

胶州湾水交换及湾口潮余流特征的数值研究

吕新刚^{1,2}, 赵昌^{1,2}, 夏长水^{1,2}, 乔方利^{1,2*}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 利用基于普林斯顿海洋模式建立的胶州湾及临近海域潮汐潮流数值模型, 结合胶州湾口走航式声学多普勒海流剖面仪(ADCP)测流资料, 研究了胶州湾口的潮(余)流特征, 并在潮流模型的基础上耦合建立了水质模块, 模拟了胶州湾的水交换过程。考虑 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , M_4 和 MS_4 六个主要分潮, 胶州湾口潮流场的模拟与 ADCP 观测数据吻合较好。外湾口水道上的潮流非常强, 大潮期间观测到 201 cm/s 的峰值流速。团岛岬角的两侧分别存在一个流向相反的余流涡旋, 两涡旋在团岛附近辐合, 形成了 57 cm/s 的离岸强余流。整个胶州湾平均水体存留时间为 71 d, 平均半交换时间为 25 d。胶州湾水体交换能力在空间分布上有很大差异: 湾口海域最强, 向湾顶逐渐减弱。湾内存在两个弱交换区, 分别位于湾的西-西南部和东北端, 水体存留时间多超过 80 d, 湾西局部水域最长达 120 d, 而半交换时间也大多超过 40 d。潮流场的结构、强度, 以及与湾口距离的远近是造成湾内水交换能力空间差异的主要原因。

关键词: 胶州湾; 水交换; 潮流; 数值模拟; 水体存留时间; 走航式 ADCP

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)02-0020-11

1 引言

水交换能力是评价海湾环境容量和环境质量的重要指标, 交换能力的强弱直接关系到海湾的水质状况。湾内水体通过平流和扩散等物理过程与周围水体混合, 通过湾口与外海水交换。交换不畅的海湾容易产生水体富营养化等问题。胶州湾位于山东半岛南岸, 对青岛的经济发展有重要影响。随着环胶州湾地区经济的高速发展, 胶州湾的水体环境问题也日益突出, 主要表现在营养盐浓度攀升, 赤潮频发, 污染加重, 生物多样性减少^[1]。胶州湾东西宽 27.8 km, 南北长 33.3 km,

具有内、外两个狭窄湾口: 内湾口位于团岛与黄岛之间; 外湾口是连接黄海的通道, 位于团岛与薛家岛之间, 宽度仅 3.1 km(见图 1)。一条深水道横亘于湾口水域, 是其突出的地形特征。

潮流往往是近岸海水瞬时流动的主要形式, 为水体交换过程提供了动力学背景; 潮致余流尽管量值较小, 却与物质的长期输运关系密切。通过大面积现场观测^[2]、数值模拟^[3-7]等手段, 人们对胶州湾潮运动的基本特征取得了较为统一的认识, 比如: 潮型为正规半日潮, M_2 分潮占优; 驻波性质明显; 湾内潮余流场呈多涡旋结构, 等。但是, 目前对潮余流强度的分歧较大, 不同研究得出的

收稿日期: 2008-12-30; 修订日期: 2009-08-29。

基金项目: 国家科技支撑计划课题“浒苔大规模暴发的监测与预警技术研究”(2008BAC49B02); 我国近海海洋综合调查与评价专项“海洋可再生能源开发与利用前景评价”(908-02-05-01); 我国近海海洋可再生能源调查与研究成果集成(908-ZC-I-21); 国家自然科学基金资助项目(40806016)。

作者简介: 吕新刚, (1975—), 男, 山东省莱芜市人, 博士。从事陆架和海洋环流数值研究。E-mail: Lxg@fio.org.cn; Gary_lxg@163.com

* 通信作者: 乔方利, 研究员, 博士生导师。E-mail: qiaofl@fio.org.cn

余流最大值相差 1 倍以上^[2-7,11-12];另外,在湾口

强流区的剖面观测还比较少。

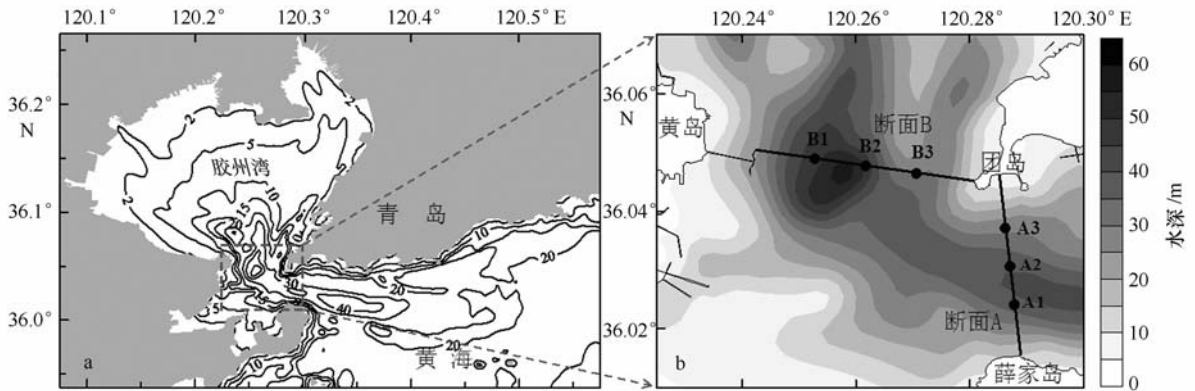


图 1 数值模式区域(a)和走航调查断面位置(b)
等值线和灰度代表水深(单位:m)

目前有多种模型被用于水交换的研究,如:箱式模型^[8-9]、质点追踪模型^[10-11]和水质模型^[12-14]等。借助一个箱式模型,吴永成等^[8]利用盐度资料计算了胶州湾水体半交换时间;国家海洋局和青岛水产局^[9]计算了胶州湾的“水体净化时间”(指水流通过开边界进入并充满整个箱体所需时间);孙英兰等^[10]用二维数值模型通过质点跟踪,定性分析了湾内水的交换能力;赵亮等^[11]追踪胶州湾水质点轨迹,定量给出了海湾水的更新时间(箱内物质质量减至初始值的 37% 所需时间)。Liu 等^[12]在三维水动力模型基础上建立了水质模型,给出了胶州湾水体存留时间的水平分布(水体存留时间的定义见 2.3 节)。陈时俊等^[14]用数值模式研究了给定排污源条件下胶州湾污染物的分布。这些研究有助于我们了解胶州湾水交换的基本规律,但研究方法的不同导致其结论大相径庭:前人得出的胶州湾平均水体存留时间从 5 d 到 80 d 不等^[12],差别巨大。这也说明有必要采用更精细的模式对胶州湾水交换问题做进一步探索。海湾水交换问题的本质是湾内水体在流场中的对流-扩散问题,因此基于对流-扩散的水质模型(欧拉弥散模型)在物理机制上更为合理。

