

海洋工程影响下莱州湾海域水动力环境变化特征

吕 婷¹, 苏 博², 王佳莹², 靳 洋², 何 鑫², 于华明¹, 马元庆²

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006)

摘 要: 本文利用 MIKE21FM 数值模拟软件模拟了 2000 年和 2014 年莱州湾海域的水动力变化。结果表明由于海洋工程的建设, 莱州湾内地形和浅滩发生变化, 导致 2014 年湾内整体潮流流速较 2000 年减小, 流向发生一定偏转; 在 NE 向定常风驱动下对比 2000 年和 2014 年模拟海流结果可知变化幅度在 1 ~ 3 cm/s 内, 莱州湾整体表层海水运动受岸线变化影响较小; 纳潮量减少 0.1788 km³, 为 2000 年的 3.2%; 半水交换时间由 27.5 d 增加到 29 d, 工程建设对莱州湾水交换影响相对较小。

关键词: 水动力; 莱州湾; 半水交换时间; 纳潮量

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2017)04-0571-07

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2017.04.014

The hydrodynamic environment variability of Laizhou bay response to the marine engineering

LV Ting¹, SU Bo², WANG Jia-ying², JIN Yang², HE Xin², YU Hua-ming¹, MA Yuan-qing²

(1. Ocean university of China, Qingdao 266100, China; 2. Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, China)

Abstract: This article simulates the hydrodynamic environment of the Laizhou bay during 2000 and 2014 by MIKE21FM numerical simulation method. Compared with 2000, the results show that the marine engineering cause the change of topography and shallows of the Laizhou bay, which leads to the tidal current slowing down and the direction turning in 2014; the ocean current changed in the range of 1 cm/s to 3 cm/s with the constant northeast wind, the variation of coastline had little impact on the flow of the surface sea water; the storage capacity of tidal was 0.1788 km³, 3.2% decrease in 2000; the half water exchange time increased from 27.5 days to 29 days, which indicates the construction had little influence on the water exchange.

Key words: hydrodynamic; Laizhou bay; half water exchange time; storage capacity of tidal

莱州湾地处山东半岛北部, 渤海南部, 是渤海三大海湾之一。莱州湾北临环渤海城市群和东北老工业基地, 南接长三角, 区位优势明显, 海域水浅滩广, 温盐条件适宜, 是我国重要的渔业资源利用和养护区。随着海洋经济不断发展, 莱州湾海

域逐渐产生污染程度加剧, 局部海域“荒漠化”等一系列问题^[1]。近年来, 为满足更好地开发建设莱州湾这一需要, 科研工作者对这一区域进行了大量的研究。张永强^[2]等为探讨清水沟流路黄河大嘴对莱州湾潮流场的影响, 应用 ECOM 数值

收稿日期: 2017-03-14, 修订日期: 2017-04-28

基金项目: 山东近岸热点开发海域主要污染物环境容量及总量控制技术研究(2014GSF117030); 全球高分辨率海洋再分析系统研制与产品研发(2016YFC1401800); 全球海洋潮能通量与耗散(41406011); 重大海洋动力灾害致灾机理、风险评估、应对技术研究及示范应用(2016YFC1402000)

作者简介: 吕 婷(1996-), 女, 山东烟台人, 本科, 海洋科学方向, E-mail: lvtting26@163.com

通讯作者: 马元庆(1979-), 男, 山东海阳人, 硕士, 高级工程师, 海洋环境研究方向, E-mail: erma0402@163.com

模型对黄河口改道前后的莱州湾潮流场进行模拟;李蒙蒙^[3]等运用 3S 技术对近 50 a 来莱州湾西、南部淤泥质海岸地貌演变进行了研究。刘建强^[4]等通过应用 MIKE21 数值模型建立莱州湾平面二维潮流模型,研究不同工程岸线下莱州湾水动力特征。秦华伟^[5]等根据现场调查数据资料研究分析了莱州湾表层海水中石油类的平面分布和季节变化特征。刘潇^[6]等应用 MIKE21 数值模型对不同时期水深岸线条件下莱州湾西南侧海域的水动力演变特征及潍坊港建设对水动力的影响进行研究。本文主要应用 MIKE21FM 数值模型建立 2000 年和 2014 年潍坊港及其附近海域的平面二维潮流模型,研究莱州湾海域的水动力环境变化特征。

