

近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响*

王勇智 吴 頔^① 石洪华 赵晓龙 闫文文

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

摘要 近十年来我国海岸带地区快速城市化,对土地的需求持续高涨,导致沿海地区围海造地现象愈演愈烈,海湾纳潮海域面积持续萎缩,对海湾的水交换带来了较大压力。为此,选取我国海岸带快速城市化的典型区域——渤海湾为例,研究近十年来渤海湾海岸带城市化对渤海湾水交换的影响。基于国际流行的 MIKE3 水动力模型耦合粒子追踪模块,应用 2000 年和 2010 年两个典型年份的渤海湾岸线资料,分别计算了 2000 年和 2010 年渤海湾环流系统及其驱动下的水质点运移规律和变化特征。研究将渤海湾划分为 8 个区块,量化研究和对比了近十年来由于渤海湾持续围填海导致的海湾水存留时间和不同区块水交换能力的变化。结果表明,随着近十年来渤海湾沿岸快速城市化产生的岸线变化,导致湾内环流涡旋增多,决定湾内水交换的流场结构发生了显著变化,导致各区块的水交换能力和平均水存留时间不仅存在较大差异,而且发生了显著的变化。与 2000 年相比,2010 年天津港、黄骅港和曹妃甸港区海域的平均水存留时间明显增加,水交换率下降,对区域水质的改善十分不利。

关键词 渤海湾;水交换;围填海;城市化

中图分类号 P753 **doi:** 10.11693/hyhz20140700194

围海造地是人类开发利用海洋的重要方式,也是缓解土地供求矛盾和扩大社会发展空间的有效途径,但由于围海造地在短时间、小尺度范围内剧烈的改变了海域自然属性,对海洋生态系统易产生强烈的扰动。据统计,近十年来由于生产和生活的需要,我国填海造地总面积超过 1100km²(国家海洋局,2012;2013),相当于我国第三大海岛崇明岛的面积。以环渤海湾地区为例,沿岸为京津唐等重要城市,近十年来由于渤海湾沿岸快速城市化建设以及多个国家级发展战略和总体规划的实施,沿岸集中了化工、港口、养殖、油气、矿产、旅游、盐业等多种经济活动,导致沿海地区土地需求量增大。大规模的填海造地工程位于唐山曹妃甸和天津滨海新区,其中曹妃甸区域建设用海规划填海总面积 310km²,截至 2014 年 1 月共计完成填海造地 210km²;天津滨海新区近十年来累计填海造地面积约 320km²,人工岸线从 41.16km

增加到 217.79km(国家海洋局,2012,2013);正在实施的沧州渤海新区区域建设用海项目也计划填海造地 75km²,加之环渤海湾零零碎碎的填海活动,导致渤海湾自然岸线急剧萎缩。而且,渤海湾近岸海洋资源开发利用产生的生产和生活污水急剧增加,大量排放入渤海湾。渤海湾属于典型的半封闭缓坡淤泥质海湾,湾内水交换本不顺畅,持续高涨的填海造地进一步加剧渤海湾海域环境质量的下降,湾内生物多样性减少,渔业资源衰退,不利于沿海地区社会经济的可持续发展。因此,近十年来海岸带地区快速城市化对渤海湾水交换的影响是渤海湾合理开发利用的重要认知背景,引起了众多学者和管理者的关注。

水交换是指水体通过对流和扩散等物理过程与周围水体相互混合,在海湾、近岸海域的水交换研究中,一般是通过定义各种时间尺度来描述水体交换能力的强弱或交换速度快慢,并使用半交换时间、交

*国家海洋局海域管理技术重点实验室开放基金项目,201209 号;山东省自然科学基金青年项目,ZR2013DQ001 号。王勇智,高级工程师,E-mail: wangyongzhi@fio.org.cn

通讯作者:吴頔,助理工程师,E-mail: wudi@fio.org.cn

收稿日期:2014-07-08,收修改稿日期:2015-02-09

换率和存留时间等描述其时间尺度。箱式模型是最早应用于水交换研究的数学模型之一,高抒(1991)基于狭长海湾多箱物理模型研究了象山港的水交换机制。随着数值计算技术的不断发展,对流扩散模型和拉格朗日质点追踪模型逐渐成为研究海湾水交换的主要方法,对流扩散模型通过求解对流扩散方程得到保守物质浓度分布的模型,拉格朗日质点追踪模型是通过计算水质点的运移来研究水体的交换情况,两者均在渤海湾等其他海域的水交换研究中得到了广泛应用。匡国瑞等(1987)以高低潮盐度变化给出了乳山湾一个潮周期内的水交换率。Roger 等(1995)应用欧拉弥散模型计算了北海的半水交换时间。Signell 等(1992)定义湾内水降为原有水体积的 37% 时所用时间为平均存留时间。Choi(1999)计算了黄东海风生流、潮汐余流、密度环流等驱动下不同的水体更新时间。魏皓等(2002)应用数值模型,表明渤海半交换时间约为 0.5—3.5 年,渤海 3 个海湾及渤海中部交换能力相差很大,以莱州湾交换能力最强,辽东湾最弱。王悦(2005)分别计算了新旧地形影响下的渤海湾水体的平均存留时间,表明新地形条件下渤海湾水交换能力明显减弱,平均半交换时间延长约 16 天。李希彬(2013)应用三维水动力和水交换数值模型,得出渤海湾水体半交换周期为 323 天,海湾西北部海域和南部海域的水交换率较低。赵亮等(2002)应用拉格朗日粒子追踪法研究了胶州湾的水交换,表明胶州湾深水交换时间为 7 天,而北部和西部海区交换时间超过 2 个月。孙英兰等(1988)通过拉格朗日余流分布和标识质点跟踪的方法,对胶州湾水交换活跃程度进行区域划分,将其划分为湾顶滞留区、黄岛附近活跃区和湾口良好区。李小宝(2011)应用随机游动模型研究了渤海和天津近岸海域的水交换,分析了有无风场对渤海各海区水交换的影响。

有关近十年来渤海湾岸线变化对海湾和天津滨海新区近岸海域水交换影响的研究鲜有报道,故本文拟应用三维水动力数值模型和拉格朗日水质点追踪方法,以 2000 年和 2010 年渤海湾的岸线为计算背景,定量化计算和分析近十年来渤海湾岸线变化对渤海湾和天津滨海新区近岸海域水交换影响。

