

内陆河流水体跨越管道溢油模拟及应急对策*

栾国华¹ 高青军² 李昊阳³ 余志红¹ 李鑫¹ 储胜利¹ 秦梦³ 石明杰¹

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司; 2. 中国石油兰州石化公司; 3. 中国石油大学(北京)机械与储运学院)

摘 要 介绍了内陆河流水体跨越管道溢油模拟技术与基本流程,以西北地区某河段油品跨越管道为研究对象,分析发生管道泄漏突发溢油事故的风险,考虑丰/枯水期、强/静风、泄漏位置等影响因素,设计构建了 12 种溢油突发事件情景,应用 MIKE21 模拟软件建立水动力模型,并分析不同情景下的溢油漂移扩散规律。根据模拟计算结果并考虑河流自身特点,确定了高风险水域多个应急处置关键断面,给出了不同应急处置关键断面的有效应急时间,为溢油突发事件应急准备工作提供了技术支持。

关键词 内陆河流水体; 溢油模拟; 情景设计; 应急对策

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.01.003

文章编号: 1005-3158(2018)01-0010-04

0 引 言

水体溢油事故往往造成重大的环境污染,是我国各级政府、石油石化企业安全生产与环境风险防控的重点。近年来,随着国民经济的不断发展,黄河、松花江、长江、黄浦江、珠江等重点内陆流域沿岸石油石化工业园区密集布置,成品油、原油管线穿越大型河流、支流的情况不可避免,河流水体面临泄漏溢油的风险。根据统计,2005 年以来全国沿海地区和河流共发生了 250 多起溢油事故,发生溢油事故风险概率较高^[1]。水体发生溢油后,如何准确识别并判断泄漏油品的前缘位置、油膜分散面积,对于现场开展应急指挥决策工作非常关键。针对海洋水体特点,国内学者开发了多个较为成熟的溢油漂移扩散系统。上海市环境科学研究院卢士强、林卫青等针对黄浦江突发水体溢油事故风险,基于 WebGIS 技术对 Delft3D 水动力模型、OilMap 溢油模型进行了二次开发,搭建了“黄浦江突发水污染事故在线预警系统”^[1-3];大连海事大学吴宛青、王耀兵等应用 ArcGIS 技术开发了“海上溢油漂移扩散预测可视化系统”^[4-5];针对舟山港、渤海湾突发溢油事件风险,俞济清、焦俊超等应用 GIS 技术建立了相应的“溢油预测和决策支持系统”^[6-7]。

内陆河流水体与海洋水体相比差别较大,具有流向稳定、流速变化较大等特点,目前国内有关内陆河流水体溢油模拟基本流程、影响因素、应急对策等方面的研究较少。本文以某内陆河流水体跨越管道溢油风险为研究对象,分析了影响管道溢油的风险因

素,设计了 12 种水体溢油突发事件情景、搭建了 MIKE21 HD 水动力模型、模拟了溢油漂移扩散规律,分析各应急关键点的应急时间窗,为溢油突发事件应急准备与处置工作提供决策技术支持。

1 溢油模拟技术介绍

1.1 水动力模拟与率定

开展溢油漂移扩散模拟之前,首先需要采集水文、地理、气象等信息对河流水体进行建模,比对水动力模拟结果与实测数据之间的差异,修正调整相关参数,使得水流、水位水体参数模拟结果满足应用误差需要。由于水平宽度远远大于垂直深度,一般采用二维水动力控制方程描述内陆河流水体水动力模型^[8-9]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

X 方向动量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp}{C^2 \cdot H^2} \sqrt{p^2 + q^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] - fq - f_w \mid W \mid W_x = 0 \quad (2)$$

Y 方向动量方程:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp}{C^2 \cdot H^2} \sqrt{p^2 + q^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) \right] - fq - f_w \mid W \mid W_y = 0 \quad (3)$$

* 基金项目: 中国石油安全环保重大科技项目《河流域炼化典型危险化学品泄漏应急技术研究》(2014D-4607)。

栾国华, 2012 年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业, 博士, 现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司从事安全环保技术研究工作。
通信地址: 北京市昌平区沙河镇西沙屯桥西中国石油创新基地 A 座, 102206

