

文章编号: 1000-5641(2012)06-0046-11

鸭绿江公路大桥溢油漂移扩散三维数值模拟

陈士谦, 朱建荣

(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-si, 加入油膜计算模块, 模拟在鸭绿江公路大桥主跨航道处溢油事故(溢油量为 100 t)发生后油膜的漂移扩散。模拟结果显示, 夏季溢油事故发生后油膜分别于 0.9 h、1.5 h 后到达四道沟取水口和丹东造纸厂取水口, 持续影响时间分别为 0.6 h 和 1.7 h; 冬季溢油事故发生后油膜分别于 1.2 h、1.7 h 后到达两地取水口, 持续影响时间分别为 0.6 h 和 2.5 h。冬夏季, 油膜均没有到达燕窝取水口。鸭绿江夏季径流量远比冬季径流量大, 但涨潮期间油膜上溯距离反而更远。数值试验结果表明, 夏季较强的涨潮流是该现象的次要原因, 风是首要原因。鸭绿江大桥上游河道先是西北走向, 导致冬季西北风阻碍油膜向上游漂移, 然后是近南北走向, 导致夏季南风促进油膜向上游漂移。

关键词: 油膜; 漂移扩散; 风; 数值模拟

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2012.06.006

Three-dimensional numerical simulation of the drift and diffusion of oil film at the highway bridge in the Yalu River

CHEN Shi-qian, ZHU Jian-rong

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

Abstract: An improved 3D numerical model ECOM-si, coupled with the drift and diffusion module of oil film, was adopted to simulate the thickness and trace of the oil film after an oil spill accident (100 tons leakage) is occurred at the main pier of the highway bridge in the Yalu River. The model results show that the oil film reaches the water intakes of Sidaogou and Dandong Paper Mill at 0.9 h and 1.5 h after the oil spill, experiencing duration of 0.6 h and 1.7 h in summer, respectively. The oil film reaches the two places at 1.2 h and 1.7 h after the oil spill, experiencing duration of 0.6 h and 2.5 h in winter, respectively. No matter in summer or in winter, the oil film will not reach the water intake of Yanwo. Although the river discharge in summer is much larger than the one in winter, the oil film drifts upstream farther in summer than in winter during flood current. The numerical experiment results show that the stronger flood current in summer is only the second reason for the phenomena, while the wind is its principal reason. The orientation of the river is north-west near upstream the bridge which results in the oil film blocked by the northwest wind in winter, and is almost north-south farer upstream the bridge

收稿日期: 2011-09

第一作者: 陈士谦, 男, 硕士研究生. E-mail: shiqian_chen@foxmail.com.

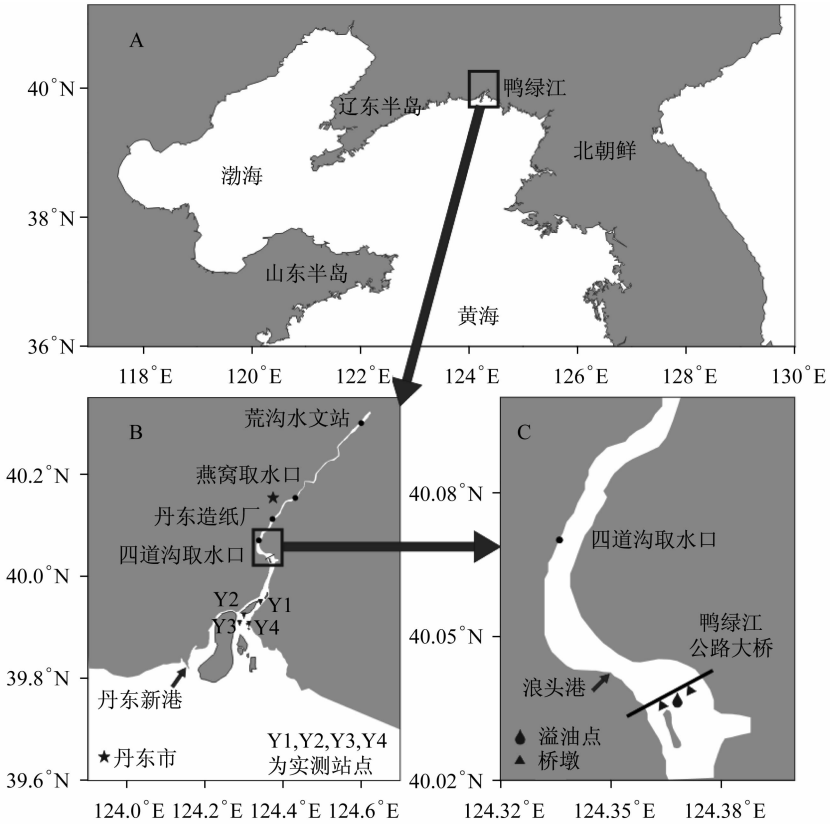
通信作者: 朱建荣, 男, 教授, 博士生导师, 从事河口海洋学研究. E-mail: jrzhou@sklec.ecnu.edu.cn.

which results in the oil film pushed forward by the south wind in summer.