1 研究方法

1.1 模型简介

水动力和水质模拟采用的是丹麦水力学研究所研制的 DHI MIKE 系列数值计算与分析软件,该软件

是国际上比较成熟的数值模拟软件系统,在模拟前处理和后处理方面具有独特的优势,受河口海岸工程技术专业人员认可,在海洋、海岸和河口研究中得到了广泛应用(Chorin, 1967)。本文采用 MIKE 3 正压水动力模块 FM(Flow Model)开展水动力模拟,并耦合粒子追踪模块 PT(Particle Tracking)进行水交换数值模拟(DHI, 2008)。同时渤海湾夏季盛行偏南风,海水容易向渤海湾西北角聚集,而冬季盛行偏北风,有利于水交换,因此,潮流驱动下的水质点运动可代表渤海湾水交换的情况。因此,本研究以标识水质点追踪的方法,定量分析渤海湾各区块与外海水交换的时间。

模拟区域覆盖了渤海和部分黄海,岸界和垂直边界采用无通量条件,开边界为:出流,辐射边界条件:入流,无梯度条件。开边界设置在山东省成山头(37°20'54.09"N, 122°40'52.15"E)至朝鲜 Changyon(38°7'33.43"N, 124°38'59.57"E),开边界潮位采用 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1 和 P_1 共 6 个分潮驱动,来源于国家海洋局第一海洋研究所研发的 MASNUM 模型,风场来源于 ERA40 近十年的气候态风场数据。在渤海湾内进行网格加密,最小网格步长为 100m,垂向分层采用 sigma 分层,均分为 7 层,时间步长为 300s。

1.2 基本定义与计算方案

根据 Backhaus(1984)和赵亮等(2001)对海湾水交换的定义:从水质点追踪起算的时间开始,对每个水质点开展追踪和标识,当标识的水质点运动至渤海湾外,即认为湾内海水与洁净的湾外海水进行过交换更新,标记出每个水质点第一次到达渤海湾外的时间,即为湾内每个水质点的存留时间,湾内每个水质点的存留时间求和平均后可得到湾内海水的平均存留时间。统计各区块内每个时刻湾内、湾外的水质点数量,湾外水质点数不为零的起始时间即为此区块开始水交换时间;湾内水质点数变化小于 2% 时为交换达到稳态时间(赵亮等, 2001),每个区块中运移到湾外水质点的数量与原来各区块初始标识的水质点数之比为该区块的水交换率。

为体现渤海湾围填海对渤海水交换的影响,分别采用 2000 年和 2010 年渤海湾的岸线数据,渤海其他区域的岸线数据保持不变(均使用 2000 年渤海岸线),两种方案的计算时长均为 4 年。为定量研究渤海湾内水交换情况,将渤海湾分为 8 个子区块(图 1),由于天津滨海新区主要入海排污口大部分分布在塘沽

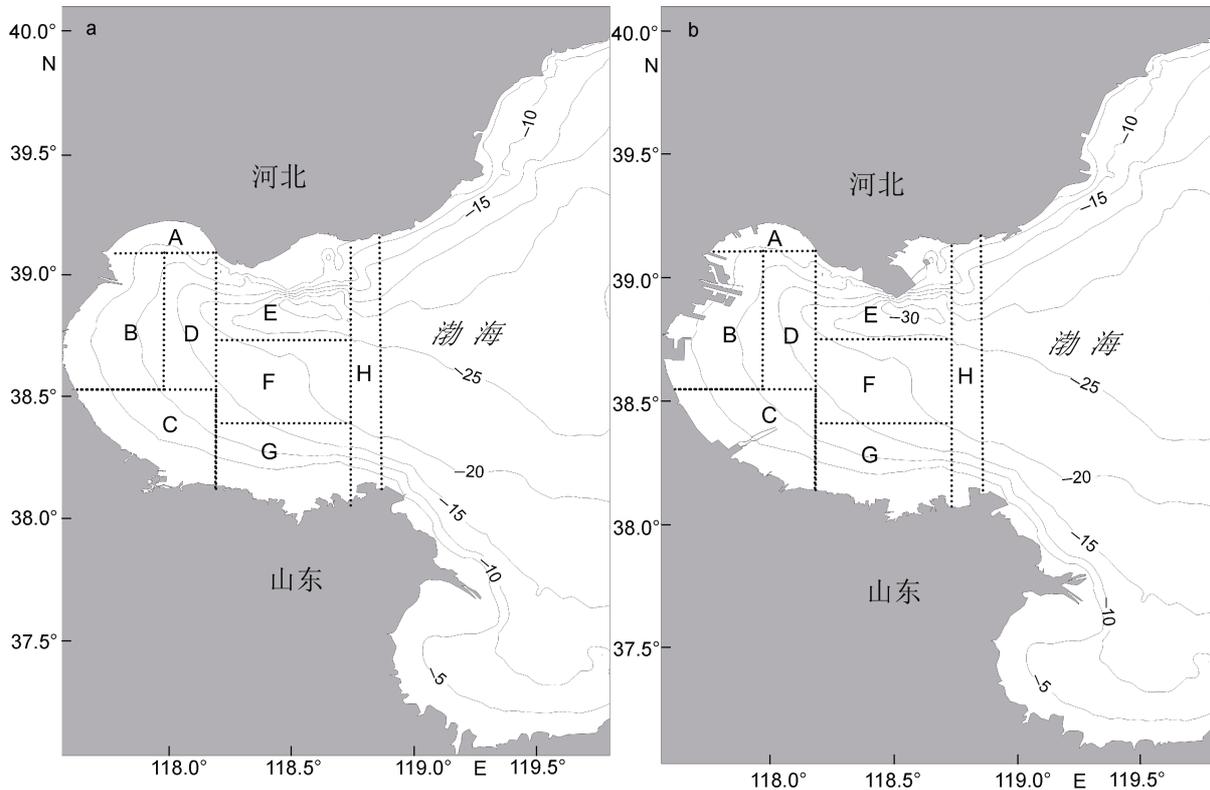


图1 2000年(左)和2010年(右)渤海湾各区块划分示意图
Fig.1 Region division of Bohai Bay in 2000(left) and 2010(right)