胶州湾口窄内宽,封闭性强,湾口是与外界进行水交换的关键区域,故研究湾口附近的潮(余)流形态具有重要意义。本文首先利用胶州湾口潮流实测资料,结合数值模式,分析湾口潮余流的结构特点;其次,在三维潮流模型的基础上耦合建立水质模块,研究胶州湾的水交换规律。

2 资料与方法

2.1 资料

采用走航式声学多普勒剖面流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler,简称 ADCP),获得了胶州湾内外两个湾口在大、小潮期间的潮流资料。这些现场观测数据不仅有助于了解湾口的潮流形态,同时可以对潮流模型做验证。

2006 年 9—10 月,在天文大潮和小潮期间,沿胶州湾外口(断面 A)和内口(断面 B)分别进行多航程走航式剖面观测(图 1b)。断面 A 观测日期为:9 月 27 日 09:00—28 日 10:00(小潮),10 月 7 日 09:00—8 日 10:00(大潮);断面 B 观测日期为:9 月 29 日 09:00—30 日 10:00(小潮),10 月 9 日 09:00—10 日 10:00(大潮)。观测仪器采用美国 RD Instruments (RDI) 公司生产的 300K 走航式 ADCP,将仪器固定在水下 0.5 m 处,观测船速约为 3 m/s,每 10 s 记录一次数据,每个断面连续观测 25 h。由于湾口较窄,约 17 min 即可完成单次航程。向下剖面观测的第一层数据位于 3.1 m 水深处,以下每层相距 1 m,每个航程得到 100 个左右的剖面数据。

2.2 数值模式及配置

在前期工作建立的胶州湾及临近海域水动力(正压潮流)模型^[7]基础上耦合一个水质子模型。该潮流模型基于普林斯顿海洋模式(POM)^[15]建立,已被应用于 2008 年夏季青岛近海爆发性绿潮(浒苔)的研究中^[16]。模式区域如图 1a 所示,水平分辨率约 180 m × 220 m,垂向等分为 5 层。根据方国洪等^[17]提出的

准调和分析方法,模式由开边界潮位:

$$\zeta = \sum_i D_i H_i \cos(\omega'_i t - g_i - d_i) \quad (1)$$

驱动。式中, i 取1~6,代表 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , M_4 和 MS_4 分潮(族); D 和 d 分别为振幅和迟角订正^[17]; ω' 为经过订正的潮汐角频率; H 和 g 分别为潮汐振幅和迟角,由大区域潮汐潮流数值模式结果^[18]插值调整得到。模式的详细介绍从略。

水质模型参照 Liu 等^[12]和魏皓等^[13]构建。以被动溶解保守物质作为湾内水体交换的示踪物,其控制方程为

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + F. \quad (2)$$

其中,水平扩散项

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DA_H \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (3)$$

C 为示踪物浓度, U 和 V 代表流速水平分量, ω 为 σ 坐标系下的垂直速度, K_H 和 A_H 分别是示踪物的垂直和水平湍流扩散系数, D 为瞬时水深。 ω 和 σ 的定义见文献^[15]。

以胶州湾的外口为界,湾内的初始浓度设为1,湾外设为0。在模式区域的开边界处,认为进入模式区域的外海水示踪物浓度为0,流出模式区域的示踪物浓度等同于相邻内点(即无梯度)。在岸界处采用无穿透边界条件。潮流动力模式首先积分5 d,获得充分稳定的流场,然后启动水交换模型,继续积分200 d。

2.3 水交换的算法

描述水交换时间的定义非常繁杂,常导致混淆^[12-13]。不同研究经常采用不同的定义,这为不同研究结果之间的比较带来一些麻烦。本文采用两种指标衡量胶州湾的水体交换能力:一是 Luff 等^[19]引入的半交换时间,即某海域保守物质浓度降为初始浓度一半所需的时间;二是 Takeoka^[20]提出的“平均存留时间”(mean residence time)

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{C(t)}{C(t_0)} dt, \quad (4)$$

式中, t_0 和 t 分别表示初始时刻和某一特定时刻。

3 胶州湾口潮流特征

3.1 潮流

准确的潮流场模拟是水质模拟的基础。本节将给出潮流数值模拟结果的观测验证,胶州湾潮汐同潮图、潮流椭圆分布等详细特征可参见文献^[7]。

在两条走航线路上,分别等间距取3个代表点(见图1b),给出观测潮流的周日变化过程,并取潮流速的进湾主要分量(即在断面A上取东西分量 u ,在断面B上取南北分量 w)与模式结果作对比。6个单点上的潮流过程均表明(见图2—4),半日潮性质非常明显。

在外湾口A2点(见图2),无论在大潮还是小潮期间,流向和流速的模拟变化曲线均与观测拟合较好。表层和中层的潮流位相基本同步,反映了潮流的正压特征。A2点处于水道中央,从流向的周日变化可见,基本在 120° 和 300° 两个方向上摆动,说明潮流的往复性很强。在两条断面的其他位置点上,流向的模拟效果均比较理想,为节省篇幅,下面只给出其他点的流速结果。

在所选取的6个对比点中,位于断面中央的A2和B2两点的模拟结果与观测吻合最好。另外4点(尤其是A3和B3两点)的潮流受岸界影响较大,模拟效果较其他点稍差,但基本的潮流形态都得到了正确的刻画。

由于走航路线位于胶州湾口的水道上,流速非常强。大潮期间观测到的峰值流速,在A2点达201 cm/s(17时50分),在A3点达199 cm/s(14时00分);小潮期间最大流速为153 cm/s(A2点)。仅流速的东西分量,在大潮期间A断面的3个点也都在150 cm/s以上(A3点为198 cm/s),小潮期间亦在100 cm/s以上(A3点达146 cm/s)。

3.2 欧拉余流

欧拉余流是指对一固定地点在一个潮周期内对潮流取平均所得到的剩余速度。本文每条剖面的走航观测均连续测得25 h(50组)的海流数据,而胶州湾潮型是正规半日潮,对剖面上每个观测点的25 h流速数据做平均,可得整个剖面的欧拉余流分布。大、小潮期间各得一套数据,取二者的均值作为平均意义下的余流。对数值模拟得到的1个月潮流序列用最小二乘法做调和和分析,其剩余的非周期流动即为模拟的欧拉余流。

图5和图6表明,观测与模拟得到的欧拉余流结构基本相符。在外湾口的南北两端,模拟余流略有偏小;内湾口的近底层观测到了南向余流,而模拟结果则显示垂向均匀,底层结果有一定偏差。表1进一步量化了A断面的余流结构和模拟误差:在断面A上均匀取34个点,其流向的平均绝对误差仅 6.0° ,流速的平均绝对误差4.1 cm/s,最大约11.9 cm/s,总体上令人满意。但是,由图6a可以看

