

文章编号:1000-5641(2008)04-0114-10

崇启大桥建成后流场变化 及溢油的数值模拟

傅利辉, 朱建荣, 陈昞睿, 王彪, 李路

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 应用三维河口海岸海洋数值模式 ECOM, 加入油膜计算模块, 研究长江河口北支崇启大桥建成后水域流场的变化和主跨航道处溢油事故发生后油膜面积、厚度的变化和漂移轨迹。结果表明, 大桥建成后对流场的影响主要在桥洞和桥墩处, 其余地方随离桥距离的增加而减小。在主跨处, 流速最大增大了约 48 cm/s, 桥墩处流速减小, 而局部地形的改变也减小了南岸上游点的流速, 并改变了靠近南岸点的流向。在东南风 4 m/s 情况下, 大潮落潮时油膜随落潮流向北支口下游漂移, 面积扩大, 厚度减小, 至第 6 h 油膜已扩散至北支口门; 涨潮时油膜随涨潮流沿北支北侧向上游漂移, 至第 6 h 到达新春沙中段。此外, 风向的变化对油膜漂移轨迹和污染程度影响十分明显。

关键词: 崇启大桥; 数值模拟; 流场变化; 油膜漂移扩散

中图分类号: P731 **文献标识码:** A

Numerical simulation of current change and diffusion of oil film after the Chongqi bridge construction

FU Li-hui, ZHU Jian-rong, CHEN Bing-rui, WANG Biao, LI Lu

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Using the 3-D estuarine coastal and ocean numerical model ECOM in the north branch of Changjiang estuary, combined with oil film drift and diffusion module, the current change due to Chongqi bridge project, and the area, thickness, trace of oil film were studied after the oil spill accident happened at the sea-route in waterway. The results of model calculation showed that the main influence on current concentrated on bridge hollow and piers after bridge construction. The current was less influenced as the distance from the bridge increases. The current speed increased about 48 cm/s on the waterway and reduces on the piers. In the case of southeast wind with 4 m/s, with ebb tidal current the oil film drifted to downriver area of north branch during spring tide. To the 6th hour oil film diffused to the mouth of north branch. During flood tide, to the 6th hour oil film reached to the middle of Xinchunsha. Moreover, the change of

收稿日期:2007-11

基金项目:国家自然科学基金创新团队(40721004)

第一作者:傅利辉,男,硕士研究生,研究方向为河口海岸动力学. E-mail: larryflh@yahoo.com.cn.

通讯作者:朱建荣,男,教授,研究方向为河口海岸动力学. E-mail: jrzhou@sklec.ecnu.edu.cn.

wind speed and direction has a significantly influence on the oil film trajectory and pollution extent in the port.

Key words: Chongqi bridge; numerical simulation; current change; drift and diffusion of oil film

0 引 言

为满足长三角地区社会和经济快速发展的需要,在长江河口建造连接上海和长兴岛的隧道、长兴岛至崇明岛和崇明岛至苏北启东的大桥.崇明岛至启东的大桥——崇启大桥——位于长江河口北支北湖的东侧,北边位于启东港和三条港之间(见图1),是沪苏通道沟通上海市崇明县与江苏启东市的重要通道.大桥建成后,因桥墩的存在,对工程水域流场和运输安全可能会带来不利的影响;其次工程区域若发生原油泄露事故,将对周围水域生态环境产生严重的后果,特别是下游崇明东滩的国家中华鲟自然保护区,将受到非常大的危害.因此,本文从环评的角度,模拟大桥建成后水域流场的变化,考虑如果在航道处发生溢油事故,油膜漂移扩散过程.本文工作既可为工程的建设提供理论依据,又可为溢油事故的处理提供油膜面积、油膜厚度变化等基础资料,具有实际意义.