区及汉沽区, 因此将天津滨海新区近岸海域单独划分为一个区块研究。

2 研究结果

2.1 渤海湾潮汐验证

选取模型稳定后 3 个月的潮位, 采用 T_TIDE (Pawlowicz 等, 2002) 进行调和分析, 得到四个主要分潮的同潮图, 所得潮汐结构与《渤黄海海洋图集: 水文》及前人的计算结果基本一致, 并与渤海沿岸 21 个验潮站的调和常数比较, M_2 分潮振幅平均误差为 4.17cm, 迟角平均误差为 6.82° , K_1 分潮振幅平均误差为 2.32cm, 迟角平均误差为 5.48° , 表明模型的潮汐模拟基本可信。计算结果显示 M_2 分潮在渤海湾形成一个逆时针旋转的潮波系统, 渤海湾东北部较西南部同潮时线相差 60° , 潮时相差 4.6h, 振幅从湾口向湾顶逐渐增大, 湾口约为 30cm, 至渤海湾湾顶振幅可达到约 110cm, 与《渤黄海海洋图集: 水文》中的结果一致。

2.2 渤海湾潮余流验证

由图 3 可见, 由 2000 年渤海湾欧拉余流的模拟结果来看, 整个渤海湾湾顶沿岸的流态基本呈逆时

针的结构, 余流从湾口北部流入, 沿湾口向南形成较强的南向流, 从南部流出渤海湾, 其中渤海湾西侧顺时针流强度较弱, 湾口附近余流呈弱双环结构, 与张越美等(2002)和万修全(2003)的模拟结果较为一致。2010 年渤海湾欧拉余流的分布发生了明显变化(图 4), 湾内存在多个涡旋, 黄骅港东西两侧分别出现一个顺时针和逆时针流, 2000 年时海湾西部的顺时针流减弱并东移, 湾口的弱双环结构仍然存在。

3 渤海湾典型年代水交换变化的模拟结果

3.1 典型年代各区块与外海水交换律变化

从静止流场起算, 模拟 3 天后, 计算区域潮波达到稳定, 在低潮时刻投放水质点粒子, 粒子初始分布精度为 $1.11' \times 1.11'$, 其中 2000 年岸线条件下初始时刻投放粒子数为 3253 个, 2010 年岸线条件下初始时刻投放粒子数为 3095 个(由于填海造地, 渤海湾海湾面积萎缩, 故投放粒子数目减少)。

根据数值试验的结果, 对于渤海湾这样的半封闭海湾海域, 低潮和高潮时刻投放水质点对海岸的水交换能力存在一定影响, 低潮时投放水质点时水交换达到稳定态所需的时间为最长, 海湾水交换能

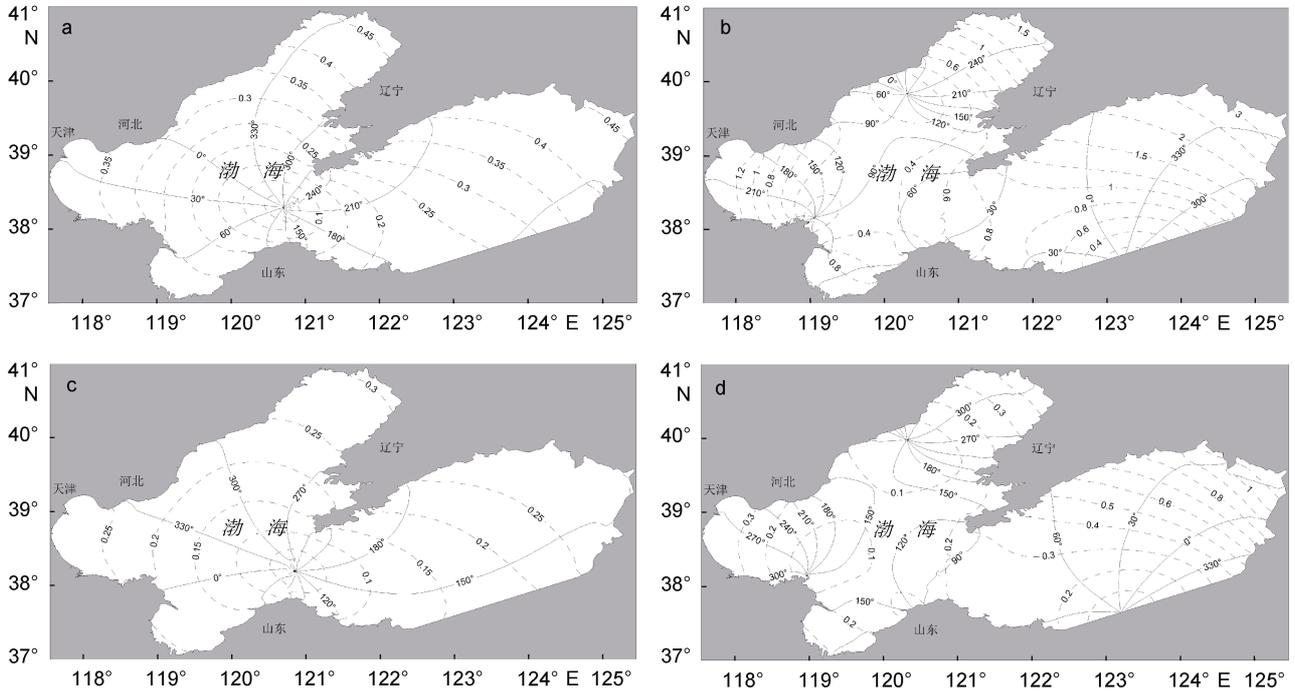


图2 2000年模型海域等振幅线(虚线)和同潮图(实线)

Fig.2 Co-range (dashed) and co-tidal line (solid)

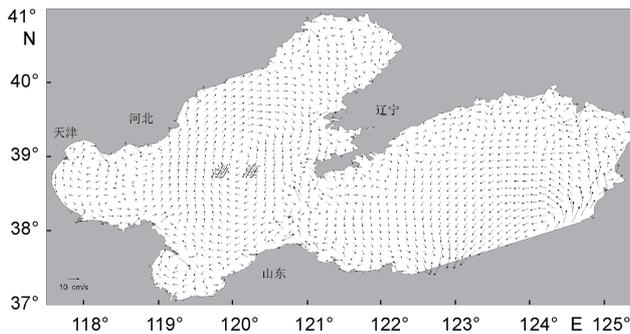


图3 计算区域欧拉余流场分布图(2000年)