以现代黄河口与妃姆岛为连线,莱州湾是处于其南侧的一半封闭浅水海湾,习惯上依据莱州湾地貌及动力特征,将莱州湾沿岸分为三大区域:东部、西部和南部,分别以虎头崖和小清河为分界点。莱州湾大部分海域水深在 10 m 以下,东部最深处约为 18 m。莱州湾的潮汐主要受黄河口外 M2 潮波系统控制,莱州湾大部分海区属于不正规混合半日潮型,受地形影响,潮流以顺时针方向的旋转流为主,伴有往复流,涨潮流方向为东北-西南向,落潮流方向为西北-东南向。近年来由于各种人类活动,如填海造地、港口开发、围海养殖等,海湾面积有所减小^[7]。

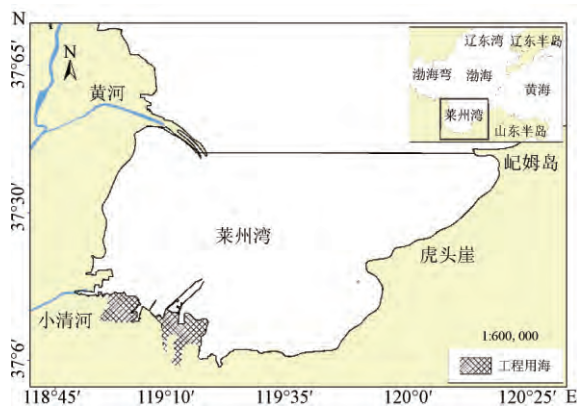


图 1 研究区域

Fig. 1 Region of investigation

1 材料与方法

1.1 数据资料

本文应用平面二维数值模拟软件 MIKE21FM 模拟 2000 年和 2014 年潍坊港及其附近海域的潮

流场、海流、纳潮量和半水交换时间的变化情况,详细分析由于岸线的变化对莱州湾海域的水动力环境的影响情况。

水深和岸界数据主要根据中国人民解放军海军航海保证部制作的海图以及工程附近海域地形图和水深测量结果确定。

为验证模式模拟潮位、潮流能否较好的再现实际的潮位、潮流状况,本文选取了 2014 年 8 月 21 日~22 日两个站位的潮流观测点结果(05#和 07#)和 1 个潮位观测站(T01)作对照,并选取潍坊港附近的 17 个点(P01~P17) 2000 年和 2014 年的海流资料,为获得由于岸线的变化所引起的潍坊港附近海流变化规律提供参考。各站位位置如图 2 所示。

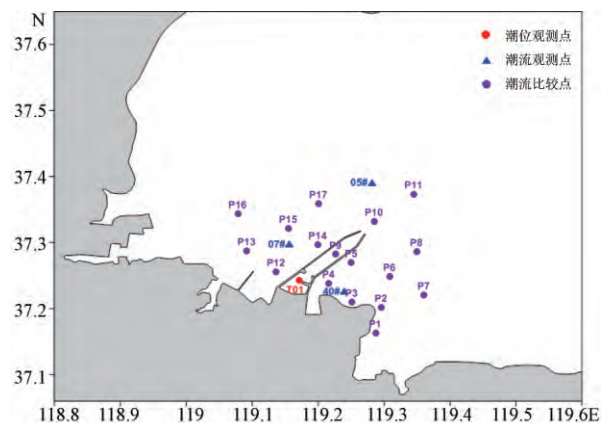


图 2 潮位观测点、潮流观测点和潮流比较点位置

Fig. 2 The observation spots of the tidal level and the tidal current and the tidal current comparison spots

1.2 数值模型

本文采用丹麦水力学研究所研制的平面二维数值模型 MIKE21FM 来研究工程海域的潮流场运动及海域污染物扩散影响,该模型采用非结构三角网格剖分计算域,标准 Galerkin 有限元法进行水平空间离散,三角网格能较好的拟合陆边界,网格设计灵活且可随意控制网格疏密,在时间上,采用显式迎风差分格式离散动量方程与输运方程^[8]。本文使用 MIKE21FM 水动力模块和污染物迁移扩散模块进行对潮流场、海流、纳潮量和半水交换率的模拟。模型采用潮位驱动的方式,开边界条件是从渤海海流模型中提取的,在海域滩涂广阔的区域设置动边界,每隔一时间步长均进行干出与淹没的判断,考虑新弥河、白浪河和虞河三条河流的径流,其径流量分别为 59.63 万 t/d,

