

胶莱运河的修建对莱州湾水交换及海洋环境影响初探

苏 博^{1,2}, 朱金龙^{1,2}, 王佳莹^{1,2}, 赵玉庭^{1,2}, 王立明^{1,2}, 马元庆^{1,2*}

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

摘 要:为研究莱州湾水交换对胶莱运河修建工程的响应,以及为海洋污染治理问题提供参考,以莱州湾为重点模拟区域建立了二维平面潮流和对流扩散模型,利用渤海、黄海、莱州湾地形及海洋环境资料,结合 2018 年莱州湾海水水质监测结果,初步分析了胶莱运河的修建对莱州湾海洋环境现状的影响。模拟结果表明,胶莱运河建成后年径流总量约为 $7.2 \times 10^9 \text{ m}^3$,净流方向由胶州湾流向莱州湾;工程后整个莱州湾水交换能力略有增强,东部强于西部,半交换周期缩短 14 d;黄海海水经由胶州湾进入胶莱运河输送至莱州湾,冲淡莱州湾内非优良水体,从一定程度上缓解了莱州湾东部河口入海处小范围海域海水水质现状。

关键词:胶莱运河;莱州湾;水动力交换;海洋环境

中图分类号:TV91;P731.2

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)01-0048-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.01.006

引用格式:SU B, ZHU J L, WANG J Y, et al. A simulation study on influence of the construction of Jiaolai Canal on the water exchange and marine environment in the Laizhou Bay[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(1): 48-58. 苏博, 朱金龙, 王佳莹, 等. 胶莱运河的修建对莱州湾水交换及海洋环境影响初探[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 48-58.

莱州湾位于山东半岛西北、渤海南部,与辽东湾和渤海湾并称为渤海三大海湾。莱州湾的海湾面积占据山东各海湾面积之首,其湾口西起黄河新入海口,东至砣姆岛高角,口门宽约 96 km^[1]。受渤海半封闭型内海地理区位特点的影响,莱州湾内海水交换能力差,沿岸排入污染物总量远超海域海水的自净能力,导致水体质量不断恶化^[2-3]。近年来,有学者和社会舆论提出修建胶莱运河^[4](胶莱人工海河),运河可使胶州湾海水输入莱州湾,增强莱州湾水交换,同时缓解莱州湾乃至渤海的海洋生态环境污染现状^[5]。然而,胶莱运河是在胶莱河基础上从胶州湾到莱州湾开挖航道贯穿山东半岛的,该工程体量和修建耗资都很庞大,须对其修建可行性和效果做充分、科学的研究。此前相关学者做过初步论证,如左军成等^[6]分析了两湾的潮流和环流结构以及胶莱运河对胶州湾和莱州湾之间的水交换的贡献,认为胶莱运河的开通将极大改善胶莱两湾的水环境条件,不足的是其未采用数学模型进一步论证说明;王佳等^[7]通过一、二维耦合模式模拟分析认为工程的实施对渤海水质影响效果不显著,但其模型模拟网格分辨率较低。

以往研究成果未能明确修建胶莱运河对莱州湾海洋环境的具体影响,所以,本文利用渤海、黄海、莱州湾地形地形及海洋环境资料,选择莱州湾作为重点研究区域,建立二维平面潮流和对流扩散模型,结合 2018 年莱州湾海水水质监测结果,研究胶莱运河修建对莱州湾水交换及海洋环境的影响,旨在为此重大项目的可行性及必要性进行初步的研究。

收稿日期:2020-05-09

资助项目:国家重点研发计划——渤海入海污染源解析与水质目标管控关键技术与示范(2018YFC1407601);山东省重点研发计划——山东近海环境高效治理关键技术方法研究与示范(2019JZZY020705)

作者简介:苏 博(1986—),男,助理研究员,硕士,主要从事海洋动力及环境影响方面研究. E-mail: subo_ocean@163.com

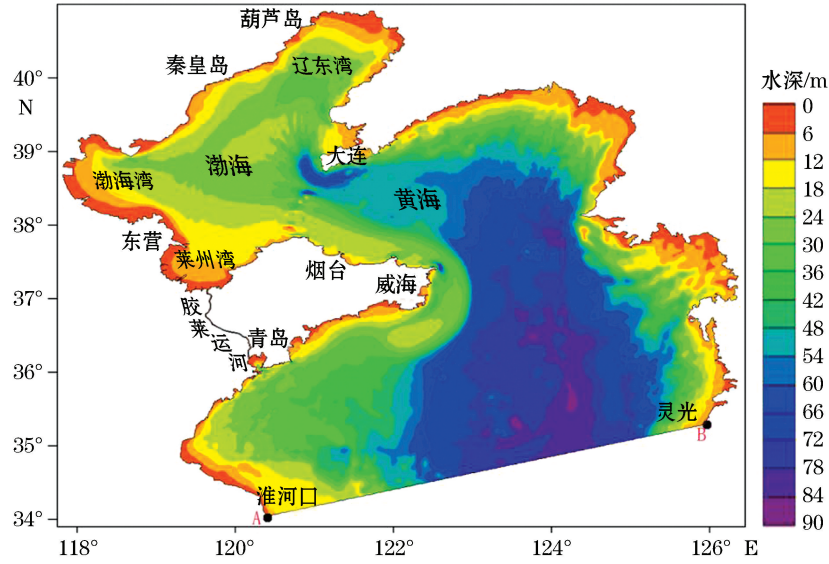
*** 通信作者:**马元庆(1979—),男,研究员,硕士,主要从事海洋环境方面研究. E-mail: erma0402@163.com

