

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2017.05.014

天津海域围填海工程对渤海湾 水交换的影响研究

靳玉丹^{1,2}, 张秋丰^{1,2}, 李希彬², 王鲁宁², 叶风娟²

(1. 上海海洋大学, 上海 201306; 2. 国家海洋局天津海洋环境监测中心站, 天津 300457)

摘 要: 利用三维海洋数值模型 FVCOM, 进行渤海湾三维水动力和水交换数值模拟, 经实测潮汐和潮流资料验证, 模型模拟结果较好。然后采用该模型对渤海湾内的水体水交换能力进行定量研究。研究结果表明, 在天津海域进行围填海工程之前渤海湾水体的半交换周期为 300 d 左右, 围填海之后, 水体半交换周期延长 25 d, 渤海湾西部水体的水交换率下降可达 10 %, 半交换周期延长 92 d。尤其是天津沿海南部海域的水交换能力下降严重, 围填海之后其水体半交换周期延长可达 200 d。渤海湾北部也有部分海域水交换周期延长达 200 d。建议在进行围填海工程建设时, 应将工程对水体交换能力的影响纳入考虑, 避免因围填海工程因素造成的恶劣环境影响。

关键词: 渤海湾; 围填海工程; 水交换影响

中图分类号: P731.26

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2017)05-0578-07

Effects of Tianjin reclamation projects on the Bohai Bay water exchange

JIN Yu-dan^{1,2}, ZHANG Qiu-feng^{1,2}, LI Xi-bin², WANG Lu-ning², YE Feng-juan²

(1. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Tianjin Marine Environmental Monitoring Central Station, SOA, Tianjin 300457, China)

Abstract: Based on the FVCOM (the Finite-Volume Coastal Ocean Model), numerical model of Bohai bay water exchange was established, and the observed data of tide and currents was used to validate the simulated result. The simulated results of the Bohai bay water exchange showed that half period of water exchange in Bohai Bay extends from 300 days to 325 days, when Tianjin reclamation projects are established. In western Bohai Bay, the water exchange rate even reduces by 10 %, and half period of water exchange extends for 92 days. In southern Tianjin coastal area especially, water exchange capacity decreased significantly, and half period of water exchange extended for 200 days with the effect of reclamation projects, as well as in some areas of the northern Bohai Bay. Therefore, it was suggested that the effect of projects on water exchange and environment of coastal sea should be considered in the development of reclamation projects.

Keywords: the Bohai Bay; reclamation project; effect of water exchange

渤海湾是渤海西部的一个海湾, 位于河北唐山、天津、河北沧州和山东黄河口之间, 有海河、永定新河、独流减河等河流注入, 是天津的海上门户, 华北的海运枢纽。渤海湾水深较浅, 滩涂面积大, 生态环境较为脆弱。特别是近年来经济发展迅速, 围填海工程大规模进行, 给渤海湾海域的水环境造成了很大的压力, 尤其是对该海域水交换的影

响, 已经引起诸多学者的广泛关注 (李静等, 2015)。

在港湾的水交换过程研究方面已经有很多学者涉足, 并且进行了大量的研究, 如有些学者基于平均存留时间的概念研究了胶州湾的水交换能力, 计算结果正确的反映了胶州湾的水交换情况 (刘哲, 2004; 曹振东, 2011)。还有学者建立了钦州湾海

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-09-27

基金项目: 2012 年天津市科技兴海项目 (KJXH2012-26)。

作者简介: 靳玉丹 (1991-), 硕士研究生, 主要从事物理海洋研究, 电子邮箱: jinyudan2010@163.com。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