式(1)~(3)中: h 为水深,m; ζ 为水位,m; $H = \frac{(fq + f_w |W| W_y) \rho y}{\tau_{yy} + \tau_{xy}}$, H 为水深中间变量; p 为 x 方向上的流量通量, m^3/s ; q 为 y 方向上的流量通量, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; C 为谢才数, $\text{m}^{1/2}/\text{s}$; ρ 为海水密度, kg/m^3 ; f 为科氏力系数,无量纲; f_w 为风阻力系数,无量纲; W 为风速, m/s ; W_x 为风速在 x 方向上的分速度, m/s ; W_y 为风速在 y 方向上的分速度, m/s ; τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} 为3个方向剪切应力,MPa。

1.2 溢油漂移扩散规律模拟

溢油漂移扩散规律模拟是指通过计算分析油品随水流、时间的漂移扩散前缘位置、形状、浓度、厚度等轨迹特征。溢油漂移扩散规律模拟的计算数据量较大,国内外研究机构和学者多采用“油粒子”模型,将溢油离散化为大量油粒子的集合,每一个油粒子代表一定的油量,溢油的漂移扩散过程近似看做相互独立的质点运动,它们离散的路径和质量被跟踪和记录为与参照网格体系相关的时间函数。目前,市面上成熟的商用模拟软件主要有 MIKE21、RiverSpill、Wpmb、NRDAM、OilMap、HGSYSTEM 等^[10-14]。

2 管道溢油风险与情景设计

2.1 溢油风险分析

如图1所示,西北地区某跨河管道临河段长度为200 m,管径为300 mm,设计压力2.5 MPa,设计输量1 000 m^3/d 。根据水文观测数据,该河段丰水期、枯水期水流量分别为3 500,300 m^3/s ;根据气象观测数据,该地区常年以北风为主,每年3—6月为强风期,平均风速为2.29 m/s,其他月份为静风期,平均风速为1.82 m/s。

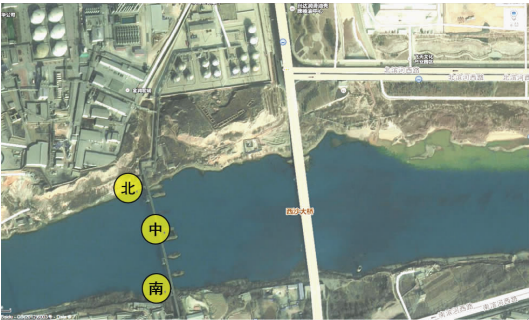


图1 跨河管道临河段基本情况

根据调研情况,泄漏点位置可能出现在跨河管道的任何部位,当管线发生断裂时(最不利情况)油品以11.57 L/s的速度向外泄漏到水体中,最迟可在10 min内启动停输操作。

2.2 溢油情景设计

真实情况下,跨河管道溢油的扩散运移规律将会受到水动力条件、污染物的理化性质、泄漏模式、风场情况等多种因素影响。其中,水动力流量因素、风场因素、泄漏位置因素为主要影响因素。考虑不同泄漏点位置、丰/枯水期、强/静风测量参数的变化,设计12种跨河管道溢油泄漏事件情景,如表1所示。

表1 溢油泄漏事件情景设计

情景设计	强/静风		泄漏位置		
	强风 (2.29 m/s)	静风 (1.82 m/s)	南岸	中心	北岸
情景一	✓		✓		
情景二	✓			✓	
情景三	✓				✓
情景四		✓	✓		
情景五		✓		✓	
情景六		✓			✓
情景七	✓		✓		
情景八	✓			✓	
情景九	✓				✓
情景十		✓	✓		
情景十一		✓		✓	
情景十二		✓			✓

注:情景一~情景六为丰水期(3 500 m^3/s);情景七~情景十二为枯水期(300 m^3/s)。

3 水体溢油模拟及应急对策研究

3.1 水动力模拟

①模型建立。利用 MIKE Zero 中的网格生成器创建非结构地形网格。其中最大三角形面积为6 000 m^2 ,最小允许角度为30°,区域内节点数为1 931个,计算域内网格数为2 668个。生成网格后,在网格编辑器中导入河底高程数据,并将其插值到各网格点,形成有效的计算网格,导出模拟区域的地形分布图,如图2所示。

