DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.015

基于 EFDC 模型的长江下游码头溢油风险预测

黄轶康[1],李一平[1],邱 利[1],薛偲琦[1],章双双[2]

(1.河海大学环境学院,江苏 南京 210098;2.南京信息工程大学滨江学院,江苏 南京 210044)

摘要:为了更有效地预测溢油事故,建立了基于 EFDC(environmental fluid dynamlics code)模型的长江下游南京段码头溢油事故影响的预测模型。研究结果表明:构建的二维水动力模型能够较为准确地反映研究区域风场、流场、复杂地形条件综合影响下长江溢油扩展和迁移运动的整体规律,油膜在研究区域降解较慢,溢油发生在落急时刻和西风风向时,油膜更早向下游扩散,对下游保护区的污染更严重。

关键词:溢油风险;EFDC 模型;码头溢油;风险预测;长江下游;码头;油膜

中图分类号:X507 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2015)01-0091-08

Risk prediction on wharf oil spill in the lower reaches of Yangtze River based on EFDC

HUANG Yikang[1], LI Yiping[1], QIU Li[1], XUE Siqi[1], ZHANG Shuangshuang[2]

(1. *College of Environment, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*

2. *Binjiang College, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *China*)

Abstract: In order to predict more effectively the oil spill accident, a model to predict the influence of wharf oil spill accident of Nanjing section in the lower reaches of Yangtze River was set up based on EFDC (environmental fluid dynamics code). The study results show that the two dimensional hydrodynamic model set up can more accurately reflect the overall rules of the spilled oil spreading and migration in Yangtze River under the comprehensive effects of wind field, flow field, complex terrain conditions of the study area, and the degradation of oil slicks in the study area is slow, and when the oil spill occurred in the ebb time and in the westerly wind, oil slicks diffuse to the downstream more early, resulting in a more serious pollution on the downstream protection zone.

Key words: oil spill risk; EFDC model; wharf oil spill; risk prediction; lower reaches of Yangtze River; wharf; oil slick

进入 21 世纪以来,经济的迅猛发展导致了我国的能源需求越来越大,在加快了石油运输行业蓬勃发展的同时,也带来了海洋和江河溢油事故的风险。长江是我国最重要的水源地,其水质安全关系到千家万户,建立长江溢油应急反应系统非常必要。溢油应急反应系统的关键是对溢油轨迹的准确预测,既缩小环境污染的范围,又能保护海洋和江河的生态环境。多目标评估模型是目前溢油事故风险评价的主要模型,其基本思路是:首先确定溢油风险评价指标,然后通过各种评估模型分析溢油风险。但是这种多目标评估模型比较适合溢油事故发生后的油污影响评价,对溢油事故发生前的预测则起不到借鉴作用。笔者首次尝试以 EFDC(environmental fluid dynamics code)模型预测长江下游码头溢油事故,建立长江下游南京段溢油事故影响的预测模型。基于 EFDC 模型,能高效整合多种边界数据,模拟油膜的迁移轨迹,并最终在地理信息系统的图层里以动画形式实时展示溢油油膜到达下游环境保护区的时间、油膜的迁移时间以及油膜的浓度情况。

1 研究区域概况

长江下游南京段自然条件优越,是长江三角洲

作者简介:黄轶康(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水环境数学模型研究和环境影响评价。E-mail:kolowin@163.com

地区的重要组成部分。本河段水流路径绵延,洲滩众多,除局部河宽较窄外,河段宽度一般在 1 km 以上(图 1)[1]。本河段潮汐为非正规半日浅海潮,每日两次涨潮、两次落潮,且有日潮不等现象。在径流与河床边界条件阻滞下,潮波变形明显,涨落潮历时不对称,自下而上涨潮历时短,落潮历时长,潮差沿程递减,落潮历时沿程递增,涨潮历时沿程递减[1]。

图 1　研究区域

2　研究方法

2.1　预测模型简介

长江下游南京段码头溢油事故影响的预测模型由 EFDC 模型模拟而成。目前 EFDC 是美国环保署 TMDL 模拟工具箱中的重要模拟软件。根据对南京段码头溢油事故水环境预测特点的要求,考虑长江该段的地理气候条件,对比了现行众多的地表水模拟软件[2],笔者选择 EFDC 模型。EFDC 模型优势在于:①EFDC 模型是美国环保署首推的模拟软件,在水动力模拟[3-4]和水质模拟[5]方面的准确性已得到学术界的认可;②与 POM、ECOM 模型相比,EFDC 模型能够更加有效地处理变边界条件,文件输入方式更通用,更好地耦合水动力、水质和泥沙模块,不同模型接口间的转换过程可以省略;③EFDC-Explorer 软件拥有友好的可视化操作界面,能够完整地完成模拟的前后处理,快速生成网格数据,最终形成实时图像;④EFDC 是开源软件,有利于预测模型的集成和二次开发。

2.2　区域网格的构建

根据研究区域长江地形实际变化情况,对干流江段选择采用矩形网格,对南京长江大桥断面到三江口断面江段则采用曲线正交贴体网格,以便更好地拟合岸界情况。笛卡尔网格单元的大小为 100 m×100 m,曲线正交网格单元沿河宽方向最小 1.4 km,最大 2.9 km,沿河流方向全程 37 km,在研究区域共概化出 9 174 个网格单元。由于长江在研究江段的水深较浅(水深远小于河宽),可忽略垂向变化,概化为二维平面网格。通过 EFDC 自身的网格生成程序,进行设置边界控制点,生成研究区域的计算网格。如图 2 所示,长江下游南京段码头溢油事故预测模型都将建立在该空间概化的结果之上。