Key words: oil film; drift and diffusion; wind; numerical simulation

0 引 言

为了增进中朝友谊,促进中朝交流,鸭绿江浪头港附近将建造连接中国和朝鲜的公路大桥(见图 1)。鸭绿江公路大桥建成后,因桥墩的存在,将增大船舶航运的危险。若发生原油泄漏事故,会对周围水域生态环境产生严重的后果,特别是会污染上游丹东市取水口(四道沟取水口、丹东造纸厂取水口和燕窝取水口),影响居民生活及工业用水的安全。因此,研究鸭绿江公路大桥在发生溢油事故后油膜漂移扩散,可为溢油事故的处理提供油膜面积、到达取水口时间和油膜厚度变化等数据,对鸭绿江环境的保护和取水的安全具有实际意义。



注:(A)鸭绿江在北黄海的位置;(B)鸭绿江主要取水口水文测站的位置;(C)鸭绿江公路大桥和溢油点位置

图 1 鸭绿江河口示意图

Fig. 1 Sketch map of the Yalu Estuary

目前预测溢油事故发生后油膜漂移扩散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]。二维数值模式不能真实的反映风生流产生的垂向上的显著变化,从而会影响模拟油膜扩散的精度。近年来,三维模式也逐渐开始运用于油膜扩散的计算中^[6-10],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. 本文基于改进的三维数值模式 ECOM-si^[11], 加入油膜计算模块^[12,13], 计算鸭绿江大桥发生溢油事故后油膜的输移.

2 数值模式设置和验证

2.1 模式设置

模式的计算区域包括整个鸭绿江河口, 上边界位于荒沟水文站, 外海开边界西至 123.6°E, 东至 124.6°E, 南到 39.4°N (见图 2). 模式最高网格分辨率为 35 m, 网格拟合岸线且具有良好的正交性和光滑性. 水深通过数字化高分辨率海图及相应海区 1 分精度的水深数据插值获得. 垂向均匀分为 6 层, 时间步长设置为 5 s. 模式采用北京-54 坐标系, 后处理和绘图时转为经纬度坐标系.

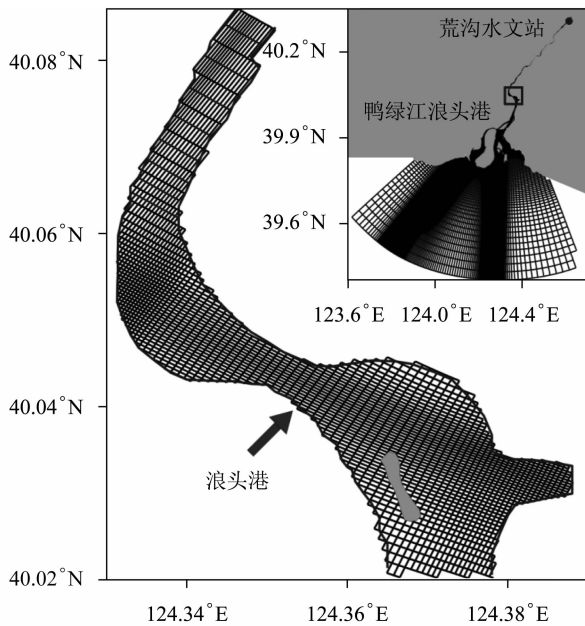


图 2 模式计算区域、网格及浪头港局部网格

Fig. 2 Model calculation domain and grids with detail grid near Langtou Port

考虑潮汐、径流和风应力对油膜漂移扩散的作用. 外海开边界以潮位驱动, 考虑 16 个主要分潮 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 U_2 、 V_2 、 T_2 、 L_2 、 $2N_2$ 、 J_1 、 M_1 和 OO_1 , 由各分潮调和常数合成给出 (调和常数来自全球潮汐模式 NAOTIDE, 资料来源网站为 http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html):

$$\zeta = \sum_1^{16} f_i H_i \cos[\omega_i t + (V_i + u_i) - g_i].$$

其中, ζ 为潮位, f 为节点因子, H_i 为振幅, ω_i 为角频率, g_i 为迟角, $V_i + u_i$ 为订正角 (它可以由具体的年、月、日求得). 本文假设夏季和冬季突发溢油事故后油膜的漂移扩散情况, 因主要取水口均位于大桥的上游 (见图 1), 考虑到对上游取水口的最坏影响, 假定溢油时间均为落憩时刻. 上游开边界条件以荒沟水文站实测多年月平均径流量给出, 分别取 8 月和 2 月为夏季和冬季的代表月份. 鸭绿江 8 月平均径流量为 1 400 m³/s, 2 月平均径流量为 700 m³/

s,夏季径流量明显大于冬季.风场根据多年月平均风资料,夏季为南风 4.6 m/s,冬季为西北风 4.9 m/s.初始条件水位、流速均取为零.鸭绿江口及其上游河段存在较大滩涂(潮间带),模式采用干湿判断法处理潮滩动边界.