Fig.3 The Eulerian residual current of 2000

力也较适中,故文中有关各区块水质点分布图和平均水存留时间均采用低潮时投放水质点的结算统计结果。

3.2 典型年代各区块水交换能力

3.2.1 2000年各区块水交换能力 由表1可见,靠近渤海湾口的区块G和区块H分别在第0天和第3天开始与渤海湾外水体发生交换,区块F在第12天开始发生交换,区块D和E则需要近1个月的时间才开始发生交换,而区块C虽然处于湾顶海域,但发生交换的时间却早于区块D和E,需要约20天,这与渤海湾的环流结构密切相关,区块A和B大部处于湾顶的弱流区内,发生交换的时间最长,分别需要105天

和60天。

区块A需要将近15个月的时间才能达到稳态,是八个区块中所需时间最长的,其次是区块B。虽然区块A和B达到稳态的时间较长,但其交换较强,均超过了80%。区块C和D分别需要约10个和11个月才能达到交换稳态,但其交换率却不及区块A和B,尤以区块D最为明显,达到稳态时交换率仅为67.5%。区块H达到稳态所需的时间最短,约为24天,与区块H与湾口接壤有关,但交换率却很低,而区块F虽然需要近1个半月的时间交换才能达到稳态,但达稳态时的交换率却是所有区块中最高的,约为96.3%,显示出很强的交换水平。从第1年各区块的交换率来看,区块A、C和D的交换率较低,而其他区块第1年的交换率均超过了80%,从水质点的运动规律看,区块A和C中有较多的水质点贴岸向湾外运动,区块D多数水质点则由于岸界侧粘滞作用而减弱了它们与湾外水体的交换能力。虽然区块G靠近渤海湾口,但其交换率却低于同样临近湾口的区块E和F,这与区块G所处渤海湾南部的环流结构有重要关系。

3.2.2 2010年各区块水交换能力 由表2可见,靠近渤海湾口的区块G和H分别在第2天和第0天开始与湾外水体发生交换,区块E和F的开始交换时

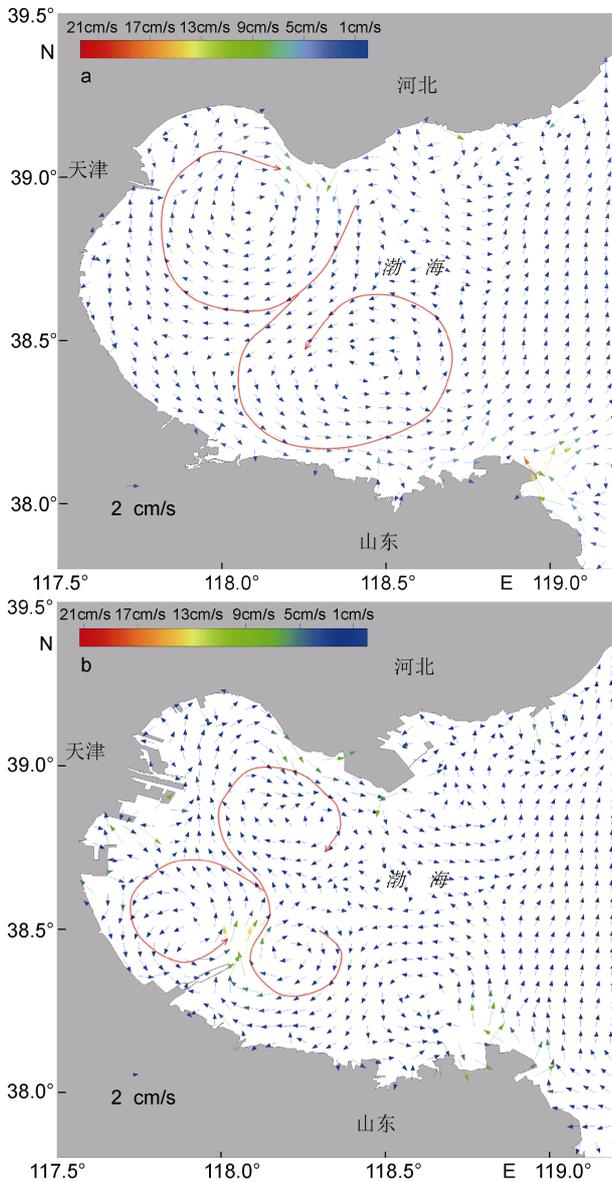


图4 渤海湾海域年均欧拉余流场分布图(左图为2000年, 右图为2010年)

Fig.4 The Eulerian residual current in Bohai Bay (the left denotes 2000 and the right denotes 2010)

间较2000年均有所提前, 分别在第24天和第3天开始发生交换, 区块A、B、C和D开始交换时间则要大落后于2000年, 以区块C最为显著, 需要117天才开始发生交换。

各区块达到交换稳定态的时间较2000年均有一定程度的变化。区块A和B达到交换稳定态的时间有所缩短, 分别为368天和312天, 较2000年分别缩短了约3个月和2个月, 但达稳定态时的交换率却下降很大, 表明区块A和B的交换能力有所下降。虽然区块C和H达到稳定态所需的时间变化不大, 但交换率却呈现出下降的趋势, 以区块H最为显著, 与2000年相比达到稳定态时交换率下降了约20%。2010年区块D、E和F达到稳定态所需时间较2000年大大增加, 其中区块E增加了约10个月的时间, 区块F增加了约3个月的时间, 但区块D和E的交换率却变化不大, 而区块F的交换率则下降明显, 由2000年的96.3%下降为79.1%。

3.3 典型年代渤海湾内平均水存留时间变化

模拟4年后, 2000年和2010年渤海湾的平均水存留时间分别约为150天和169天(图7), 可见无论是2000年还是2010年除湾口和海湾中部偏西海域的平均水存留时间分布较相似外, 平均水存留时间在渤海湾分布差异很大。因此, 若仅以箱式模型通过研究湾口通量来计算渤海湾水交换, 可能会过高的估计渤海湾的水交换水平。

2000年和2010渤海湾东南部靠近湾口的海域平均水存留时间分别约为24天和22天, 即1个月内这一区域海水可全部与渤海湾外水体交换更新, 故该海域的水交换能力较强, 水质相对洁净。虽然, 从理论上来说湾口海域的平均水存留时间应为最短, 但沿渤海湾口自南向北一线海域的平均水存留时间的分布存在较大差异: 2000年和2010年渤海湾湾口中部