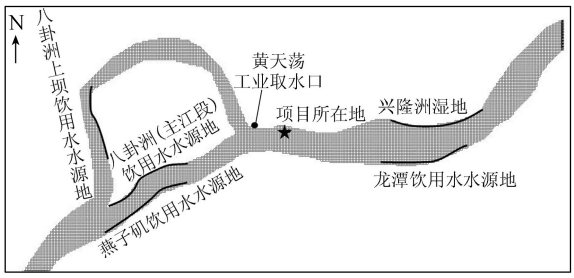


图 2　研究区域计算网格

2.3　源强分析

有关统计资料表明,物料码头可能发生的泄漏有 3 种类型:①船舶碰撞发生的事故性溢油;②装卸作业时管道泄漏事故性溢油;③装卸过程集装箱掉落入江溢油。

参照一般工程实际情况,事故溢油主要为船舶自身的燃料油,一般 1 000 t 级以上船载储油量可达到 10t 以上,一旦发生船舶相撞导致漏油现象,会造成比较大的溢油事故。按照一次最大溢油量,1 000 t 级轮出现撞船等事故导致的溢油量为 10 t。

按照国家标准集装箱规格,20 尺(5.69 m×2.13 m×2.18 m)集装箱和 40 尺(11.8 m×2.13 m×2.18 m)集装箱的配货毛质量分别为 27 t 和 26 t,因此,在考虑装卸过程集装箱掉落事故时,液体化工污染品 100% 入江,污染物最大入江量为 27 t。但实际情况下,集装箱内存放化工品桶,单个化工品桶为 200 kg,需考虑掉落化工品桶个数,从而确定污染源强。

管道装卸的污染源量需按照各工程案例实际情况进行确定,不做统一要求。

2.4　模型选取

本研究使用的 EFDC 模型不同于常见的溢油模型,是采用 Fay 公式扩展后的油粒子模型。该模型同时考虑了溢油的自身扩展和漂移阶段,且使自身扩展和漂移阶段同时进行[6]。该模型的优点在于吸取了油粒子模型和 Fay 模型各自的长处,成功突破 Fay 模型局限于静止水面的限制,而特别适用于水域狭窄且河道复杂、水流状况较为多变的河流溢油模拟。

油粒子模型的中心思想是将溢油离散化为大量油粒子,每个粒子表征一定的油量[7]。在流场中追踪油粒子的运动轨迹,得到每一时刻各个油粒子所处的空间位置,统计各时刻油粒子的位置,可得到各时刻溢油的空间分布[8]。目前,针对事故性溢油的预测,国内外都取得了一系列研究成果。沈永明等[9]建立了统筹物理、化学和生物反应综合作用的近岸海域多组分三维水质动力学模型;熊德琪等[10]将风场和流场数据库作为强制条件,建立了大连港

溢油应急预报系统,并借助 HAMSOM 三维海洋模式进行潮流分析,完成珠江口水域的溢油模拟工作;汪守东等[10-11]考虑了风、浪、流等多要素的诱导作用,模拟溢油油膜的迁移过程,选用 POM 模式作为水动力模型,实现溢油迁移和归宿模型的三维化;Mannul 等[12]选择拉格朗日油粒子模型(LPTM),将采用 ROMS(regional ocean modeling system)模式模拟出的流场以及美国国家环境预报中心 NCEP(National Center for Environmental Prediction)每 6 h 一次的风场作为边界数据,模拟了"威望号"船舶溢油事故。总体而言,现阶段有关溢油的研究主要集中于开阔的海域,而对长江等浅窄江道领域,鲜见油粒子模型在此相关领域的研究。对溢油的漂移扩散过程,研究主要在油粒子模型方面展开;而对油膜扩展过程,研究更多地集中在 Fay 提出的三阶段扩展理论[13]。Fay 模型的假设是,在自身扩展阶段油膜在静止水面扩展,不会碰到水陆边界,所以开敞海域里 Fay 假设是基本适用的,但河流则相对狭窄,实际情况下溢油在自身扩展阶段多数是会接触水陆边界的,因此将 Fay 假设用于江、河溢油预测会出现比较多的问题[14],故采用 Fay 公式扩展后的油粒子模型是非常有必要的。

3 模型的建立

3.1 模型的基本原理

EFDC 模型垂向上采用 σ 坐标变换,能较好地拟合近岸复杂的岸线和地形;采用 Gelperin 等修正的 Mellor-Yamada2.5 阶湍封闭模式能较客观地提供垂向混合系数,避免人为选取造成误差。动量方程、连续方程及状态方程为

$$\partial_t(m_xm_yHu)+\partial_x(m_yHuu)+\partial_y(m_xHvu)+\partial_z(m_xm_ywu)-f_em_xm_yHv=-m_yH\partial_x(p+p_{atm}+\phi)+m_y(\partial_xz_b^*+z\partial_xH)\partial_zp+\partial_z\left(m_xm_y\frac{A_v}{H}\partial_zu\right)+\partial x\left(\frac{m_y}{m_x}HA_H\partial_xu\right)+\partial_y\left(\frac{m_x}{m_y}HA_H\partial_yu\right)-m_xm_yc_pD_p(u^2+v^2)^{1/2}u \tag{1}$$

$$\partial_t(m_xm_yHv)+\partial_x(m_yHuv)+\partial_y(m_xHvv)+\partial_z(m_xm_ywv)+f_em_xm_yHu=-m_xH\partial_y(p+p_{atm}+\phi)+m_x(\partial_yz_b^*+z\partial_yH)\partial_zp+\partial_z\left(m_xm_y\frac{A_v}{H}\partial_zv\right)+\partial x\left(\frac{m_y}{m_x}HA_H\partial_xv\right)+\partial_y\left(\frac{m_x}{m_y}HA_H\partial_yv\right)-m_xm_yc_pD_p(u^2+v^2)^{1/2}v \tag{2}$$