(王 燕 编辑)

1 材料与方方法

1.1 数据与资料来源

模型岸线提取自中国“高分一号”卫星,影像地面分辨率为 2 m,成像时间为 2015 年。应用 ArcGIS 软件对遥感影像进行校正和配准,经校正配准后的遥感影像依据多年平均大潮高潮时的海陆分界线所具备的光谱特征,采用人机交互解译获取岸线分布信息。模型水深选取中国人民解放军海军航海保证部 10011 号海图的地形水深测量资料,该数据基于中国人民解放军海军海道测量局长期测量结果。以莱州湾水深为例,莱州湾水深自湾口向湾内递减,最大水深位于砣姆岛高角附近,超过 20 m,湾内水深一般在 10 m 以内(图 1)。



注: A 为江苏淮河口, B 为韩国灵光, 两点连线围成的黄渤海海域为数学模型计算区域

图 1 模型区域的岸线与水深

Fig.1 Coastline and water depth in the modeling area

1.2 数值模型

1.2.1 水动力控制方程

水动力模型的数值解基于二维浅水方程所得,原始方程的空间离散采用的是单元中心有限体积法^[8],正交笛卡尔坐标系。平面二维连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

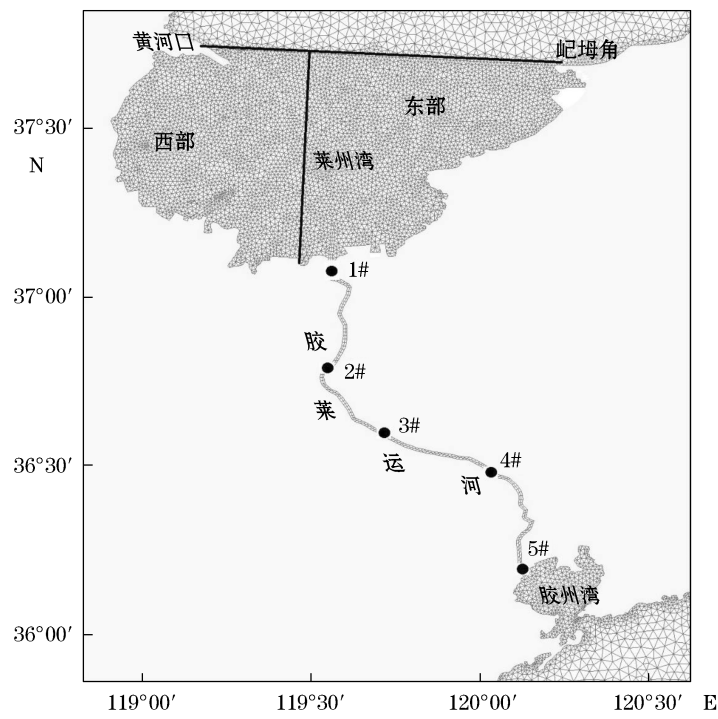
式中, h 为总水深, η 为水位, t 为时间, $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 分别为 x 和 y 向的水深平均流速, x 和 y 为笛卡尔坐标, S 为源强, f 为科氏系数, g 为重力加速度, τ_{sx} 和 τ_{sy} 分别为 x 和 y 向的风剪切力, τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为 x 和 y 向的底床剪切力, ρ 为水的密度, A 为水平涡黏系数。

1.2.2 定解条件

数学模型计算域岸线、水深及范围见图 1。胶莱运河横跨胶东半岛,连通黄、渤两海,研究尺度较大,故本近海数值模型采用水位控制开边界(AB 连线),使得潮波传播到研究区域时与实际情况相符。考虑到胶莱运河修建的经济性和施工难度,河道参数设置为河宽 1 km,水深 5 m。模型中海域采用非结构三角形网格,运河河道采用四边形网格。模型最大网格面积为 $100\,000\text{ m}^2$,最小网格面积为 500 m^2 。为了能够精确地分析运河工程对周边海域水动力环境的影响,模拟过程中,将工程附近海域进行网格加密,加密区域确定为整个莱州湾和胶州湾,工程附近计算网格见图 2。

初始条件:当开始计算时,采用计算初始时刻相对应的边界条件。

边界条件:将研究区域的陆地边界作为固定边界,假定垂直于固定边界的法向速度为零。随涨、落潮交替出现的边滩,采用“干、湿”动边界技术^[9-10];开边界水位根据 MIKE Tidal 工具箱提供的全球潮汐分潮数据(the global tide model data)推算,全球潮汐分潮数据来源于潮汐模型同化 Topex/Poseidon 卫星的测高数据(altimetry data),是由全球 10 个主要天文分潮(日分潮 5 个,为 S_1, K_1, O_1, P_1 和 Q_1 ;半日分潮 4 个,为 M_2, S_2, K_2 和 N_2 ;浅水分潮 1 个,为 M_4)^[11-12]组成,分潮数据空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。



注:1#~5#为胶莱运河的 5 个典型位置

图 2 工程附近计算网格

Fig.2 Computing grids in the areas near the project

1.3 模型验证

底床阻力系数由曼宁阻力系数来确定。随水深的增加,曼宁阻力系数取值为 $0.015 \sim 0.022$ ^[13]。采用 Smagorinsky 公式^[8]计算水平涡流黏度,Smagorinsky 系数 C_s 取值为 0.24。风场的时序资料来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)。风力拖曳系数 $c_a = 1.255 \times 10^{-3}$ 。