表1 2000年各区块交换特征统计表
Tab.1 Characteristic of water exchange in 2000

投放水质点数	区块 A 108	区块 B 511	区块 C 447	区块 D 348	区块 E 560	区块 F 493	区块 G 482	区块 H 299
开始交换时间(天)	105	60	20	32	31	12	3	0
达到稳定时间(天)	470	388	331	312	194	45	31	24
达稳定态时交换率	80.6%	83.6%	71.1%	67.5%	78.4%	96.3%	73.0%	65.6%
第1年交换率	77.8%	81.0%	71.6%	76.1%	91.1%	99.0%	84.6%	91.3%
第2年交换率	82.4%	92.0%	88.4%	90.2%	95.7%	99.6%	89.4%	97.0%
第3年交换率	82.4%	94.3%	94.6%	93.1%	97.1%	99.6%	92.9%	98.0%
第4年交换率	82.4%	94.3%	94.6%	93.1%	97.1%	99.6%	92.9%	98.0%

表 2 2010 年各区块交换特征统计表
Tab.2 Characteristic of water exchange in 2010

投放水质点数	区块 A 103	区块 B 445	区块 C 423	区块 D 348	区块 E 492	区块 F 493	区块 G 465	区块 H 323
开始交换时间(d)	119	118	117	116	24	3	2	0
达到稳定时间(d)	368	312	357	225	486	131	136	32
达稳定态时交换率(%)	73.8	52.4	61.5	66.1	82.5	79.1	63.0	85.8
第 1 年交换率(%)	71.8	59.6	61.9	81.3	80.5	93.1	87.1	96.6
第 2 年交换率(%)	77.7	78.7	86.3	94.3	89.0	96.8	94.8	96.9
第 3 年交换率(%)	78.6	79.3	88.4	94.8	89.4	96.8	95.1	97.8
第 4 年交换率(%)	78.6	79.3	88.4	94.8	89.4	96.8	95.1	97.8