10.79 万 t/d 和 12.61 万 t/d, 计算开始时以“冷态”启动, 计算域范围为莱州湾海域, 坐标范围为 $37^{\circ}6' \sim 37^{\circ}48' \text{ N}$, $118^{\circ}48' \sim 120^{\circ}24' \text{ E}$ 。模型岸线分别采用 2000 年和 2014 年遥感影像提取的岸线, 网格分布见图 3。为了能清楚了解由于岸线变化所引起的该海域的潮流变化, 将潍坊港附近海域进行局部加密, 加密网格区域见图 4。2000 年和 2014 年岸线模拟区域内分别由 14970 个和 14062 个节点组成, 最小空间步长约为 15 m。模型计算时间不长根据 CFL 条件进行动态调整, 最小时间步长 0.3 s。底床糙率通过曼宁系数进行控制, 曼宁系数取 $0.3 \sim 0.45 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ 。采用考虑亚尺度网格效应的 Smagorinsky (1963) [8] 公式计算水平涡粘系数。

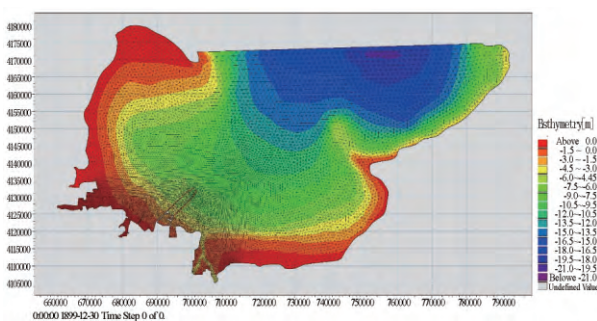


图3 莱州湾海域水深及计算范围网格设置

Fig. 3 The depth and the grid of the investigation region in Laizhou bay

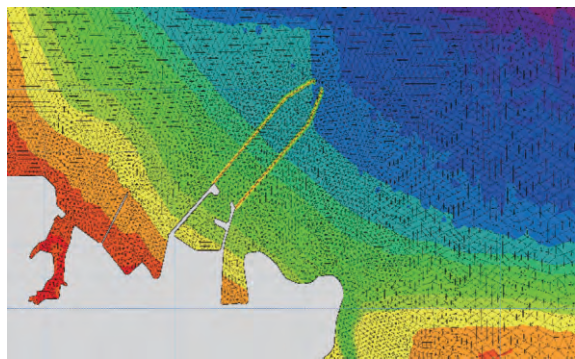


图4 潍坊港附近海域水深及计算范围网格设置

Fig. 4 The depth and the grid of the investigation near Weifang harbor

1.3 计算方法

1.3.1 纳潮量计算方法

纳潮量代表一个海湾可以接纳的潮水的体积 [10], 海湾的生命活力与纳潮量密切相关, 其大小取决于海湾高、低潮时潮位及海域面积的变化, 是海湾水动力特性的总体反映。本文模拟研究区域潮汐场变化, 挑选 2000 年和 2014 年一个天文

大潮前后关注海湾相邻两个最大、最小水量(对应总体的高低潮)取差, 计算公式如下:

$$W = \frac{1}{2} (S_1 + S_2) (h_1 - h_2) \quad (1)$$

式中: W 代表纳潮量; S_1 和 S_2 代表高低潮时水域面积; h_1 和 h_2 代表高低潮潮位 [11]。

1.3.2 半水交换时间

海洋本身具有较强的自净能力, 能接纳净化大量污染物, 局部水体的净化速率主要由水体与外部交换快慢控制, Luff 和 Pohlmann [12] 类比于放射性同位素的半衰期定义, 引入了半交换时间的概念, 定义为海域保守物质浓度通过对流扩散稀释为初始浓度一半所需的时间, 用来表征水体与外界的平均交换能力。

首先假定初始时刻潍坊附近海域均匀分布着同样的溶解态保守污染物, 水体中该污染物质的浓度维持在某一个特定的量值, 假设海水从边界入流时设定这种物质在开边界的浓度为 0, 这种污染物质的浓度值会随时间变化, 计算出不同时刻该种污染物质的浓度值。初始时刻将模拟海域内水体的污染物浓度设定为 10, 模拟莱州湾某一时刻平均浓度的计算公式:

$$\frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot H_i} \xrightarrow{A_i = \text{const}} \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (2)$$

