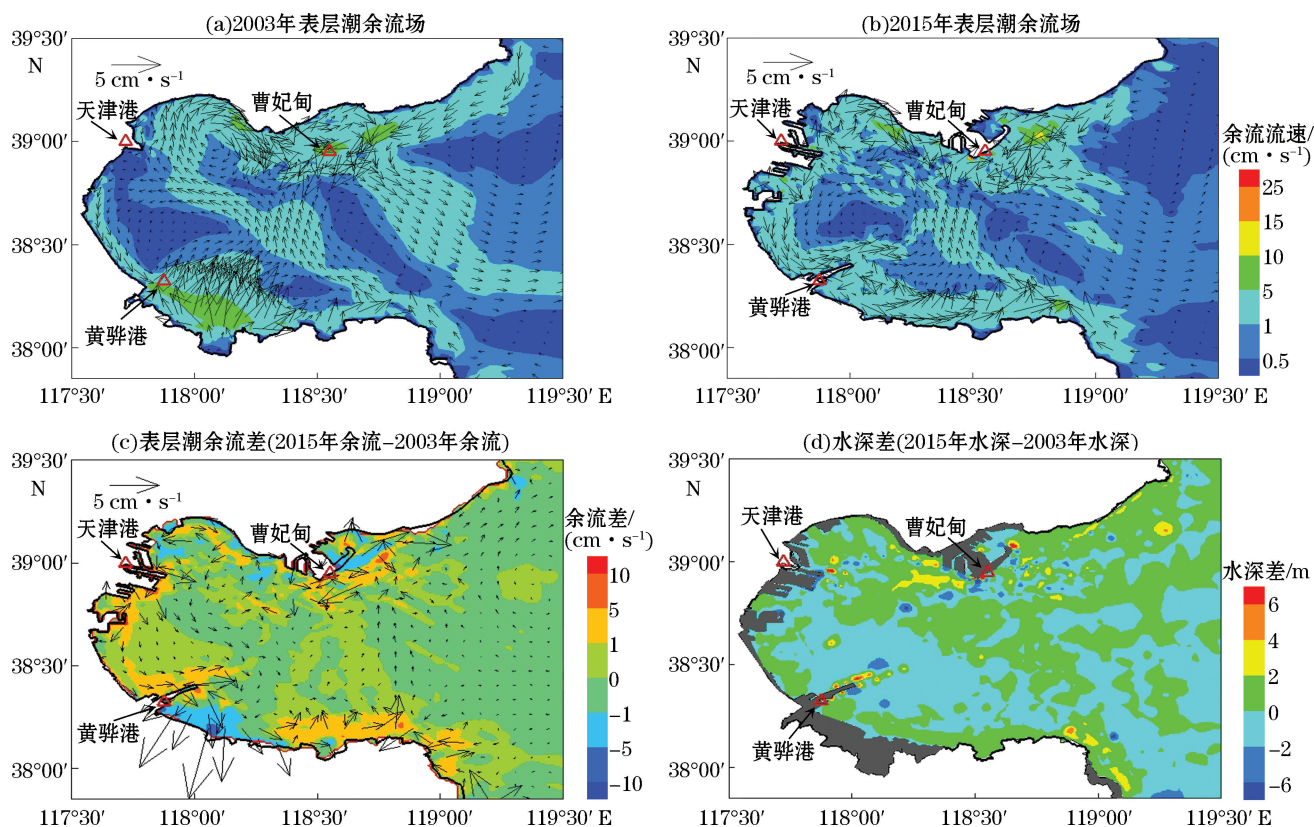


图6 2003和2015年渤海湾潮余流场、余流差及水深差

Fig.6 Surface tide-induced residual current in 2003 and 2015, and their difference as well as bathymetry difference in the Bohai Bay

