

胶州湾跨海大桥对海湾水体交换的影响*

陈妍宇^{1,2} 宋德海^{1,3} 鲍献文^{1,2,3} 严聿晗^{1,2}

(1. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋与大气学院 青岛 266100;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237)

摘要 跨海大桥的建设有利于环湾经济的发展,但桥墩入水不可避免地会对海湾内水动力和水交换造成一定的影响。本文以胶州湾为例,利用无结构网格有限体积海洋模型,建立了能够描绘胶州湾跨海大桥入海桥墩的高精度网格,构造了胶州湾及邻近海域的三维水动力模型,模拟了胶州湾建桥前后的潮(余)流结构。在此基础上,通过污染物示踪对比了胶州湾内污染物在建桥前后的对流扩散过程。模拟结果表明,大桥的建设对胶州湾南部大部分区域的影响较小,包括潮(余)流、水交换等方面;但对大桥北侧以及南侧靠近大桥一定范围内的区域有显著影响。大桥北侧潮致余流整体减小约 2cm/s,靠近桥南侧的余流则由向北转为沿桥向东流动。由于大桥的影响,污染物在大桥北侧堆积,重点集中于桥北的红岛以西(区)沿岸区域以及红岛以东(区)大部分区域。其中,区建桥后的半交换时间增加了 2.00d,区增加了 2.04d。在减缓污染物扩散速率的同时,大桥也同样阻碍了径流输出的淡水向胶州湾南部的输运,使得桥北水体的盐度降低,有可能是造成近年来胶州湾冬季冰情加剧的原因之一。

关键词 胶州湾跨海大桥;潮致余流;水交换;污染物输运;数值模拟

中图分类号 P731.26 **doi:** 10.11693/hyh20180900211

水交换能力作为评价海湾环境容量和环境质量的重要指标之一,其强弱与海湾的水质状况息息相关。采用不同的水交换概念及水动力模式计算得到的水体交换时间会有所差异。其中,净化时间、物质存留时间和水体更新时间都基于无扩散这个假定,使得这些定义的适用范围有所局限(魏皓等,2002)。水交换问题的本质即是水体在流场中的对流-扩散问题,因此水体扩散不应该被忽略。对此,Luff等(1995)引入半交换时间的概念,即在对流、扩散过程下,海域内保守物质浓度降到初始浓度一半所需的时间。这种方法同时考虑了对流和扩散,较之其他定义更客观,也更全面。封闭、半封闭海湾本身的物质交换能力弱,因此海湾内的细微变化,都将对其水动力产生影响。为了探明海湾水交换能力的情况,已有多种模型被用于这方面的研究。王聪等(2008)基于 ECOM-

si(Estuarine Coastal and Ocean Model-semi-implicit)三维数值模式,同时耦合 Lagrange 粒子追踪法及保守污染物输运模型,研究了大亚湾整个海湾及各子区域的水体平均存留时间和更新时间。魏皓等(2002)则在 HAMSOM(HAMBurg Shelf Ocean Model)三维斜压分层平均半隐模式下,利用水质模型计算了渤海 4 个区域(辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海中部)的半交换周期。王平等(2018)则是在三维有限体积海洋模式(Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM)模型下,采用粒子追踪法及保守污染物输运模型,再现了象山港内污染物的输运趋势。

胶州湾是位于青岛市境内的半封闭海湾,平均水深 7m,是青岛的“母亲湾”。胶州湾拥有天然的优良港口资源和丰富的渔业资源,对青岛市的发展起到不可或缺的重要作用。为促进山东半岛城市间的交通

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划), 2015CB452905 号; 国家自然科学基金委—山东联合基金, U1706215 号。陈妍宇, 博士研究生, E-mail: cyy@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 宋德海, E-mail: songdh@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018-09-03, 收修改稿日期: 2019-01-08

联系和经济发展,青岛市政府于 2006 年开始筹备建设胶州湾跨海大桥,以此缩小胶州湾东西两岸和红岛间的距离。大桥于 2011 年 6 月建成通车,全长 28.05km,跨海部分 25.17km,共有 1691 个墩身、3 个主要航道(从西到东分别为大沽河航道,桥长 610m,主跨 260m;红岛航道,桥长 240m,主跨 120m;沧口航道,桥长 600m,主跨 260m)。

近年来,对于胶州湾内水动力变化的研究主要集中在两个方面:(1)利用不同模型模拟水动力过程来探究胶州湾的整体或局部水交换能力。Shi 等(2011)等采用 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Computer Code)模型并耦合污染物示踪模块,对胶州湾在 1966、1988、2000 和 2008 年的岸线水深情景下的潮流场和海湾平均存留时间进行了研究。赵亮等(2002)利用 ECOM 模型通过质点跟踪,定量地研究了整个海湾海水的存留时间及各区域的水交换能力。吕新刚等(2010)基于 POM(Princeton Ocean Model)的数值模拟结果,认为胶州湾水交换能力自湾口向湾内逐渐减弱,且在空间分布上有很大差异。(2)对比围填海造成岸线变化给胶州湾水动力和物质运输带来的影响。陈金瑞等(2012)采用 FVCOM 海洋模式,基于胶州湾近 70 年的岸线变化建立典型年代的情景模拟,分析比较了围填海造成的水域面积大幅缩小对水动力的影响。Gao 等(2014, 2018a, b)采用 FVCOM 建立了三维正压水动力模型,同时耦合波浪、泥沙模型,研究了胶州湾 1935—2008 年间岸线变化对湾内潮动力和泥沙运输的影响,并提出浪流相互作用会从多方面影响胶州湾内泥沙的动力输运。Yuan 等(2016)则指出不同的污染物指标对岸线演化的响应是不同的,需要结合生物地球化学过程进行研究。Xiao 等(2018)利用 2015 年一组实测数据计算了胶州湾的纳潮量,对比历史资料发现,随着胶州湾海域面积的缩小,过去 80 年里胶州湾的纳潮量减少了 22%,但近年来随着退地还海政策的实施,胶州湾的纳潮量已有所恢复。

潮流是近岸海水运动的主要形式,潮致余流尽管量值较小,却与物质的长期输运关系密切。胶州湾内潮致余流的水平结构呈现多涡的形态,自湾口至湾顶,共 5 个显著的余流涡旋,其中在团岛、黄岛之间余流涡旋最强,最大流速达 20cm/s(闫菊等, 2001)。团岛岬角两侧存在一对方向相反的余流涡旋,并在团岛附近海域辐合,形成了流速达 57cm/s 的强余流(吕新刚等, 2010)。在大桥建成后, Li 等(2014)通过模

拟发现,胶州湾内余流涡旋的数量减少,湾口处的涡旋显著减弱,而湾内较弱的流环则消失了。Zhao 等(2016)发现大桥使湾口余流流速减小,同时限制了内湾余流向北的发育,压缩了中部大型顺时针余环流的范围。

而对于大桥建设给胶州湾水动力带来的变化,学者们也给出了一定研究。Li 等(2014)利用 FVCOM 模型,研究了大桥建设引起的胶州湾潮汐动力学变化,发现在涨落潮时,大桥桥墩之间流速增加 5—6cm/s,而靠近桥墩处的水流速度减小,但桥墩对大桥南北两侧流速的影响不大。Zhao 等(2015, 2016)应用 MIKE21 建立数值模型,结果表明胶州湾西部海域,在桥南北两侧形成不同的水位变化梯度,产生的正压流使大桥北侧平均流速增加,而南侧平均流速减小,大桥东部则相反。张莞君等(2015)建立了胶州湾平面二维潮流模型,对胶州湾建桥前后的潮流场进行模拟,发现大桥仅对其南北 1.5km 范围内区域有影响,而对胶州湾整体流场影响较小。而对于大桥建设后胶州湾水交换变化的研究则相对较少,本文将采用三维水动力模型 FVCOM 对胶州湾及附近海域的潮汐、潮流进行模拟,并通过污染物示踪实验分别模拟大桥北部东、西两区的水体交换,以揭示大桥建设前后海水半交换周期的变化以及大桥建设对水动力和物质运输的影响。