域保守物质的对流-扩散模型，基于半交换时间概念对该海域不同时期的水交换能力进行了数值模拟，并进行分析（张坤，2014）。另外有利用 delft3D 软件中的 How 模块，以保守物质作为示踪剂，建立对流-扩散型的海湾水交换数值模型来模拟象山港水交换过程，研究象山港整体与外海之间水体交换特性（彭辉，2013）。对于渤海湾的水交换过程，前人也有研究，如采用二维水动力模型对渤海湾的水交换情况进行了模拟，认为当时情况条件下对渤海湾水交换影响最大的因素是风（何磊，2004）。还有人提出了关联矩阵的方法，并利用该方法对渤海湾水交换进行初步分区模拟，通过计算得到了渤海湾的半交换周期（孙健，2007）。应用三维 HAMSOM 模型对渤海湾进行模拟，得到了渤海湾的半交换时间（魏皓等，2002）。有关围填海工程对渤海水交换的影响也有一些学者进行研究，如利用水动力学模型和拉格朗日粒子跟踪法，针对围填海对渤海湾水交换的影响进行研究，并分别从整体和局部分析得到：进行大规模围填海之后，渤海湾半交换时间延长，其主要原因很有可能就是因为围填海工程使海湾水体通道受阻（袁德奎等，2015）。基于 MIKE3 水动力模型耦合粒子追踪模块分析了近十年来渤海湾海岸工程对渤海湾水交换的影响。结果表明，随着近十年来渤海湾沿岸围填海工程的进行，渤海湾水域平均水存留时间明显增加，水交换率下降（王勇智等，2015）。

前人对水交换的研究大都使用拉格朗日水质点追踪方法，采用这种方法主要是研究水质点本身的物质交换，着眼于每个水质点的位置随时间变化的规律，重点描述每一个流体质点自始至终的运动过程；另外采用这种方法虽然很自然，很直观，但实现起来却非常困难，需要对成千上万的流体质点进行跟踪，效率比较低。而本文采用欧拉方法进行水质点的追踪来研究污染物浓度的扩散规律，这种方法着眼于空间点，主要研究空间中每一个点上流体运动随时间的变化情况。相比于拉格朗日方法，能够使得海水充分稀释和扩散，可以合理的反映海水的污染物扩散情况，更加的科学合理。本文利用三维水动力弥散水质模型 FVCOM，针对渤海湾沿岸尤其是天津近海近年来的大规模围填海现状，对该海域保守物质浓度输运及其交换能力的变化进行数值模拟，并对其定量的研究，为渤海湾水环境的情

况提供更加科学的认知，同时为海洋工程的建设创造依据。

1 模型

1.1 数值模型简介

本文采用由陈长胜研究组提出的三维海洋数值模型 FVCOM (Finite Volume Coast and Ocean Model)，该模型具有以下几个特点：在垂直方向使用 σ 坐标，可以更好的拟合渤海湾研究区域的水深情况；在水平方向采用三角形网格，这样可以加密需要重点研究的区域，同时能够准确的拟合岸线复杂区域；另外该模型包含干/湿网格模块，能够对滩涂的淹没和露出过程进行准确模拟，针对渤海湾滩涂面积大的特点可以保证流体守恒（CHEN et al, 2006）。因此，利用 FVCOM 对渤海湾海域进行数值模拟是十分合适的（李希彬等，2010）。

本文基于 FVCOM 所建立的数值模型由水动力模型及水交换模型这两部分构成。其中水动力模型提供驱动水交换模型所需的三维水动力场和湍流扩散，水交换模型用于污染物扩散的数值模拟（李希彬等，2012）。

1.2 模拟时期选择

为展示天津海域围填海工程对水交换能力的影响，本文选取 2 次围填海工程规模变化较大的典型历史时期，分别为 2015 年（大规模围填海后）及 2005 年（大规模围填海前），在两个不同历史时期期间，由于围填海工程的大量进行，天津海域面积减少约 280 km²，渤海湾海域面积已减少近 0.5%，如图 1 所示，图中灰色区域为 2005-2015 年期间通过围填海工程增加的陆地区域。利用历史数据及相应历史时期的海图、高分辨率卫星遥感图像及水深资料等，分别建立相应时期岸线和地形特征的三维水动力数值模型，使其能够反应对应时期天津近海的水动力环境及水交换状况。

1.3 模型计算区域及网格设置

本文研究的渤海湾水交换指的是该水域的水体通过对流扩散等物理过程与周围水域的水体进行相互混合，因此所选的模拟计算区域是整个渤海（37°-41°N，117.5°-122.8°E），如图 2 所示，以便于研究渤海湾与外界的水交换。