模式运行约 7 d,水位和流场稳定后,开始计算溢油.溢油事故假设瞬时溢油 100 t,油种为重质原油,密度为 950 kg/m^3 ,低于海水密度.溢油的漂移轨迹采用质点跟踪的方法计算,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,暂未考虑挥发、乳化、光化学氧化分解、沉积和生物降解等长时间尺度的物理化学过程.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 为油粒质点的初始坐标; U 、 V 分别为 X 、 Y 方向的流速分量; W_{10} 为海面上方 10 m 处的风速; 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.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,求出油膜在该网格的厚度值:

$$\text{厚度} = \text{质点数} \times \text{单个质点代表的体积} / \text{网格的水平面积}.$$

2.2 模式验证

采用 2000 年 5 月 6 日到 5 月 7 日鸭绿江口门外实测站点流速流向资料验证数值模式,测站位置见图 1.从实测资料看,鸭绿江河口落潮历时远长于涨潮历时,涨潮历时短(见图 3),这与以往研究结果一致^[14].从模式验证结果看,总体上模式计算的流速和流向与实测值吻合良好(见图 3).误差主要是由地形、底摩擦、开边界条件误差和模式计算误差等因素造成.验证结果表明本文建立的数值模式能较好地模拟鸭绿江河口的水动力过程.

3 油膜漂移扩散的数值模拟

3.1 夏季

鸭绿江河道内为不规则半日潮,落潮历时远长于涨潮历时,涨潮历时短^[14].假设溢油发生在落憩转涨时刻,2 h 后已基本处于涨憩状态,故考虑溢油后 2 h 涨潮流期间油膜的漂移扩散过程.夏季在潮流、径流 $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ 和南风 4.6 m/s(记为数值试验 A)作用下,油膜向上游漂移扩散,在溢油后 2 h 时刻油膜分布见图 4 左图.此时溢油已经经过四道沟取水口,影响到丹东造纸厂取水口,丹东造纸厂取水口附近油膜厚度超过 $55 \mu\text{m}$.3 个取水口油膜厚度随时间变化(实线)见图 5.在涨潮过程中,油膜在溢油发生后 0.9 h 到达四道沟取水口,之后油膜厚度迅速上升至最大值 $125 \mu\text{m}$,然后迅速降低,影响持续至 1.5 h.丹东造纸厂取水口约在 1.5 h 受到油膜影响,略超过 2 h 时油膜厚度达到最大值 $160 \mu\text{m}$,持续影响至 3.2 h.溢油没有漂移扩散到燕窝取水口.统计夏季 $20 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 厚度油膜的面积、相对于溢油发生点最远和最近距离随时间的变化,见表 1.在 0.5 h 至 2 h 内, $20 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 油膜距离溢油点的最远距离不断增大,其中 2 h 时刻最远距离分别为 8.93 km、10.21 km.

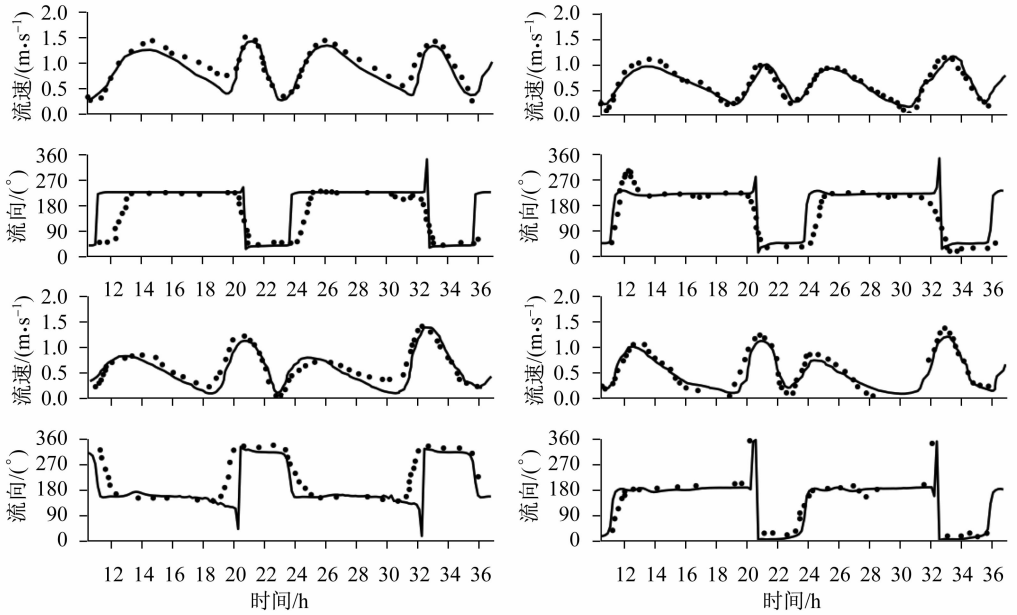
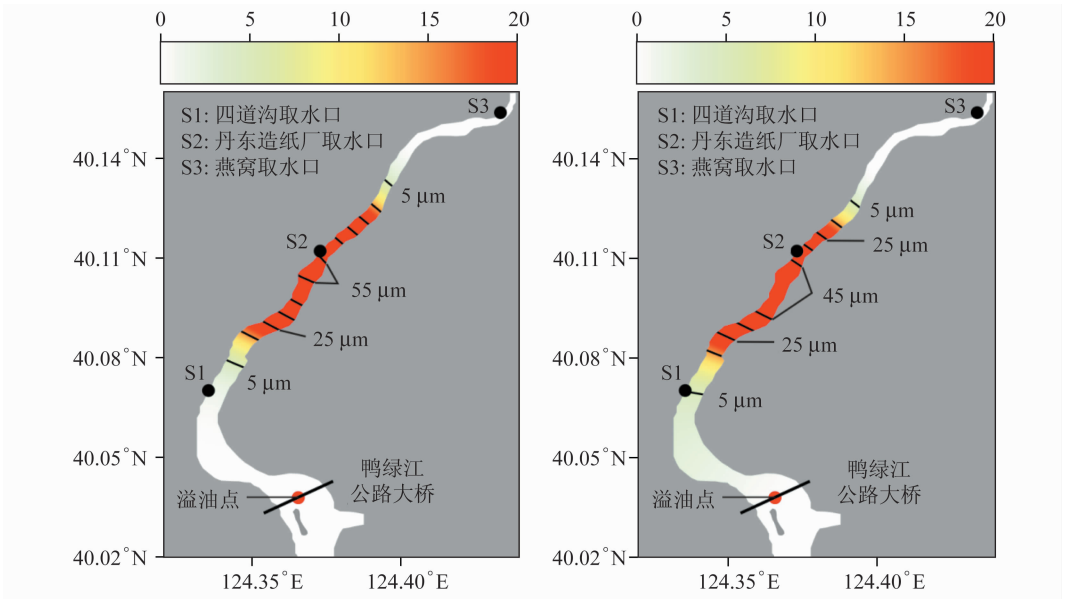