出,断面 B 除了团岛附近以外,其他位置上的模拟流向存在明显偏差,在中段的弱流区甚至流向相反,

这表明黄岛与团岛之间的涡旋中心实际位置应该比模拟结果更偏南一些。

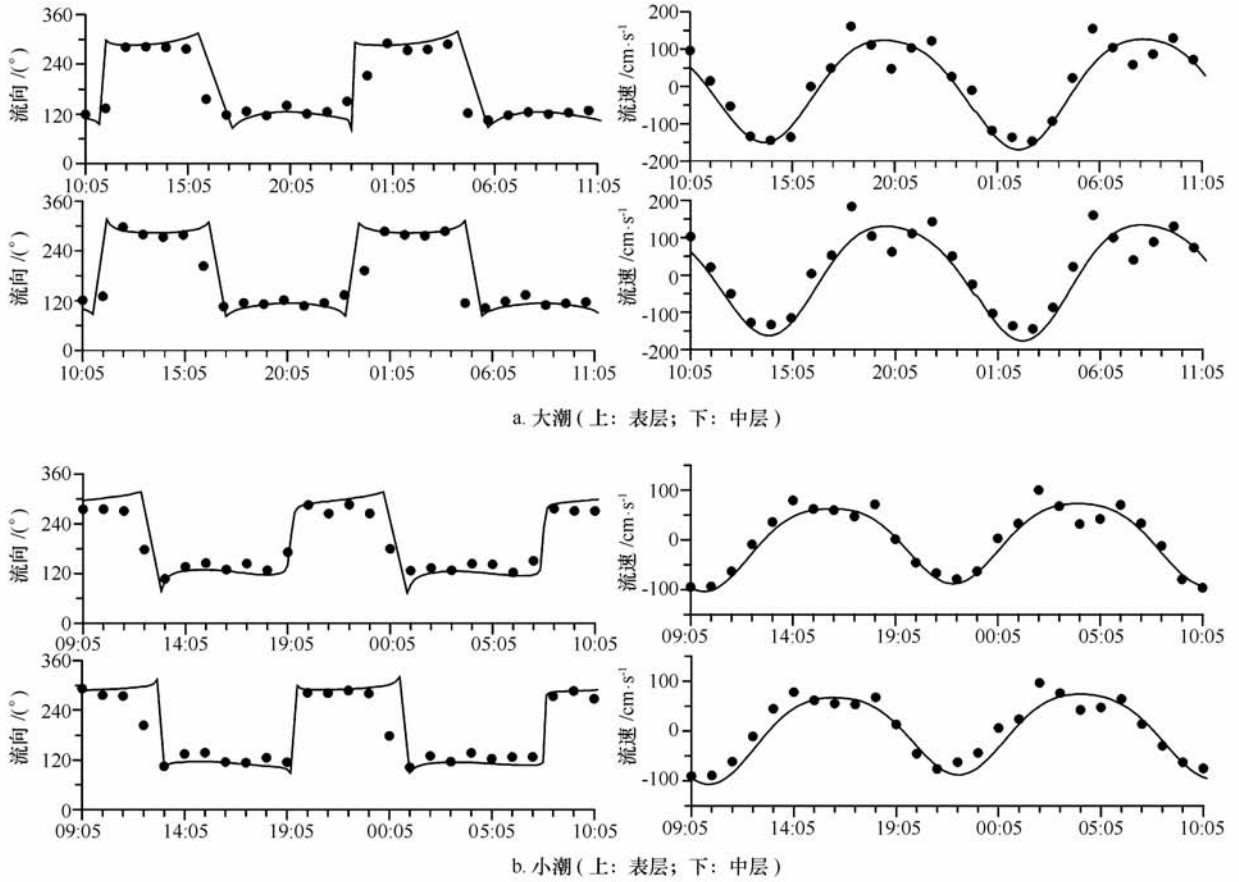


图2 A2站大、小潮潮流周日观测与模拟对比(实线代表模拟,散点代表观测)

表1 外湾口(断面A)表层余流的模拟与观测对比¹⁾

序号	流向/°					流速/cm·s ⁻¹				
	大潮	小潮	观测平均	模拟	差值	大潮	小潮	观测平均	模拟	差值
1	279.5	284.2	281.7	281.5	0.1	34.5	28.9	31.7	39.9	-8.2
2	278.3	278.2	278.2	278.0	0.3	52.6	44.5	48.5	45.0	3.5
3	275.7	277.6	276.6	275.7	0.9	60.3	52.5	56.4	45.7	10.7
4	275.0	275.9	275.4	273.7	1.8	61.2	53.3	57.3	46.6	10.7
5	271.3	276.6	273.8	271.6	2.2	58.0	51.3	54.6	44.6	10.0
6	268.8	273.0	270.7	269.1	1.5	59.0	46.1	52.5	40.6	11.9
7	268.8	270.2	269.4	266.3	3.1	55.0	41.0	48.0	36.7	11.3
8	267.6	267.4	267.5	262.3	5.2	50.0	35.0	42.5	31.9	10.6
9	265.9	263.6	264.9	256.7	8.2	40.1	31.2	35.6	26.9	8.8
10	261.6	260.4	261.0	248.6	12.4	33.4	26.4	29.9	22.2	7.7
11	254.6	255.7	255.1	239.3	15.9	25.9	22.7	24.3	18.5	5.8
12	241.0	251.8	246.0	226.1	19.9	20.6	17.9	19.2	15.6	3.6
13	214.0	241.4	227.9	208.2	19.7	14.5	14.8	14.2	13.8	0.4
14	179.7	217.2	198.1	195.6	2.6	13.0	12.6	12.1	13.2	-1.1
15	158.6	199.3	177.1	182.1	-5.0	15.0	12.7	13.0	13.2	-0.2
16	153.7	188.8	167.1	170.3	-3.2	17.8	11.1	13.9	13.9	-0.1