利用最新的卫星遥感影像，将其进行矢量化，

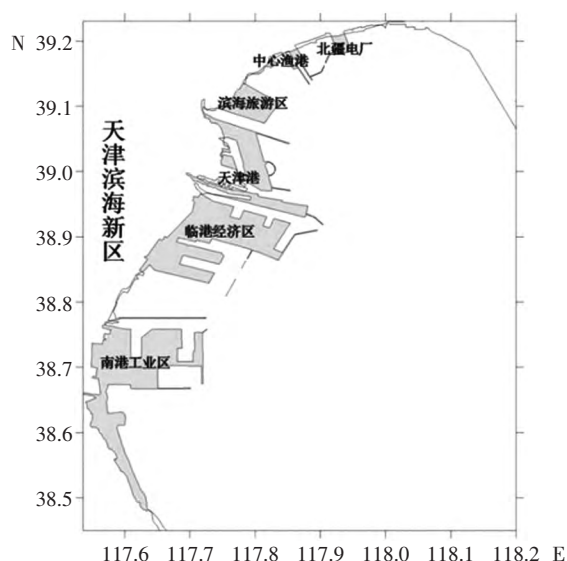


图1 2005–2015 年天津沿海岸线变化

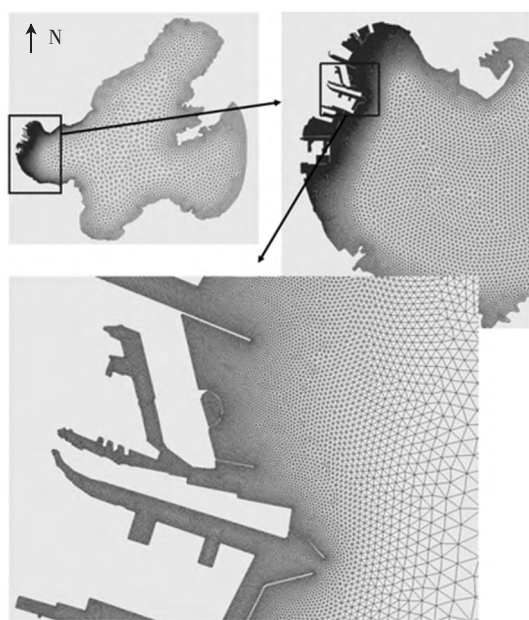


图2 模式网格图

并结合海图资料得到岸线数据,将通过航保部获得的水深资料进行插值得到想要的水深数据。模型采用冷启动,水位、流速初始条件均用零。

为了着重研究天津近岸围填海工程对海域水交换的影响,在模型网格中,对渤海湾天津近海区域进行加密,渤海中部区域网格相对较疏。模拟区域面积为 $450 \times 500 \text{ km}^2$,区域内最小网格步长为 200 m ,最大网格步长为 6000 m 。模型内模时间步长 20 s ,外模时间步长 2 s ,垂向 6 个 σ 层。

为了减小开边界对渤海湾内研究区域的影响,

将开边界设置在渤海海峡以外,开边界条件通过开边界上 56 个点的调和常数进行计算得到开边界驱动水位。

2 模型结果验证

模型结果的验证,我们采用 2015 年 10 月 18 日–19 日国家海洋局天津海洋环境监测中心站在天津近海进行的 3 个站位的海流监测结果和塘沽海洋环境监测站的验潮资料,将实测资料与模型计算结果相比较,绘制流向、流速曲线如下图 3 所示,潮位验证结果如下图 4 所示,图中虚线代表观测数据,实线为数值模拟结果。

从模拟值与实测值的对比可以看出,模型模拟结果较好,流速、流向模拟结果误差均在允许范围内,潮汐模拟中振幅误差较小,而且相位对比基本一致。因此,本文所采用的模型科学合理,可以用来模拟渤海湾的水交换情况,其模拟结果能够正确的反映渤海湾的水动力特征。

3 水交换模拟结果及其对比

在计算污染物扩散时,采用欧拉方法从理论上计算保守污染物扩散,在模拟的初始时刻将渤海湾海域内 (118.95°E 以西海域) 保守污染物的浓度全部设置为 1,湾外浓度全部设置为 0 (图 5),在与前文模型水动力条件相同的情况下进行污染物扩散的数值模拟,设置模型开始时刻进行污染物的释放。分别针对 2005 年和 2015 年两段不同历史时期的岸线特征,进行 800 d 的污染物扩散模拟,并进行分析。