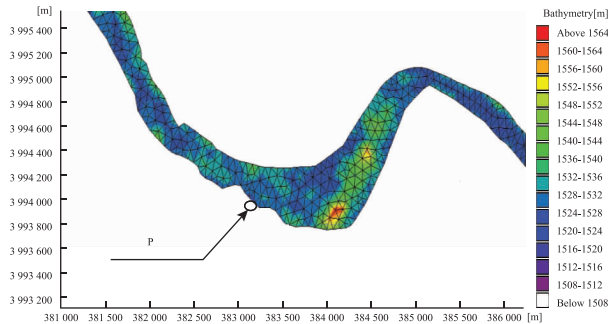
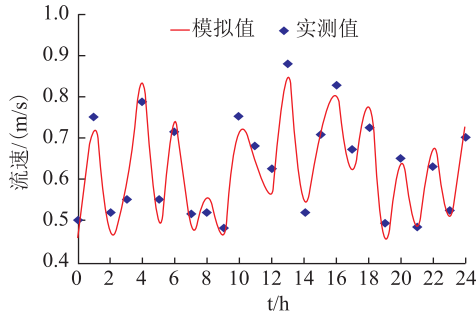


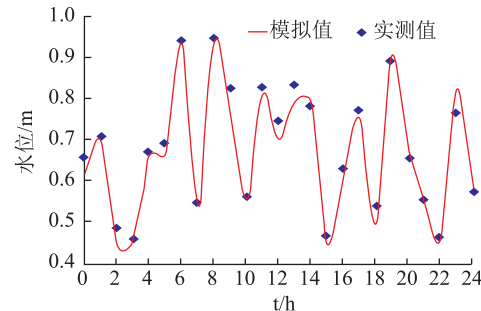
图2 河段模拟区域局部地形

②率定与验证。水动力模型验证曲线见图 3。如图 3(b)所示,以河流上 P 点流速和水位实测数据为基准,对模型参数进行率定与验证。通过调

整底床摩擦系数、涡黏系数取值,率定后的水动力模型流速、水位的计算值与实测值的误差在合理范围内。



(a) 流速验证曲线-P



(b) 水位验证曲线-P

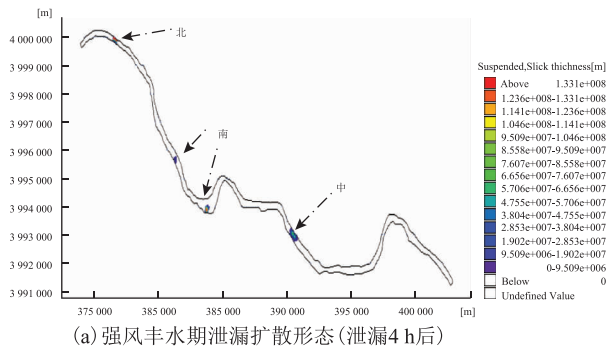
图 3 水动力模型验证曲线

3.2 溢油模拟与应急对策研究

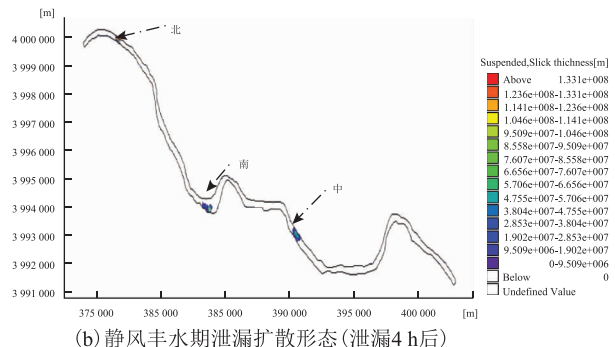
3.2.1 溢油模拟结果

在水动力模型的基础上,应用 MIKE21 OilSpill

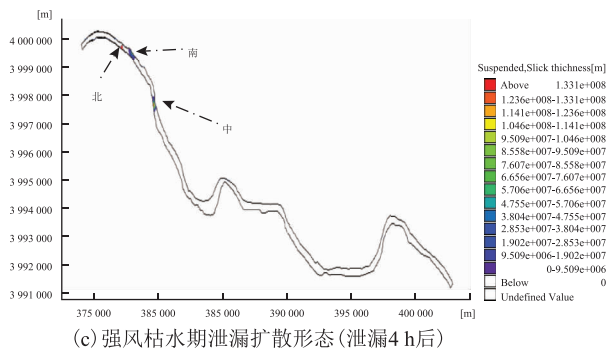
模块对 12 种溢油泄漏事件情景进行仿真计算,分析强/静风、丰/枯水期、泄漏位置对溢油漂移扩散形态的影响程度。溢油漂移扩散模拟计算结果见图 4。