续表 1

序号	流向/ $^{\circ}$					流速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$				
	大潮	小潮	观测平均	模拟	差值	大潮	小潮	观测平均	模拟	差值
17	151.9	172.4	159.5	163.9	-4.4	20.4	12.1	16.0	14.2	1.8
18	147.0	163.3	152.3	157.9	-5.6	23.9	11.5	17.5	14.7	2.8
19	140.2	158.2	146.9	152.6	-5.7	23.4	14.0	18.5	15.2	3.3
20	140.9	160.9	148.1	148.3	-0.2	20.6	11.6	15.9	15.2	0.7
21	133.0	161.1	143.7	144.1	-0.4	20.5	12.7	16.1	15.3	0.9
22	129.5	158.2	139.4	139.7	-0.2	22.0	11.9	16.5	15.3	1.2
23	125.0	162.9	137.7	135.0	2.7	24.4	12.6	17.6	15.1	2.5
24	121.8	161.6	135.0	130.2	4.8	24.7	12.7	17.7	15.1	2.6
25	118.8	158.7	132.2	125.1	7.1	22.8	11.8	16.4	15.2	1.2
26	112.4	157.8	127.6	119.6	8.0	24.9	13.0	17.6	15.4	2.2
27	111.2	158.2	126.0	114.4	11.6	24.7	11.9	16.9	15.8	1.1
28	110.6	151.0	122.0	109.2	12.8	25.6	10.5	17.2	16.6	0.6
29	107.2	152.8	118.7	104.5	14.2	24.1	8.5	15.3	17.6	-2.3
30	100.7	140.0	110.4	100.3	10.0	26.5	9.0	17.0	18.8	-1.8
31	94.3	128.4	102.3	97.0	5.3	29.1	9.2	18.5	20.6	-2.1
32	87.4	127.0	97.1	94.4	2.7	33.0	11.1	21.1	22.5	-1.4
33	87.1	107.9	92.6	92.2	0.5	37.1	13.7	25.0	24.5	0.5
34	85.4	86.9	85.9	91.4	-5.5	40.1	20.0	30.1	24.6	5.5
绝均差					6.0					4.1

1) 序号 1 到 34 表示由北向南均匀取 34 个点。

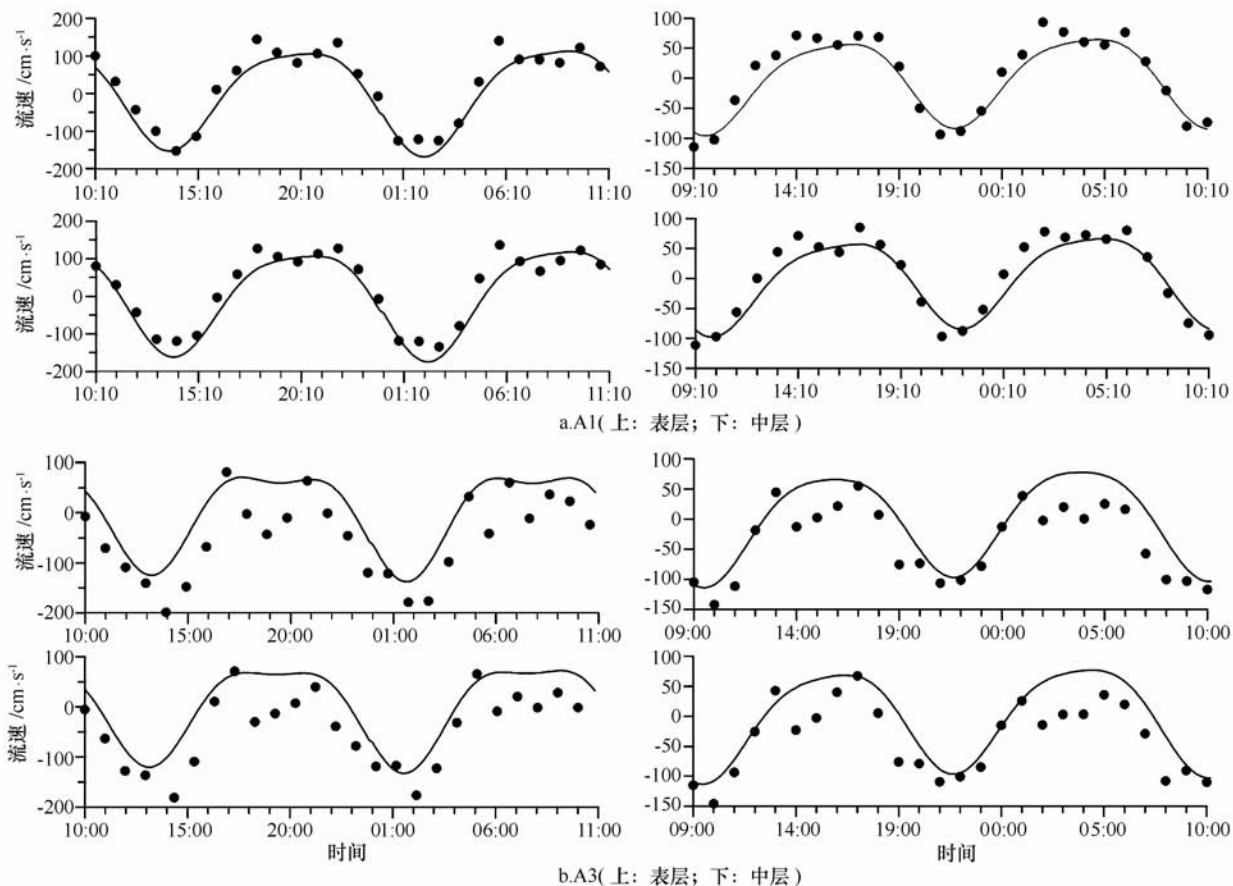


图 3 大潮(左)和小潮(右)期间 A1 和 A3 站流速 u 分量的周日变化(实线代表模拟,散点代表观测)