1 模型设置

1.1 模型计算区域及网格介绍

为更好地拟合胶州湾复杂的岸线,本文选用了无结构网格 FVCOM,该模式水平方向上采用三角形网格,能够较为灵活地拟合复杂岸线,并在重点区域进行局部加密;垂向上采用 σ 坐标(Chen *et al.*, 2003, 2006)。此外,对于潮汐、潮流的模拟, FVCOM 采用有限体积法,此方法同时具有有限元法的几何灵活性及有限差分法的简单离散结构与高效计算能力,能更好地模拟近岸、河口等岸界、地形复杂区域,同时,也能更好地保证质量、动量、盐度和热量的守恒性。

模型的计算区域为 35.5°—36.3°N、120.0°—120.7°E,垂向分为 7 个 σ 层。如图 1 所示,本文分别在有桥和无桥情况下建立两套高精度网格,两套网格仅在大桥桥墩处存在有无网格的区别,其余完全相同,以减小因网格不同造成的计算误差。其中,水深和岸线均采用 2013 年的数据。

1.2 边界条件

本文不考虑温盐变化带来的影响, 温盐均设为常数。采用零初始条件, 开边界水位驱动, 利用 8 个主要的天文分潮和 3 个浅水分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_4 、 MN_4 、 MS_4)的调和常数, 在开边界 66 个节点处用 T_TIDE 后报出开边界水位。其中, 调和常数来自于 NAO.99(Matsumoto *et al*, 2000)。

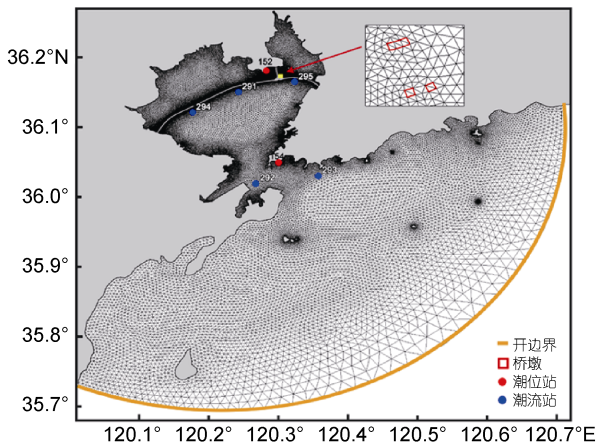


图 1 胶州湾模型的网格范围及实测站点分布图

Fig.1 The model domain and grid of the Jiaozhou Bay

2 模型验证

本文用于验证的观测资料来自国家重点基础研究发展计划(973 计划)。水位数据采用自记式温深仪, 时间间隔 2min, 其中, 取红岛验潮站(152 站)2015 年

7 月 14 日—8 月 12 日和团岛验潮站(154 站)2015 年 7 月 15 日—8 月 13 日的观测资料进行验证。而潮流采用电磁海流计(600Hz)测量, 采样间隔 2min, 并以 291—295 站于 2015 年 7 月 16 日 08 时—17 日 09 时(大潮)和 7 月 23 日 08 时—24 日 09 时(小潮)所测结果进行验证。同时, 数据经过质控没有发现异常。由图 2 可以看出潮位的模拟结果与观测拟合较好。表 1 给出了两站观测和模拟的振幅和迟角对比, 除 S_2 分潮迟角偏差稍大外, 其他分潮均模拟较好。

用来验证海流的数据取自 291—295 站(站位分布如图 1 所示)于 2015 年 7 月 16 日 08 时—17 日 09 时(大潮)和 7 月 23 日 08 时—24 日 09 时(小潮)所测结果。对比结果如图 3 所示, 大潮期间, 除 292 站流速在峰值处偏小外, 其他各站模拟的流速流向均与实测结果吻合较好; 而小潮时, 除 291 站部分时刻及 292 站峰值时刻流速偏小外, 其他各站均模拟较好。存在的这些偏差可能是由于模型在计算时进行了适当的简化, 未考虑风强迫、密度梯度等因素的影响, 同时网格点与实测点之间存在一定的空间偏差造成。

综上所述, 模拟结果可再现胶州湾内潮汐、潮流的主要特征, 能够支持本文研究工作的开展。在下文有桥和无桥的情景模拟中, 除桥墩处的网格差异外, 模型(如: 岸线、水深、开边界条件等)均采用相同的配置, 以有针对性地分析大桥建设对胶州湾水动力和物质运输的影响。

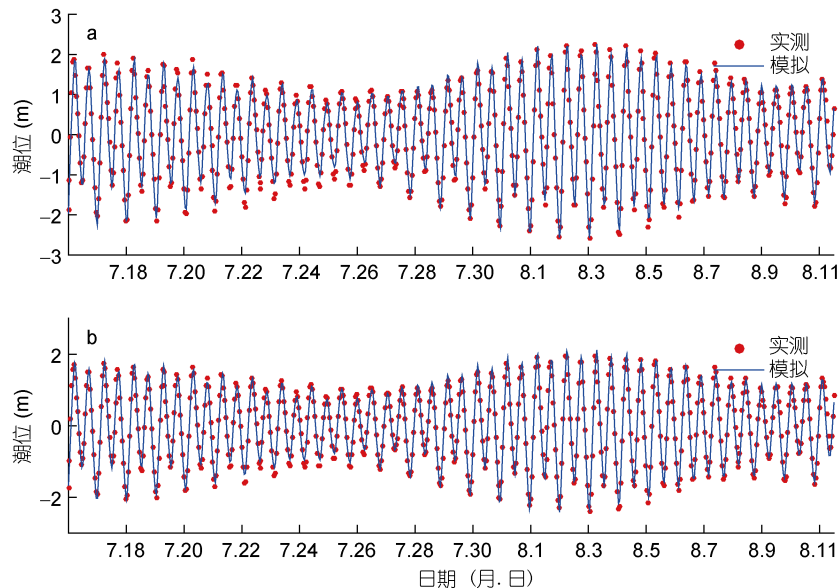


图 2 模拟水位与实测水位(2015 年 7 月 16 日—8 月 11 日)

Fig.2 Simulated and measured tidal level in the stations from July 16 to August 11, 2015
注: a: 红岛验潮站(152 站); b: 团岛验潮站(154 站)

表 1 红岛和团岛站实测与模拟调和常数对比
Tab.1 Comparison between modeled and observed harmonic constants for stations Hongdao and Tuandao

分潮类型	站位	振幅(cm)			迟角(°)		
		观测值	计算值	绝对误差	观测值	计算值	绝对误差
M ₂	红岛	140.64	141.09	-0.45	134.02	133.94	0.08
	团岛	130.51	130.73	-0.22	129.97	130.00	-0.03
S ₂	红岛	40.81	41.78	-0.97	179.25	174.70	4.55
	团岛	38.15	38.82	-0.67	173.36	169.32	4.04
N ₂	红岛	25.27	25.77	-0.50	126.16	125.58	0.58
	团岛	24.14	24.24	-0.10	120.40	120.90	-0.50
K ₁	红岛	32.89	32.40	0.49	354.39	353.49	0.90
	团岛	32.39	32.27	0.12	351.42	351.36	0.06
O ₁	红岛	21.71	20.62	1.09	296.57	297.17	-0.60
	团岛	20.86	20.80	0.06	294.50	293.94	0.56
Q ₁	红岛	3.05	3.04	0.01	275.17	276.81	-1.64
	团岛	3.35	3.41	-0.06	278.07	277.06	1.01