先对 2015 年情况下模拟计算的污染物扩散结果进行分析,由下图 6 和图 7 可知,在潮流系统作用下,污染物由渤海湾向外扩散,扩散的主要方向为莱州湾及渤海中部,模拟 800 d 后,莱州湾底部部分海域的污染物浓度也达到了 0.3 以上。而由于渤海湾地区水深较浅、区域半封闭,潮流特征较弱,所以污染物扩散能力较弱,模拟 800 d 后,仍有部分海域的污染物残留浓度达 0.6 以上。渤海湾内污染物浓度随模拟时间而逐渐降低,约 300 多天时,污染物浓度降为初始浓度的一半。在模拟的后阶段,其水交换率呈现下降趋势。模拟区域内污染

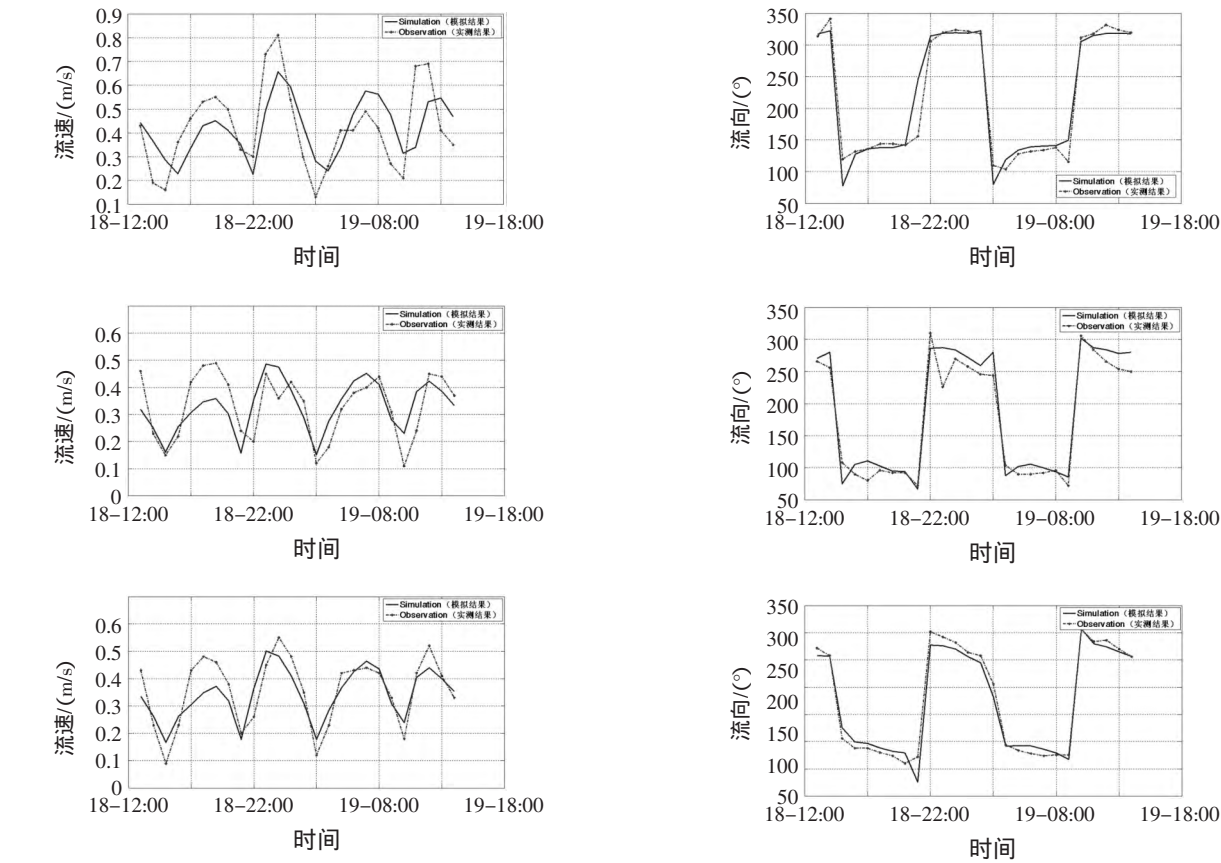


图3 潮流验证图

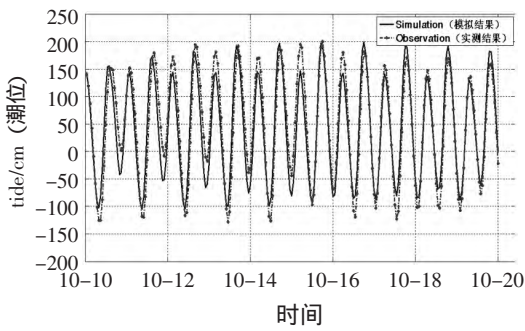


图4 潮位结果验证

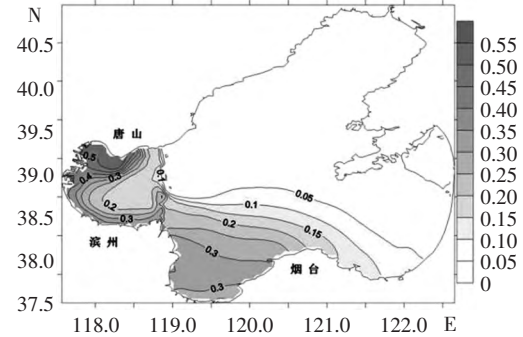


图6 模拟扩散 800 d 后污染物浓度分布 (渤海湾 2015)

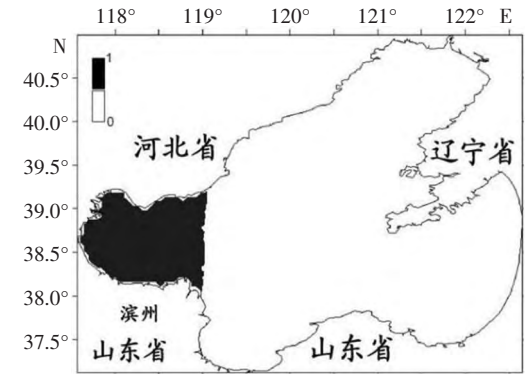