式中: n 为网格数; C_i 为第 i 个网格的污染物浓度; H_i 为第 i 个网格的即时深度; A_i 为网格面积, 模型中所有网格面积相同。

1.4 模型验证

1.4.1 潮位验证

图 5 为潍坊验潮站实测潮位值与模拟值的对比图。由图可以看出, 模式模拟潮位与实际观测潮位基本一致。

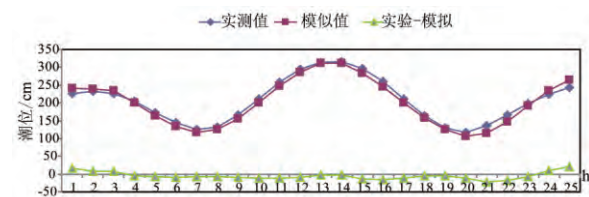


图5 潍坊验潮站实测站位值与模拟值的比较(2014年8月21日~22日)

Fig. 5 The comparison between the measured value and the simulated value for the Weifang tidal station (August 21th-22th in 2014)

1.4.2 潮流验证

图6和图7为两个测流点2014年8月21日~22日表层流速、流向实测值与模拟计算值的对比图,其中蓝色线代表实测值,紫色线代表模拟值。由图可以看出,两个测流点模拟流场与实际变化基本一致,由于受到地形的影响,流速最大差别约为10 cm/s左右,流向最大差别约为100°。从整体上看,计算模式可以较好的再现该海域的实际潮流状况。

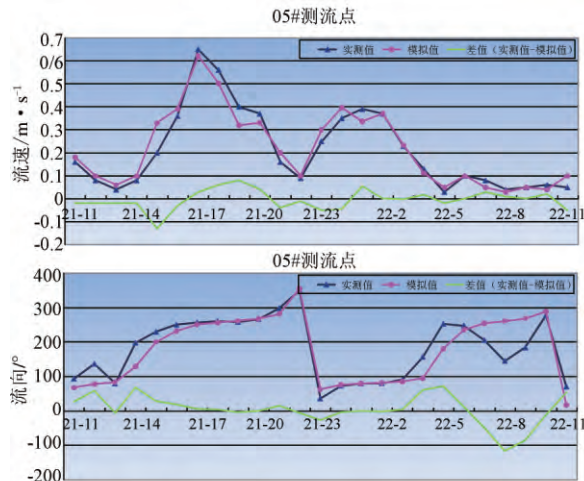


图6 05#测流点流速、流向实测值与计算值比较

Fig. 6 The comparison between measured value and simulated value of the velocity and direction for point 05

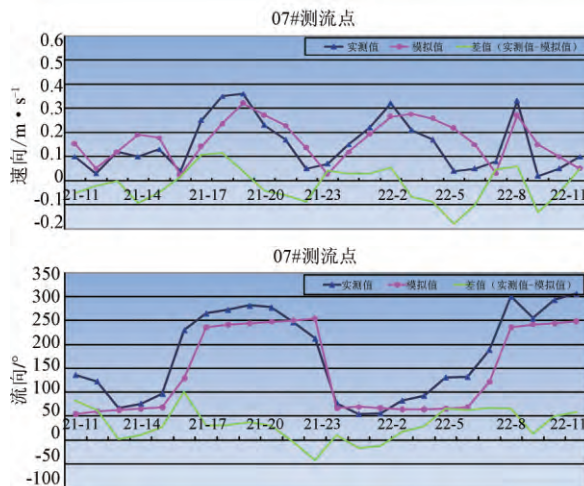


图7 07#测流点流速、流向实测值与计算值比较

Fig. 7 The comparison between measured value and simulated value of the velocity and direction for point 07