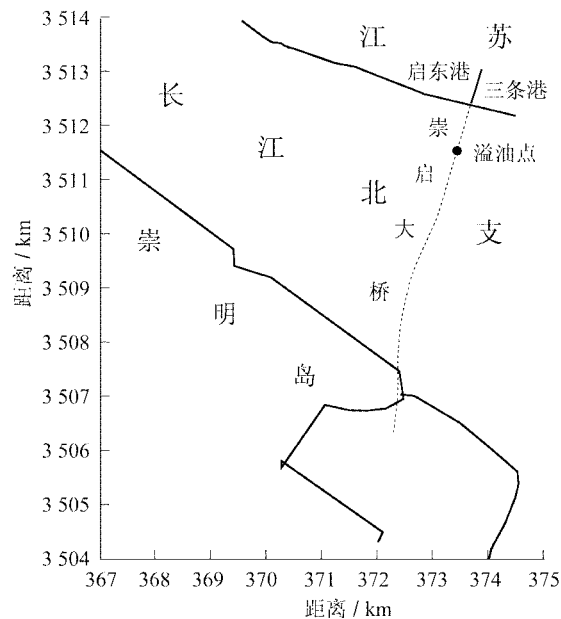


图1 崇启大桥位置和桥墩的配置

Fig. 1 Position of Chongqi bridge and piers

目前预测溢油事故发生后油膜扩散变化的主要方法是数值模拟,一般以垂向平均的二维数值模式为主^[1-5].但是,二维数值模式不能真实反映风生流产生的垂向上的显著变化,从而会影响油膜扩散模拟的精度.近年来,三维模式也逐渐开始运用于油膜扩散的计算中^[6-9],三维模式能提供较为真实的风生流垂向变化,能更为准确地模拟表层流场对溢油漂移扩散的作用.

1 模式设置

本文基于三维 ECOM 模式,先建立一个包括整个长江河口及邻近海区的大区域数值模式,再建立一个包括整个北支的更高分辨率的小区域数值模式(见图 2),考虑潮流和长江径流的作用.小区域模式最高网格分辨率为 20 m,垂向均匀分为 6 层,网格拟合岸线且具有良好的正交性和光滑性.大区域模式计算结果为小区域模式提供合理的水位开边界条件,精度为半小时,径流边界采用大通径流量驱动,取为 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$.大区域模式的时间步长设置为 20 s,小区域模式为 2 s.

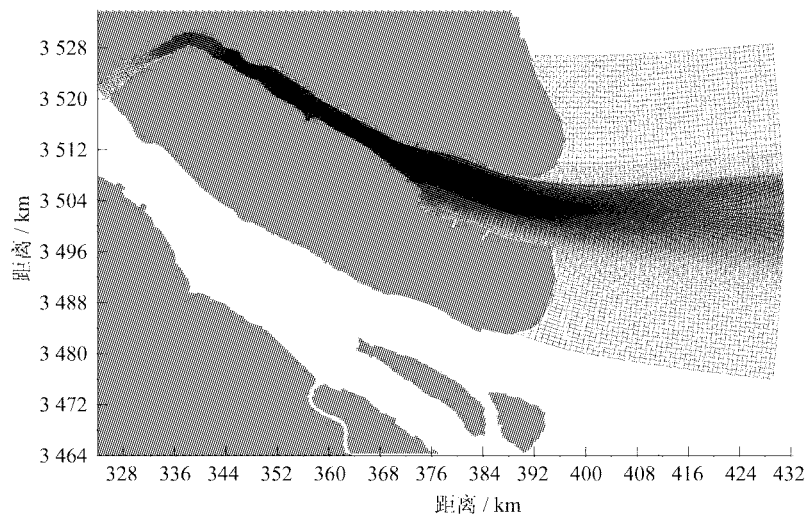


图 2 小区域模式计算网格

Fig. 2 Model calculation domain and grids of small areas

崇启大桥主桥墩位于北侧的深槽处(见图 1),主跨 4 个宽 185 m,副孔宽 100 m,主墩为两墩,引桥墩跨间距为 75 m,紧靠南岸北湖处有一墩跨间距为 160 m 的大桥墩,副孔宽 90 m.由于桥墩的物理尺寸很小,在考虑整个北支的情况下,若采用能分辨出桥墩的网格,计算量将大大超过可接受范围.由于流体流动的连续性,桥墩处流速的减小,桥洞处流速将增大.在桥墩的上下游,因桥墩的阻挡作用,会导致流速减小,因此,本文对桥墩做了概化处理.桥墩处允许水体流过,但在桥墩处将底摩擦系数增大 100 倍,以降低桥墩处的流速.这样对桥墩的概化处理在物理概念上是可以接受的,也是以往对桥墩处理中常用的方法^[11,12].