利用黄、渤海海域内潍坊港和青岛港等 24 个潮位站(图 3)的潮汐调和常数计算得到的潮位值与模型计算得到的潮位预测值进行对比验证,限于篇幅,潮位验证结果仅展示接近胶莱运河河口位置的潍坊港和青岛港站(图 4)。验证结果表明,所有潮位站潮汐相位误差不超过 0.25 h,潮位峰谷值误差不超过 0.10~0.15 m,这说明模型潮位能够反映实际的潮汐特征。

利用大潮期莱州湾内潍坊港、刁龙咀和砣矶岛三个潮流观测站以及胶州湾内象头东和青岛港两个潮流观测站(图 3)与模型计算得到的潮流预测值进行对比验证,限于篇幅,潮流验证仅展示运河河口位置的潍坊港和象头东站(图 5)。验证结果分析,所有潮流观测站位流速峰谷值的绝对误差不大于涨落潮最大流速值绝对值之和的 20%,流速相位差一般也不超过 0.25 h,说明模型潮流能够反映实际的潮流特征。

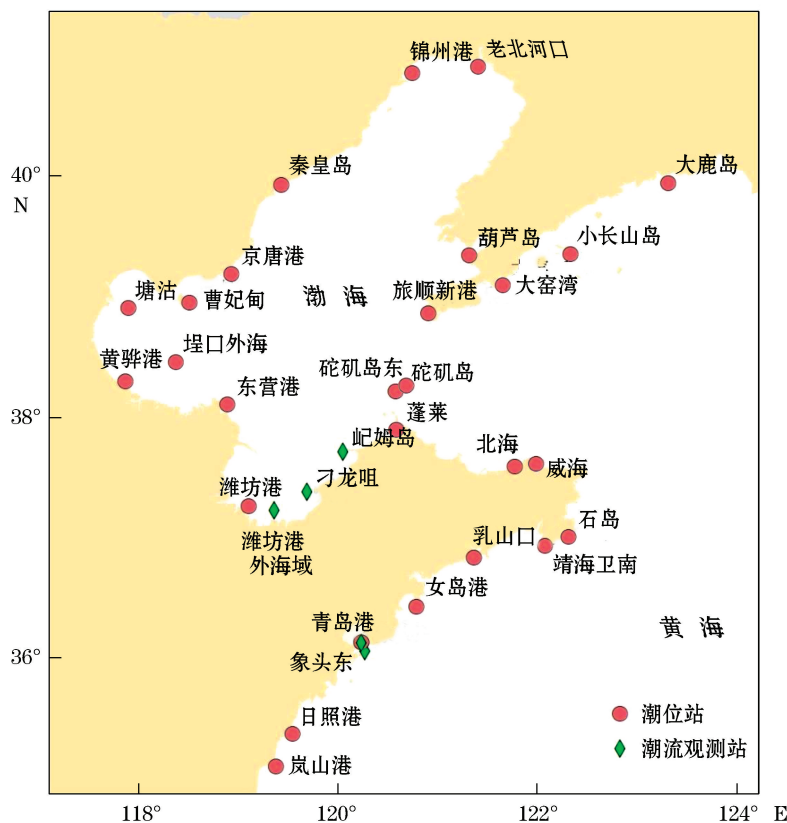


图 3 黄渤海海域内 24 个潮位站的分布

Fig.3 Distribution of 24 tide stations in the Yellow Sea and the Bohai Sea

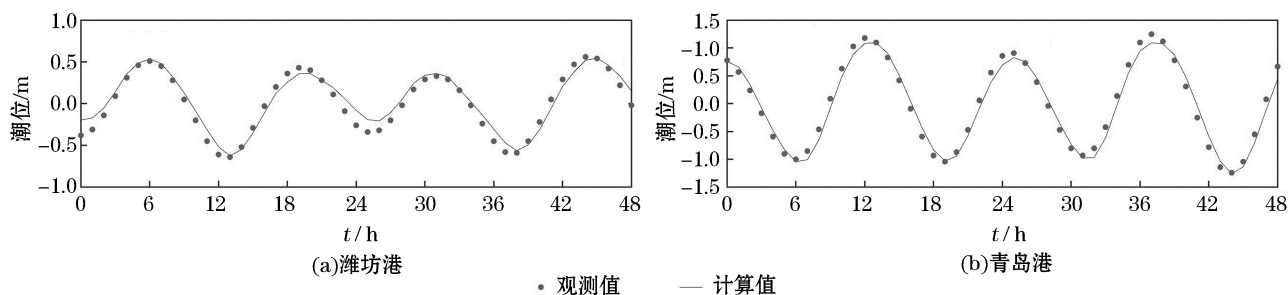


图 4 潍坊港和青岛港两潮位站验证结果

Fig.4 Verifications of tide level at two stations: Weifang Port and Qingdao Port

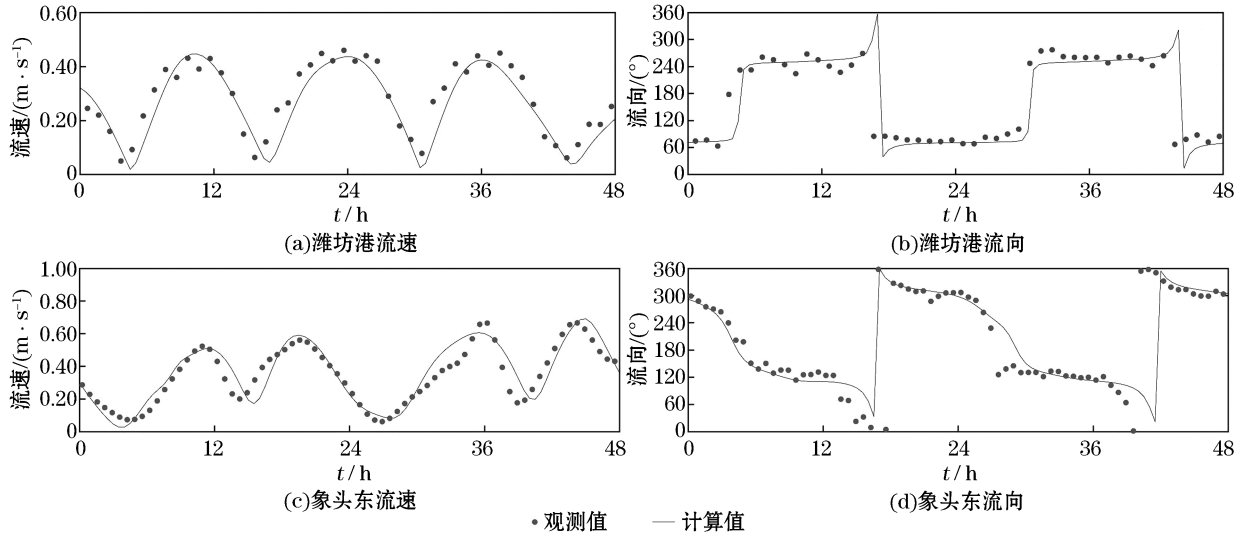


图5 潍坊港和象头东两潮位站流速、流向验证结果

Fig.5 Verifications of flow velocity and direction at two tide Stations: Weifang Port and Xiangtoudong

1.4 水交换计算

建立水交换模式采用的是保守物质的对流-扩散方程:

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial hu\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial hv\bar{C}}{\partial y} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] \bar{C}, \quad (4)$$