由图 7a 可知,辽东湾 2003 年余流自湾顶流入,在辽东湾湾口处沿东南方向流出,湾顶辽河口处和娘娘庙站附近余流较大,约为 5 cm/s ;娘娘庙站南部形成顺时针环流;鲅鱼圈站附近有一流速较小顺时针环流;长兴岛北部有顺时针环流,大小约 4 cm/s ;辽东湾中部余流整体较小,小于 3 cm/s 。对比图 7a 和图 7b 可知:与 2003 年相比,2015 年余流流向与流速分布结构变化不大。对比图 7c 与图 7d 可以得到:辽东湾辽河口附近岸线向湾内收缩,加上由于河口三角洲的冲淤导致的局部水深变化,共同造成了辽河口附近余流改变较大,辽河口附近余流减小量达 $2\sim 7\text{ cm/s}$ 。

2003 年岸线及水深条件下的莱州湾余流分布如图 8a 所示,可以看出,黄河口附近凸出的岸线会对余流的大小和方向造成较大影响。余流在黄河口处分叉,在黄河口以北,形成一个逆时针环流;在黄河口以南,形成顺时针环流。这一结果与黄大吉和苏纪兰^[17]模拟结果一致。莱州湾余流在黄河口附近出现最大值,约为 5 cm/s 。在莱州湾东南海域刁龙嘴及龙口附近,因岸线向湾内凸起,分别在其附近产生了流速为 $3\sim 5\text{ cm/s}$ 的环流。与 2003 年余流(图 8a)相比,莱州湾 2015 年的余流场(图 8b)主要变化有:黄河口以北的逆时针环流向东南方向偏移,与莱州湾水深差值(图 8d)所示的黄河三角洲的推移方向相同;黄河口南部环流遭破坏,形成了流向为黄河口至刁龙嘴的余流,且黄河口附近余流大于 3 cm/s 的区域增大,余流最大值可达到 11 cm/s 。由图 8c 的莱州湾余流差值可以看出:相较于 2003 年,2015 年黄河口南北两侧余流减小 $1\sim 3\text{ cm/s}$,但东南部余流流速明显增大,增加量最大达到 9 cm/s ;刁龙嘴南侧顺时针环流减小,北侧顺时针环流增大,增加量的范围为 $4\sim 9\text{ cm/s}$ 。