动力因子考虑了径流、潮流、风应力和斜压梯度力.大区域模式外海开边界潮位由 8 个主要分潮给出^[10],地形资料由数字化长江河口最新的高分辨率地形图和合作单位给出.初始条件流场和水位均取为零,盐度场由大区域模式计算的结果给出.溢油事故假设溢油 100 t,油种为重质原油,密度为 950 kg/m^3 ,低于海水密度,故模拟中不考虑原油的沉降.在东南风、西北风的作用下,分别计算分析落潮和涨潮期间油膜的漂移轨迹、油膜面积、厚度变化及影响范围.溢油的漂移轨迹采用质点跟踪方法计算,溢油质点的移动由水流、风应力和随机扩散决定,本文模拟溢油扩散时间尺度较短,未考虑挥发、乳化、光化学氧化分解、沉积和生物降解等长时间尺度的化学过程.每个质点的下一时刻位置按以下公式计算:

$$X = X_0 + (U + \alpha W_{10} \cos A + r \cos B) \Delta t,$$

$$Y = Y_0(V + \alpha W_{10} \sin A + r \sin B)\Delta t.$$

式中 X_0 、 Y_0 为某质点的初始坐标; U 、 V 分别为 X 、 Y 方向的流速分量; W_{10} 为海面上的风速; A 为风向; α 为修正系数; r 为随机扩散项, $r = RE$, R 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, E 为扩散系数; B 为随机扩散方向, $B = 2\pi R$. 只要质点数足够多, 油膜漂移的模拟就越精确, 因此本文设置了一百万个油膜质点. 每个质点代表一个恒定的体积大小, 每步根据网格的水平面积大小和所含质点数, 可以求出油膜在该网格的厚度值: 厚度 = 质点数 \times 单个质点代表的体积 / 网格的水平面积.

2 模式验证

2003年2月华东师范大学河口海岸学国家重点实验室在长江河口作过一次大规模的现场观测, 在北支有3个测站(见图3). 1号和2号测站观测时间为小潮期间, 3号测站观测时间为大潮期间. 观测资料和模式计算结果均表明, 在北支测站流场为往复流, 落潮历时较涨潮历时长约3h. 小潮期间, 落潮流大于涨潮流; 大潮期间, 涨潮流速大于落潮流速. 因北支地形复杂多变, 及时正确获得地形资料对模拟流场的精度有较大的难度, 这是模拟结果存在误差的主要原因, 如大潮期间的测站3误差相对较大. 总的来说, 模式计算的表、底层流速和流向与观测值基本吻合(见图4), 表明上面建立的三维数值模式能较好地模拟长江河口北支的水动力过程.

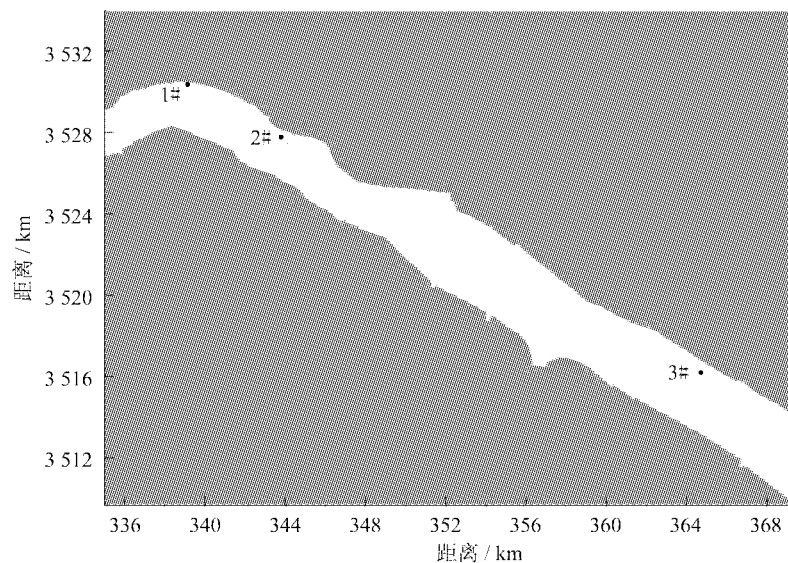


图3 2003年2月北支测站站位

Fig. 3 Observation stations at North Branch in Feb. 2003

3 工程前后流场的变化

北支的流场基本上受潮流和地形的控制. 潮流性质为往复流, 存在日不等现象, 以半月为周期的大小潮变化明显. 工程区域工程前大潮涨急和落急时表层流场见图5(a), (b), 落急时水流沿北支走向流向东南, 除在北湖东侧因受之阻挡流速很小外, 其余地方流速在100

~120 cm/s; 涨急时水流沿北支走向流向西北, 除在北湖东侧流速约在 50 cm/s 相对较小外, 其余地方流速约在 150~200 cm/s, 涨潮流速明显大于落潮流速. 小潮期间, 流向和大潮时一致, 流速明显减小, 落急和涨急时流速比较接近, 约为 80 cm/s(图略). 工程后大潮期间涨急和落急时的流场见图 5(c), (d), 崇启大桥建成之后, 由于桥墩的阻力作用, 在大桥桥墩及其附近的流场与工程前相比有所减小.