$$m_xm_yf_e=m_xm_yf-u\partial_ym_x+v\partial_xm_y \tag{3}$$

$$(\tau_{xz},\tau_{yz})=A_vH^{-1}\partial_z(u,v) \tag{4}$$

$$\partial_t(m_xm_yH)+\partial_x(m_yHu)+\partial_y(m_xHv)+\partial_z(m_xm_yw)=Q_H+\delta(0)(Q_{ss}+Q_{sw}) \tag{5}$$

$$\partial_zp=-gH(\rho-\rho_0)\rho_0^{-1}=-gHb \tag{6}$$

$$\rho=\rho(p,S,T) \tag{7}$$

式中:u、v、w 分别为边界拟合正交曲线坐标 x、y、z 方向上的速度分量,m/s;m_x 和 m_y 分别为度量张量对角元素的平方根,$m=m_xm_y$,是度量张量行列式的平方根;H 为总水深,m;A_v 为垂向紊动黏滞系数;p 为压力,Pa;P_{atm} 是大气压强,atm;ϕ 为自由表面电位,V;z_b^* 为水流底面的物理垂直坐标;A_H 为水平紊动黏滞系数;c_p 为阻力系数;D_p 为单位水平水流网格内的植物区域,无量纲;f_e 为科里奥利加速度;f 为科里奥利系数;τ_{xz},τ_{yz}分别为 xz 方向、yz 方向的剪切应力,Pa;Q_H 为降雨、蒸发和微量侧面流入流出通量的体积,m^3/s;$\delta(0)$为三角脉冲函数;Q_{ss}和 Q_{sw}分别为介于河床和水流间的沉积物和水的网格流量,m^3/s;P 为静压力,N;g 为重力加速度,m/s^2;ρ 为密度,kg/m^3;ρ_0 为标准大气压,1.01×10^5Pa;b 为脉动量;S 为盐度;T 为温度,℃。本研究中盐度 S 等于 0,并假设水为不可压缩流体,密度 ρ 和水温 T 为常量。

垂向紊动黏滞系数 A_v 通过 Mellor and Yamada(1982)提出的二阶矩紊动闭合模型求得:

$$A_v=\phi_AA_0ql \tag{8}$$

$$\phi_A=\frac{1+R_1^{-1}R_q}{(1+R_2^{-1}R_q)(1+R_3^{-1}R_q)} \tag{9}$$

$$A_o=A_1\left(1-3C_1-\frac{6A_1}{B_1}\right)=\frac{1}{B_1^{1/3}} \tag{10}$$

$$R_1^{-1}=3A_2\frac{(B_2-3A_2)\left(1-\frac{6A_1}{B_1}\right)-3C_1(B_2+6A_1)}{\left(1-3C_1-\frac{6A_1}{B_1}\right)} \tag{11}$$

$$R_2^{-1}=9A_1A_2 \tag{12}$$

$$R_3^{-1}=3A_2(6A_1+B_2) \tag{13}$$

式中:ϕ_A 为垂向稳定分层环境下的传输衰减系数;q 为比流量,L/(s·m);l 为长度,m;A_0 为初始垂向紊动黏滞系数;A_1、B_1、A_2、B_2、C_1 为与主控的紊动特征长度和紊动结构特征有关的实验常数,分别取 0.92、16.6、0.74、10.1 和 0.08。

动量方程的垂向边界层考虑了水表面的风拖曳力和湖底的摩擦力,即河床剪切应力 τ_{xz}和 τ_{yz}取决于速度分量,可以根据二次阻力公式求得,具体方程为

$$(\tau_{xz},\tau_{yz})=(\tau_{sx},\tau_{sy})=c_s\sqrt{U_w^2+V_w^2}(U_w,V_w) \tag{14}$$

式中:U_w、V_w 分别为 x、y 方向在水表面 10 m 高处的风速;τ_{sx}和 τ_{sy}分为 x、y 方向水表面的风拖曳力分量;c_s 为风拖曳系数。c_s 求法如下:

$$c_s = 0.001\frac{\rho_a}{\rho_w}(0.8 + 0.065\sqrt{U_w^2 + V_w^2}) \quad (15)$$

式中,ρ_a 和 ρ_w 分别为空气和水的密度。

湖底摩擦力的计算方法为

$$(\tau_{xz},\tau_{yz}) = (\tau_{bx},\tau_{by}) = c_b\sqrt{u_1^2 + v_1^2}(u_1,v_1) \quad (16)$$

式中:u,v 的下标 1 指河流底部的对应流速;τ_{bx},τ_{by} 分别为 x、y 方向湖底部切应力分量;c_b 为底摩擦系数;c_b 的求取方程为

$$c_b = \left[\frac{\kappa}{\ln(\Delta_1/2z_0)}\right]^2 \quad (17)$$

式中:κ 为卡门常数,Δ_1 为底层的无量纲厚度,$z_o = z_0^*/H$(z_0^* 为对应的糙率),为无量纲的糙率高度,一般取值在 0.002 ~0.01。

方程组在离散求解过程中,空间上采用二阶精度的中心差分格式,时间上采用三次时间步蛙跳式差分格式。使用质量守恒格式的干湿网格处理方法,更好地模拟湖流的漫滩过程,保证浅水区域计算结果的准确性。具体离散求解方法可参见文献[15]。