式中, $\bar{C}$ 为保守物质的垂向平均浓度, D_h 为水平扩散系数。初始时刻, 莱州湾内水体保守物质的相对浓度设为 1, 湾外水体的相对浓度为 0。模拟海湾某一时刻平均浓度的计算公式为:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot H_i}, \quad (5)$$

式中, n 为海湾所占网格数, 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 为第 i 个网格的面积。湾内某一时刻水交换率的计算公式为 $EX = (1 - \bar{C}) \times 100\%$ 。根据半水交换^[14]的概念, 半交换周期为湾内的平均浓度降为初始浓度一半所需的时间。

2 结果与讨论

2.1 水动力计算结果与分析

由于缺乏观测数据, 在此给出莱州湾和胶州湾胶莱运河河口处(图 2 中 1#点、5#点)大潮同时期的潮位过程模拟结果如图 6 所示。由图 6 可知, 胶州湾河口为正规半日潮, 莱州湾河口为不正规半日潮, 胶州湾河口的潮差远大于莱州湾河口的潮差。两湾河口处的潮位位相几乎相反, 即当莱州湾河口涨潮时胶州湾河口落潮, 当莱州湾河口涨急时胶州湾河口落急, 反之亦然。

由大潮期莱州湾河口涨急、胶州湾河口落急时刻潮流场(图 7a)可知: 涨急时刻潮流由莱州湾外向湾内运动, 流速一般为 0.10~0.78 m/s; 最大流速出现在黄河口、

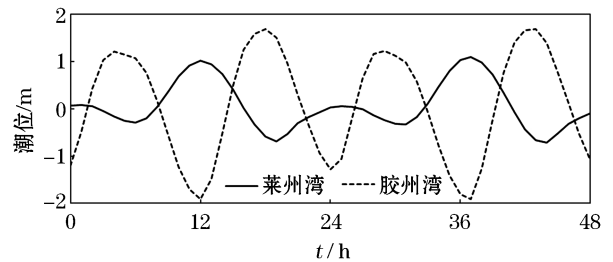


图6 莱州湾和胶州湾河口处潮位过程线

Fig.6 Tidal level process in the estuary areas of the Laizhou Bay and the Jiaozhou Bay

莱州浅滩处,最小流速出现在湾顶附近;湾内流速整体呈现西部流速略大于东部流速的空间特征。流向整体上呈现偏 SW 向,在黄河口南部海域,潮流流向偏 NW 向;在刁龙咀南部海域,潮流流向偏 SE 向。胶州湾河口落急时刻海水流向与涨急时刻相反,海水由湾内经湾口流向湾外,湾口流速大于湾内,最大流速出现在湾口附近,流速最大值约 1.4 m/s,最小流速均出现在湾顶,流速约 0.2 m/s。湾内涨潮流向由湾顶指向湾口。