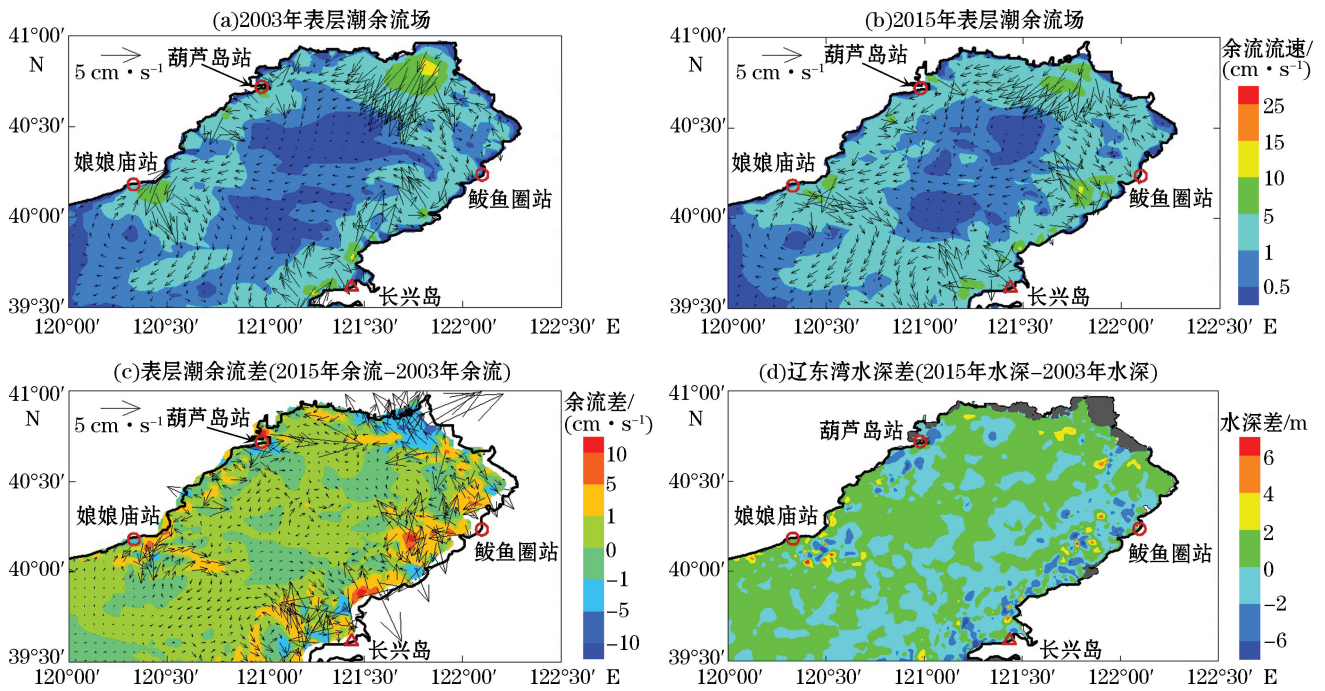


图7 2003和2015年辽东湾潮余流场、余流差及水深差

Fig.7 Surface tide-induced residual current in 2003 and 2015, and their difference as well as bathymetry difference in the Liaodong Bay

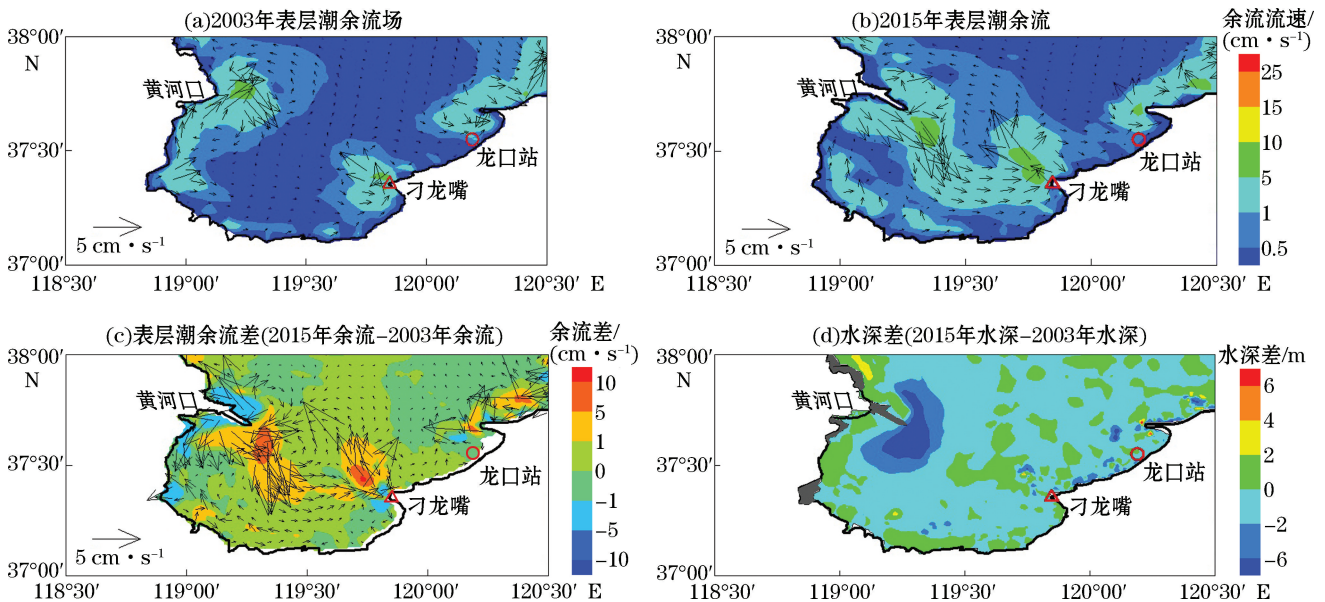


图8 2003和2015年莱州湾潮余流场、余流差及水深差

Fig.8 Surface tide-induced residual current in 2003 and 2015, and their difference as well as bathymetry difference in the Laizhou Bay

3 结 论

本文建立了基于 Delft3D 的渤海三维水动力学模型,在验证良好的基础上,分别对围填海前后渤海的水动力场进行了模拟。对比分析了围填海前后潮波和潮余流的变化特征及其与岸线和水深变化的响应关系,得到结论:

1) 渤海岸线及水深变化会对潮波系统产生较大的影响。渤海 M_2 分潮 2015 年的振幅整体上比 2003 年振幅减小;在渤海湾和辽东湾湾顶处减小量约为 2~4 cm;莱州湾振幅减小量约为 8~12 cm,且自渤海中部至黄河口振幅减小量逐步递增;秦皇岛附近无潮点向西北方向偏移。

2) 各海湾岸线及水深变化对其附近海域的潮余流影响较大。渤海湾内曹妃甸港南部由于水深增加导致余流发生了不规则的变化,曹妃甸近岸海域整体余流增大 1~3 cm/s;天津港大规模围填海导致天津港至黄骅港北部近岸海域余流增加了 3~5 cm/s;而黄骅港由于防波堤的修建在其南部附近海域形成了一个逆时针环流,余流减小 2~5 cm/s。此外,辽东湾辽河口附近局部冲淤导致余流减小 2~7 cm/s。莱州湾也因黄河三角洲的变迁致使黄河口北部余流略有减小,而东南部余流明显增大,增加量最多能达到 9 cm/s,同时黄河口南部海域的逆时针环流向东南方向偏移;刁龙嘴南侧的顺时针环流减小,北侧的顺时针环流增大 4~9 cm/s。

3) 各海湾岸线及水深变化对余流的影响范围限于临近海域,距离变化的岸线与水深较远的海域和其他海湾受到岸线及水深变化影响的程度较小,影响水动力的主要因素是局部区域范围内的岸线及水深变化。

参考文献(References):

- [1] SUN B S, ZUO S H, XIE H L, et al. Analysis of impact effects and changes of the coastline in the Bohai Bay during the past 40 years[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2017, 63(4): 139-148. 孙百顺, 左书华, 谢华亮, 等. 近 40 年来渤海湾岸线变化及影响分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2017, 63(4): 139-148.
- [2] ZHU L H, HU R J, ZHU H J, et al. Modeling studies of tidal dynamics and the associated responses to coastline changes in the Bohai Sea, China[J]. Ocean Dynamics, 2018, 68(12): 1625-1648.
- [3] LI B T, WANG Y G, WEI Z X, et al. Numerical study on tides of Bohai Sea and impact of topography changes on the tidal wave system [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(1): 9-16. 李秉天, 王永刚, 魏泽勋, 等. 渤海主要分潮的模拟及地形演变对潮波影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 9-16.
- [4] WANG Y Z, WU D, SHI H H, et al. Impact of reclamation on water exchange in Bohai Bay in recent decade[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 471-480. 王勇智, 吴頔, 石洪华, 等. 近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 471-480.
- [5] YUAN D K, LI G, WANG D S, et al. Numerical simulation of effects of land reclamation on water exchange capability of Bohai Bay[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(7): 605-613. 袁德奎, 李广, 王道生, 等. 围填海工程对渤海湾水交换能力影响的数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(7): 605-613.
- [6] WEI H. Tidal-induced Lagrangian and Eulerian mean circulation in the Bohai Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 44(3/4): 141-151.
- [7] QIN Y W, ZHANG L, ZHENG B H, et al. Impact of shoreline changes on the coastal water quality of Bohai Bay (2003—2011)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2149-2159. 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾岸线变化(2003—2011 年)对近岸海域水质的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2149-2159.
- [8] 中国人民解放军海军司令部航海保证部, C1411170[CM]. 天津: 中国航海图书出版社, 2003.
- [9] LIU Y F, LOU A G, MENG Y. Impact of coastline and topography changes on water exchange of the adjacent seas of the drain outlets into the Bohai Sea[J]. Marine Environment Science, 2017, 36(5): 719-725. 刘亚飞, 娄安刚, 孟云. 岸线地形变化对环渤海排污口临近海域水交换能力的影响[J]. 海洋环境学, 2017, 36(5): 719-725.
- [10] TU J, BAI Y C, XU H Y, et al. Change of coastline and tidal current caused by Bohai Bay reclamation project[J]. Port Engineering Technology, 2017, 54(4): 1-4. 涂晶, 白玉川, 徐海珏, 等. 渤海湾围垦工程引起的岸线及潮流变化[J]. 港工技术, 2017, 54(4): 1-4.
- [11] MA W D, WU C Q, YIN S J, et al. Analysis on change of coastline and reclamation in Liaoning province[J]. Environment and Sustain-