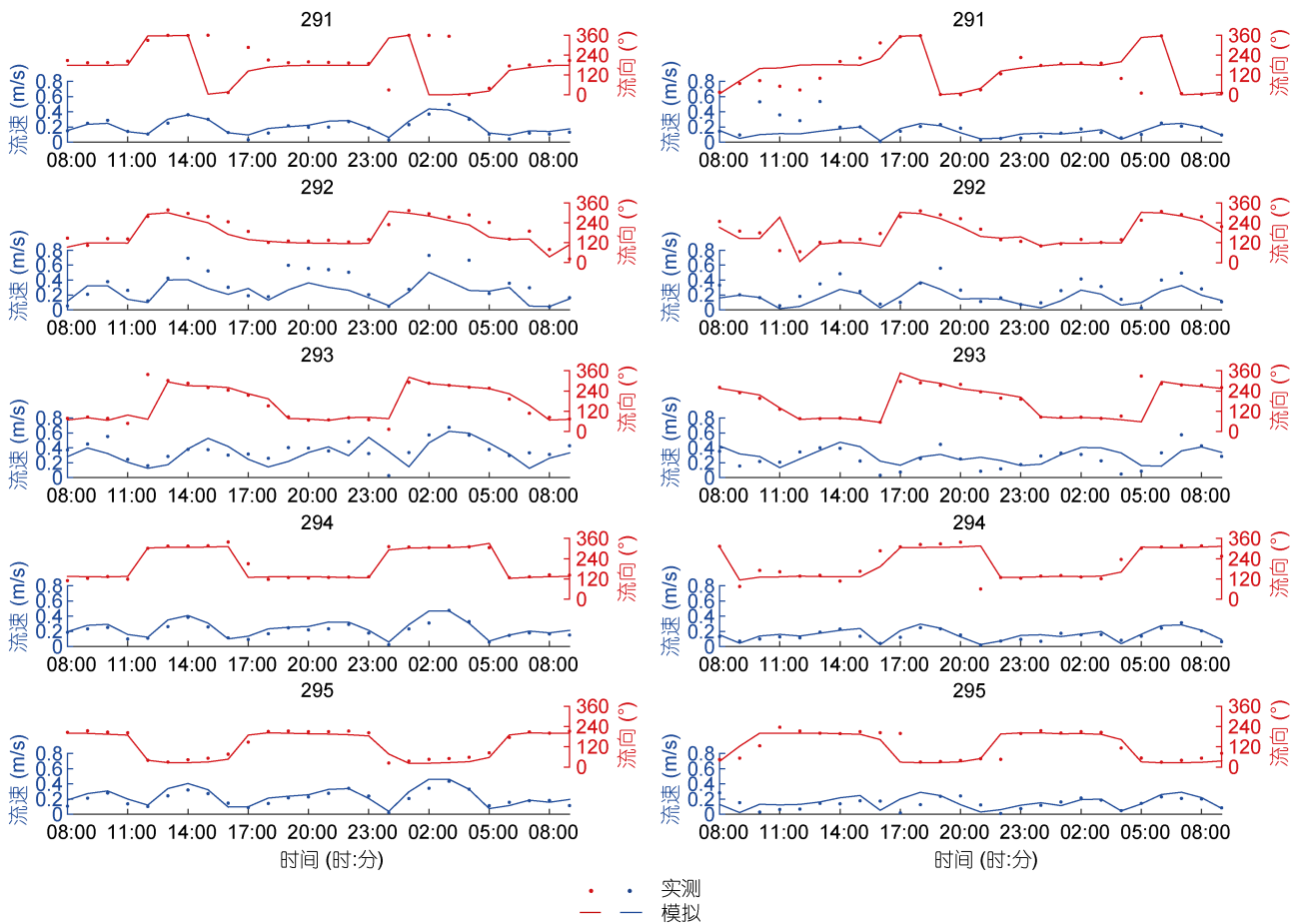


图 3 大潮(2015年7月16日~17日,左列)与小潮(2015年7月23日~24日,右列)期间291—295站海流流速、流向实测与模拟对比图

Fig.3 Comparison of observed and simulated current speed and direction in stations Nos. 291~295, respectively, for the spring tide (left panel) from July 16 to 17, 2015 and neap tide (right panel) from July 23 to 24, 2015

3 水交换能力变化

3.1 水动力变化

大桥的建设对海流流向的影响较小, 流场结构基本没有变化。图 4a—图 4h 分别为涨急、高潮、落急、低潮时刻无桥和有桥情况下的流场分布情况。对比发现, 除了大桥 T 型区域流速在涨、落急时可以看出明显的降低以外, 其他区域流速基本没有明显差异。涨急时, 胶州湾内潮流整体流向由南向北, 东岸沿岸流流向为西南-东北向, 西岸沿岸流流向为东南-西北向; 落急时, 其流向整体由北向南, 东岸为东北-西南向, 西岸为西北-东南向, 与前人研究结果一致。

图 4i—图 4l 为建桥前后流场流速大小的差值。相对于无桥情况, 涨、落急期间胶州湾大部分区域的流速减小约 0.01m/s。涨急时, 大桥北侧流速因桥墩阻挡, 减小明显, T 型区域减小最为明显, 超过 0.10m/s, 最大减小 0.20m/s。而大桥南部东西两侧以及大桥北部红岛南部小范围区域则因为大桥与岸界的阻流而使流速略有增大。落急时, 潮流由北向南, 靠近大桥南侧流速相对无桥时减小约 0.02m/s。同时, 由于细致刻画了所有桥墩结构, 使得结果比前人研究更精确, 并非所有桥墩之间均表现为流速增加, 在涨、落急时沿桥会出现流速增大、减小相间的情况, 其中, 在桥墩相距较宽区域流速增加。