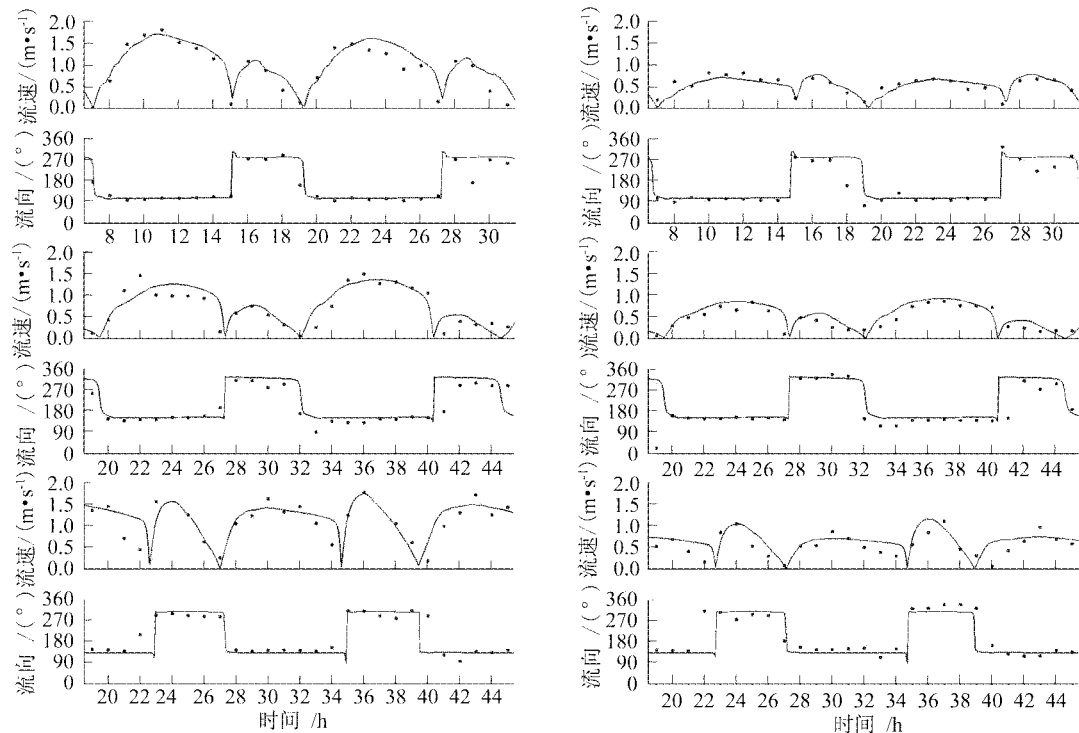


图 4 各测站表、底层流速和流向计算值(实线)和观测值(黑点)比较

Fig. 4 Comparison of surface and bottom current speed and direction between the model calculated ones (solid line) and observed ones (point) in stations 1(top group), 2(middle group) and 3(bottom group)

注: 图上、中、下分别表示 1#, 2#, 3# 测站, 左、右表示表、底层流速流向

为了能清楚地了解工程后工程区域附近流场的变化, 模式设置了 20 个点(见图 6), 输出工程前后各点大潮期间表层落潮和涨潮流速和流向最大变化(见表 1). 1、2 号点位于主跨的上游, 涨潮时流速增加, 分别为 12 cm/s 和 56 cm/s, 流向变化很小, 分别为 -1° 和 -3° ; 落潮时 1 号点流速减小了 17 cm/s, 2 号点流速减小了 12 cm/s, 流向基本不变. 3 号点位于主跨的桥洞中, 因桥墩处流速的减小和流体在不同的横断面处体积必须连续(质量守恒), 导致桥洞处涨潮和落潮期间流速增大, 分别为 48 cm/s 和 40 cm/s, 增大幅度约达 1/3, 比较明显; 流向变化较小, 分别为 2° 和 -2° . 4 和 5 号点位于桥的下游, 与上游 1 和 2 号点涨潮落潮时流速变化正好相反, 涨潮时流速减小, 分别为 -10 cm/s 和 -18 cm/s, 落潮时流速增大, 分别为 48 cm/s 和 8 cm/s, 而流向的变化则很小. 其余 6-20 输出点流速和流向变化详见表 1. 总的来说, 大桥建成后对流场的影响则主要在桥洞和桥墩处, 其余地方随离桥距离的增加而减小. 因此, 大桥的建设除了在桥孔和桥墩处较小范围内对流场的影响较明显外, 其它地

方影响并不明显.