3.2 模型的设置与率定

数值模型的参数取值一直是影响模型结果的关键,因此必须对模型进行灵敏性分析。由于对水流运动物理特性的研究已经十分成熟,因此 EFDC 模型的大部分物理参数未作改动,如,Mellor-Yamada 紊流模型[16] 的相关参数与其他水动力模型(如 Princeton 海洋模型[17] 与河口海岸海洋模型[18])中设置的参数是一致的。此外,考虑燃油的理化性质,模型中燃油的密度取 0.8 kg/m^3,衰减系数取 0.2。类似地,Smagorinsky 公式[19] 中的量纲黏度系数是不变的,取 0.2[20]。因此,本文确定使用 3 s 为模型的时间步长,以保证模型运行的稳定性。

目前使用 1997 年 7 月 19 日 0:00 ~7 月 26 日 11:00(共 180h)、1996 年 7 月 1 日 1:00 ~7 月 9 日 2:00(共 194h)的实测水文资料。模型验证结果显示,沿程水面线与实测水面线基本一致,南京站检验水位误差不超过 20 cm 的时段占总验证时段(1996 年为 194 h,1997 年为 180 h)的 70% ~90% 之间(图 3)。总体而言,利用一维水流模型对区域的概化处理基本合理,选用的参数基本反映了河道的水力特性。

由率定验证可知,EFDC 具有较好的匹配性,能够较真实地模拟出长江的水动力变化情况。

3.3 模型的构建

本研究以南京港西坝港区西坝作业区八期液体化工码头工程为实例。南京港西坝港区为 5 万 t 级液体化工品码头,3 万 t 级泊位 1 个,吞吐量 140 万 t/a。预测该码头发生的事故是船舶碰撞溢油 10 t。用笛卡

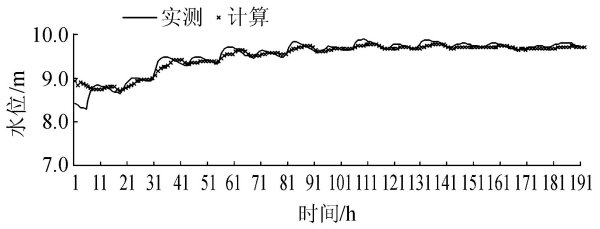


图 3 南京站计算断面的实测水位与计算结果的比较

尔直角坐标网格建立长江下游南京段模型,水平面总计 9 174 个网格,每个网格单元边长相当于实际长度 100 m。EFDC 模型以大气、表面风力和出入江流量为动力边界条件。初始条件设置了潮位、流量、风向风速。通过 EFDC 模型在项目溢油事故发生地点连续释放示踪剂(LPT)100 个,追踪油膜漂移的轨迹,模拟油粒子过程。时间步长取为3 s,共计算 8 d。

为了方案的合理性,考虑影响最大的情况,本研究使用枯水期小潮位数据输入边界条件作为入江口和出江口的潮位数据,设置项目所在地位置、溢油的流量、持续溢油的时间、风向和风速。从偏安全角度考虑,根据气象气候资料,选取年主导风向(东北风)、年平均风速 3.4 m/s;不利风向(西风)、强风速 10 m/s 两种情况下事故分别发生在刚好涨潮和刚好落潮的潮位过程作为设计工况条件(表 1)。同时考虑到两种类型事故下的溢油量相近,影响效果也会相似,因此只对 10t 溢油量进行预测,分析事故发生后对上下游水环境保护目标的影响。

表 1 模型预测方案

方案	事故发生时潮位	预测因子	事故发生时工况	
			风速/(m·s^{-1})	风向
1	落急	燃油	3.4	东北风
2	落急	燃油	3.4	西风
3	涨急	燃油	3.4	东北风
4	涨急	燃油	10	西风
5	涨急	燃油	3.4	西风

注:各方案溢油量均为 10 t。

4 结果与讨论

假设分别在刚好涨潮时(涨急)和刚好落潮时(落急)发生事故泄漏,模型模拟了此江段沿程的各个保护区受到溢油事故影响的时间、溢油到达和离开各保护区的时间,见表 2。

研究区域位于长江下游感潮河段,水流既受上游下泄径流的影响,又受下游潮汐的影响,水流极其复杂。从图 4 的结果可以看出,落急时长江下游南京段的计算区域内流场分布不均匀,东北风时,流速在 0.01 ~0.65 m/s 之间;西风强风速 10 m/s 时,计算区域内流速在0.01 ~0.72m/s之间。涨急时计

表 2　溢油到达和离开保护区时刻

污染物	风向条件	环境保护对象	溢油到达时间/d		溢油离开时间/d	
			最早	最迟	最早	最迟
燃油	东北风	龙潭饮用水水源地	0.19	0.27	0.48	0.52
		兴隆洲湿地	0.44	0.52	1.60	1.77
	西风	龙潭饮用水水源地	0.15	0.23	0.44	0.48
		兴隆洲湿地	0.40	0.40	1.10	1.15

算区域内流场分布也不均匀，东北风时，流速在 0.01 ~ 0.15 m/s 之间；西风强风速 10 m/s 时，计算区域内流速在 0.01 ~ 0.25 m/s 之间。从落潮向涨潮变化的过程不会出现往复流，流速逐渐变小。

4.1　溢油泄漏时刻对油膜扩散的影响

如图 5 所示，方案 1 和方案 3 的结果表明，落急时刻油膜到达和离开各保护区的时间都比涨急的提前 0.04 d。主导风向溢油油膜到达龙潭饮用水水源地的时间一样，而离开该保护区的时间则落急时刻比涨急时刻提前了 0.04 d；溢油油膜到达兴隆洲湿地的时间落急时刻比涨急时刻提前了 0.08 d，离开该保护区的时间落急时刻提前了 0.17 d。落急时刻，整个研究区域的流速较快，油膜往下游的扩散更快，下游保护区更早受到污染。