由大潮期莱州湾河口落急、胶州湾河口涨急时刻潮流场(图 7b)可知:大潮期间落急时刻莱州湾潮流分布情况与涨急时刻潮流场相似,只是流向与涨急时刻潮流场刚好相反,落急时刻潮流流速一般介于 0.10~1.12 m/s,最大流速出现在黄河口、莱州浅滩处,最小流速出现在湾顶附近,湾内流速整体呈现西部流速略大于东部流速的空间特征。流向整体上呈现偏 NE 向,在黄河口南部海域,潮流流向偏 SE 向;在刁龙咀南部海域,潮流流向偏 NW 向。胶州湾河口涨急时刻海水经湾口由湾外流入湾内,湾口流速大于湾内,最大流速出现在湾口附近,流速最大值约 1.5 m/s,最小流速均出现在湾顶,流速约 0.2 m/s。湾内涨潮流向由湾口指向湾顶。

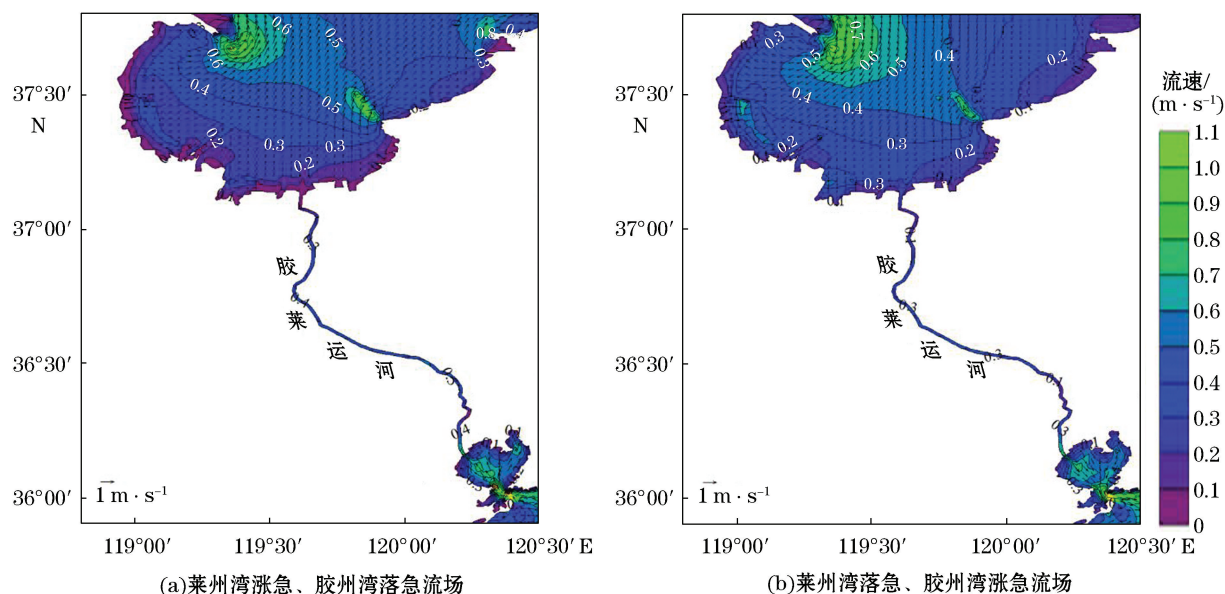


图 7 莱州湾和胶州湾的落急和涨急流场

Fig.7 The flood and ebb flow fields in the Laizhou Bay and the Jiaozhou Bay

为分析河道水动力环境特征,鉴于胶莱河沿线较长,选择胶莱河两端口门内河段 5 个典型位置(图 2),绘制其 48 h 的流速与流向过程曲线图,见图 8,其中 1#点位于莱州湾河口、5#点位于胶州湾河口。胶州湾口门的 5#点最大流速为 1.1 m/s 左右,其他各特征点最大流速不超过 0.5 m/s。1#~5#点的流向每隔一

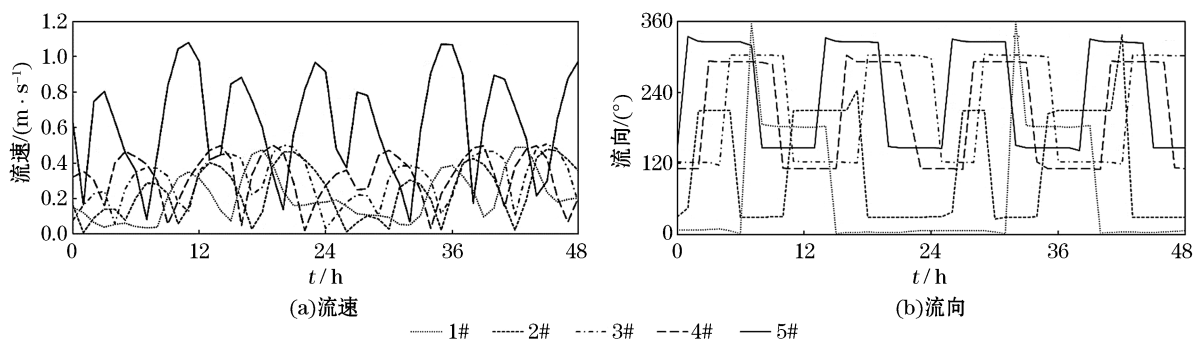


图 8 河道特征点流速与流向过程线

Fig.8 Process of flow velocity and direction at character points in the river channel