图5 污染物初始场设置

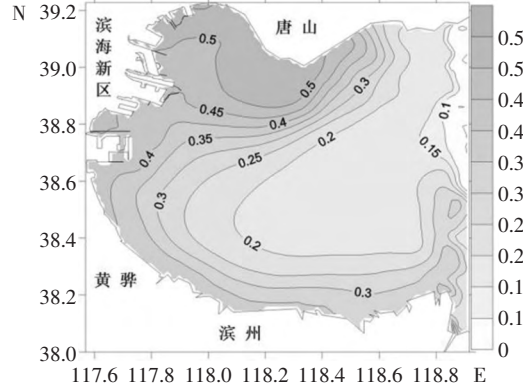


图7 模拟扩散 800 d 后污染物浓度分布 (渤海湾 2015)

物浓度随时间递减的过程中有着半月左右的周期振荡,与潮汐大小潮的周期相同(图8)。在大潮时,纳潮量达到最大,对应的水体体积会增加,污染物浓度会相应减少,而小潮时纳潮量减少,相应污染物浓度出现增加。

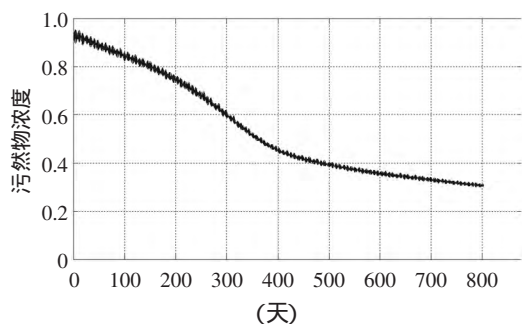


图8 污染物浓度随时间变化图

为展现围填海工程对污染物扩散的影响,本文采用2015年状况模拟的污染物扩散结果减去采用2005年状况模拟的结果,得到污染物扩散能力之间的差值,如下图9所示。模拟800 d后,相比2005年,2015年状况下,整个渤海湾海域的污染物浓度均呈现增加的趋势,即扩散慢,水交换率降低。其中,渤海湾北部海域,尤其是天津南部的南港工业区和唐山东部附近海域的水交换率下降的更加显著,此两处不同年份的污染物残留浓度变化量达到0.12以上,仅靠近渤海湾口处,污染物浓度残留略呈现减小趋势。