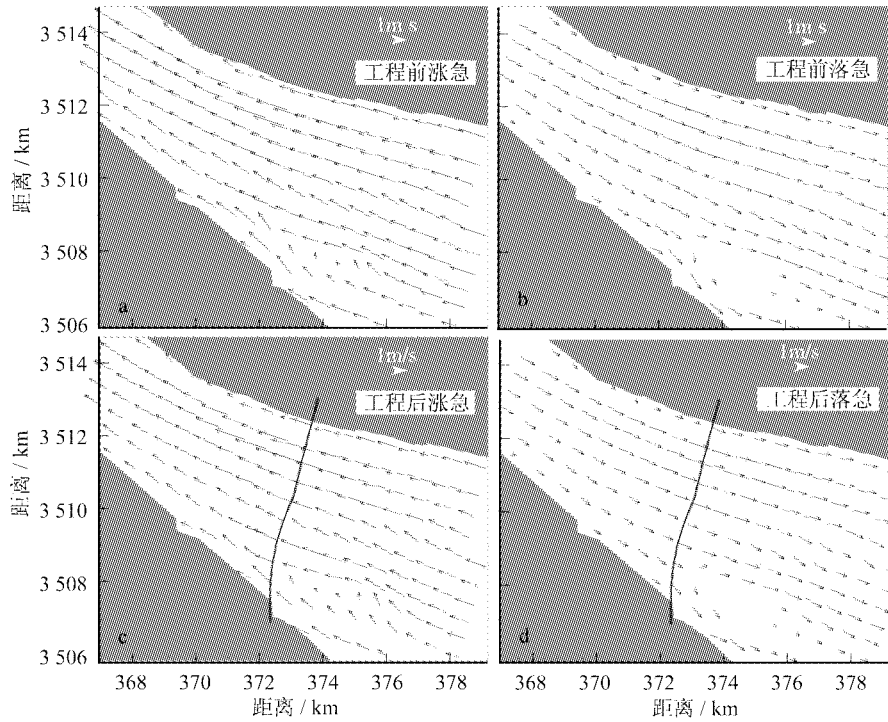


图 5 工程区域大潮涨、落急时刻表层流场

Fig. 5 Surface current at fastest flood and fastest ebb of spring tide in project area

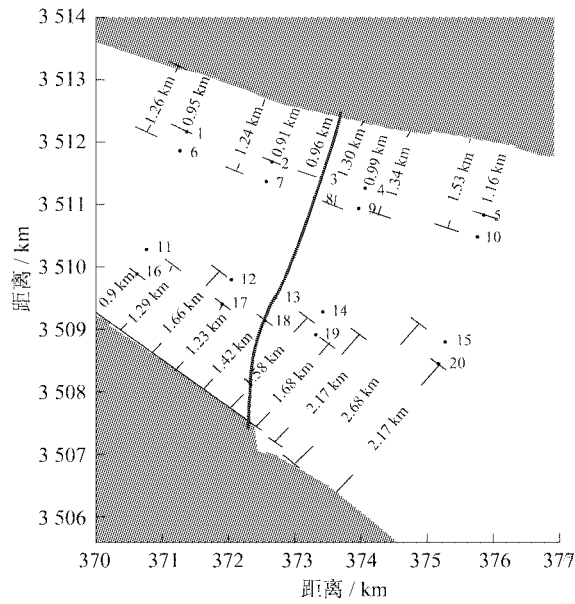


图 6 模式输出点 1-20 的位置(图中数据为离岸距离)

Fig. 6 Stations of model output, data in picture is the distance to shore

表1 工程前后各输出点大潮期间表层落潮和涨潮流速和流向最大变化(工程后-工程前)

Tab. 1 The maximum change of surface current and direction at flood and ebb tide during spring tide in each station (after project minus before project)