2 结果与讨论

2.1 潮流场模拟结果

本文采用 MIKE21FM 数值模型分别对莱州湾2000年和2014年潮流场、海流、纳潮量和水交

换情况进行数值模拟。

图8和图9分别为2000年和2014年莱州湾附近海域涨急和落急时刻潮流场,表1为潍坊港附近17个特征点的流速、流向比较。从图8中可以看出,整个莱州湾落潮时海水向莱州湾口流出,流向基本为偏东到东北方向,涨潮时海水向莱州湾底涌入,流向基本为偏西到西南方向,流速最大值大约为0.9 m/s,位于莱州湾口处。在潍坊港位于莱州湾底部海域,低潮时刻有部分浅滩露出,流速较小。潍坊港附近海域在涨急和落急时,潮流流向分别为向岸和离岸方向,基本垂直岸线。从图9中可以看出,整个莱州湾海流特征基本与2000年相似。由于潍坊港区和防波堤的建设,岸线变化较大,导致潍坊港附近海流变化较大。在一个潮周期的过程中,港口区内部存在不规则涡旋,港口门处流速较大,潍坊港西侧潮流强于东侧,二期防波堤东侧流速较大。其它海域海流特征与2000年海流基本一致。

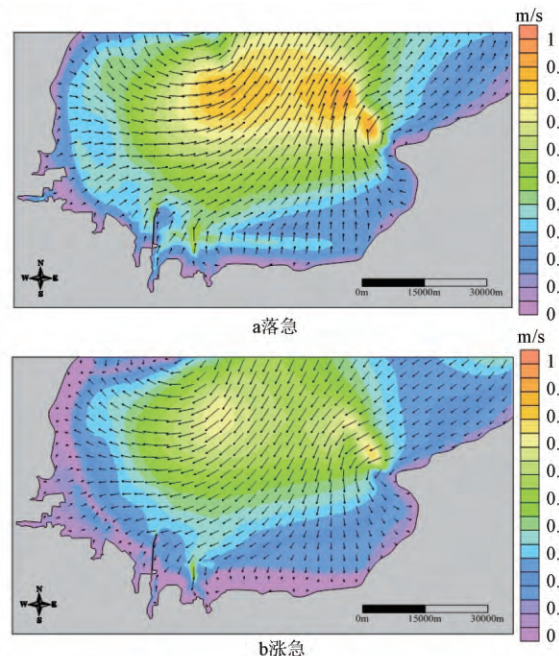


图8 2000年莱州湾落急、涨急时潮流场

Fig. 8 The ebb peak and flood peak of Laizhou bay in 2000

通过对两个年份模拟结果进行对比可知,海洋工程的建设对整个莱州湾海流的影响不大,但对潍坊港潮流场造成了一定的影响,尤其集中在工程附近区域,这主要是由于近岸工程的建设改变了附近区域的地形进而影响了其水动力环境,具体表现为海湾内流速整体减小,近海海流方向发生一定偏转。

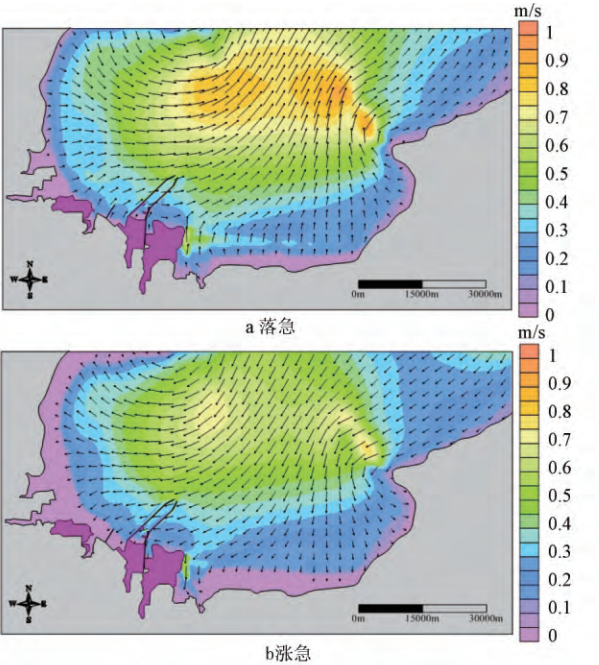


图 9 2014 年莱州湾落急、涨急时潮流场

Fig.9 The ebb peak and flood peak of Laizhou bay in 2014

2.2 环流模拟结果

莱州湾水深较浅,地形复杂,受季风影响明

显,冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风,盛行季风对表层流影响较大,本文根据这一特征设计模型由定常风驱动海流模式,模拟 2000 年和 2014 年不同岸线情况下莱州湾内海水的运动规律,分析由于地形变化对工程附近海流产生的影响。