图3 垂向平均流速和流向模式计算值(实线)和观测值(点)的比较测站 Y1(左上), 测站 Y2(右上),测站 Y3(左下)和测站 Y4(右下)

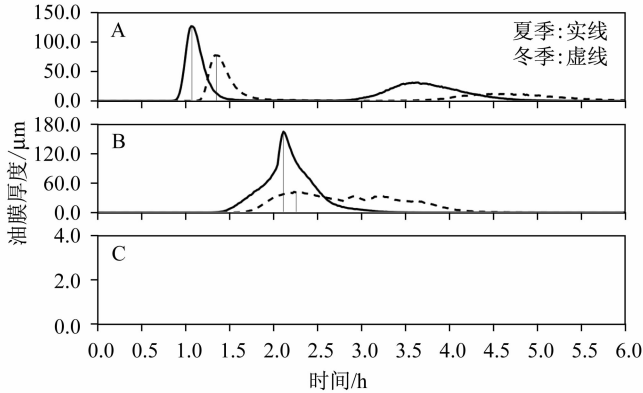
Fig.3 Comparison of the vertically averaged current speed and direction between the model1 calculated ones (solid line) and observed ones (point) in the station Y1(left upper), Y2(right upper), Y3(left lower), and Y4(right lower)



注:左为夏季,右为冬季;黑色线为油膜厚度等值线,等值线量值从5起画,间隔为10,单位为 μm

图4 落憩后2 h油膜厚度分布图

Fig.4 Thickness of oil film contour at 2 hours after ebb slack



注:(A)四道沟取水口;(B)丹东造纸厂取水口;(C)燕窝取水口

图 5 落憩后 6 h 内取水口油膜厚度随时间变化

Fig. 5 Temporal variation of oil film thickness at the water intakes inner 6 hours after ebb slack.

表 1 夏、冬季落憩后 2 h 内油膜面积、漂移最远和最近距离

Tab. 1 The area, the longest and shortest distance of oil film inner 2 hours after ebb slack in the case of summer and winter

时间 /h	20 μm 厚度油膜						1 μm 厚度油膜					
	夏季			冬季			夏季			冬季		
	面积 /km ²	最远距离 /km	最近距离 /km	面积 /km ²	最远距离 /km	最近距离 /km	面积 /km ²	最远距离 /km	最近距离 /km	面积 /km ²	最远距离 /km	最近距离 /km
0.5	0.6	2.06	0.63	0.63	1.03	0.10	1.09	2.3	0.47	1.47	1.23	0.0
1.0	1.13	4.58	2.64	0.99	3.63	1.96	2.23	5.0	2.30	2.05	3.73	0.78
1.5	1.65	7.27	4.67	1.80	5.76	2.15	3.39	8.31	2.88	3.26	6.33	1.95
2.0	1.71	8.93	5.63	1.86	7.86	1.96	3.12	10.21	4.67	4.90	9.19	1.78