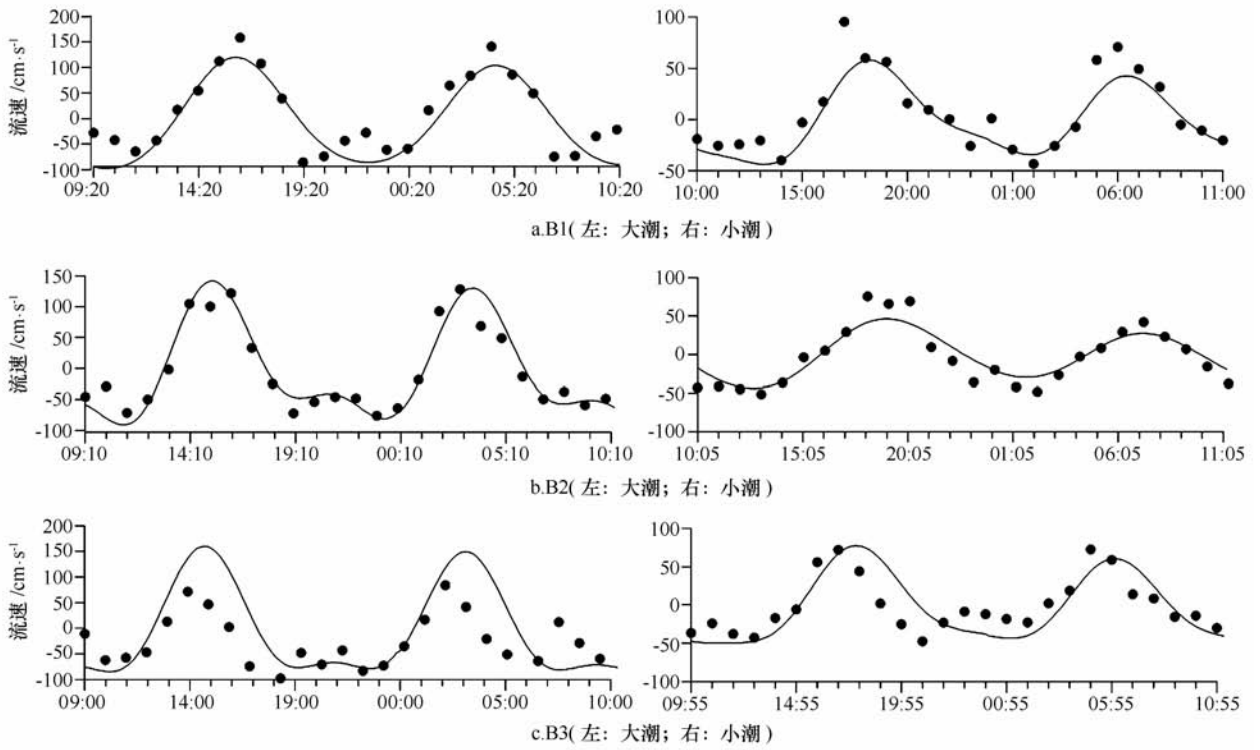


图4 大潮(左)和小潮(右)期间 B1, B2, B3 站表层潮流 v 分量的周日变化(实线代表模拟, 散点代表观测)

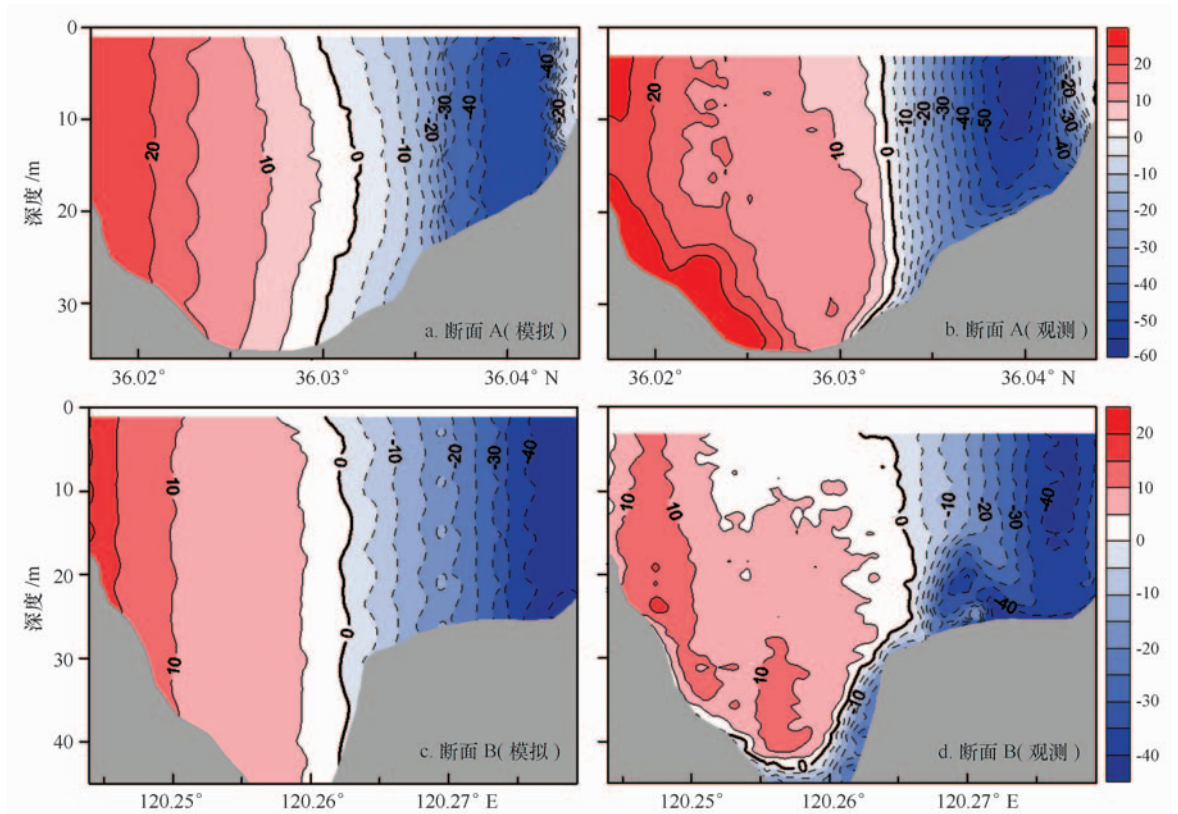


图5 模拟与观测的余流速度 u 分量(a, b)和 v 分量(c, d)剖面分布 (单位: cm/s)

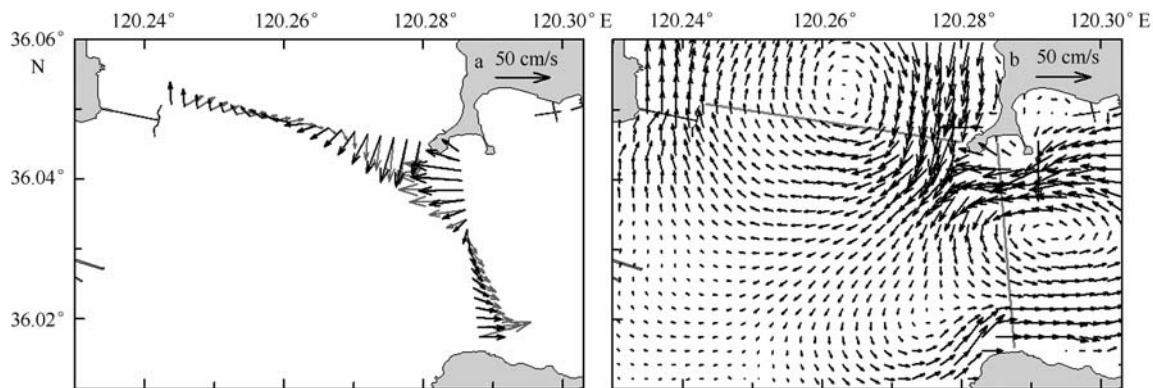


图6 观测与模拟的表层余流矢量

a 中灰色箭头代表观测,黑色代表模拟;b 为模拟的表层余流场,走航路线用灰色直线标出

在外湾口,余流基本态势为北进南出;在内湾口,为西进东出(图5中, u 正值代表向东, v 正值代表向北)。在内、外湾口上,余流表现为东西和南北的非对称性,强流均发生在团岛一端。从矢量场更清晰地看出余流的涡旋结构(图6):在内外湾口分别存在一个流向相反的余流涡旋,二者在团岛周围汇聚呈辐射状流向西南。这种基本形态与以往研究相吻合^[2-7]。