根据羊口盐场气象站 1994 ~ 2005 年(缺失 1995 年 11 月) 12 年观测的逐时风速风向资料统计结果可知,该区常风向和强风向皆为 NE 向,因此本文模拟在 NE 向定常风驱动下,2000 年和 2014 年莱州湾表层海水运动情况。通过图 10 与图 11 对比可知,莱州湾整体表层海水运动受岸线变化影响较小,在 NE 向定常风驱动下,莱州湾西部沿岸海水呈逆时针旋转,东部为顺时针旋,海水由西部和东部流入,中部流出,海湾西部和东部沿岸流速较大,最大约为 12 cm/s。图 12 为在 NE 向定常风驱动下,不同岸线条件下莱州湾表层海水运动对比情况,从图中可以看出东西防沙堤堤头处和二期防波堤工程东北角海域流速增加,东西防沙堤内部和东侧以及二期防波堤工程东测海域流速减小,变化幅度较小,一般都在 1 ~ 3 cm/s 之间。

表 1 2000 年和 2014 年潍坊港附近特征点涨急和落急时刻海流比较

位置	流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$						流向/ $^{\circ}$					
	2000 年		2014 年		差值 (2014 年-2000 年)		2000 年		2014 年		差值 (2014 年-2000 年)	
	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急
P1	0.8	0.55	0.76	0.54	-0.04	-0.01	167	353	175	359	8	6
P2	0.49	0.46	0.44	0.46	-0.05	0	218	35	195	12	-23	-23
P3	0.36	0.31	0.13	0.12	-0.23	-0.19	214	35	265	86	51	51
P4	0.29	0.24	0.25	0.22	-0.04	-0.02	247	70	269	93	22	23
P5	0.41	0.36	0.35	0.32	-0.06	-0.04	254	73	262	84	8	11
P6	0.44	0.4	0.36	0.34	-0.08	-0.06	245	63	247	66	2	3
P7	0.43	0.4	0.39	0.37	-0.04	-0.03	248	65	245	63	-3	-2
P8	0.5	0.47	0.45	0.43	-0.05	-0.04	245	65	246	66	1	1
P9	0.41	0.37	0.35	0.34	-0.06	-0.03	261	80	267	87	6	7
P10	0.54	0.49	0.51	0.49	-0.03	0	251	72	260	81	9	9
P11	0.63	0.6	0.62	0.6	-0.01	0	245	67	247	68	2	1
P12	0.3	0.3	0.3	0.29	0	-0.01	230	51	232	55	2	4
P13	0.31	0.3	0.33	0.32	0.02	0.02	240	63	241	62	1	-1
P14	0.41	0.38	0.39	0.39	-0.02	0.01	264	80	261	84	-3	4
P15	0.38	0.35	0.39	0.37	0.01	0.02	268	85	266	88	-2	3
P16	0.33	0.31	0.34	0.33	0.01	0.02	252	75	252	75	0	0
P17	0.52	0.47	0.54	0.5	0.02	0.03	265	83	265	85	0	2