天存在 1 h 左右由胶州湾至莱州湾的单向流动,并且每一转流周期,1#点莱州湾入流历时大于出流历时约 7 h。模型统计了胶州湾河口与莱州湾河口断面海水进、出的累计流量。海水经胶州湾河口断面进入河道的累计流量与海水经莱州湾河口断面进入莱州湾的累计流量随时间变化的量值一致,胶莱运河年径流总量约为 $7.2\times 10^9\text{ m}^3$,净流方向由胶州湾流向莱州湾。

2.2 水交换能力影响分析

为研究胶莱运河工程实施对莱州湾纳潮量的影响,在湾口断面计算流量获得整个断面的流量时间序列,然后按涨潮期或落潮期进行流量累计可得海湾潮量。运河工程实施前后莱州湾海域大潮期和小潮期纳潮量计算结果显示,工程实施后莱州湾大小潮期纳潮量均有所减少,其中大潮期纳潮量减少 $3.2\times 10^7\text{ m}^3$,小潮期纳潮量减少 $1.7\times 10^7\text{ m}^3$,大潮期纳潮量减少值大于小潮期。

以位于 $119^{\circ}24'\text{ E}$ 经线附近、垂直于莱州湾湾口连线的直线为界将莱州湾分为西部和东部两个部分(图 2),根据水交换率计算公式及半交换周期的概念表述,模拟得到工程前后莱州湾整体、西部、东部的海水水交换率随时间变化与工程前后莱州湾半交换周期(图 9、表 1),工程后整个莱州湾水交换能力有略微增强趋势,全年平均与现状相比增强约 2.0%,工程后半交换周期(113 d)比现状(127 d)缩短 14 d;西部莱州湾水交换能力基本没有变化,略微增强约 0.5%;东部莱州湾受胶莱河入水口的影响,水交换比西部强,增强约 2.7%。由图 10 可见,莱州湾水体整体上是自西向东交换,湾内运河处出水口交换率最高。运河工程实施后,潍坊港防波堤至刁龙咀海域水交换能力略有增强,潍坊港防波堤以西海域水交换能力基本未发生变化,即运河工程的实施对莱州湾水交换能力影响范围主要位于潍坊港防波堤至刁龙咀之间海域。

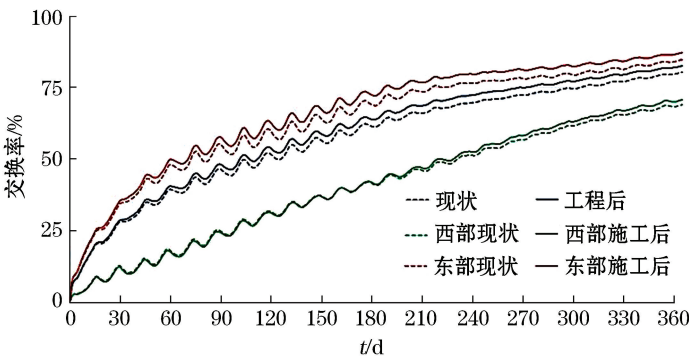


图 9 水交换率随时间变化

Fig.9 Changes of water exchange rate with time

表 1 莱州湾水交换率变化

Table 1 Variations of the water exchange rate in the Laizhou Bay

t/d	整 体		西 部		东 部	
	现状	工程后	现状	工程后	现状	工程后
10	14.7	15.0	4.8	4.6	18.5	19.0
20	20.6	21.1	7.4	7.1	25.6	26.4
30	28.1	28.7	12.5	12.1	34.5	35.5
40	30.6	31.5	12.0	11.5	37.7	39.2
50	34.0	35.2	13.1	12.6	41.7	43.5
60	39.4	40.5	17.9	17.4	48.1	49.9
70	39.6	41.1	19.1	18.6	47.5	49.7
80	41.3	43.1	19.7	19.3	49.1	51.7
90	46.4	48.1	24.7	24.2	55.1	57.6
100	46.7	48.6	27.0	26.5	54.5	57.2
110	46.9	49.2	27.1	26.8	54.1	57.2

续表							%
t/d	整 体		西 部		东 部		
	现状	工程后	现状	工程后	现状	工程后	
120	51.6	53.7	31.5	31.1	59.5	62.6	
130	53.6	55.7	33.8	33.5	61.4	64.5	
140	53.0	55.5	33.7	33.5	60.0	63.4	
150	56.5	58.8	37.0	36.9	64.1	67.4	
160	59.8	62.1	39.4	39.4	68.0	71.2	
170	59.4	62.1	39.0	39.1	66.9	70.5	
180	61.4	63.9	41.5	41.8	69.0	72.4	
190	64.6	67.0	44.3	44.7	72.6	75.8	
200	65.0	67.7	44.0	44.7	72.8	76.2	
210	66.0	68.7	46.0	46.9	73.6	76.9	
220	68.0	70.5	48.9	49.9	75.3	78.5	
230	68.9	71.6	49.5	50.6	76.1	79.3	
240	69.7	72.4	51.3	52.6	76.6	79.8	
250	70.8	73.4	53.8	55.2	77.3	80.4	
260	71.5	74.1	55.1	56.5	77.6	80.7	
270	72.4	75.0	56.7	58.2	78.2	81.2	
280	73.5	76.1	58.9	60.4	79.2	82.1	
290	73.9	76.4	60.2	61.7	79.0	82.0	
300	74.6	77.2	61.6	63.1	79.5	82.4	
310	76.0	78.5	63.5	65.0	81.0	83.8	
320	76.5	79.0	64.2	65.8	81.2	84.0	
330	77.1	79.5	65.4	66.9	81.5	84.2	
340	78.5	80.7	67.2	68.7	83.0	85.5	
350	79.2	81.5	67.5	69.2	83.7	86.2	
360	79.8	82.0	68.4	70.1	84.0	86.5	