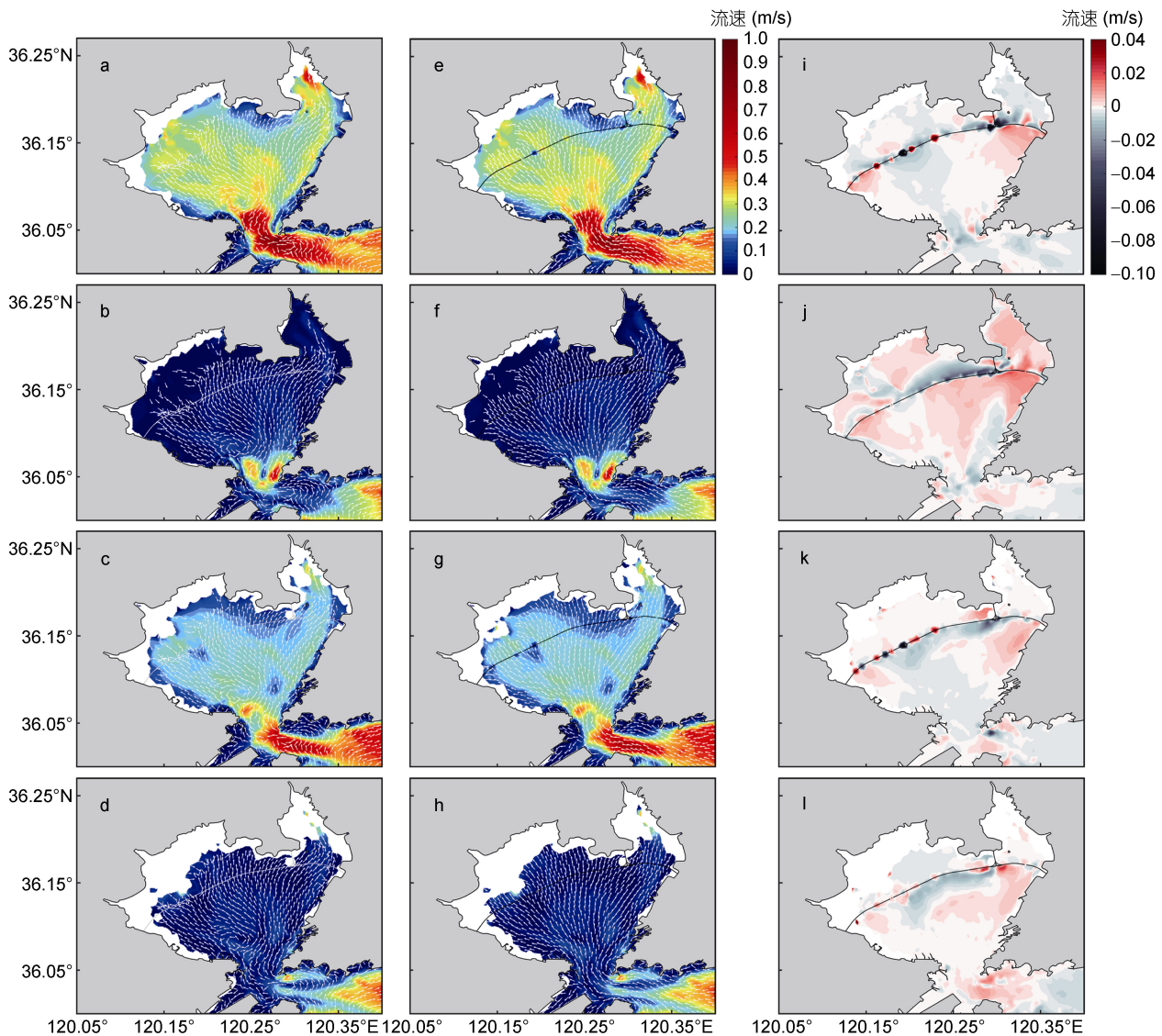


图 4 胶州湾跨海大桥对潮流的影响

Fig.4 Impact of the Jiaozhou Bay Cross-bay Bridge on tidal currents

注: 箭头表示方向, 颜色表示流速; a—d 分别为无桥情景下涨急、高潮、落急、低潮时刻的流场分布; e—h 为有桥情景下对应时刻的流场分布; i—l 为对应时刻有桥减无桥的差值

大桥的建设对胶州湾南部潮致余流(本文计算结果中的余流均指潮致余流)的多涡结构略有影响,除了前人提到的 5 个余流涡旋外,胶州湾中部至大桥南侧又多了一个反气旋式余流涡旋(图 5)。有桥情况下,胶州湾余流强度较无桥时整体是减弱的,尤其是大桥南北两侧。有桥存在时,北侧余流接近于

0,较无桥时减小 2—4cm/s;而南侧余流则沿桥向东流动,强度虽然比北侧强,但较无桥情况下也减小了约 1—2cm/s。此外大桥附近出现了一个余流增强的区域,即大桥 T 型连接处附近,相对于其他各处余流强度的减弱,此处强度反而较无桥情况增强约 2cm/s。

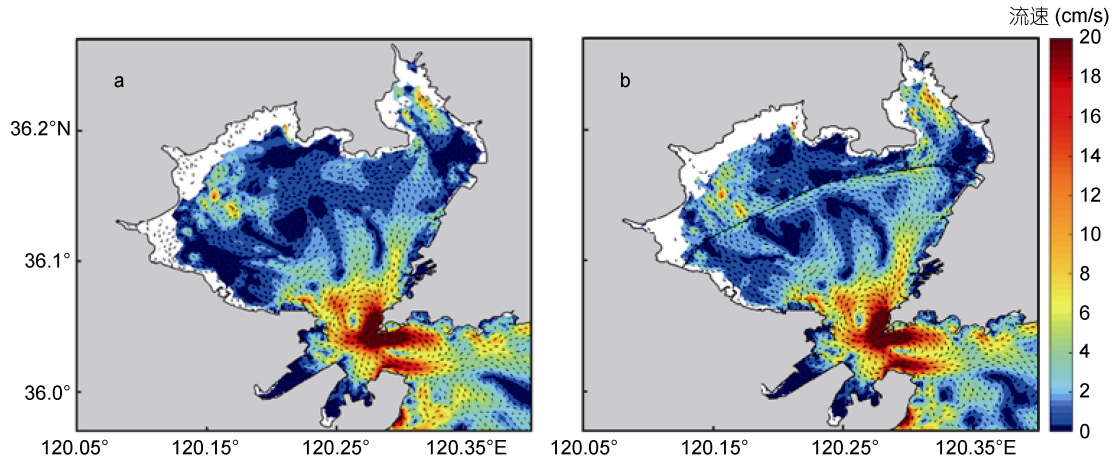


图 5 胶州湾跨海大桥对余流场的影响

Fig.5 Impact of the Jiaozhou Bay Cross-bay Bridge on residual currents

注: a 为无桥情景; b 为有桥情景; 箭头代表方向; 颜色代表大小

3.2 水交换能力变化

湾内的污染物通过对流-扩散过程与湾外水体进行交换,也就是说,海湾水交换的快慢与海湾自净能力的强弱密切相关。因此,进行海湾水交换能力的研究,对于评价和预测海湾环境质量有重要作用。

通过上述潮汐、潮(余)流的验证,说明此模型能够为下一步研究提供可靠的动力背景场。本节在水动力模型基础上,加入污染物示踪模块,通过三个实验逐步揭示胶州湾跨海大桥对胶州湾整体及局部水交换能力的影响。

3.2.1 水交换计算方法 在水交换的研究中,常用净化时间(Flushing time)、物质存留时间(Residence time)、水体更新时间(Turn-over time)、半交换时间(Half-life time)等概念来定量分析。不同的方法计算得到的胶州湾水交换时间从几天到几十天不等,故需要明确各方法的定义,以在不同情况下选择适合的评估方法。

净化时间: 指水流通过开边界进入并充满整个箱体所需时间。

物质存留时间: 保守性粒子从某个特定位置运移到计算域边界所需的时间。适用于质点跟踪模型。

水体更新时间: 其定义仍未完全统一,主要为下

述两种。1、箱内物质浓度降为初始浓度 37%所需的时间。2、当海域内原有质点数达到稳态时(或减少到原有质点数的 37%时)所经过的时间。该定义适用于质点跟踪模型。

半交换时间: 某海域保守物质浓度通过对流、扩散等稀释为初始浓度一半所需的时间。

其中,净化时间和物质存留时间仅考虑了对流作用对水交换的影响,未考虑扩散的作用,故计算得到的水交换时间过长,低估研究区域的水交换能力。因此经过对评估方法的比较,本文选用了考虑扩散作用的半交换时间方法。

计算研究海域的平均污染物浓度,其表达式为:

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^6 C_{i,j} \cdot S_i \cdot h_{\delta_i}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^6 S_i \cdot h_{\delta_i}}$$

其中: C_a 代表研究区域的平均污染物浓度; $C_{i,j}$ 代表网格 i 的污染物浓度; S_i 代表网格 i 的面积; h_{δ_i} 代表网格 i 的 δ 层高度。

3.2.2 实验一 以湾口 120.29°E 为界,胶州湾内(区)污染物的初始浓度值设为 1,湾外的初始浓度值为 0(图 6)。

由图 7 可知,污染物扩散的方式基本不受大桥影响,

建桥前后保持不变, 污染物浓度分布基本沿等深线平行分布。湾口处水动力交强, 污染物浓度下降快; 而湾顶水动力较弱, 污染物浓度下降相对较慢。在第 40d 左右全湾各处基本都降到初始浓度的 50% 以下, 仅在一些滩涂、港区内部因水动力较弱污染物浓度仍旧较高。