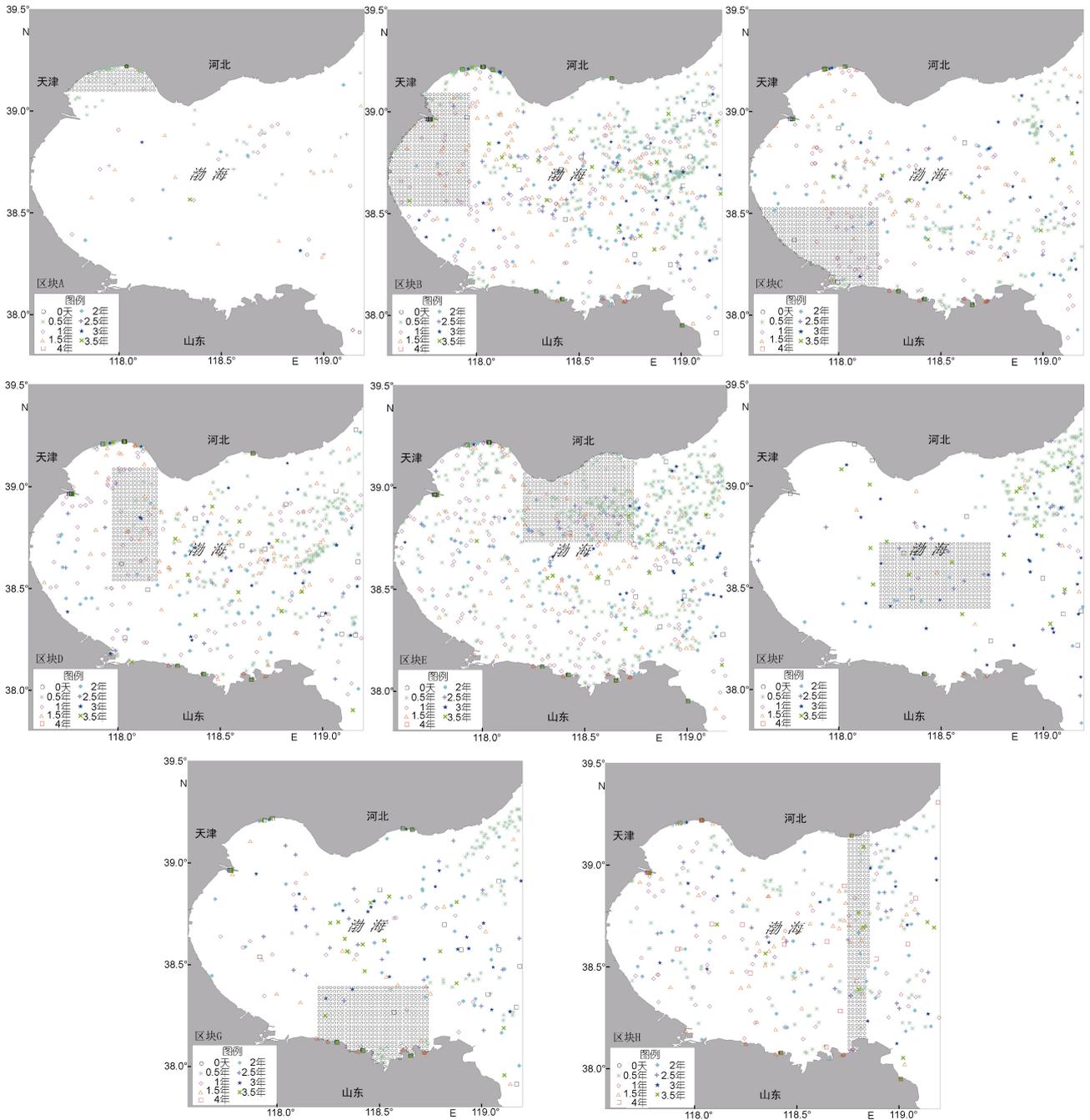


图 5 2000 年渤海湾各区块水质点分布图
Fig.5 The distribution of water particles in 2000

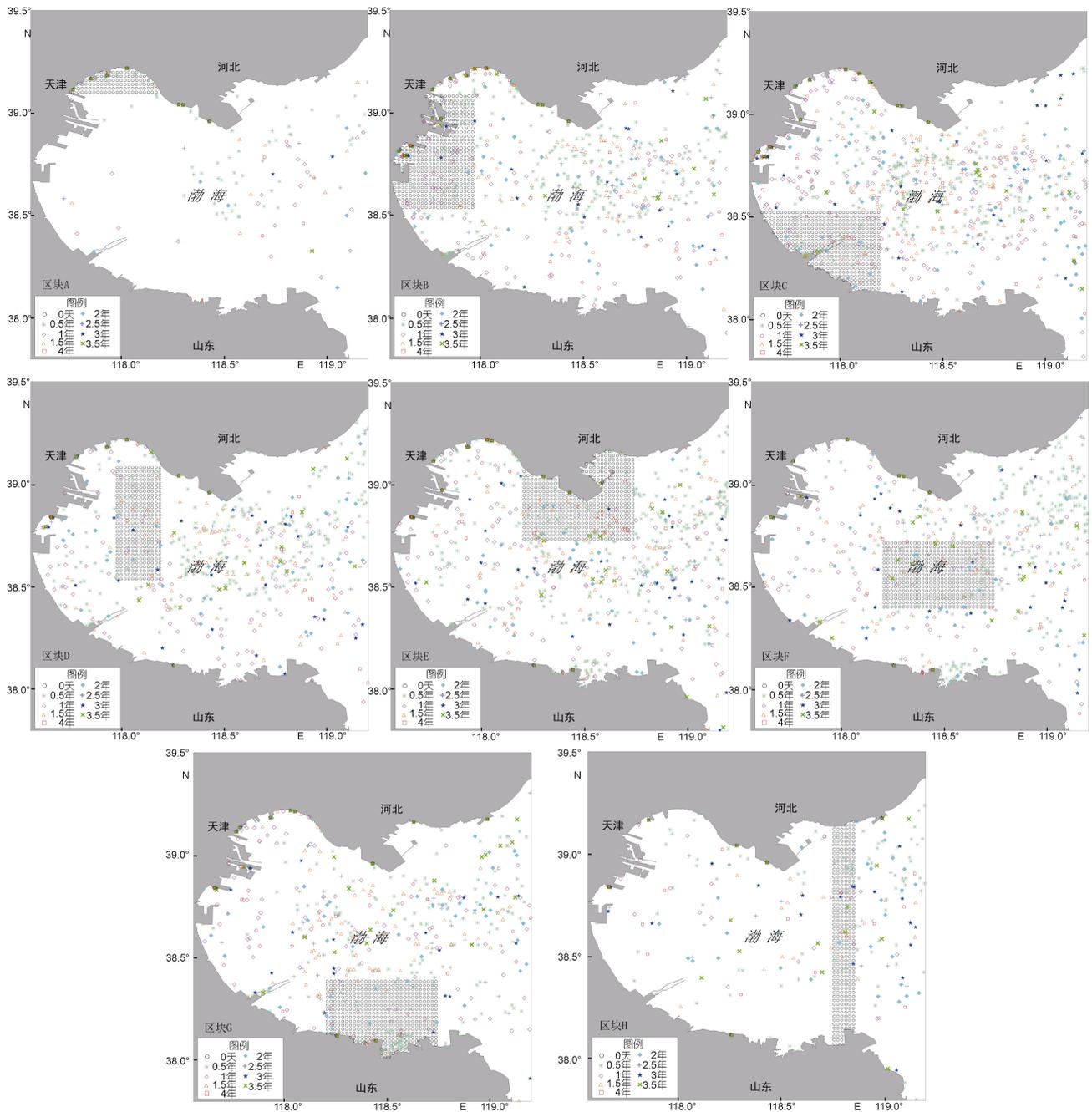


图 6 2010 年渤海湾各区块水质点分布图

Fig.6 The distribution of water particles in 2010

偏南海域(38.5°N附近)的平均水存留时间均少于3天,并逐渐向南北两侧增加,以2000年向北部增加最为显著,至38.93°N附近时平均水存留时间可增加至300天,向南部的增加量相对较少,至渤海湾南岸的东营沿岸海域时,平均水存留时间增加至30—40天,说明渤海湾湾口南部海域的水交换能力远强于北部海域。然而,2010年时渤海湾湾口北部和南部的平均存留时间均有所减少,其中湾口北部平均减少至约

230天,湾口南部海域平均水存留时间减少至约19天。2000年渤海湾湾口至中部海域存在一个平均水存留时间低值区(平均水存留时间小于60天),但至2010年时该低值区不仅影响范围有所减小,而且有向西南方向萎缩的趋势。2000年黄骅港至滨州北部沿岸海域的平均水存留时间为290天,滨州北部沿岸的平均水存留时间较长,最长可达490天,天津港至黄骅港海域的平均水存留时间低值区呈条状分布,