胶州湾口潮余流的强度是一个有争议的问题。以往的多数数值研究得出的欧拉余流最大为13—20 cm/s^[3-5,11-12],而本文的观测和模拟结果均显示,团岛附近的余流最大值在50 cm/s左右。1980年,国家海洋局第一海洋研究所曾在胶州湾进行了多个站位的定点观测^[2],测得的最大余流发生在团岛西侧,为50 cm/s,本文模拟结果与之非常相符(本次观测得到的最强余流发生在团岛南侧,为57 cm/s,见表1)。中国海洋大学的Chen^①最近用FVCOM对青岛近海的潮流进行了多分潮细网格模拟,其最大余流流速亦为50 cm/s左右,支持本文结论。以往研究得出的余流偏弱,原因可能在于两方面:一是数值模式分辨率较低,对岸形的刻画不够真实,尤其在岸形非常曲折的岬角处,这种失真更明显;二是仅考虑 M_2 分潮,忽略了分潮间的非线性相互作用。

4 胶州湾水交换模拟

上文对潮流数值结果的验证表明,水动力模式

能够为水质模拟提供合理的动力背景场。下面给出胶州湾水交换过程的模拟结果并做分析。

计算了水体半交换时间和存留时间来分析胶州湾的水交换规律(见图7)。整个湾平均的水体半交换时间为25 d,平均存留时间为71 d。从水平分布来看,水交换能力在整个湾内不同海区差异非常大:湾口的开放海域水交换能力最强,湾中央较强,湾顶最弱。在紧靠湾口的水道上,半交换时间仅为1~2 d;在内湾口以北半径约4 km的半圆区域,半交换时间在10 d之内。从湾的中部到湾顶及湾东西两侧的浅水区,半交换时间逐渐加长。

值得注意的是,湾内存在两个明显的水交换滞缓区:湾的西—西南端和东北端。湾东北部的半交换时间多在40 d以上,湾西局部甚至超过百天(见图7a)。这两个弱交换区对于胶州湾的污染物分布及排污设计非常重要。从水交换的角度考虑,如需增加排污口,应尽量避免这两个区域,以设在湾口附近为宜。

湾内弱交换区的形成与潮流的流速、方向和与湾口之间的距离有关。首先,胶州湾潮流的流速分布规律为:湾口大,湾内小;湾中部较大,近岸区较小(见图8)。湾口水道上潮流最强,仅 M_2 分潮流的振幅即达1 m/s,大潮期间观测到的瞬时流速甚至达到2.01 m/s。在涨落潮的过程中,越是靠近湾口的水体,与外海水交换越快;越靠近湾顶,交换越慢。其次,胶州湾潮流基本上是偏南北向的往复流。在湾的西南部,流向与岸线大致平行,平流输运的作用

① CHEN Jin-rui. Three-dimensional high-resolution numerical study of the tide and tidal current in the Jiaozhou Bay and Olympic Sailing Site, PICES 17 Annual Meeting, 2008, Dalian, China.

以沿岸为主,这种流动要比离岸流(如湾顶北部)的输运效率低;湾西南部的弱交换区实际上距离黄岛内湾口并不远,但是此处不仅流向平行于岸,流速也比内湾口海区弱得多,两处潮流场迥然不同,导致了水体交换能力的巨大差别。相比之下,在与西南部

弱交换区基本对称的东南部沿岸区,流速明显比西南部大(图8),故交换能力也较之强。第三,在湾顶的东北角海域,距离湾口最远,同时流速向北递减,因而污染物存留时间较长。

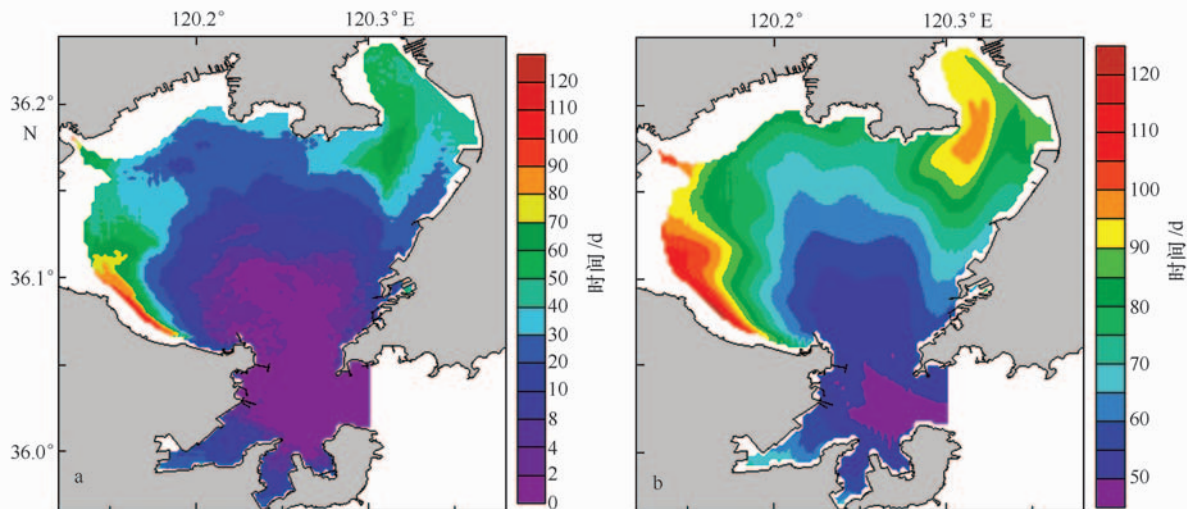


图7 胶州湾水体半交换时间(a)和水体存留时间(b)的水平分布

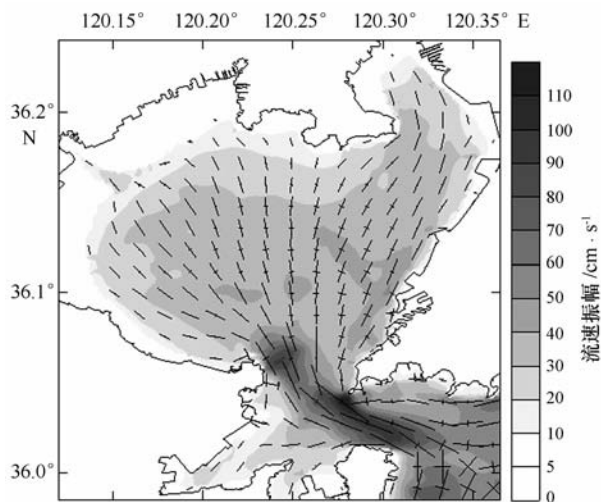


图8 M_2 表层潮流椭圆和流速振幅的水平分布
灰度表示流速振幅

除了潮流的平流输运作用,扩散过程也影响污染物的分布,但其贡献远小于潮流输运作用^[14]。除了湾口附近外,湾内的余流非常小^[7],对水交换的作用也是有限的。因此,胶州湾水体自净能力主要受潮流场以及到湾口的距离控制。