3.2 冬季

冬季在潮流、径流 700 m³/s 和西北风 4.9 m/s(记为数值试验 B)作用下,油膜向上游漂移扩散,在溢油后 2 h 时刻油膜分布见图 4 右图。此时溢油已经经过四道沟取水口,影响到丹东造纸厂取水口,丹东造纸厂取水口附近油膜厚度接近 45 μm。3 个取水口油膜厚度过程线(虚线)见图 5。在涨潮过程中,油膜在溢油发生后 1.2 h 到达四道沟取水口,之后油膜厚度迅速上升至最大值 75 μm,然后迅速降低,影响持续至 1.8 h。丹东造纸厂取水口约在 1.7 h 受到油膜影响,2.2 h 时油膜厚度达到最大值 50 μm,持续影响至 4.2 h。溢油没有达到燕窝取水口。统计冬季 20 μm 和 1 μm 厚度油膜的面积、相对于溢油发生点最远和最近距离随时间的变化,见表 1。在 0.5 至 2 h,20 μm、1 μm 油膜距离溢油点的最远距离不断增大,其中 2 h 时刻最远距离分别为 7.86 km、9.19 km。

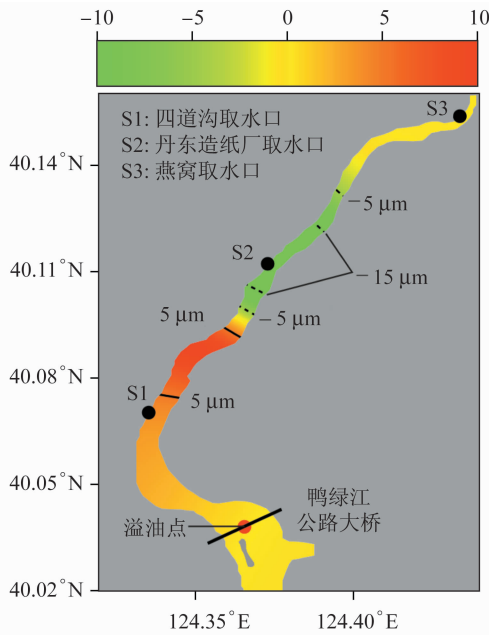
3.3 冬夏季差异

比较夏季和冬季溢油扩散的数值模拟结果,可以看出在涨潮过程中,夏季油膜到达四道沟取水口的时间比冬季早 0.3 h,四道沟取水口最大油膜厚度冬夏季分别为 125 μm 和 75 μm;夏季油膜到达丹东造纸厂取水口的时间比冬季早 0.2 h,丹东造纸厂取水口最大油膜厚度冬夏季分别为 160 μm 和 50 μm(见图 5)。图中油膜厚度在丹东造纸厂取水口达到峰值的

时刻略超过 2 h,这说明 2 h 内是一个持续的涨潮过程.

为了直观的显示冬夏季油膜向上输运的差异,将冬季涨潮 2 h 时刻油膜厚度减去夏季涨潮 2 h 时刻油膜厚度,得到油膜厚度差值图(见图 6).从图中可以看出,丹东造纸厂取水口附近及以上区域油膜厚度变化为负值,绝对值最大超过 15 μm ,说明冬季油膜上溯比夏季更近;四道沟取水口到接近丹东造纸厂取水口的区域油膜变化为正值,说明油膜厚度在该河段冬季比夏季厚,因为冬季向上游漂移扩散距离比夏季短,而冬夏季溢油总量相同,满足质量守恒的原理.

然而夏季径流量(1 400 m^3/s)远大于冬季(700 m^3/s),径流越大对油膜向上输运的阻碍作用越强,理应油膜向上游漂移扩散夏季比冬季近.为什么夏季油膜的上溯距离反而更远?影响油膜漂移扩散的动力因子除径流外,还有潮汐和风应力.下面对油膜漂移扩散的动力机制作进一步的模拟和分析.



注:黑线表示油膜厚度变化的等值线,等值线量值从 -5 起画,间隔为 10,单位为 μm

图 6 落憩 2 h 后冬夏季油膜厚度差值图(数值试验 B - A)

Fig. 6 Difference of oil film thicknesses at 2 hours after ebb slack (numerical experiment B minus A)