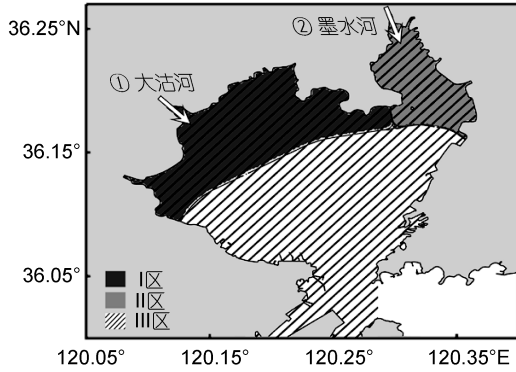


图 6 各实验污染物布放区域图

Fig.6 Initial distribution of passive-tracing contaminant in different experiments

图 8 为胶州湾污染物平均浓度随时间的变化情况。无桥时, 胶州湾内水体半交换周期为 9.67d; 有桥时, 半交换周期为 9.96d, 两者之间相差仅 0.29d。这

表明大桥的建设对胶州湾整体的水体交换能力影响不大, 但因胶州湾跨海大桥位于胶州湾湾顶水深较浅的海域, 其影响区域在计算半交换周期时贡献偏小。因此整个胶州湾的水体半交换周期无法准确描述大桥对胶州湾水交换能力的影响。通过图 9 也可发现, 胶州湾建桥前后大桥南侧(胶州湾大半部分区域)的半交换周期差异几乎可以忽略。但在大桥北侧, 尤其是环红岛及胶州湾东北部区域, 半交换周期明显增加, 湾顶增幅可达到 5d 以上。

为进一步探究胶州湾跨海大桥的影响, 故进行实验二, 更加有针对性地对分析大桥北侧区域在建桥前后的变化情况。

3.2.3 实验二 以红岛联通为分界线, 将桥北部分为 I 区(西北部)、II 区(东北部)两个区域, 分别进行 4 个污染物示踪实验, 即在 I、II 区分别进行有桥和无桥两组实验, 研究区域内的污染物初始浓度值设为 1, 其余区域的初始浓度值为 0 (图 6)。

由图 10 可知, 污染物扩散方式基本不变。在第 30d 左右, 4 种情况下的胶州湾跨海大桥北部大部分区域的污染物浓度均已减半。除了洋河口区域, 由于水动力弱, 直到第 50d 左右污染物浓度才开始有所下降。

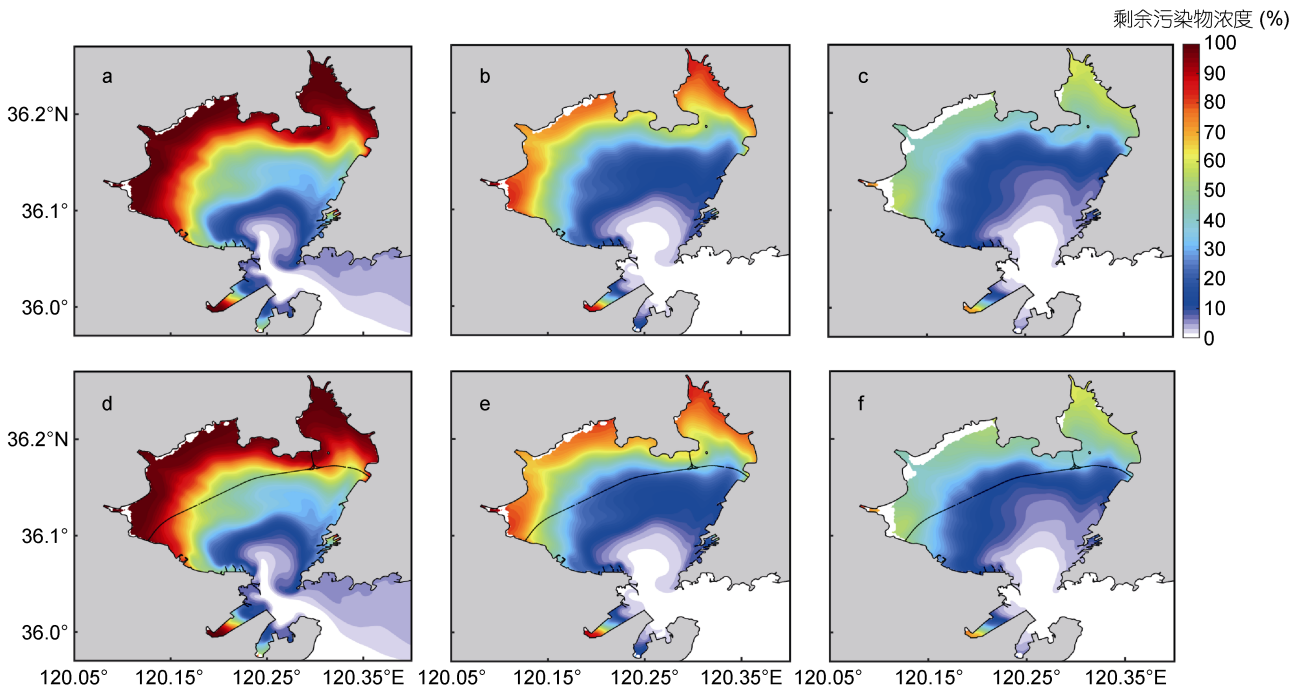


图 7 污染物浓度分布图

Fig.7 Distribution of contaminant concentration on Day 20, 40, and 60 in the case without bridge (a—d) and with bridge (e—h), respectively

注: a—c 分别为无桥情景下第 20、40 和 60 天的污染物浓度分布; d—f 为有桥情景下对应时期的污染物浓度分布

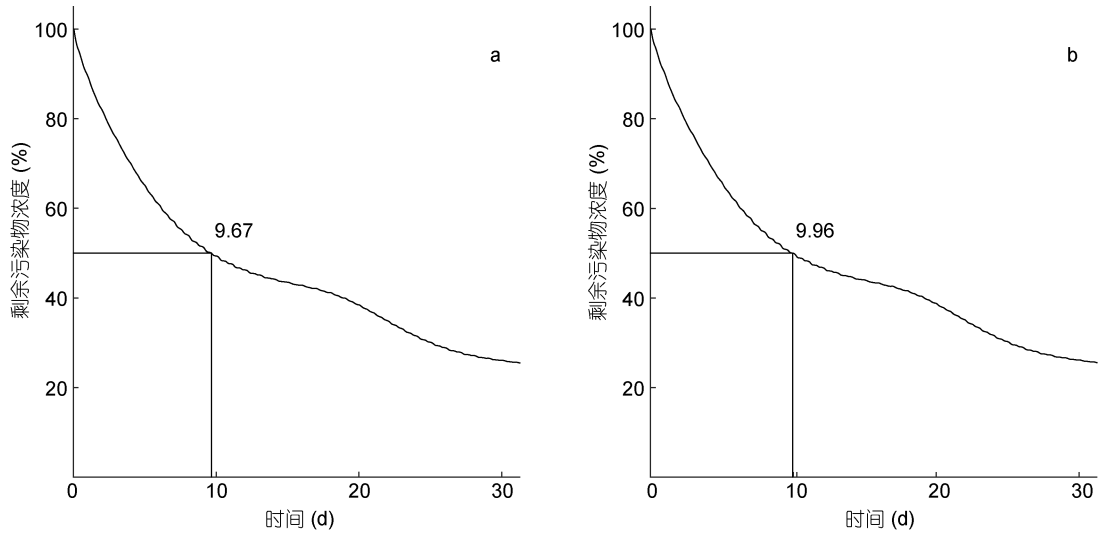


图 8 胶州湾污染物平均浓度随时间变化曲线

Fig.8 Time series of contaminant concentration in Jiaozhou Bay in the cases without bridge (a) and with bridge (b)
注: a: 无桥; b: 有桥