4.2　风场对油膜扩散的影响

以往研究表明，溢油长期扩展的主要影响因素是油膜和水表面的风力，油膜运动速度大约为水表面 10 m 以上风速的 3%[21]，所以风场对溢油油膜的影响非常重要。本研究选用东北风 3.4 m/s、西风 10 m/s 以及西风 3.4 m/s 3 种方案，分析风速和风向对油膜扩散的影响（图 6 ~ 8）。方案 3 和方案 5 的

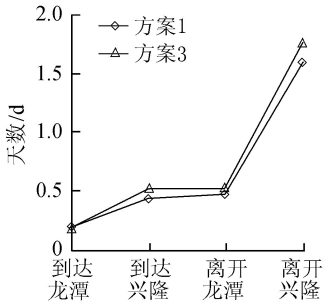


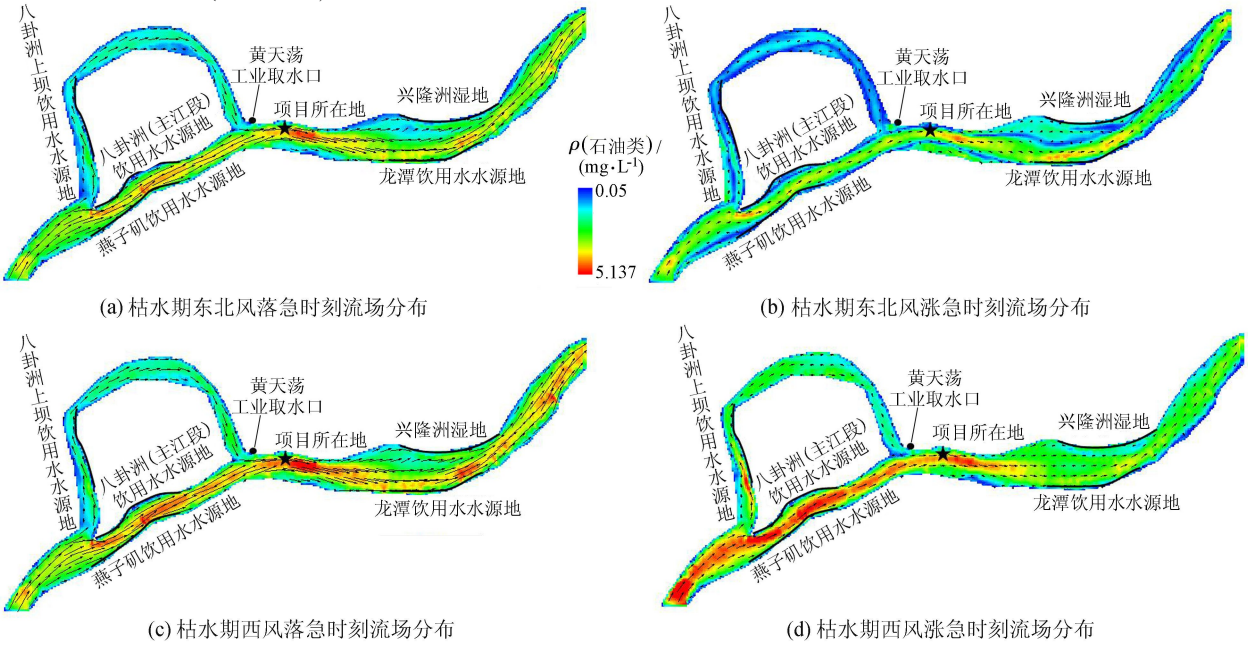
图 5　相同风场下不同潮位油膜漂移时间对比

预测结果表明：相同风速、不同风向下，油膜到达和离开保护区的时间明显不同。对于龙潭饮用水源地，西风下油膜 0.19d 到达、0.48 d 离开，分别比东北风下提前 0 d 和 0.04 d；对于兴隆洲湿地，西风下油膜 0.44 d 到达、1.48 d 离开，分别比东北风下提前 0.08 d 和 0.29 d。

而通过对比方案 4 和方案 5 可以看出，相同风向、不同风速下，对于龙潭饮用水源地，10 m/s 和 3.4 m/s 风速方案油膜到达和离开的时间一致；对于兴隆洲湿地，10 m/s 风速下油膜 0.40 d 到达、1.15 d 离开，分别比 3.4 m/s 风速下提前 0.04 d 和 0.33 d。龙潭饮用水源地的油膜扩散受到风向的影响更加明显，西风风向是对下游保护区不利的条件。而风速的变化影响油膜到达和离开兴隆洲湿地的时间变化更明显。