水体平均存留时间的空间分布态势与半交换时

间基本吻合,存留时间自湾口向湾顶逐渐增加:湾口最短,约40余天;湾顶东北角和西—西南部的存留时间最长,在80~120 d(图7b)。上述结果在示踪物浓度时间演变图上表现得更为直观(见图9)。图10给出整个胶州湾示踪物平均浓度随时间的变化曲线。示踪物浓度在模型运行100 d后变化明显趋缓,200 d后的浓度基本上可视为定常。

陈时俊等^[14]较早运用数值模式,以半日潮为动力背景,在给定排污源条件下,对胶州湾的污染物输运做了数值计算,得到两个污染物的高值区,分别位于大沽河口和胶州湾东—东北侧。这与本文得到的水交换滞缓区在总体分布趋势上大致吻合。不过,本文得到的湾西弱交换区不在大沽河口,而是在偏西南侧(图7),该差异与文献^[14]的污染源分布有关。

Liu等^[12]曾比较过一些胶州湾水交换研究的结果。由于采用了不同的方法,前人的研究结论有很大差异。箱式模型^[8-9]研究得到折算后的胶州湾平均存留时间仅为5~7 d,比其他研究^[11-12]小得多。这是由于箱式模型假定每个潮周期湾内水都能够与外海水充分混合,因而高估了交换能力。文献^[10]为定性研究,未给出水交换能力的定量数值。基于

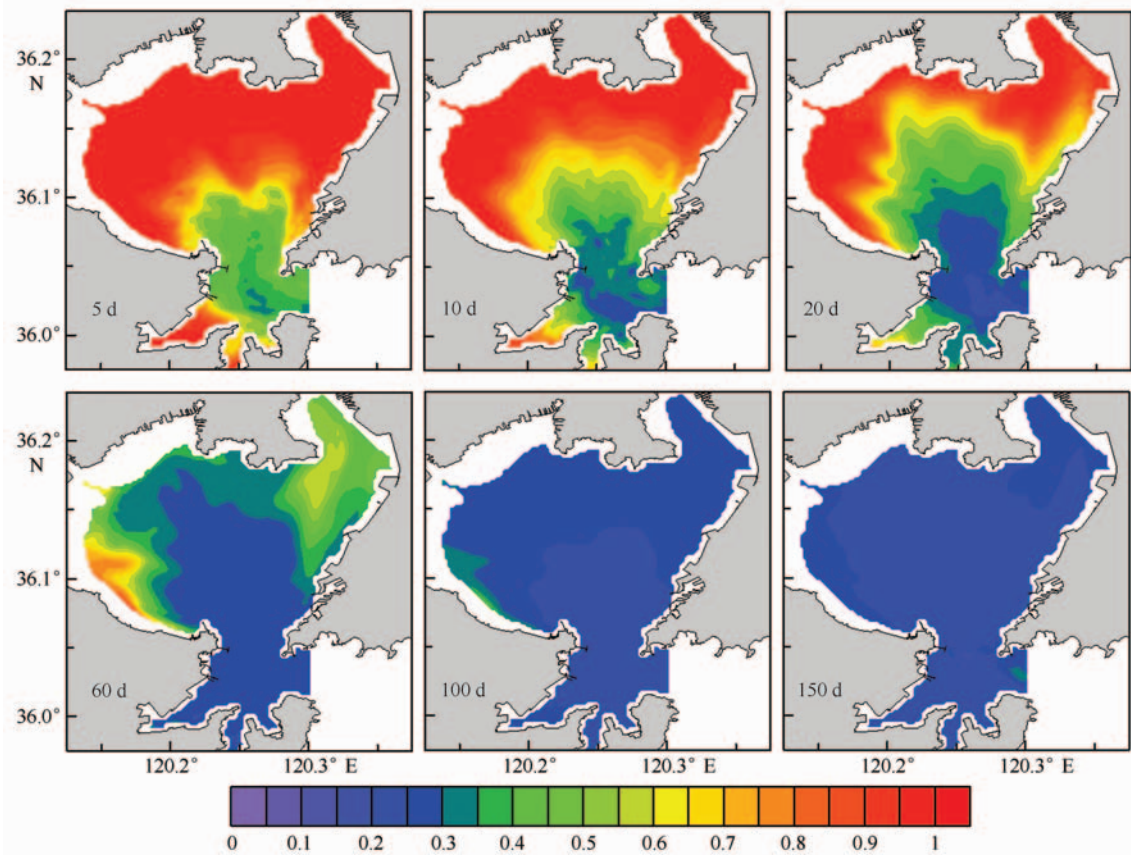


图9 示踪物浓度水平分布的时间演变

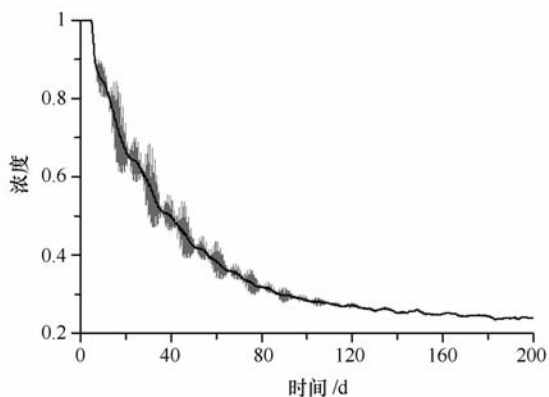


图10 胶州湾示踪物平均浓度时间演变曲线
黑线为五点平滑

拉格朗日观点,赵亮等^[11]追踪胶州湾内不同初始位置的质点出湾所用的时间,得出水体更新时间平均为80 d,空间分布从7 d到几个月不等。质点追踪模型忽略了扩散过程,这可能会低估水交换能力,尤其是在近岸弱流区,扩散过程有可能在水交换中起重要作用。本文采用的水质模型与Liu等^[12]类似,因而二者工作存在较多可比性。本文给出的水体存