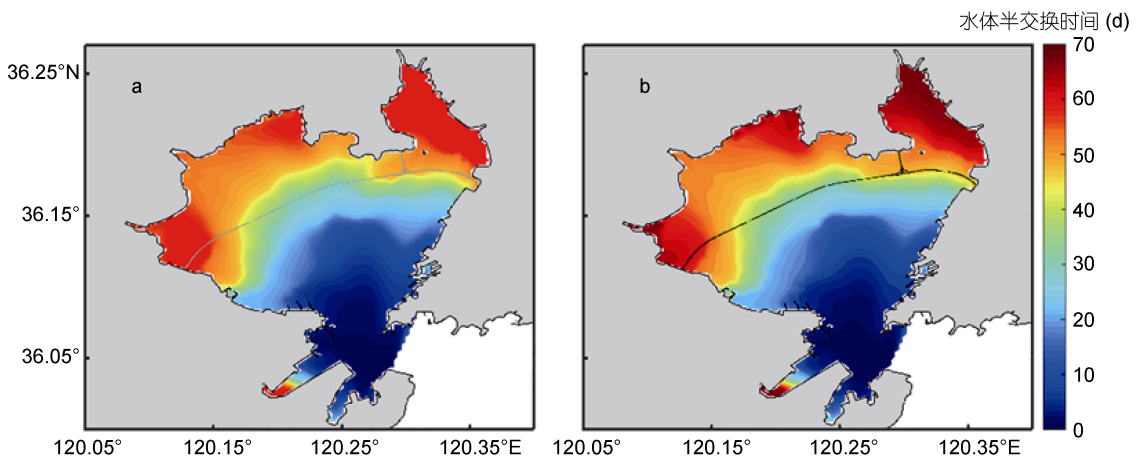


图 9 胶州湾水体半交换时间水平分布图, 其中(a)无桥, (b)有桥

Fig.9 Horizontal distribution of half-life time in Jiaozhou Bay in the cases without bridge (a) and with bridge (b)
注: a: 无桥; b: 有桥

图 11 为模型运行第 30d 后污染物的浓度差(有桥-无桥)。如图 11a 所示, 由于大桥的阻隔, 污染物难以对流扩散出 区, 造成堆积, 尤其在红岛西侧。同时, 大桥 T 型区阻截了本应输运到胶州湾东北部的部分污染物, 使东北部污染物浓度较无桥时要低。同样, 由图 11b 可知, 对于 区的污染物, 大桥令其难以绕过红岛到达红岛西侧, 故红岛西侧污染物浓度在有桥时比无桥时低。而东北部也因污染物受到阻隔未能有效对流扩散出胶州湾东北部, 浓度明显增加。

图 12 分别为 区、 区在有桥情况下, 浓度

随时间变化的情况。无桥时, 区的半交换时间为 18.54d, 区的半交换时间为 24.17d, 可见大桥北侧东北部水动力本身较西北部弱; 而有桥时, 区的半交换时间为 20.54d, 区的半交换时间为 26.21d。由上述结果可知, 桥北水体半交换周期均有所增加, 区增加了 2.00d, 区增加近 2.04d, 即建桥后, 大桥北部区域的水交换能力是降低的。

3.2.4 实验三 研究区域内的污染物初始浓度值均设为 0, 以河口为源, 不间断输入污染物, 其值为 1。共进行两个实验, 分别从大沽河、墨水河排放污染物(如图 6 所示)。

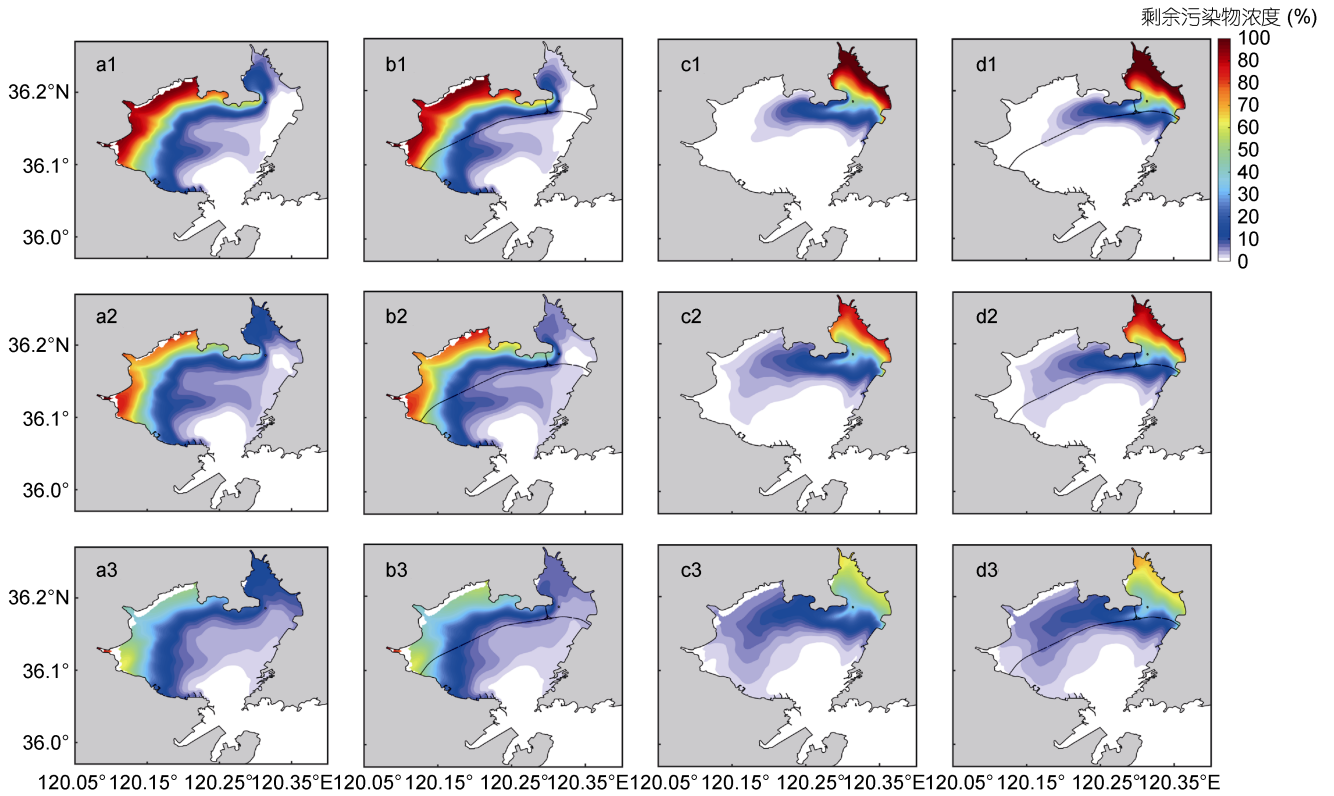


图 10 污染物浓度分布图

Fig.10 Distribution of contaminant concentration

注: a—d 分别为 区无桥、 区有桥、 区无桥和 区有桥情景; 1—3 分别为第 10、20 和 30 天时的污染物浓度分布

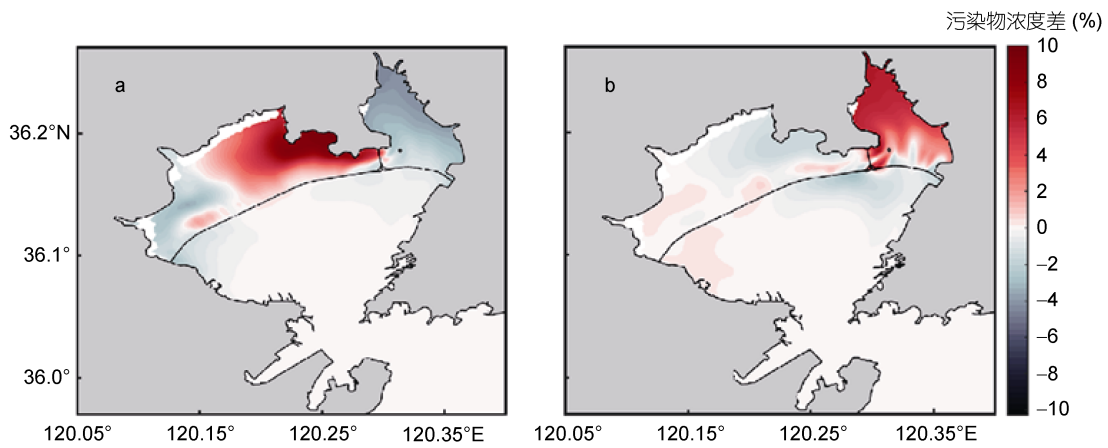


图 11 污染物浓度差(第 30 天有桥减无桥的结果)