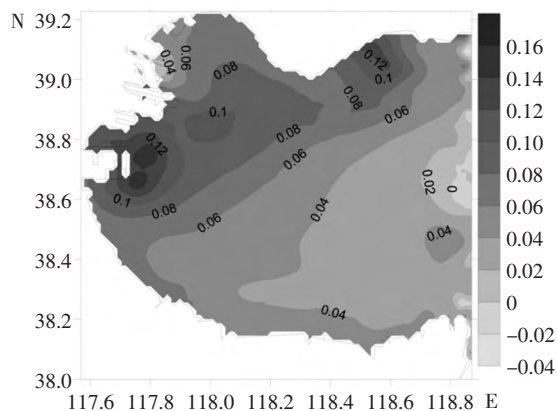


图9 扩散800 d后污染物浓度差值分布

为定量展现围填海工程对污染物扩散的影响,本文列表进行分析,通过下表1发现,相比2005年,在进行水交换模拟200、400、800 d后,采用2015年状况下的渤海湾水交换率分别下降了4.22%、5.76%和6.99%。水交换率的下降,随时间的延长

有逐渐增大的趋势,下降的水交换率将延长污染物扩散时间,使渤海湾原本就较弱的扩散能力更加降低,恶劣的海洋环境更加恶化。

表1 水交换率变化对比

时间/d	2015年情 况下污染 物浓度	2015年情 况下水交 换率/%	2005年情 况下污染 物浓度	2005年情 况下水交 换率/%	水交换率 降低百分 比/%
200	0.744 8	25.52	0.702 6	29.74	4.22
400	0.459 5	54.05	0.401 9	59.81	5.76
800	0.310 8	68.92	0.241 9	75.91	6.99

根据渤海湾的地理特征、水动力场及污染物扩散能力特征,我们将渤海湾划分为3个区域,分别是位于渤海湾西北角的区域一,渤海湾中部区域二和渤海湾南部区域三(图10)。

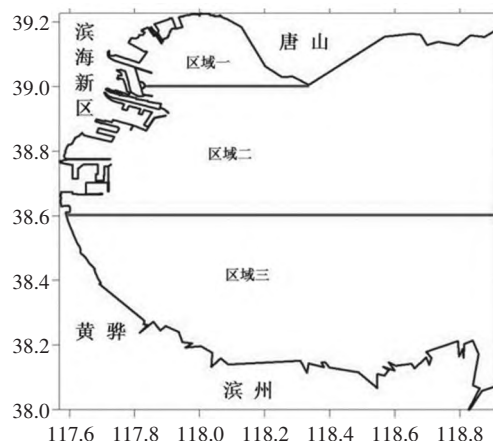


图10 渤海湾区域划分

其中,区域一位于渤海湾西北角,处于天津北部和河北唐山西部之间,该区域滩涂面积大,水深浅,水动力较弱,扩散能力较弱;区域二位于渤海湾中部,主要为天津中部和南部以东海域,此区域由于水深较深,且从湾底至湾口正对渤海中部,受外部潮波影响直接,所以水动力条件较好,扩散能力较强;区域三位于渤海湾南部,包括河北沧州、山东滨州和东营沿海海域,渤海湾底部东营老黄河口附近,由于 M_2 分潮无潮点的存在,此处水动力条件较弱,污染物扩散较慢,形成一条阻止污染物向外传输的阻隔带,该处西部由于此阻隔带的阻隔作用,只能通过阻隔带的北部通道进行水交换,但由于该海域水动力条件较好,整体水交换能力较强。

表2是两个不同历史时期下,渤海湾内3个区域在不同模拟时间下的水交换率对比结果。在模拟的初始阶段,区域二由于直面渤海中部海域,水交

换通道畅通，因此水交换率较高；区域一由于水浅、滩涂面积大、水动力条件差，水交换率很低，模拟 200 d 时，水交换率仍在 1 % 以下，尤其是围填海工程完成后，在模拟 200 d 时，水交换率极低，仅达到 0.27 %，比围填海前下降 0.57 %；区域三在模拟的初始阶段，由于阻隔带的存在，水交换率较低，在模拟 200 d 时，水交换率在 10 % 以下。模拟 800 d 时，在持续的水动力条件作用下，3 个海域的水交换率均有大幅提升，其中区域一的水交换率达到 50 % 左右，区域二的水交换率达到 70 % 左右，而区域三，尤其是区域三的中部和西部海域，在较好的 SW-NE 向潮流条件作用下，水交换率大幅提升，达到 70 % 以上。值得注意的是，依据 2015 年条件模拟的 3 个区域的水交换率，均