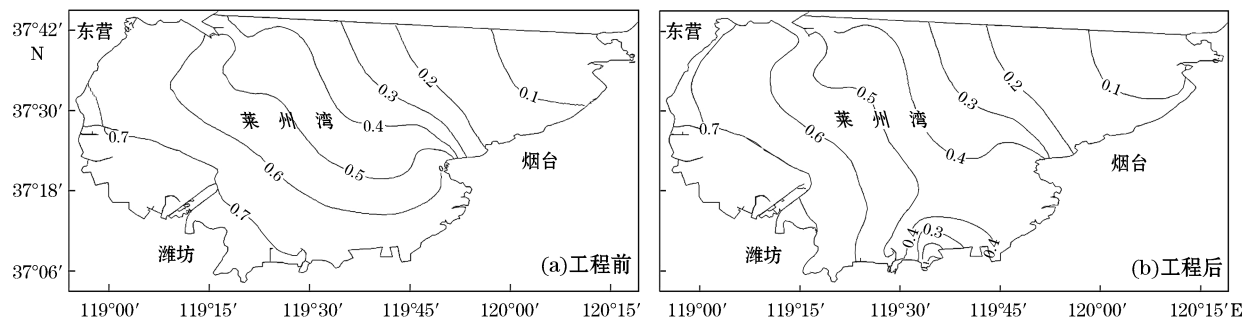


图 10 工程前后在 160 d 莱州湾水交换物质浓度分布(初始值为 1)

Fig.10 Concentration distribution of water exchange substances in 160 days before and after the project (initial value: 1)

2.3 莱州湾海水质量状况的影响分析

2018 年山东省海洋生态环境公报^①中指出,山东省主要的水质污染(低于二类水质标准)区域在渤海沿岸,其中莱州湾的海水水质尤其差,相对应的,胶州湾内虽有部分区域水质较差,但总体相对于莱州湾水质要好(图 11)。从海水水质分布趋势来看,莱州湾东部海水质量普遍高于西部,莱州湾西部陆源污染强度要比东部大,主要是因为黄河及小清河入海径流量大,携带陆源污染较多,另外莱州湾西部水交换效率也明显低于东部。从胶莱河工程前后 160 d 水交换物质浓度差异(图 11a)来看,工程前后莱州湾入流口水交换物质浓度差最大为 0.5(初始为 1),但是影响范围较小,仅仅影响河口向海 5 km 的扇面海域。通过数模计算出年输送海水量,约为 $7.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ (南胶莱河年入海径流量为 $2.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,北胶莱河年入海径流量为 $4.96 \times 10^8 \text{ m}^3$),黄海海水经胶州湾由胶莱运河输送至莱州湾,冲淡莱州湾内非优良水体,可减少水质污染面积约 1.5 km^2 ,在一定程度上可缓解莱州湾东部河流入海口附近小范围海域中的海水水质污染现状。

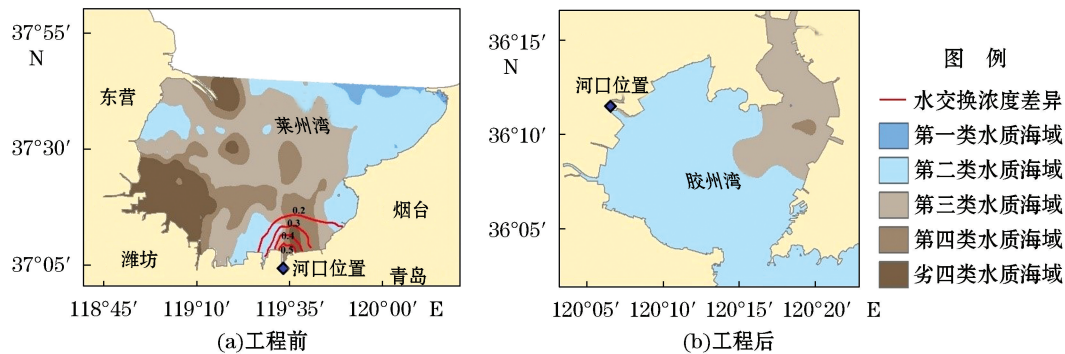


图 11 2018 年莱州湾及胶州湾海域水质等级及工程前、后 160 d 水交换物质浓度差异

Fig.11 Seawater quality grades in the Laizhou Bay and the Jiaozhou Bay in 2018 and difference in concentration of water exchange substances in 160 days before and after the project

3 结 论

建立了二维潮流和对流扩散模型,结合海水水质现状,初步模拟分析了胶莱运河的贯通对莱州湾水动力条件及海洋环境现状的影响,得到结论:胶莱运河开通后年径流总量约为 $7.2 \times 10^9 \text{ m}^3$,净流方向为胶州湾流向莱州湾。莱州湾水体交换整体上是自西向东,湾内运河河口附近水交换率最高。工程后莱州湾整体年平均水交换能力与现状相比增强约 2.0%,半交换周期缩短 11.0%;其中莱州湾西部水交换能力变化较小,增强约 0.5%;莱州湾东部水交换能力变化较大,增强约 2.7%。运河工程的实施对莱州湾水交换能力提升主要位于潍坊港防波堤至刁龙咀之间海域,作用范围仅为河口向海 5 km 的扇面海域。

需要指出的是,黄海海水经由胶州湾、运河进入到莱州湾的海水水质优良,同时保证运河两侧无陆源污染物汇入的前提下,以目前设计的工况贯通运河,莱州湾东部运河河口附近水质污染会略有缓解,但无法从根本上解决海洋生态环境问题,莱州湾污染治理的关键应该是污染源头的控制和管理。

参考文献(References):

- [1] China Gulf chronicles Compilation Committee. China gulf chronicles: volume 3[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 181-192. 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第三分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 181-192.