- able Development, 2014, 39(6): 54-57. 马万栋, 吴传庆, 殷守敬, 等. 辽宁省岸线及围填海变化分析[J]. 环境与可持续发展, 2014, 39(6): 54-57.
- [12] TIAN Y, YU D Y, LI Y L. Research on the accumulation of marine environment of Laizhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(1): 117-124. 田艳, 于定勇, 李云路. 莱州湾围填海工程对海洋环境的累积影响研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 117-124.
- [13] WU P Q, ZHANG J, MA Y, et al. Coastline dynamics monitoring and analysis around the Bohai Sea using remote sensing images during 2010 and 2015[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(1): 128-138. 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 2010-2015 年环渤海海岸线的时空变迁监测与分析[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 128-138.
- [14] LU Y J, JI R Y, ZUO L Q. Morphodynamic responses to the deep water harbor development in the Caofeidian sea area, China's Bohai Bay[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(8): 831-843.
- [15] HOU X Y, ZHANG H, LI D, et al. Development trend environmental and ecological impacts and policy recommendations for Bohai Sea reclamation[J]. Acta Ecologia Sinica, 2018, 38(9): 323-331. 侯西勇, 张华, 李东, 等. 渤海围填海发展趋势、环境与生态影响及政策建议[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 323-331.
- [16] LUO C Y. Optimization and application of key parameters in a coupled ROMS-CoSiNE model of the Bohai and Yellow Seas[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. 罗辰奕. 渤黄海 ROMS-CoSiNE 模型关键生态参数的优化与应用[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [17] HUANG D J, SU J L. The effects of the Huanghe River delta on the circulation and transport of larvae[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(6): 104-111. 黄大吉, 苏纪兰. 黄河三角洲岸线变迁对莱州湾流场和对虾早期栖息地的影响[J]. 海洋学报, 2002, 24(6): 104-111.

Numerical Simulation of the Hydrodynamics Affected by Coastline and Bathymetry Changes in the Bohai Sea

DONG Jiao-jiao¹, SUN Jian², CHEN Yan-zhen³, LIU Chang-gen¹, MA Hui-min¹, LIU Chun-hong¹

(1. *Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300350, China;*

2. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

3. *Tianjin Marine Environment Monitoring Central Station, SOA, Tianjin 300457, China*)

Abstract: In order to explore the influence of coastline and bathymetry changes on the ocean hydrodynamic field, the three-dimensional hydrodynamic model of the Bohai Sea under present (2015) and historical (2003) coastline and bathymetry conditions were constructed based on the Delft3D-FLOW model, and the hydrodynamic conditions of the Bohai Sea were simulated accordingly. The simulated tidal wave and tidal residual current were compared and analyzed, and the influence of coastline and bathymetry changes on the dynamic field of the Bohai Sea was explored. The simulation results showed that the changes of coastline and bathymetry had noticeable impact on the M_2 tidal wave system in the Bohai Sea. After reclamation, the amplitude of the M_2 tide decreased and the amphidromic point near Qinhuangdao shifted to the northwest. The tide-induced Eulerian residual current was affected by the coastline and bathymetry changes. The residual current in the southern of Caofeidian Port exhibited irregular changes, formed complex eddies, and increased in the offshore area. The residual current from the Tianjin Port to the northern coastal area of the Huanghua Port increased by 3–5 cm/s in 2015 compared to that in 2003. A counterclockwise circulation formed in the southern part of Huanghua Port, and the residual current decreased by 2–5 cm/s. As the water depth increased, the residual current decreased by 2–7 cm/s near the Liaohe Estuary of the Liaodong Bay. The counterclockwise current near the Yellow River Estuary moved to the southeast, the residual current in the northern part of the Yellow River Estuary decreased slightly, and the residual current in the southeast significantly increased by up to 9 cm/s. The clockwise circulation on the south of the Diaolongzui decreased, and the clockwise current on the north increased by 4–9 cm/s.

Key words: Bohai Sea; coastline changes; bathymetry changes; tide-induced current; tidal wave system

Received: June 10, 2019