低于依据 2005 年条件模拟的水交换率，尤其是区域二，在模拟中段，水交换率甚至下降达 11 %，这主要是由于天津沿海的大部分围填海工程均集中在此区域，包括天津港、临港经济区、南港工业区等，大规模的围填海工程占用了海域，使得此海域的纳潮面积减少，纳潮量降低，水交换率下降。区域一内围填海工程相对区域二较少，仅北疆电厂和滨海旅游区，其水交换率下降也较区域二少，模拟 800 d 后，水交换率下降 6 %。区域三中，围填海工程少，其水交换率的变化也较少，尤其是模拟的中前期，其水交换率的变化在 1 % 内。

在对渤海湾的水交换率进行计算和对比后，我们对渤海湾内污染物浓度降为初始浓度一半的时间，即渤海湾海水的半交换周期进行了计算，并绘

表 2 渤海湾内不同区域水交换率计算结果

时间/d	区域一水交换率变化			区域二水交换率变化			区域三水交换率变化		
	2015 年情况下	2005 年情况下	变化	2015 年情况下	2005 年情况下	变化	2015 年情况下	2005 年情况下	变化
200	0.27 %	0.84 %	-0.57 %	39.95 %	48.84 %	-8.89 %	8.66 %	8.44 %	0.22 %
400	20.07 %	22.39 %	-2.32 %	54.25 %	65.45 %	-11.2 %	59.9 %	59.86 %	0.04 %
800	48.61 %	54.61 %	-6 %	67.85 %	76.35 %	-8.5 %	73.36 %	78.3 %	-4.94 %

制半交换周期图，如图 11 所示。渤海湾水体半交换周期的等值线分布与污染物残留等值线分布大体类似，整个渤海湾水体的半交换周期表现从湾口向湾内逐渐增大，仍然出现北部和东南部周期长、中部和西南部周期短的趋势。同样利用 2015 年状况模拟的半交换周期结果减去采用 2005 年状况模拟的结果，得到半交换周期的差值，如图 12 所示，可以发现渤海湾北部和西部的中间位置，在大规模的围填海工程后，水体的半交换周期是延长的，部分海域的半交换周期延长 200 d 以上；渤海湾南部海域的半交换周期是缩短的，其中部分海域的缩短时间可达 20 d 以上。

计算之后，本文同样定量的分析了渤海湾的半交换周期，并对两个不同历史时期不同区域的半交换周期进行对比（见表 3）。在 2015 年围填海工程大规模建设的状态下，整个渤海湾水体的半交换周期为 398 d，而在 2005 年的状态下，仅为 366 d，半交换周期延长 32 d。区域一水体交换能力最弱，其半交换周期达近 800 d，由于围填海工程的建设，半交换周期延长 64 d，此区域沿岸主要为天津市北部和唐山市西部，可能也考虑到该区域的水交换能力较弱，天津市北部沿海主要规划为旅游区和渔港