4.3　油膜停留时间的讨论

从方案 1 ~ 5 的结果可以看出，溢油油膜停留在龙潭水源地的时间最大为 0.33 d（东北风向涨急时刻），停留在兴隆洲湿地的时间最大为 1.25 d（东北

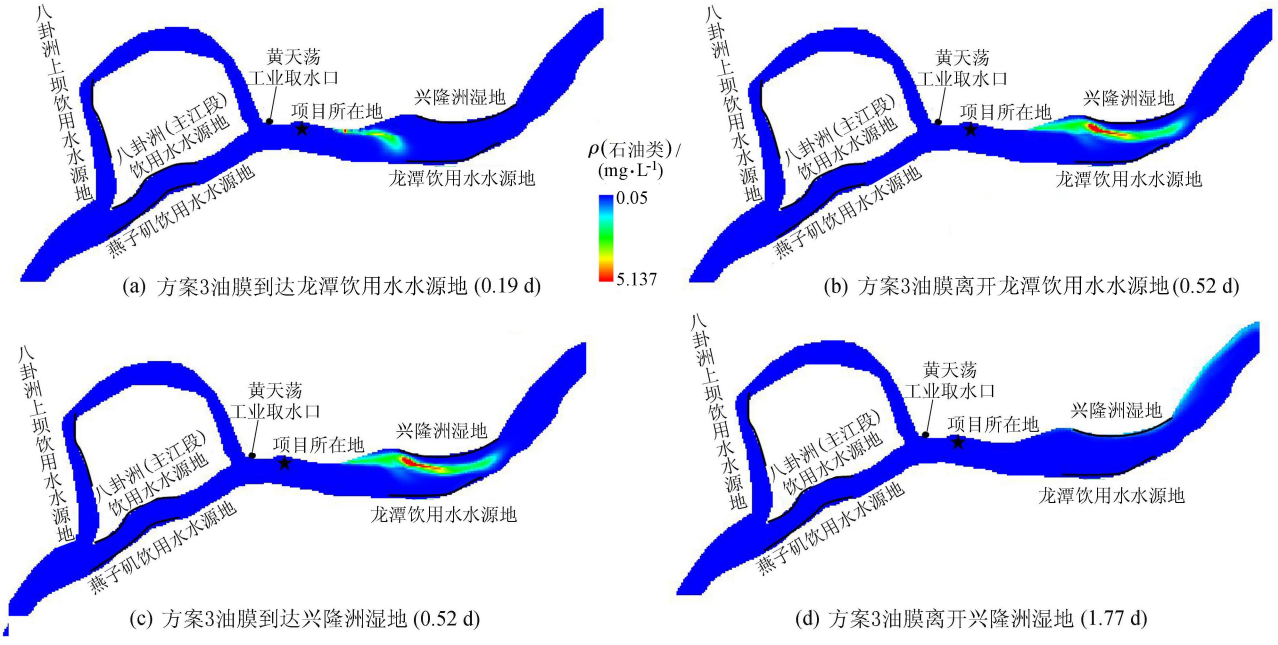


(a) 枯水期东北风落急时刻流场分布　　(b) 枯水期东北风涨急时刻流场分布

(c) 枯水期西风落急时刻流场分布　　(d) 枯水期西风涨急时刻流场分布

注：深色为长江石油类污染物本底质量浓度（0.05 mg/L），符合国际Ⅱ类标准；浅色为高浓度状态。

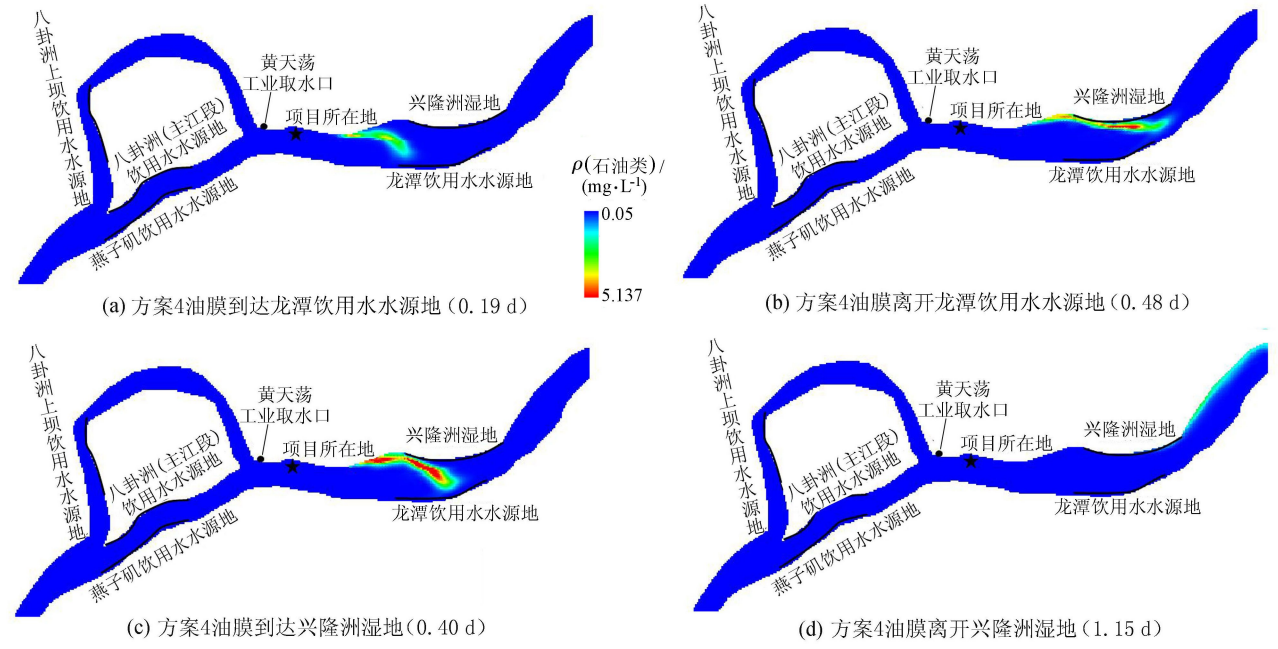
图 4　研究区域流场分布



(a) 方案3油膜到达龙潭饮用水水源地 (0.19 d)　(b) 方案3油膜离开龙潭饮用水水源地(0.52 d)

(c) 方案3油膜到达兴隆洲湿地 (0.52 d)　(d) 方案3油膜离开兴隆洲湿地 (1.77 d)