留时间空间分布(见图7)总体上支持他们的结论,但Liu等^[12]结果中不存在红岛附近的高值区(文献[12]之图6b),这一点与本文差别较大,并可能导致了两份工作在平均存留时间上的较大差异:他们给出的结论为56 d,本文为71 d。根本原因可能在于两份研究采用的水动力模型的差别:本文数值模式的水平分辨率比文献[12]高出1倍,地形及岸线资料更新,得到的潮(余)流场与之有一定差别。如,Liu等^[12]得到的最大余流为13 cm/s,比本文小很多。由于得到了较多实测潮流数据的验证,我们相信本文水质模型所倚赖的潮流动力场是较为可靠的。

5 结语

在胶州湾及临近海域三维潮汐潮流模式基础上建立了与之耦合的水质模型,模拟了胶州湾的水体交换过程;并结合走航ADCP实际测流资料,给出了胶州湾口潮流和余流特征。主要结论如下:

(1)潮流数值模式再现了观测期间胶州湾口的潮流场和欧拉余流场,给出了湾口余流的水平和剖

面结构,模拟与实测结果吻合较好。胶州湾口水道上的潮流非常强,大潮期间观测到的最强流速达 201 cm/s。团岛岬角两侧存在一对方向相反的余流涡旋,在外湾口北进南出,在内湾口西进东出,该涡旋对在团岛附近海域辐合,形成了流速达 57 cm/s 的强余流。

(2)水交换能力自湾口向湾内逐渐减弱。湾内存在两个明显的弱交换区,分别位于湾的西—西南部和东北端。湾口附近水交换能力最强。造成湾内水交换能力空间差异的主要原因在于:一是潮流场的水平分布不均匀,二是与湾口距离的远近不同。

整个胶州湾平均水体存留时间为 71 d,平均半

交换时间为 25 d。两个弱交换区的水体存留时间多超过 80 d,半交换时间多超过 40 d;湾西局部水体存留时间达 120 d。湾口海区的水体存留时间在 50 d 以下,半交换时间小于 1 d。

本研究采用的潮流模式得到了较多观测资料的验证,但水交换过程的模拟尚缺少实测数据的支持。另外,正压潮动力模型不包含风、密度层结等因子,水质模型没考虑外源强迫和悬浮物质沉降的作用,这些都是值得今后改进的方向。

调查资料由国家海洋局第一海洋研究所华锋研究员组织的观测团队提供,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 杨东方,高振会,马媛,等. 胶州湾环境变化对海洋生物资源的影响[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(4):39—42.
- [2] 国家海洋局第一海洋研究所. 胶州湾自然环境[M]. 北京:海洋出版社, 1984:286.
- [3] 孙英兰,孙长青,王学昌,等. 青岛海湾大桥对胶州湾潮汐、潮流及余环流的影响预测: I. 胶州湾及邻近海域的潮流[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1994, 8: 105—119.
- [4] 鲍献文,闫菊,赵亮,等. ECOM 模式在胶州湾潮流计算中的应用[J]. 海洋科学, 1999, 5: 57—60.
- [5] 闫菊,王海,鲍献文. 胶州湾三维潮流及潮汐余环流的数值模拟[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 172—177.
- [6] 孙英兰,张越美. 胶州湾三维变动边界的潮流数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 355—362.
- [7] 吕新刚,乔方利,夏长水. 胶州湾潮汐潮流边界数值模拟[J]. 海洋学报, 2008, 30(4): 21—29.
- [8] 吴永成,王以敏,张以恩,等. 海水交换和混合扩散(胶州湾生态学和生物资源)[M]. 北京:科学出版社, 1992:57—72.
- [9] 国家海洋局,青岛水产局. 胶州湾陆源污染物入海总量控制研究[R]. 青岛:国家海洋局北海监测中心, 1998.
- [10] 孙英兰,陈时俊,俞光耀,等. 海湾物理自净能力分析和水质预测——胶州湾[J]. 山东海洋学院学报, 1988, 18(2): 60—67.
- [11] 赵亮,魏皓,赵建中. 胶州湾水交换的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 33(1): 23—29.
- [12] LIU Zhe, WEI Hao, LIU Guang-shan, et al. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61: 25—35.
- [13] 魏皓,田恬,周锋,等. 渤海水交换的数值研究——水质模型对半交换时间的模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 519—525.
- [14] 陈时俊,孙文心,王化桐. 胶州湾环流和污染扩散的数值模拟: II. 污染浓度的计算[J]. 山东海洋学院学报, 1982, 12(4): 1—12.
- [15] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model [G]//HEAPS N S. Three Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Sciences, Vol. 4. Washington: American Geophysical Union, 1987:1—16.
- [16] LÜ Xin-gang, QIAO Fang-li. Distribution of sunken macroalgae against the background of tidal circulation in the coastal waters of Qingdao, China, in summer 2008[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35, doi:10.1029/2008GL036084.
- [17] 方国洪,郑文振,陈宗镛,等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京:海洋出版社, 1986:474.
- [18] 吕新刚,乔方利,夏长水,等. 长江口外及浙江沿岸夏季上升流的潮生机制[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2007, 37(1): 133—144.
- [19] 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]. Dtsch Hydrogr Z, 1996, 47(4): 287—299.
- [20] TAKEOKA H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3: 331—336.

Numerical study of water exchange in the Jiaozhou Bay and the tidal residual currents near the bay mouth

LÜ Xin-gang^{1,2}, ZHAO Chang^{1,2}, XIA Chang-shui^{1,2}, QIAO Fang-li^{1,2}

(1. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling (MASNUM), State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract: A barotropic tidal model covering Jiaozhou Bay (JZB) and Qingdao coastal waters is developed based on Princeton Ocean Model (POM). This numerical model, combined with the field survey currents data obtained from a vessel-mounted Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), is used to investigate the characteristics of the tidal currents near the mouth of JZB. Furthermore, a water quality sub-model is coupled into the tidal model to simulate the water exchange processes in JZB. The tidal model includes six main tidal constituents (M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , M_4 , and MS_4), and reasonably reproduces tidal current field which is consistent with ADCP observation. The tidal current in the bay mouth channel is very strong. The observed peak current speed during spring tide period was 2.01 m/s. A couple of tidal residual eddies are found at both sides of the headland of Tuandao. The residual eddies converge near Tuandao, forming an offshore jet current of 57 cm/s. The modeled mean water residence time (WRT) in JZB is 71 days, and the mean half-life time (HLT) is 25 days. The horizontal distributions of WRT and HLT are quite uneven in space; they increase from the mouth to the top of JZB. The lowest water exchange rates are found in two regions, the west-southwest part and the northeastmost part of JZB, where the WRT is above 80 days with a maximum of 120 days, and HLT mostly exceeds 40 days. Such spatial distribution differences are controlled by the structure of tidal (residual) currents as well as the distance from the bay mouth.

Key words: Jiaozhou Bay; water exchange; tidal current; numerical modeling; water residence time; vessel-mounted ADCP