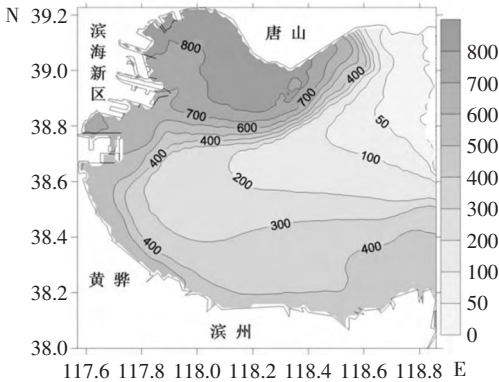


图 11 渤海湾水体半交换周期分布图

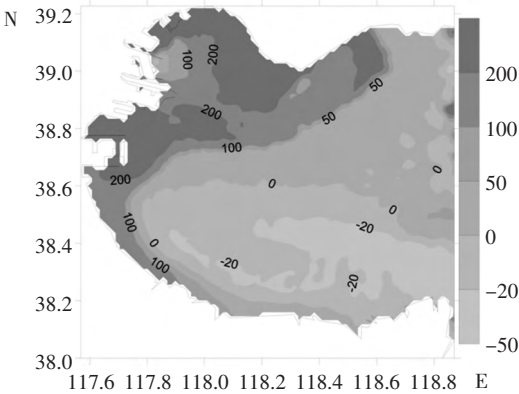


图 12 渤海湾水体半交换周期差值分布图

区,并没有规划石油化工等重污染区,建议在此区域进行生产活动时,要充分考虑海水的交换能力,严格控制污染物排放的时间和地点,同时在进行相关规划时,应充分考虑到水交换率低、污染物难以扩散的现实,进行合理规划,以防造成灾难性后果。区域二水体交换能力较强,整体半交换周期较短,围填海工程后,其半交换周期由 320 d 延长至 412 d。此区域的围填海项目均为港口和石化工程,虽然此海域水交换能力相对较强,但仍需注意围填海工程对水交换能力的负面影响,且应密切关注,以防危化品泄露,对生态环境造成灾难性影响和后果。区域三水体的交换能力强,水体半交换周期相对较短,围填海工程对此海域的影响也较小,2015 年状态下,水体半交换周期为 360 d,2005 年状态下,水体半交换周期为 354 d,变化较小。

表 3 渤海湾内不同区域半交换周期计算结果

区域	半交换周期/d		
	2015 年情况下	2005 年情况下	变化
渤海湾	398	366	32
区域一	785	721	64
区域二	412	320	92
区域三	360	354	6

4 结论

本文以海洋数值模型为基础,以围填海工程对渤海湾水体的交换能力为关注点,通过三维水动力模型和欧拉扩散方法,对渤海湾的污染物输运和水体半交换时间进行了理论数值模拟,定量研究了渤海湾内水体的水交换能力,主要得到以下结论:

(1) 渤海湾海域水体的交换率总体较低,水体半交换周期达到 300 d 以上,在围填海工程后,水体半交换周期延长 32 d。

(2) 围填海工程后,渤海湾西部,尤其是天津沿海南部海域的水交换能力下降严重,其水体半交换周期延长可达 200 d。渤海湾北部也有部分海域水交换周期延长达 200 d。

(3) 在围填海工程最多的区域二,围填海后,其水体的水交换率下降甚至可达 10%,半交换周

期延长 92 d。而围填海工程最少的区域三,其水体交换率和半交换周期的变化较少。

综上所述,建议在日后进行围填海建设时,应将水交换能力纳入考虑,事先考虑围填海工程对水体的交换能力造成的影响,优先选择水体交换能力较强的海域。且在排放污染物时,充分考虑水体的交换能力和排放时间,避免因人为因素造成难以扩散的环境污染。

致谢:十分感谢国家海洋局天津海洋环境监测中心站的专家老师为文章修改提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- Chen Ch Sh, Cowles G, Beardsley R C, 2006 An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual: Second edition. *Oceanography*, 19 (1): 78-89.
- Hainbucher D, Wei H, Pohlmann T, 2004. Variability of the Bohai Sea circulation based on model circulation, *Journal of Marine Systems*, 44 (3-4): 153-174.
- Li X B, Sun X Y, Yu H M, et al, 2010. Numerical Study of the Donghai Dam Impact on the Hydrodynamic Environment of Zhanjiang Bay. *Marine Science Bulletin*, 12 (01): 16-29.
- 曹振东, 2011. 胶州湾水交换数值研究. 中国海洋大学.
- 何磊, 2004, 海湾水交换数值模拟方法研究. 天津大学.
- 李静, 宋军, 牟林, 等, 2015. 冬季大风影响下的渤海海水交换特征. *海洋通报*, 34 (06): 647-656.
- 李希彬, 孙晓燕, 牛福新, 等, 2012. 半封闭海湾的水交换数值模拟研究. *海洋通报*, 31 (03): 248-254.
- 刘哲, 2004. 胶州湾水体交换与营养盐收支过程数值模型研究. 中国海洋大学.
- 彭辉, 2013. 象山港水交换数值研究. 浙江大学.
- 孙健, 2007. 海湾、近岸海域水交换研究的关联矩阵方法及应用. 天津大学.
- 王勇智, 吴頔, 石洪华, 等, 2015. 近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响. *海洋与湖沼*, (3): 471-480.
- 魏皓, 田恬, 周峰, 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.
- 袁德奎, 李广, 王道生, 等, 2015. 围填海工程对渤海湾水交换能力影响的数值模拟. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 48 (7): 605-613.
- 张坤, 2014. 钦州湾茅尾海纳潮量和水交换能力的数值模拟研究. 中国海洋大学.

(本文编辑 袁泽轶)