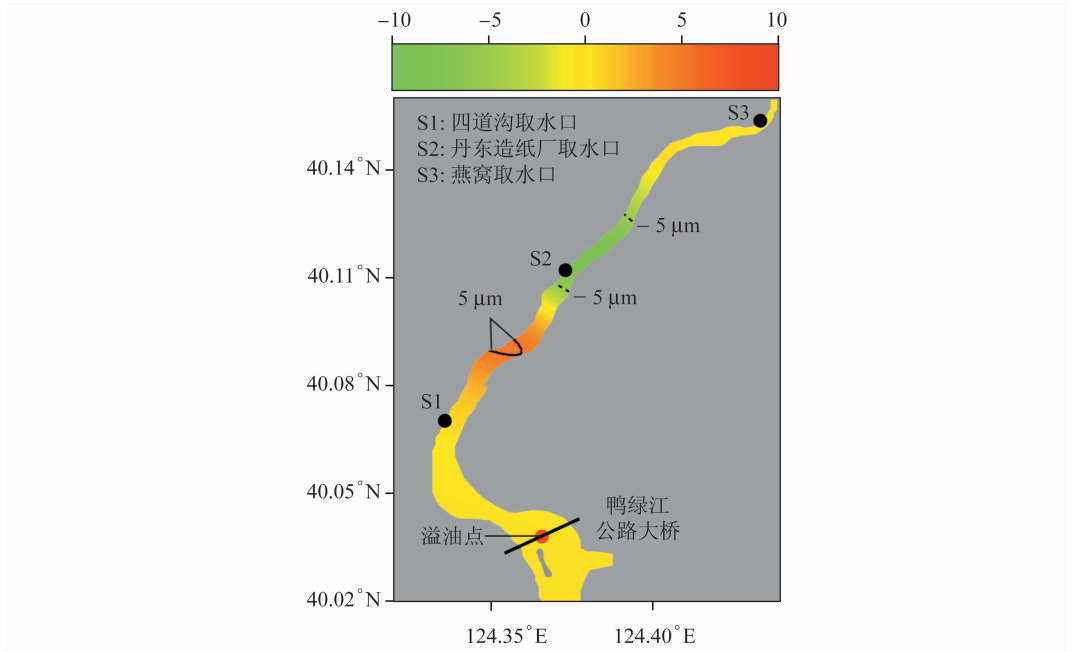
4 机制分析

4.1 潮汐的影响

本节设置一数值试验,模式动力因子为 2 月大潮,径流为 1 400 m^3/s ,南风 4.6 m/s (记为数值试验 A1).试验 A1 与试验 A 区别仅在于潮的不同.将两个数值试验计算的涨潮两小时后的油膜厚度相减(试验 A1 减去试验 A),可以看到四道沟取水口到丹东造纸厂取水口之间油膜差值为正,丹东造纸厂取水口附近及上游油膜差值为负(见图 7).这说明在风、径流相同的条件下,夏季大潮溢油上溯距离比冬季大潮溢油上溯更远.

根据 2007 年潮汐表,丹东新港(位置见图 1)8 月大潮期间 3 日平均潮差为 5.64 m,2 月

大潮期间 3 日平均潮差为 4.95 m(见图 8)。夏季潮差比冬季潮差大,潮汐产生的涨潮流更强,说明 8 月涨潮流对油膜的上溯距离更远。



注:黑线表示油膜厚度变化的等值线,等值线量值从 -5 起画,间隔为 10,单位为 μm

图 7 落憩 2 h 后油膜厚度差值图(数值试验 A1 - A)

Fig. 7 Difference of oil film thickness at 2 hours after ebb slack (numerical experiment A1 minus A)

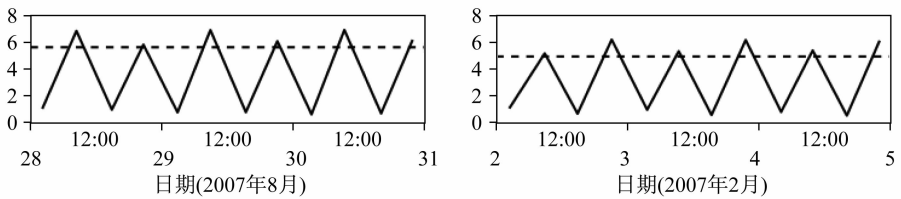


图 8 大潮期间丹东新港潮位及平均潮差(单位:米)

Fig. 8 The tidal level and mean tidal range at Dandong during spring (Unit: m)

4.2 风的影响

本节考虑风速和风向的变化对油膜上溯距离的影响。风对油膜的影响前人已做过室内试验^[15-17],说明风对油膜的漂移起着重要作用。为了突出风的影响并简化讨论,潮汐均取为 8 月大潮,径流量均为 $1\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ 。风取无风、南风 $9.2\ \text{m/s}$ 和西北风 $4.6\ \text{m/s}$,分别命名为数值试验 A0、A2 和 A3,计算结果与 A0 的计算结果比较。