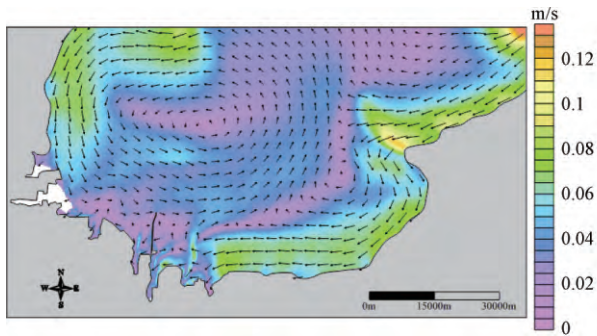


图10 2000年莱州湾海水运动情况

Fig. 10 Seawater motion of Laizhou bay in 2000

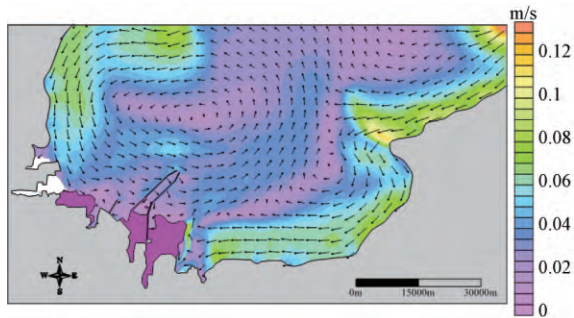


图11 2014年莱州湾海水运动情况

Fig. 11 Seawater motion of Laizhou bay in 2014

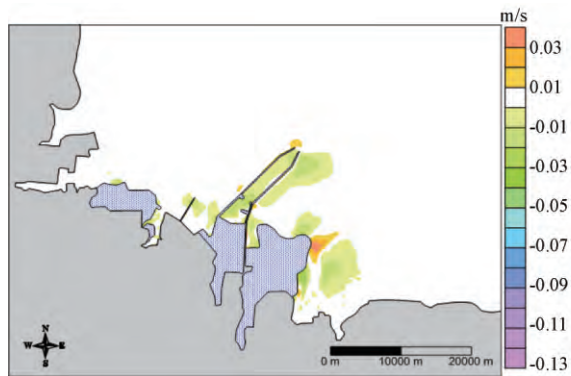


图12 NE向定常风驱动下2000年和2014年海水流速变化情况

Fig. 12 Variety of the seawater velocity with steady NE wind in 2000 and 2014

2.3 纳潮量计算结果

本文使用 MIKE21FM 水动力模块分别对2000年和2014年的海湾水量变化进行模拟,模拟时段为8月20日0:00~8月30日8:00,模拟计算结果见表2。从表中可以看出,2000年研究区域内纳潮量为 5.4472 km^3 ,2014年研究区域内纳潮量为 5.2684 km^3 ,减少 0.1788 km^3 ,减少了3.2%。

通过对比2000年和2014年莱州湾纳潮量变化情况可知,莱州湾纳潮量呈减少趋势,这主要是由于建设的海洋工程占据了原有的海域面积,降

低了海湾所能容纳海水的空间,此外,海洋工程的建设导致莱州湾内水动力减弱,潮差相应减小,因而造成了纳潮量的减小。

表2 2000年和2014年莱州湾纳潮量变化情况(单位: km^3)Tab. 2 Variety of tide storage capacity of Laizhou bay between 2000 and 2014 (unit: km^3)

2000年纳潮量	2014年纳潮量	差值	变化幅度/(%)
5.4472	5.2684	0.1788	-3.2

2.4 半水交换时间计算结果

本文在水动力计算模型的基础上加入污染物迁移扩散模块,分别模拟了2000年和2014年污染物浓度100 d内的扩散变化情况,计算结果见表3。从该表可以看出,2000年和2014年半水交换时间分别为27.5 d和29 d,说明2014年的水交换能力较2000年变弱。

通过对比可知,海洋工程的建设对莱州湾水交换产生了一定的影响,减弱了莱州湾的自净能力。由于海洋工程主要沿海岸建设,并不会改变海水交换口门的宽度,因此工程建设对莱州湾水交换影响相对较小。

表3 2000年和2014年莱州湾污染物浓度随时间变化情况

Tab. 3 Variety of pollutant density of Laizhou bay between 2000 and 2014

时间	污染物浓度变化/(%)	
	2000年	2014年
第0 d	100	100
第10 d	76	77
第20 d	58	61
第30 d	45	49
第40 d	38	40
第50 d	29	31
第60 d	22	23
第70 d	18	19
第80 d	13	14
第90 d	10	11