站号,位置	涨 潮		落 潮	
	流速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	流向/($^{\circ}$)	流速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	流向/($^{\circ}$)
1,桥上游	12	-1	-16	-2
2,桥上游	56	-3	-5	-1
3,桥洞	48	2	44	-2
4,桥下游	-8	0	51	0
5,桥下游	-20	0	4	1
6,桥上游	-7	-1	-7	-2
7,桥上游	-8	-3	-10	-4
8,桥墩	-18	0	-15	-1
9,桥下游	-7	2	-6	0
10,桥下游	-4	0	-3	2
11,桥上游	-24	-5	-13	-3
12,桥上游	-38	-10	-15	-15
13,桥墩	-30	-22	-16	-43
14,桥下游	-18	0	-9	-6
15,桥下游	-10	5	-10	-10
16,桥上游	-22	-1	-18	-1
17,桥上游	-25	2	-11	-10
18,桥墩	-23	-4	-12	-1
19,桥下游	-18	-10	-3	-1
20,桥下游	-12	-5	-5	0

4 油膜漂移扩散的模拟计算和分析

风场考虑东南风和西北风两种情况,风速均为 4 m/s. 两种风场情况下,考虑风生流、潮流和随机扩散作用,分别模拟溢油事故发生在涨憩和落憩这两个时刻时,油膜在大潮期间的漂移扩散. 假设溢油发生点在大桥的主跨通航处,溢油量为 100 t,位置见图 1.

4.1 东南风 4 m/s 情形

落潮时情形 涨憩时刻主跨溢油 100 t 情况下,油膜随落潮流向北支口下游漂移,面积扩大,厚度减小,至第 6 h 后随落潮流速减小,漂移减慢,至第 8 h 又随涨潮流向上游漂移(图略). 5 μm , 1 μm , 0.2 μm 和 0.05 μm 厚度油膜的面积随时间的变化见表 2,油膜最大厚度从落潮开始第 1 h 的 93.88 μm 变化到第 8 h 的 31.95 μm (见表 3). 0.5 μm 厚度油膜漂移的轨迹见图 7,油膜随落潮流沿北支北侧向下游漂移,至第 6 h 到达北支口门内侧,由于东南风的阻挡作用,油膜尚未触及崇明东滩的中华鲟自然保护区.

涨潮时情形 落憩时刻主跨溢油 100 t 情况下,油膜随涨潮流向北支上游漂移,面积扩大,厚度减小,至第 5 h 到达新春沙下端,第 6 h 之后因水流转向而向下游漂移(图略). 5 μm , 1 μm , 0.2 μm 和 0.05 μm 厚度油膜的面积随时间的变化见表 2,油膜最大厚度从涨潮开始第 1 h 的 160.46 μm 变化到第 8 h 的 15.87 μm (见表 3). 至第 6 h 的 0.5 μm 厚度油膜已扩散到新春沙中段(见图 7 右).

表 2 东南风和西北风为 4 m/s 情况下航道溢油油膜漂移的面积随时间变化表

Tab.2 Temporal area variation of oil film in the case of southeast and northwest wind with 4 m/s speed and oil spill happened in the sea-route km²

时间/h	油膜厚度(东南风 4 m/s)/ μm				油膜厚度(西北风 4 m/s)/ μm				
	5	1	0.2	0.05	5	1	0.2	0.05	
涨	1	3.24	5.41	7.64	10.05	3.47	6.47	9.56	12.32
	2	5.34	10.40	14.27	17.76	5.90	10.66	15.43	19.80
	3	6.73	15.30	22.93	28.42	8.01	16.53	22.91	28.05
	4	6.63	19.46	29.36	36.30	7.81	20.00	29.32	35.52
潮	5	6.28	24.65	33.64	40.17	6.97	21.46	33.24	40.93
	6	5.75	25.74	38.47	44.28	7.13	23.38	36.09	44.58
	7	5.42	26.16	40.97	49.64	6.03	25.91	39.95	48.30
	8	5.05	24.37	42.83	53.33	5.66	26.02	41.82	53.53
落	1	3.64	6.23	8.47	10.65	3.27	5.73	8.5	11.37
	2	4.65	8.89	14.55	19.33	6.32	11.28	16.71	21.26
	3	7.37	14.85	22.63	29.15	6.25	16.44	24.85	31.75
	4	7.28	20.31	29.75	36.78	5.80	18.25	29.35	39.99
潮	5	6.53	22.44	34.47	44.31	5.98	19.23	35.09	51.79
	6	6.22	23.33	40.19	54.26	5.28	26.23	49.15	73.84
	7	6.76	22.50	37.59	56.14	5.16	28.21	47.46	72.02
	8	7.16	24.21	39.35	58.50	3.94	30.13	52.97	80.06

表 3 两种风况下油膜最大厚度随时间变化表

Tab.3 Temporal variation of the maximum oil film thickness in two different wind situations μm