4.1 风速的影响

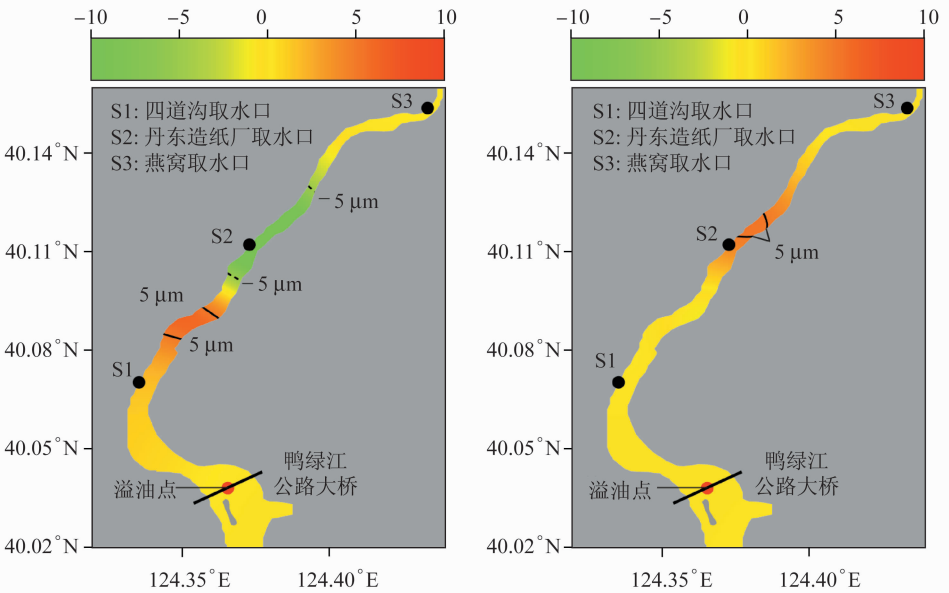
从不同南风风速下的油膜厚度差值图可以看到(见图 9),无风相对于南风 $4.6\ \text{m/s}$ 相同厚度的油膜漂移扩散的距离变近,南风 $9.2\ \text{m/s}$ 相对于南风 $4.6\ \text{m/s}$ 相同厚度的油膜漂移扩散的距离变远。这说明南风风速的加大有利于油膜向上游漂移扩散更远的距离。

本文使用油膜最远距离差来表示不同条件下油膜漂移扩散结果的差别. 表 2 定量说明了不同速度的南风对 20 μm (可代表油膜主体)和 1 μm (可代表油膜边缘)的油膜漂移扩散距离的影响,可以看出南风风速对油膜主体及边缘向上游运移都有促进作用. 由表 2 可知,溢油发生 1 h 后,油膜边缘的最远距离差绝对值迅速增大;溢油发生 1.5 h 后,油膜主体的最远距离差绝对值显著增大. 这是因为溢油发生后,油膜向上游漂移扩散,上游河道变为近南北走向,使得南风对油膜向上游的促进作用加强.

表 2 溢油后 2 h 内 20 μm 和 1 μm 油膜的最远距离差

Tab. 2 The longest distance difference of oil film at 2 hours after oil spill km

时间/h	A0-A		A2-A	
	20 μm 厚度油膜	1 μm 厚度油膜	20 μm 厚度油膜	1 μm 厚度油膜
0.5	-0.05	-0.05	0.07	0.08
1.0	-0.16	-0.19	0.07	0.11
1.5	-0.22	-0.43	0	0.25
2.0	-0.35	-0.67	0.15	0.39



注:黑线表示油膜厚度变化的等值线,等值线量值从-5起画,间隔为10,单位为 μm

图 9 落憩 2 h 油膜厚度差值图(左:数值试验 A0-A;右:A2-A)

Fig. 9 Difference of oil film thicknesses at 2 hours after ebb slack (left: numerical experiment A0-A; right: numerical experiment A2-A)

4.2 风向的影响

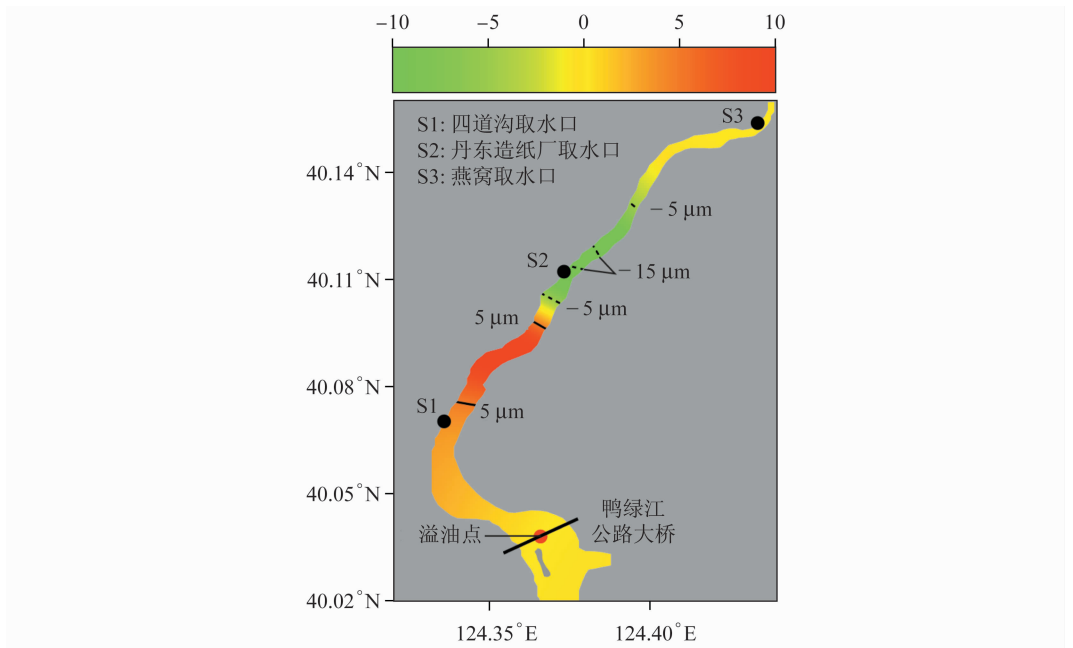
将数值试验 A3 计算结果与试验 A 计算结果作比较,得出 2 h 内油膜上溯的距离试验 A3 要小于试验 A(见图 10). 这表明西北风相比南风,阻碍了油膜的向上输移. 表 3 定量说明了不同风向(西北风和南风)对 20 μm 和 1 μm 的油膜漂移扩散距离的影响. 由表 3 可知,西北风与南风相比,1.5 h 时刻油膜主体的最远距离差绝对值迅速增至 0.94 km. 由表 2 可知,南风和无风相比,1.5 h 时刻油膜主体的最远距离差绝对值仅为 0.22 km. 可以看出,西