图 6　方案 3(3.4 m/s 东北风)结果



(a) 方案4油膜到达龙潭饮用水水源地（0.19 d）　(b) 方案4油膜离开龙潭饮用水水源地（0.48 d）

(c) 方案4油膜到达兴隆洲湿地（0.40 d）　(d) 方案4油膜离开兴隆洲湿地（1.15 d）

图 7　方案 4(10 m/s 西风)结果

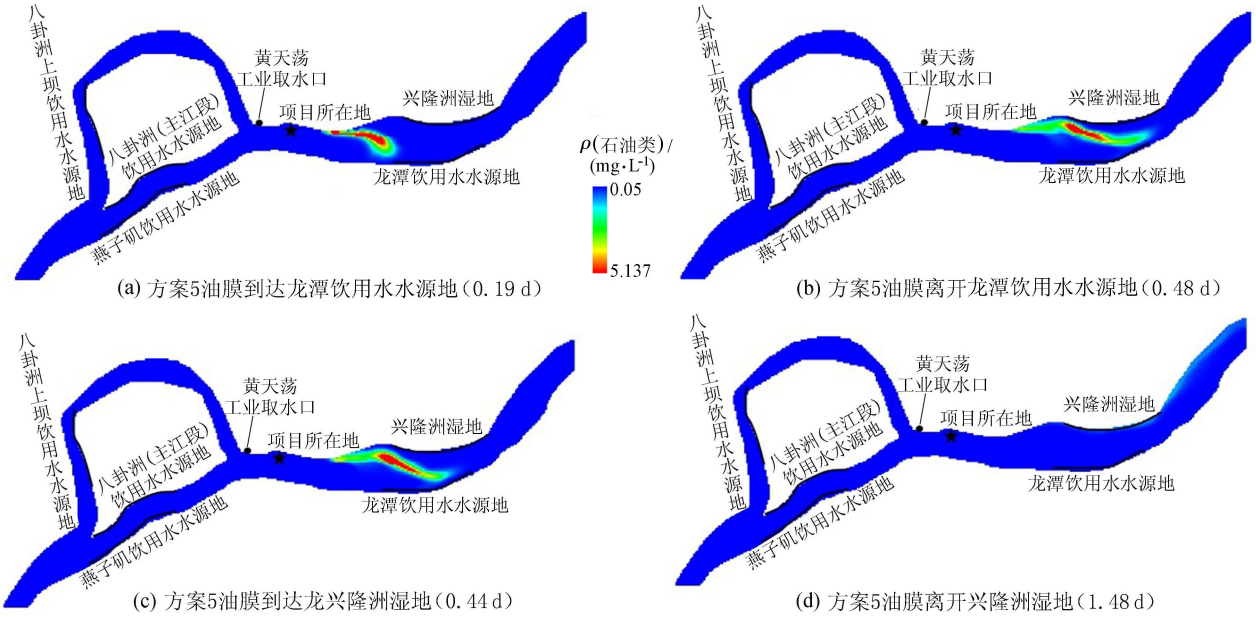
风向涨急时刻)。不难看出在最不利的两种情况综合影响下,方案 3 导致油膜对保护区的污染最大。长江下游南京段该区域的流向是自西向东北方向流动的,因此油膜更倾向于聚集在河道的北岸,即兴隆洲湿地一侧。同时,从底高程数据来看,兴隆洲湿地区域高程较高,出现了浅滩,流速较慢,停留时间也会较长。

5　结　论

a. 以枯水期水文观测资料对预测模型中水动力模型的验证结果表明,基于 EFDC 构建的二维水动力模型能够较为准确地反映研究区域的水动力情况。

b. 通过对南京港西坝港区西坝作业区八期液体化工码头工程情景的模拟可知,油膜在研究江段的扩散过程主要受到潮位、风速、风向的影响。燃油泄漏发生在落急时刻时,油膜向下游扩散得较快,较早到达保护区。但风场对油膜的影响更显著,风速变化更直接地表现为溢油油膜对长江北岸保护区的影响,西风风向导致油膜更早到达长江南岸保护区。

c. EFDC 预测模型能对长江下游南京段码头溢油事故后污染物的水环境行为进行快速的模拟和预测,并且能在地理信息系统的图层上以动画的形式实时展示事故影响的范围和程度,可以为长江下游南京段码头溢油事故的预警应急提供决策依据。



(a) 方案5油膜到达龙潭饮用水水源地(0.19 d)　(b) 方案5油膜离开龙潭饮用水水源地(0.48 d)

(c) 方案5油膜到达龙兴隆洲湿地(0.44 d)　(d) 方案5油膜离开兴隆洲湿地(1.48 d)

图 8　方案 5(3.4 m/s 西风)结果

参考文献:

[1] 闻云呈,夏云峰,张世钊,等. 长江下游南京至浏河口河段沿程设计最低通航水位分析[J]. 水运工程,2012(3):100-103. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, ZHANG shizhao, et al. Design lowest navigation water level of river reach from Nanjing to Liu River Estuary on lower Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(3):100-103. (in Chinese))

[2] 钱瑜. 环境影响评价[M]. 南京:南京大学出版社,2009:115-119.

[3] 齐珺,杨志峰,熊明,等. 长江水系武汉段水动力过程三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展,2008,23(2):212-219. (QI jun, YANG Zhifeng, XIONG Ming, et al. Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the Wuhan catchments of the Changjiang River [J]. Journal of hydrodynamics, 2008, 23(2):212-219. (in Chinese))

[4] 姜恒志,沈永明,汪守东. 瓯江口三维潮流和盐度数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展,2009,24(1):63-70. (JIANG Hengzhi, SHEN Yongming, WANG Shoudong. Numerical simulation study on three-dimensional tidal flow and salinity in the Oujiang Estuary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(1):63-70. (in Chinese))

[5] 苗晓雨. 基于 EFDC 的尹府水库水质数值模拟及预测[D]. 青岛:中国海洋大学,2012

[6] 赵琰鑫,王永贵,张万顺,等. 河道溢油污染事故二维数值模型研究 [J]. 人民长江, 2012, 43(15):81-84. (ZHAO Yanxin, WANG Yonggui, ZHANG Wanshun, et al. River oil spill pollution in accident two-dimensional numerical model for research[J]. Yangtze River, 2012, 43(15):81-84. (in Chinese))

[7] 蔡忠清. 海上船舶溢油粒子化及适应性数值模拟研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.