时间/h	试验		时间/h	试验			
	东南风 4 m/s	西北风 4 m/s		东南风 4 m/s	西北风 4 m/s		
涨	1	160.46	94.817	落	1	93.88	101.465
	2	57.98	46.913		2	69.14	57.827
	3	34.50	22.405		3	63.24	37.050
	4	25.41	29.975		4	76.71	29.091
潮	5	27.79	46.891	潮	5	77.01	30.114
	6	26.26	20.405		6	77.04	15.324
	7	20.26	16.845		7	77.04	9.150
	8	15.87	39.418		8	31.95	12.710

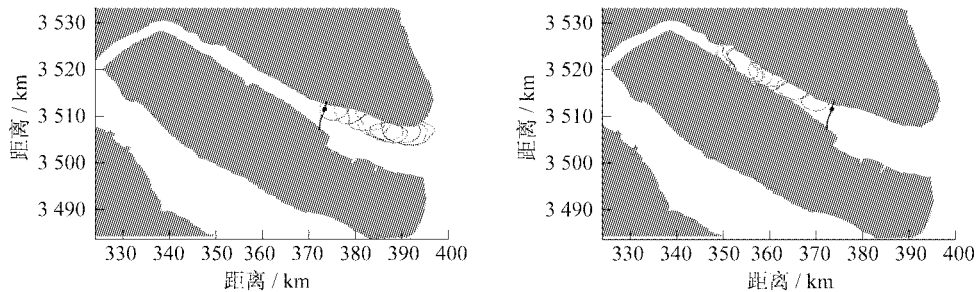


图 7 在东南风情况下 8 h 内 0.5 μm 厚度油膜扩散的轨迹

Fig.7 The drift trace of 0.5 micron thickness oil film within 8 hours in the case of southeast wind

注:左 溢油事故发生在涨潮时刻;右 溢油事故发生在落潮时刻

4.2 西北风(4m/s)下的情形

落潮时情形 涨憩时刻主跨溢油 100 t 情况下,与东南风情况相比,在西北风的推动作用下游油膜向下游漂移的速度加快,距离增大,扩散范围亦较东南风大,第 5 h 油膜已扩散到北支口门,至第 6 h 后随落潮流速减小,漂移减慢,第 8 h 后在涨潮流和风生流的反向作用下,部分油膜开始往崇明东滩方向扩散(图略). $5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$ 厚度油膜的面积随时间的变化见表 2,油膜最大厚度从落潮开始第 1 h 的 $101.465 \mu\text{m}$ 变化到第 8 h 的 $12.71 \mu\text{m}$ (见表 3). 油膜漂移的轨迹见图 8,油膜随落潮流沿北支北侧向下游漂移,至第 5 h 的 $0.5 \mu\text{m}$ 厚度的油膜到达北支口门.

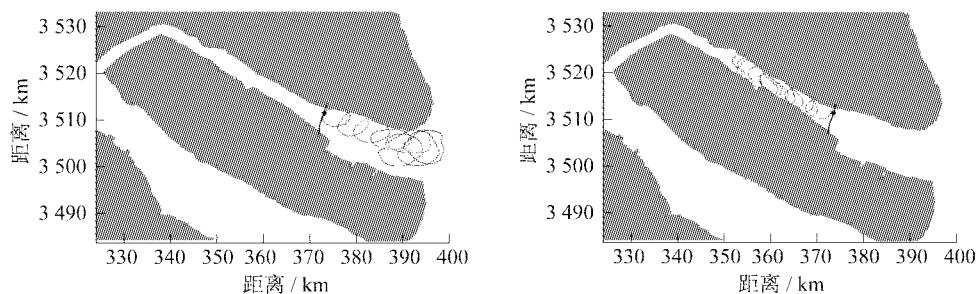


图 8 在西北风情况下 8 h 内 $0.5 \mu\text{m}$ 厚度油膜扩散的轨迹

Fig. 8 The drift trace of $0.5 \mu\text{m}$ thickness oil film within 8 hours in the case of northwest wind

注:左 溢油事故发生在涨憩时刻;右 溢油事故发生在落憩时刻

涨潮时情形 落憩时刻主跨溢油 100 t 情况下,与东南风情况相比,由于西北风的顶托作用,油膜随涨潮流向北支上游漂移的距离减小,至 6 h 油膜才扩散至新春沙下端(图略). $5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$ 厚度油膜的面积随时间的变化见表 2,油膜最大厚度从涨潮开始第 1 h 的 $94.817 \mu\text{m}$ 变化到第 8 h 的 $39.418 \mu\text{m}$ (见表 3). $0.5 \mu\text{m}$ 厚度油膜漂移的轨迹见图 8 右,油膜随涨潮流沿北支向上游漂移,至第 6 h 到达新春沙下端.