北风在溢油前 1.5 h 对油膜向上游的阻碍作用远大于南风对油膜向上游的促进作用. 这是因为溢油漂移扩散初期河段为西北走向, 导致西北风对油膜向上游阻碍作用明显.

表 3 溢油 2 h 内 20 μm 和 1 μm 油膜的最远距离差

Tab. 3 Difference the longest distance of oil film inner 2 hours after oil spill

时间/h	最远距离差(A3-A)/km	
	20 μm 油膜	1 μm 油膜
0.5	-0.23	-0.28
1.0	-0.42	-0.58
1.5	-0.94	-0.86
2.0	-0.71	-1.02



注:黑线表示油膜厚度变化的等值线,等值线量值从-5起画,间隔为10,单位为μm

图 10 落憩后 2 h 油膜厚度差值图(数值试验 A3 - A)

Fig. 10 Difference of oil film thicknesses at 2 hours after ebb slack (numerical experiment A3 minus A)

鸭绿江公路大桥溢油事故发生后,油膜漂移扩散主要由径流、风和潮流共同控制. 风的变化对油膜上溯的作用(见图 9 左图)明显大于冬夏季潮的变化对油膜上溯的作用(见图 7),是造成夏季油膜上溯距离远的主要原因.

5 结 论

基于三维河口海岸海洋模式 ECOM-si,加入油膜运输模块,计算并分析鸭绿江浪头港附近瞬时溢油 100 t 情况下,2 h 内油膜的漂移扩散情况,结论如下.

在涨潮流的作用下,夏季溢油发生后约 0.9 h 油膜到达四道沟取水口,持续时间约为 0.6 h,取水口油膜厚度最大值为 125 μm;丹东造纸厂取水口约在 1.5 h 受到油膜影响,略超过 2 h 时油膜厚度达到最大值为 160 μm,油膜持续影响至 3.2 h. 冬季溢油发生后约 1.2 h

油膜达到四道沟取水口,持续时间约为 0.6 h,取水口油膜厚度最大值为 75 μm ; 丹东造纸厂取水口约在 1.7 h 时受到油膜影响,2.2 h 时取水口油膜厚度达到最大值 50 μm ,油膜持续影响至 4.2 h. 冬夏季燕窝取水口均未受到溢油的影响. 尽管鸭绿江夏季径流量大于冬季,存在着油膜向上游漂移扩散夏季比冬季更快和更远的现象.

夏季潮汐比冬季强是上述现象的次要原因,风是首要原因. 鸭绿江大桥上游河道先是西北走向,然后是近南北走向,南风促进南北走向河道溢油向上游输运,西北风阻碍西北向河道溢油的上游输运. 本文研究结果对发生溢油后的应急处理工作具有指导作用和实践意义.

[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, 2008, 35: 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] 娄厦,刘曙光. 溢油模型理论及研究综述[J]. 环境科学与管理,2008,33(10):33-37.
- [10] 李大鸣,陈海舟,付庆军. 海上溢油数学模型的研究与应用[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008,29(12):1291-1297.
- [11] 朱建荣,朱首贤. ECOM 模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋与湖沼,2003,34(4):245-257.
- [12] 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.
- [13] 傅利辉,朱建荣,陈昞睿,等. 崇启大桥建成后流场变化及溢油的数值模拟. 华东师范大学学报:自然科学版,2008(4):114-123.
- [14] 白凤龙,高建华,汪亚平,等. 鸭绿江口的潮汐特征[J]. 海洋通报,2008,27(3):7-13.
- [15] 季荣,陈国华,胡雅蓓,等. 流—风—波共存下溢油漂移的实验室模拟[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版,1996,26(3):353-360.
- [16] 郭运武,刘栋,钟宝昌,等. 风对河道溢油扩展、漂移影响的实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2008,23(4):446-452.
- [17] 刘栋,林卫青,钟宝昌,等. 感潮河道溢油扩展、漂移特性实验[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2006,21(6):744-751.