[8] 陈丽娜. 可降解地表水污染物随机游走改进模式研究[D]. 南京:河海大学,2008.

[9] 沈永明,郑永红,吴修广. 近岸海域污染物迁移转化的三维水质水动力学模型[J]. 自然科学进展,2000,14(6):664-670. (SHENG Yongming, ZHENG Yonghong, WU Xiuguang. Migration of pollutants in near shore three-dimensional dynamic model of water quality of water[J]. Progress in Natural Science, 2000, 14(6):664-670. (in Chinese))

[10] 熊德琪,杨建立,严世强. 珠江口区域海上溢油应急预报信息系统的开发研究[J]. 海洋环境科学,2005,24(5):63-66. (XIONG Deqi, YANG Jianli, YAN Shiqiang. R & D on oil spill contingency forecast information system for Pearl River Estuary [J]. Marine Environmenal Science, 2005, 24(5):63-66. (in Chinese))

[11] 汪守东,沈永明,郑永红. 海上溢油迁移转化的双层数学模型[J]. 力学学报,2006,38(4):452-461. (WANG Shoudong, SHEN Yongming, ZHENG Yonghong. The migration of oil spill into the double mathematical model [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(4):452-461. (in Chinese))

[12] 汪守东. 基于 Langrange 追踪的海上溢油预报模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.

[13] MANUEL G, LUIS F, ADOLFO U, et al. Operational ocean graphy system applied to the prestige oil-spillage event[J]. Journal of Marine System, 2008, 72(1/2/3/4):178-188.

[14] FAY J A. The spread of oil slicks on a calm sea[M]. New York:Oil on the Sea Plenum, 1969.

[15] 张艳军,雒文生,雷阿林,等. 河道溢油模型在三峡水质

预警系统中的研究与运用[J]. 环境科学与技术,2010,33(1):128-131. (ZHANG Yanjun, LUO Wensheng, LEI Alin, et al. Research and application of river oil spill model in advanced warning system of water quality of Three Gorges [J]. Environmental Science and Technology,2010,33(1):128-131. (in Chinese))
[16] TETRA TEC, INC. The environmental fluid dynamics code theory and computation [M]. Washington DC: US EPA, 2007:233-235.
[17] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics,1982,20(4):851-875.
[18] YIN Xunqiang, QIAO Fangli, TANG Yongzeng, et al. An ensemble adjustment Kalman filter study for Argo data [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnoligy,2010,28(3):626-635.
[19] 堵盘军,胡克林,孔亚珍,等. ECOMSED 模式在杭州湾海域流场模拟中的应用[J]. 海洋学报,2007,29(1):7-16. (DU Panjun, HU Kelin, KONG Yazhen, et al. Application of ECOMSED model to the simulation of Hangzhou Bay tide current [J]. Acta Oceanologica Sinica,2007,29(1):7-16. (in Chinese))
[20] BERNTSEN J. Internal pressure errors in sigma-coordinate ocean models [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2002,19(9):1403-1414.
[21] 吴晓丹,宋金明,李学刚,等. 海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型的构建[J]. 海洋科学,2010,34(2):68-74. (WU Xiaodan, SONG Jinming, LI Xuegang, et al. Construction of theoretical model for thickness of marine oil spilled [J]. Marine Sciences,2010,34(2):68-74. (in Chinese))

(收稿日期:2014-04-11 编辑:彭桃英)

(上接第 85 页)

[10] 宁旨文,朱闻博,李毅. 昔日“臭水沟”今日清水流 深圳福田河生态景观整治与提升[J]. 风景园林,2011(4):38-41. (NING Zhiwen, ZHU Wenbo, LI Yi. From a ditch to a new clean river landscape renovation of Shenzhen Futian River[J]. Landscape Projects,2011(4):38-41.)(in Chinese))
[11] 王铭. 南亚热带大型河流生态系统健康研究:以东江为例[D]. 广州:暨南大学,2013.
[12] 海热提,王文兴. 生态环境评价、规划与管理[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2004.
[13] T L 萨蒂. 层次分析方法:在资源分配、管理和冲突分析中的应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社,1986.
[14] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers[R]. Washington D. C.: US EPA,1999.
[15] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].
[16] US EPA. Environmental monitoring and assessment of great river ecosystems (EMAP-GRE) [R]. Washingtan D. C:US Environmental Protection Agency,2006.
[17] 吴阿娜. 河流健康评价: 理论、方法与实践[D]. 上海: 华东师范大学,2008.
[18] 蔡守华,胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法[J]. 水利水电科技进展,2008,28(1):23-27. (CAI Shouhua, HU Xin. Concept of river health and index system for its evaluation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(1):23-27. (in Chinese))
[19] 水利部水资源司. 河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)[R]. 北京:水利部,2010.

(收稿日期:2014-01-23 编辑:高渭文)

(上接第 34 页)

[7] KATHLEEN G R, PHILIP J. Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient: a case study of Greater Manchester, UK [J]. Landscape and Urban Planning,2013,109:117-127.
[8] 钟春欣,张玮. 基于河道治理的生态修复[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 12-14. (ZHONG Chunxin, ZHANG Wei. Ecological restoration based on the river regulation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resonrces,2004,24(3):12-14. (in Chinese))
[9] MARK M P. A natural approach to watershed planning, restoration and management [J]. Water Science Technology,1999,39(12):347-352.
[10] 董哲仁. 美国基西米河生态恢复工程的启示[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 8-12. (DONG Zheren. The enlightenment from the Kissimmee River ecological restoration project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2004,35(9):8-12. (in Chinese))

(收稿日期:2014-12-01 编辑:彭桃英)