① 山东省生态环境厅. 山东省海洋生态环境状况公报. 2018.

- [2] WANG L M, MA L, YANG X F, et al. The countermeasures for the pollution control and protection in the Bohai Sea[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(3): 109-111. 王利明, 马蕾, 杨晓飞, 等. 渤海环境污染的治理与保护对策[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(3): 109-111.
- [3] WANG Z, WANG G Q. Exploring the management and protection countermeasures of marine environmental pollution in the Bohai Sea[J]. Environment and Development, 2018, 30(2): 71, 73. 王众, 王桂清. 探究渤海海洋环境污染的治理与保护对策[J]. 环境与发展, 2018, 30(2): 71, 73.
- [4] WANG S C. A new thinking of coordinated economic and ecological development in the Yellow Sea and Bohai Sea areas: construction of artificial Jiaolai Canal project[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(3): 280-284. 王诗成. 黄、渤海区域经济社会协调发展的新思维: 建设胶莱人工海河战略工程[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 280-284.
- [5] LE K T, WANG K, CHEN B. The numerical model of the Jiaolai Canal and its scheme assumption[C]//The Jiaolai Canal Forum, Qingdao, 2006: 43-53. 乐肯堂, 王凯, 陈斌. 重开胶莱运河可行性研究的数值模式及其方案设想[C]//胶莱人工海河论坛论文集. 青岛, 2006: 43-53.
- [6] ZUO J C, DU L, LI L, et al. Preliminary estimation of hydrodynamic conditions (tide, circulation) of the Jiaolai Canal[C]//The Jiaolai Canal Forum, Qingdao, 2006: 31-34. 左军成, 杜凌, 李磊, 等. “胶莱运河”项目水流动力学条件初步估计(潮汐、环流)[C]//胶莱人工海河论坛论文集. 青岛, 2006: 31-34.
- [7] WANG J, JIANG Y W, WAN Z W. Numerical simulation on the Jiaolai Canal with a 1-D and 2-D coupling model[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 145-151. 王佳, 江毓武, 万振文. 一、二维耦合模式在“胶莱运河”中的应用[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 145-151.
- [8] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [9] ZHAO D H. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120(7): 863-883.
- [10] AN Y N, YANG K, WANG Y, et al. Application of MIKE21 model into marine engineering research[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(3): 1-10. 安永宁, 杨鲲, 王莹, 等. MIKE21 模型在海洋工程研究中的应用[J]. 海岸工程, 2013, 32(3): 1-10.
- [11] FENG J. Application of MIKE21 FM numerical model in environmental impact assessment of Ocean Engineering[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. 冯静. MIKE21 FM 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [12] DHI. Mike21 tidal analysis and prediction module scientific documentation[M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2007.
- [13] YAN K, LIANG Q X. Coastal engineering[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002. 严恺, 梁其荀. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [14] ROGER L, THOMAS P. Calculation of water exchange times in the ICES- boxes with a Eulerian dispersion model using a half-life time approach[J]. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1995, 47(4): 287-299.

A Simulation Study on Influence of the Construction of Jiaolai Canal on the Water Exchange and Marine Environment in the Laizhou Bay

SU Bo^{1,2}, ZHU Jin-long^{1,2}, WANG Jia-ying^{1,2}, ZHAO Yu-ting^{1,2}, WANG Li-ming^{1,2}, MA Yuan-qing^{1,2}

(1. *Shandong Marine Resource and Environment Research Institute*, Yantai 264006, China;

2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine*, Yantai 264006, China)

Abstract: In order to study the response of water exchange in the Laizhou Bay to the construction of Jiaolai Canal and to provide references for the marine pollution control, a two-dimensional plane tidal current and convection diffusion model is established by taking the Laizhou Bay as the key simulation area. Then, the impact of the construction of the Jiaolai Canal on the status of marine environment in the Laizhou Bay is preliminarily analyzed based on the topographic and marine environmental data obtained from the Bohai Sea, the Yellow Sea and the Laizhou Bay and combined with the results from the water quality monitoring carried out in the Laizhou Bay in 2018. The simulated results show that after the Jiaolai Canal is constructed, its total annual runoff is about $7.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ and the net flow direction is from the Jiaozhou Bay to the Laizhou Bay. After the project implemented, the water exchange capacity in the whole Laizhou Bay is slightly enhanced, being stronger in the east than in the west, and the half exchange cycle is shortened by 14 days. The sea water of the Yellow Sea enters into the Jiaolai Canal via the Jiaozhou Bay and then is delivered into the Laizhou Bay, which will dilute the non-excellent water in the Laizhou Bay, and then alleviate, to some extent, the status of seawater quality in the small area at the eastern estuary of the Laizhou Bay.

Key words: Jiaolai Canal; Laizhou Bay; water exchange; marine environment

Received: May 9, 2020