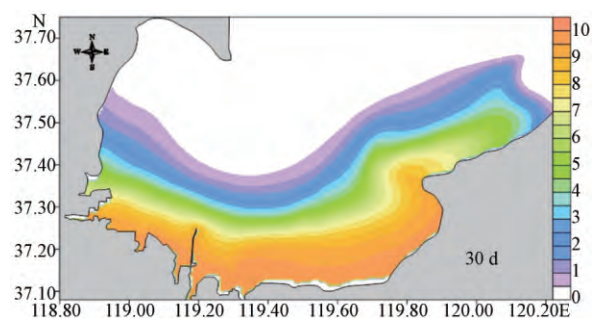


图13 2000年莱州湾模拟计算30 d污染物扩散情况

Fig. 13 Simulated diffusion of pollutant of Laizhou bay in 30 days for 2000

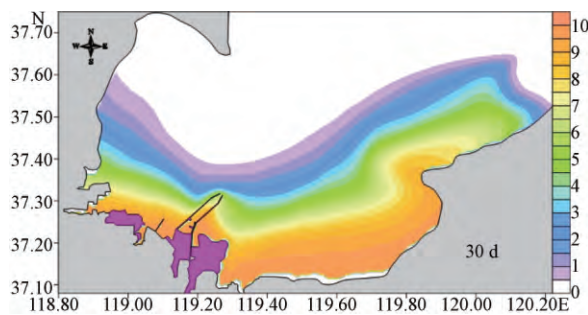


图14 2014年莱州湾模拟计算30d污染物扩散情况

Fig. 14 Simulated diffusion of pollutant of Laizhou bay in 30 days for 2014

3 结论

(1) 由于受到地形和浅滩变化的影响,莱州湾的潮流受到的影响不大,但在潍坊港近岸海域影响较大:涨急时海域内东部潮流流向为东北向,西部潮流为偏东向,落急时东部潮流流向为西南向,西部潮流为偏西向,2014年莱州湾内整体流速较2000年减小,在点P03减小最大,为0.23 m/s,近海海流方向发生一定偏转,最大偏角也出现在点P03。

(2) 在NE向定常风驱动下,莱州湾西部沿岸海水呈逆时针旋转,东部为顺时针旋,海水由西部和东部流入,中部流出,海湾西部和东部沿岸流速较大,最大约为12 cm/s。对比2000年和2014年模拟结果可知,在东西防沙堤堤头处和二期防波堤工程东北角海域流速增加,东西防沙堤内部和东侧以及二期防波堤工程东测海域流速减小,变化幅度较小,一般都在1~3 cm/s之间。总体上,莱州湾整体表层海水运动受岸线变化影响较小。

(3) 由于建设的海洋工程占据了原有的海域面积,降低了海湾所能容纳海水的空间,莱州湾海域的纳潮量呈现减小的趋势,2000年研究区域内纳潮量为 5.4472 km^3 ,2014年研究区域内纳潮量为 5.2684 km^3 ,减少 0.1788 km^3 ,为2000年的3.2%。海洋工程的建设导致莱州湾内水动力减

弱,潮差相应减小,也是造成了纳潮量减小的原因之一。

(4) 海洋工程的建设对莱州湾水交换产生了一定影响,减弱了莱州湾的自净能力。本文模拟得到2000年和2014年半水交换时间分别为27.5 d和29 d,说明2014年的水交换能力较2000年变弱。由于海洋工程主要沿海岸建设,并不会改变海水交换口门的宽度,因此工程建设对莱州湾水交换影响相对较小。

参考文献:

- [1] 郎晓辉,李悦,孔范龙,等. 莱州湾环境存在的问题及保护对策[J]. 现代农业科技,2011(3):296-297.
- [2] 张永强,迟万清,胡泽建,等. 黄河清水沟流路大嘴的形成对莱州湾潮流场影响的数值研究[J]. 海洋科学进展,2010,28(2):149-157.
- [3] 李蒙蒙,王庆,张安定,等. 最近50年来莱州湾西—南部淤泥质海岸地貌演变研究[J]. 海洋通报,2013,32(2):141-151.
- [4] 刘建强,马林娜,张永强,等. 港口工程建设对莱州湾水动力环境影响的数值研究[J]. 海洋开发与管理,2013,30(4):77-81.
- [5] 秦华伟,刘霞,张娟,等. 莱州湾海域水质石油类的分布特征[J]. 海洋环境科学,2016,35(5):739-742,755.
- [6] 刘潇,冯秀丽,刘杰. 港口工程影响下莱州湾西南侧海域水动力演化特征[J]. 海洋科学,2016,40(3):138-145.
- [7] 中国海湾志编纂委员会编. 中国海湾志(第3分册)[M]. 北京:海洋出版社,1991.
- [8] DHI Water & Environment. MIKE21 NSW on model validation[M]. Hørsholm, Denmark: DHI Water & Environment,2002.
- [9] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment[J]. Monthly Weather Review,1963,91(3):99~164.
- [10] 叶海桃,王义刚,曹兵. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换[J]. 河海大学学报自然科学版,2007,35(1):96-98.
- [11] LUFF R, POHLMANN T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach[J]. Deutsche Hydrografische Zeitschrift,1995,47(4):287-299.