与东南风 4 m/s 时计算结果比较,西北风 4 m/s 情况下溢油较明显向北支下游移动,原因是北支溢油的输运扩散,主要决定于潮流、径流和风应力.

5 结 论

基于三维河口海岸海洋模式 ECOM,利用北支实测资料对模式验证,结果良好. 模式计算了崇启大桥工程前后流场的变化,并输出工程水域一些站位进一步分析工程对流速流向的影响. 在模式中加入油膜漂移扩散模块,采用质点跟踪法,模拟计算了溢油事故发生后油膜面积、厚度的变化和漂移轨迹. 研究表明:

崇启大桥建成后对流场的影响主要在桥洞和桥墩处,其余地方随离桥距离的增加而减小. 在主跨处,流速最大增大了约 48 cm/s ,约 $1/3$ 的增大幅度. 桥墩处流速减小,流向均朝指向桥洞处的方向改变,而对局部地形的改变也减小了南岸上游点的流速,并改变了靠近南岸点的流向. 另外,北湖东侧水流因受之阻挡而变得很小. 总的来说,大桥的建设除了在桥孔和桥墩处较小范围内对流场的影响较明显外,其他的地方影响并不明显.

在东南风 4 m/s 情况下,落潮时由于风生流和潮流方向相反,油膜向下游扩散相对较

慢,至第6 h到达北支口门内侧,油膜暂未触及崇明东滩的中华鲟自然保护区.涨潮时风生流和涨潮流方向相同,风应力加速推动了油膜往北支上游漂移,至第6 h后 $0.5\ \mu\text{m}$ 厚度油膜已扩散到新春沙中段.

在西北风 $4\ \text{m/s}$ 情况下,落潮期间与东南风时相比,落潮流与风生流大致同方向,西北风加快了油膜向下游漂移,扩散范围也较东南风大,至第6 h后随落潮流速减小,漂移减慢,部分油膜开始往崇明东滩方向扩散.涨潮期间与东南风时相比,因涨潮流与风生流相反,西北风显著阻碍了油膜向北支上游漂移,至第6 h油膜滞留在新春沙下端.

若溢油事故发生后,结合涨潮、落潮和风向,本文计算的油膜漂移和厚度变化的结论,可为环保部门事故的处理提供依据.

[参 考 文 献]

- [1] 娄安刚,王学昌,孙长青,等.胶州湾海面溢油轨迹的数值模拟[J].黄渤海海洋,2001,19(1):1-8.
- [2] 张和庆,李福娇.近海海面油类漂流扩散的研究和预测实践[J].热带气象学报,2001,17(1):83-89.
- [3] 孙长青,赵可胜,郭耀同.渤海湾海面溢油数值计算[J].海洋科学,2003,23(11):63-67.
- [4] PERIANEZ R, PASCUAL-GRANGED A. Modelling surface radioactive, chemical and oil spills in the Strait of Gibraltar[J]. Computers & Geosciences, 2007(34):163-180.
- [5] VIOLEAU D, BUVAT C, ABED-MERAIM K, et al. Numerical modelling of boom and oil spill with SPH[J]. Coastal Engineering, 2007(54): 895-913.
- [6] WANG S D, SHEN Y M, GUO Y K, et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas[J]. Ocean Engineering, 2007,35(5-6):503-510.
- [7] 刘彦呈,殷佩海,林建国,等.基于GIS的海上溢油扩散和漂移的预测研究[J].大连海事大学学报,2002,28(3):463-465.
- [8] 熊德琪,杜川,赵德祥,等.大连海域溢油应急预报信息系统及其应用[J].交通环保,2002,23(3):5-7,24.
- [9] 陈义中,朱建荣,陈昞睿,等.渤海原油码头溢油漂移扩散的数值模拟[J].华东师范大学学报(自然科学版),2006(6):25-33.
- [10] 朱建荣,张衡,吴辉.东海黄海渤海8个主要分潮的数值模拟[J].华东师范大学学报(自然科学版),2005(3):71-77.
- [11] 王鹏,姚琪.挡水物附近污染带的数值模拟研究[J].上海环境科学,2003,22(13):903-906.
- [12] 孙英兰,田晖,郑连远,等.青岛海湾大桥对胶州湾潮汐、潮流及余环流的影响预测Ⅲ:预测方法的探讨[J].青岛海洋大学学报,1994(s1):120-125.