Fig.11 The difference of contaminant concentration of the cases with and without bridge on Day 30 for Section I (a) and Section II (b)

注: a: I 区; b: II 区

图 13 是污染物排放半年后有/无桥污染物浓度差的结果。图 13a 是大沽河排放的情景, 可以看到与实验二相仿, 污染物主要积聚到 区东侧, 而有少部分集中到胶州湾西部。图 13b 则是墨水河排放

的情景, 污染物滞留在胶州湾东北部。两个实验中, 污染物的堆积效果等同于入海淡水稀释了该处海水, 使之盐度降低, 这会使该区域海水在低温时更易结冰。

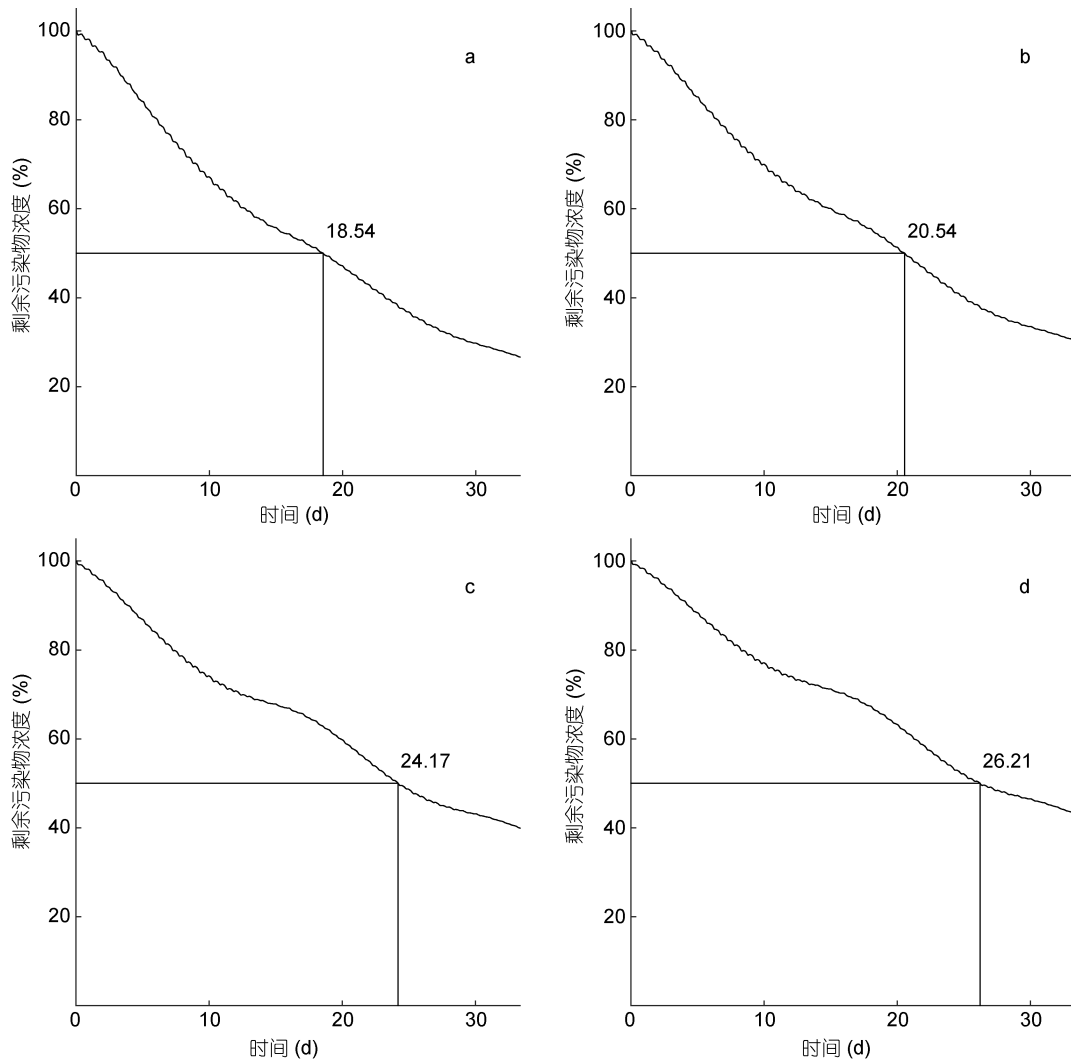


图 12 污染物平均浓度随时间变化曲线

Fig.12 Time series of contaminant concentration in Section I without bridge (a), Section I with bridge (b), Section II without bridge (c), and Section II with bridge (d)

注: a: 区无桥; b: 区有桥; c: 区无桥; d: 区有桥

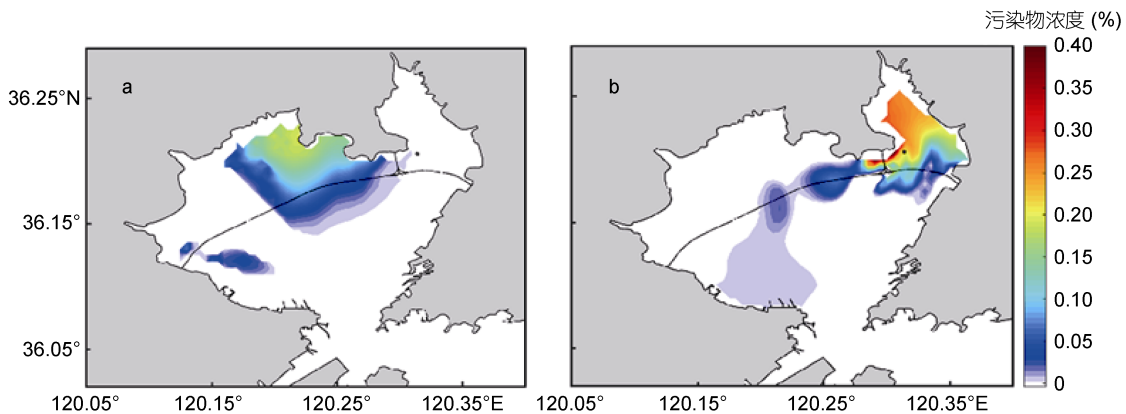


图 13 污染物浓度差(第 180 天有桥减无桥的结果)

Fig.13 The difference of contaminant concentration of the cases with and without bridge on Day 30 in the scenarios of input from (a) Dagu River and (b) Moshui River