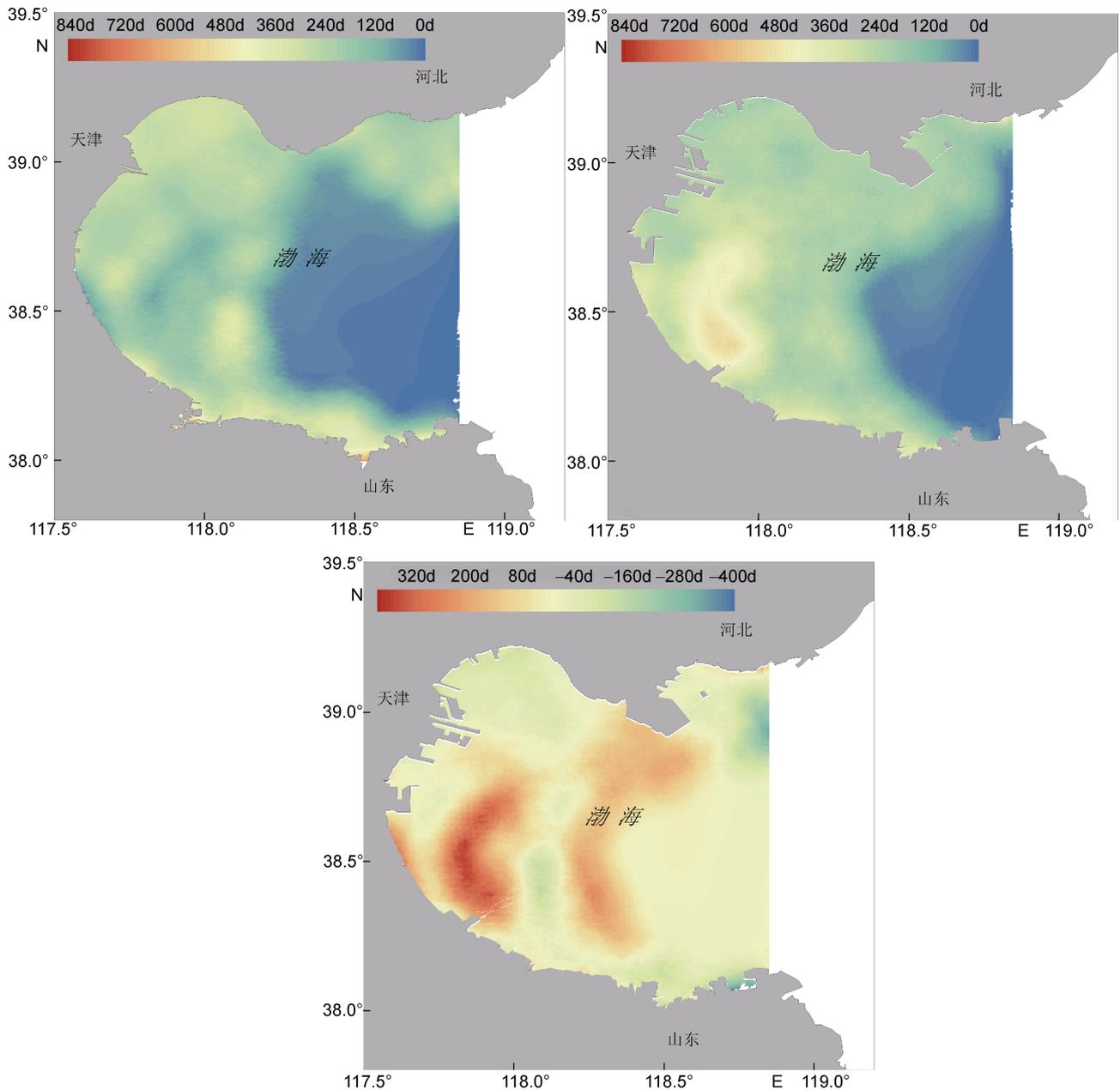


图 7 年平均水存留时间及变化(从左至右依次为 2000 年平均水存留时间图、2010 年平均水存留时间图和 2010 与 2000 年平均水存留时间变化图)

Fig.7 Average residence time of Bohai Bay and their differences (from left to right denote average residence time of Bohai Bay in 2000, average residence time of Bohai Bay in 2010 and their differences)

平均水存留时间小于 120 天; 至 2010 年时, 天津港至黄骅港沿岸的平均水存留时间大大增加, 尤以黄骅港挡沙堤西北部海域最为明显, 2000 年条状的平均水存留时间低值区消失, 转变为高值区, 平均水存留时间增加至约 420—540 天, 挡沙堤的建设导致其西北海域的平均水存留时间大大增加。2000 年天津港沿岸海域的平均水存留时间为 252 天, 天津港以北海域平均水存留时间大于南部, 北部平均水存留时间最

长为 284 天, 南部平均水存留时间最长为 264 天, 意味着天津港周边海域的水质点需要至少 10 个月的时间才能完全与湾口水体交换。然而, 至 2010 年时, 天津港沿岸海域的平均水存留时间增加至约 271 天, 港区以北和以南海域的平均水存留时间的分布格局发生了逆转——北部平均水存留时间小于南部, 最长水存留时间约 382 天。2000 年南堡沿岸海域的平均水存留时间为 303 天, 以中部和近海海域的平均水存留

最长, 最长可达 320 天, 可能是由于位于弱流区海域所致, 至 2010 年时南堡沿海岸域的平均水存留时间为 239 天, 最长可达 256 天, 均有所减小。2000 年曹妃甸沿海岸域的平均水存留时间差异较大, 具有中间短, 两端长的特征, 中部海域平均水存留时间小于 100 天, 两端的平均水存留时间则在 200 天以上; 至 2010 年时, 由于 2000 年渤海湾中部水存留时间低值区的向东南衰退, 导致 2010 年曹妃甸中部海域的平均水存留时间均大于 200 天, 而曹妃甸两侧海域的平均水存留时间则平均减小约 32 天。

由此看来, 由于近 10 年来渤海湾岸线的剧烈变动, 导致渤海湾的实际纳潮海域面积减小, 湾内的潮流场和环流结构均发生了不同程度的改变, 致使近 10 年来渤海湾内水体交换和平均水存留时间也随之产生了较大变化——天津港至黄骅港沿岸海域、黄骅港以北海域和曹妃甸至滨州海域的平均水存留时间显著增加, 天津港以北海域、滨州至东营海域和曹妃甸以东海域的平均水存留时间明显缩短。2000 年时渤海湾中部偏南海域水质点需要较长的时间才能运动出湾外, 而天津港东部海域的平均水存留时间则相对较短, 湾顶北部的南堡沿岸, 由于岸线凹进, 加之流速较弱, 故水交换能力较弱。然而, 至 2010 年时, 渤海湾沿岸各岸段由于海岸带快速城市化, 岸线向海凸出明显, 湾内环流结构发生了较大变化, 导致了更多的水质点在渤海湾中部海域的存留时间大大加长, 或者进入湾顶的弱流区内, 同时, 天津港南疆港区和黄骅港凸出海岸的建设, 阻挡了水质点的顺岸运动, 也增加了局部水存留时间。

3.4 不同投放时刻对渤海湾水交换的影响

以渤海湾潮流运动的 2 个典型时刻作为水质点投放的初始时刻, 分别计算了 2000 年和 2010 年岸线条件下的渤海湾水交换率和达到稳定态所需的时间。结果表明, 不同的水质点初始投放时刻对渤海湾水交换率和达到稳定态所需时间影响较大, 尤其是后者。2000 年和 2010 年的计算结果均表明, 低潮时投放水质点达到稳定态的时间较长, 分别所需 470 天和 486 天, 高潮时投放水质点达到稳定态所需的时间分别为 431 天和 436 天。导致该现象的主要原因是低潮时绝大多数水质点均向海湾西部运动, 由于渤海湾西部多为粉砂淤泥质海岸, 不仅大量水质点停滞在湾顶, 且湾顶的弱流区也迟滞了水质点向湾外运动。而高潮时投放水质点后, 多数水质点向湾口运动, 渤海湾中部和东部的水质点均能较快到达湾外, 而渤

海湾湾顶的部分水质点则运动迟缓, 导致其在较长时间内不能与湾外水体产生交换, 故降低了渤海湾整体的水交换率。

4 讨论

近 10 年来渤海湾环湾海岸带城市化进程不断推进, 沿岸生产和生活对土地的需求量大增, 随着围海造陆的热度持续高涨, 渤海湾的自然海岸形态发生了剧烈变化。应用 MIKE 3 水动力模型耦合粒子追踪模块分别研究了 2000 年和 2010 年岸线条件下的渤海湾各区块的水交换能力和海湾平均水存留时间, 结果表明, 人类活动导致岸线变化剧烈, 2000 年和 2010 年渤海湾的欧拉余流场分布发生了明显变化, 在海湾西部和中部产生了多个涡旋, 湾内南部的流速辐聚区被减弱。由于渤海湾的余流场结构是影响渤海湾水交换能力的重要动力学分量, 因此渤海湾内各区域的水交换能力和平均水存留时间变化显著: 2010 年渤海湾的平均水存留时间延长至 169 天, 较 2000 年增加了约 19 天, 在渤海湾中部海域形成了两个明显条状分布的平均水存留时间高值区, 对渤海湾区域水质的改善十分不利。2010 年区块 A、区块 B 和区块 D 的开始交换时间均较 2000 年有所延长, 其中区块 B 的开始交换时间延长了近一倍, 虽然它们达稳定态所需时间都较 2000 年均有不同程度的减小, 但最终达稳定态的水交换率却有不同程度的下降, 区块 B 尤为显著, 下降了近 40%。另外, 从水质点的运动规律来看, 2000 年区块 A 和 B 中大量水质点停滞在渤海湾顶沿岸, 而 2010 年区块 A 和 B 的水质点则少有停滞在上述海域, 而在曹妃甸海域停留时间较长。可见渤海湾多年来的围填海工程, 造成对决定湾内水交换的环流结构发生了一定的改变, 不仅导致近岸海域的交换能力下降(天津近岸海域的水交换能力下降最为显著), 而且也减弱了渤海湾中部的的水交换能力。

天津滨海新区的入海排污口分布于渤海湾顶的 8 条大型河流上, 按照排污口规模及污染影响程度, 主要入海排污口大部分位于塘沽区及汉沽区, 两个重点入海排污口北塘口及大沽排污口也分布在天津海域的北部。近 10 年来, 随着天津滨海新区的快速城市化, 石化、港口、钢铁等产业大量临海建设, 大量超标污水经由北塘和大沽排污口向海排放。研究表明, 虽然排污口的水质点能较快离开排污口附近, 但多停留在渤海湾北部湾顶区域, 并需要更长的时间才能扩散出渤海湾外, 很难向南疆港区以南海域扩散。

因此,天津滨海新区进一步开发建设时应将区域水交换能力纳入总体规划,在渤海湾湾顶的西北部等交换能力较差的海域,应避免近岸排污口或重污染企业,以免进一步增加区域海洋环境压力。

参 考 文 献

- 国家海洋局, 2014. 2013 年中国海洋环境状况公报
 国家海洋局, 2013. 2012 年中国海洋环境状况公报
 高 抒, 谢钦春, 1991. 狭长形海湾与外海水体交换的一个物理模型. 海洋通报, 10(3): 1—9
 匡国瑞, 杨殿荣, 喻祖祥等, 1987. 海湾水交换的研究——乳山东湾环境容量初步探讨. 海洋环境科学, 6(1): 13—23
 李小宝, 2010. 大型海湾水交换高效计算方法研究. 天津: 天津大学博士学位论文, 12—13, 81—82
 孙英兰, 陈时俊, 俞光耀, 1988. 海湾物理自净能力分析和水质预测——胶州湾. 中国海洋大学学报, 18(12): 60—65
 万修全, 2003. 渤海冬夏季环流特征及变异的初步研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 46—49
 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
 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
 张越美, 孙英兰, 2002. 渤海湾三维变动边界潮流数值模拟. 青岛海洋大学学报, 32(3): 337—344
 Backhaus J O, 1984. Estimates of the variability of low frequency currents and flushing-times of the North Sea. ICES Hydrography Committee, C. M., C24
 Choi B H, 1999. A Strategy to evaluate coastal Defense levels of seas around Korean Peninsula. In: Hong G, Zhang J and Park B eds. Health of the Yellow Sea. Seoul, Korea: The Earth Love Publication Association, 79—108
 Chorin A J, 1997. A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems. Journal of Computational Physics, 135(2): 118—125
 DHI, MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module, Scientific documentation, 2008
 Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. Computers & Geosciences, 28(8): 929—937
 Roger L, Pohlmann T, 1995. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a Eulerian dispersion model using a half-life time approach. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 47(4): 287—299
 Signell R P, Butman B, 1992. Modeling tidal exchange and dispersion in Boston Harbor. Journal of Geophysical Research, 97(C10): 15591—15606

IMPACT OF RECLAMATION ON WATER EXCHANGE IN BOHAI BAY IN RECENT DECADE

WANG Yong-Zhi, WU Di, SHI Hong-Hua, ZHAO Xiao-Long, YAN Wen-Wen
 (The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract Coastal reclamation has been increasing due to rapid urbanization in coastal zone in China in recent decade, resulting in continuous tidal prism decrease and large pressure on water exchange in coastal bays. To study the effect of coastal zone urbanization on water exchange in recent decade, Bohai Bay in North China was taken as an example. The MIKE 3 hydrodynamic model coupled with particle tracing module was applied in Bohai Bay with 2000 and 2010 coastline data. For detail understanding of in-bay water exchange, Bohai Bay was divided into eight parts in natural and anthropological features. Changes in average residence time, water exchange pattern, and water movement dynamics in the eight parts were calculated. Results reveal significant change in water current regime of the bay in hydrodynamics due to coastline alteration. Modifications in the bay water exchange and average residence time have been changed remarkably, especially in Tianjin Harbor, Huanghua Harbor, and Caofeidian Harbor in 2010 as compared to the situation in 2000, which is detrimental to the regional water quality improvement and shall be taken with effective countermeasures.

Key words Bohai Bay; Water exchange; Reclamation; Urbanization