注: a: 大沽河排放; b: 墨水河排放

4 结论

胶州湾对于青岛的社会经济发展有着举足轻重的作用。而随着大桥的建设, 环胶州湾区域的经济将持续快速发展, 这会导致向胶州湾排放的陆源污染物逐步增加, 因此, 在胶州湾海域环境保护的过程中, 胶州湾跨海大桥的建设对胶州湾的水动力和水交换是否产生影响是一个社会关注的问题。本文构建了两套高精度网格, 精细地刻画出大桥入海桥墩的分布, 并基于 FVCOM 模式, 对胶州湾水动力和水交换进行了数值模拟。在潮汐、潮流验证结果较为准确的情况下, 分析了建桥前后胶州湾海域水动力和水交换的变化情况。主要结论如下:

(1) 大桥的建设对潮流流向以及流场结构的改变较小, 但对流速大小具有一定程度的影响。涨急时, 大桥北侧流速显著减小, 尤其是大桥 T 型区附近, 可达 0.20m/s, 而大桥南侧则因桥墩阻挡流速有所增加。落急时, 除 T 型区同样流速减小外, 大桥南北侧流速增减情况相反。

(2) 对比胶州湾建桥前后的余流场, 可见大桥对胶州湾南部大部分区域的余流结构、余流大小影响不显著, 但对胶州湾北部, 尤其是对大桥两侧一定范围内的区域有巨大影响。余流结构上, 大桥的存在使胶州湾中部—大桥南侧多了一个反气旋式的余流涡旋。同时, 桥北余流整体减小 0—2cm/s, 桥南形成沿桥向东的流动, 且在大桥 T 型区域余流有 2cm/s 左右的加强。

(3) 建桥后, 胶州湾整体水交换能力减弱。其中, 对大桥南部的的水动力影响较小, 对大桥北部影响较大。区建桥前后的水体半交换时间分别为 18.54d 和 20.54d, 增加了 2.00d; 区建桥前后的水体半交换时间分别为 24.17d 和 26.21d, 增加了 2.04d。大桥阻隔了桥北部污染物向桥南的对流扩散, 同时也降低了大桥北侧东、西两区之间的水交换, 使得污染物在桥北堆积, 浓度稀释速度减缓。

(4) 胶州湾跨海大桥也对北部河流输入淡水的南向输运产生影响, 淡水主要积聚在沿岸, 尤其是环红岛周边, 会使得这些区域在冬季更易结冰, 这可能是胶州湾北部冬季的冰情加剧的原因之一。

综上, 胶州湾跨海大桥的建设对胶州湾水动力的影响主要集中在大桥北侧及南侧靠近大桥的一定范围内, 尤其是对余流结构和水体交换的影响显著。胶州湾北部的水动力在大桥建设后明显减弱, 污染

物的迁移、扩散速率降低。本文对胶州湾建桥后污染物迁移、扩散的研究, 可以为胶州湾后续的排污口设置、污染控制、水质改善等方面提供技术支持。潮动力在胶州湾占据主导, 因此本文主要考虑了潮动力变化对水交换的影响, 忽略了冲淡水、风和陆架环流等次要因素给胶州湾带来的影响, 但这些工作将在今后的工作中逐步开展。

参 考 文 献

- 陈金瑞, 陈学恩, 2012. 近 70 年胶州湾水动力变化的数值模拟研究. 海洋学报, 34(6): 30—41
- 吕新刚, 赵 昌, 夏长水等, 2010. 胶州湾水交换及湾口潮流特征的数值研究. 海洋学报, 32(2): 20—30
- 王 平, 陈伟斌, 邹文峰等, 2018. 象山港潮流结构及水体半交换时间数值研究. 海洋环境科学, 37(1): 107—115
- 王 聪, 林 军, 陈丕茂等, 2008. 大亚湾水交换的数值模拟研究. 南方水产, 4(4): 8—15
- 魏 皓, 田 恬, 周 锋等, 2002. 渤海水交换的数值研究—水质模型对半交换时间的模拟. 青岛海洋大学学报, 32(4): 519—525
- 闫 菊, 王 海, 鲍献文, 2001. 胶州湾三维潮流及潮致余环流的数值模拟. 地球科学进展, 16(2): 172—177
- 张堯君, 迟万清, 胡泽建等, 2015. 青岛胶州湾大桥建设对周边海域水动力环境影响的数值研究. 海岸工程, 34(2): 40—50
- 赵 科, 2016. 胶州湾跨海大桥对海湾沉积动力环境变化的影响. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 12—25
- 赵 亮, 魏 皓, 赵建中, 2002. 胶州湾水交换的数值研究. 海洋与湖沼, 33(1): 23—29
- Chen C S, Beardsley R C, Cowles G, 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Oceanography, 19(1): 78—89
- Chen C S, Liu H D, Beardsley R C, 2003. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20(1): 159—186
- Gao G D, Wang X H, Bao X W, 2014. Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 151: 285—294
- Gao G D, Wang X H, Bao X W *et al*, 2018b. The impacts of land reclamation on suspended-sediment dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 206: 61—75
- Gao G D, Wang X H, Song DH *et al*, 2018a. Effects of Wave-Current Interactions on Suspended-Sediment Dynamics during Strong wave events in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. Journal of Physical Oceanography, 48(5): 1053—1078
- Li P, Li GX, Qiao LL *et al*, 2014. Modeling the tidal dynamic changes induced by the bridge in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. Continental Shelf Research, 84: 43—53
- Luff R, Pohlmann T, 1995. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a Eulerian dispersion model using a half-life time approach. Deutsche Hydrografische Zeitschrift,

- 47(4): 287—299
- Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M, 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56(5): 567—581
- Shi J H, Li G X, Wang P, 2011. Anthropogenic influences on the tidal prism and water exchanges in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. *Journal of Coastal Research*, 27(1): 57—72
- Xiao K, Li H L, Song D H *et al*, 2019. Field measurements for investigating the dynamics of the tidal prism during a spring-neap tidal cycle in Jiaozhou Bay, China. *Journal of Coastal Research*, 35(2): 335—347. DOI: 10.2112/JCOAST-RES-D-17-00121. 1
- Yuan Y, Song D H, Wu W *et al*, 2016. The impact of anthropogenic activities on marine environment in Jiaozhou Bay, Qingdao, China: a review and a case study. *Regional Studies in Marine Science*, 8: 287—296
- Zhao K, Qiao L L, Shi J H *et al*, 2015. Evolution of sedimentary dynamic environment in the western Jiaozhou Bay, Qingdao, China in the last 30 years. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 244—253

IMPACT OF THE CROSS-BAY BRIDGE ON WATER EXCHANGE IN JIAOZHOU BAY, QINGDAO, CHINA

CHEN Yan-Yu^{1,2}, SONG De-Hai^{1,3}, BAO Xian-Wen^{1,2,3}, YAN Yu-Han^{1,2}

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, at Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract The construction of the cross-bay bridge in the Jiaozhou Bay (JZB) benefits the socioeconomic development of the bay. However, many piers would affect inevitably the hydrodynamic and water-exchange in the bay. We established a three-dimensional tidal model in high spatial resolution to quantify the impact based on an unstructured mesh and finite-volume community ocean model (FVCOM). We applied a passive-tracing module to find out the changes of pollutant transport in JZB. The results show that the tidal (residual) current and the water-exchange capacity after the bridge buildup were changed slightly in most of the southern bay but greatly in the northern side especially in the areas adjacent to the bridge. The residual current was reduced by about 2cm/s and the direction was shifted from northward to eastward along the bridge in the south. The piers obstructed contaminant from dispersion in the continental side of the bridge, namely, the west of Hongdao (Section) and the east of Hongdao (Section). The half-life time in Sections and increased by 2.00d and 2.04d, respectively, and the journey of river water to the sea became longer after the bridge construction, which has lowered the salinity in the north of the bridge, resulting probably in the aggravation of sea ice in winter in JZB.

Key words Jiaozhou Bay Cross-bay Bridge; tidal residual current; water exchange; contaminant transport; numerical modeling