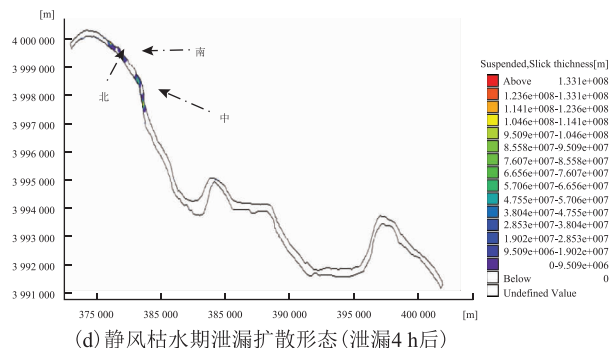
(a) 强风丰水期泄漏扩散形态(泄漏4 h后)



(b) 静风丰水期泄漏扩散形态(泄漏4 h后)



(c) 强风枯水期泄漏扩散形态(泄漏4 h后)



(d) 静风枯水期泄漏扩散形态(泄漏4 h后)

图 4 溢油漂移扩散模拟计算结果

在发生泄漏 4h 后,不同强/静风、丰/枯水期、泄漏位置的溢油情景在河流水体上的漂移扩散形态见图 4。由图 4 可知,丰/枯水期、泄漏位置对溢油扩散速度的影响较大,丰水期溢油漂移扩散的速度远高于枯水期,泄漏点在中间位置时,溢油的漂移速度最快,南岸次之,北岸最慢;强/静风对溢油扩散速度的影响较弱,对溢油污染团带的形态有一定的影响。综合分析可知,“强风、丰水期、中间位置泄漏”时,溢油随水

流漂移扩散速度最快,溢油应急处置工作难度最大。

3.2.2 关键断面与时间窗分析

按照溢油突发事件应急准备工作的需要,在研究的河段长度上选取容易到达的水闸、桥梁结构作为应急处置关键断面,图 2(a)中 11,12,13,14,15,16,17,18,19 位置。以“强风、丰水期、中间位置泄漏”为应急对象,模拟计算溢油前缘到达各关键断面的时间(以下称为“窗口时间”)。关键断面应急窗口时间统

计见表 2。

表 2 关键断面应急窗口时间统计

序号	窗口时间/min	油膜面积/m ²
1	40	4 983.59
2	60	3 692.99
3	85	3 919.94
4	145	4 634.93
5	200	6 656.35
6	255	3 138.26
7	315	10 132.65
8	340	8 074
9	350	12 530.27

由表 2 可知,各应急队伍、物资及装备需要在窗口时间内做好集结、出发,并在河面上开展围控、回收等各项准备工作。

4 结 论

①利用 MIKE21 软件构建了某河段的水动力模型,并通过获取的实时数据对水动力模型进行了率定与验证,验证了该模型的可用性和稳定性。

②考虑强/静风、丰/枯水期、泄漏点位置等因素,设计构建了跨越管道溢油的 12 种事故情景,分析不同泄漏情景下的漂移扩散规律。

③根据不同泄漏情景下溢油模拟结果并考虑河流自身特点,确定了高风险水域多个应急处置关键断面,给出了不同应急处置关键断面的有效应急时间。

参 考 文 献

[1] 陈义中,卢士强,林卫青,等.基于 Web-GIS 的黄浦江上游水源地突发水污染事故预警系统[J].上海环境科学,2012,31(4):139-143.

[2] 余江,林卫青,卢士强,等.黄浦江突发性化学品泄漏事故对上游水源地影响初探[J].上海环境科学,2007,26(5):193-197.

[3] 余江,卢士强,刘志国,等.突发化学品水污染快速模拟中化学品分类研究[J].上海环境科学,2015,34(4):144-149.

[4] 张平.基于 VB+MapX 的海上化学品泄漏漂移预报地理信息系统研究[D].大连:大连海事大学,2008:53-54.

[5] 陈兰芳.南通港泄漏危化品运移扩散趋势预测及可视化[D].大连:大连海事大学,2008:26-27.

[6] 焦俊超,马安青,娄安刚,等.基于 GIS 的渤海湾溢油预测系统研究[J].海洋环境科学,2011,30(5):735-738.

[7] 孙俊,俞济清,黄立文.基于 OILMAP 的中国舟山港溢油管理信息系统[J].计算机仿真,2002,19(4):76-78.

[8] 俞济清,魏敏,黄立文,等.中国舟山港溢油模拟信息系统研制[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2002,26(4):463-465.

[9] 姜卫星.黄浦江溢油事故的数值模拟研究[D].上海:同济大学,2007:44-45.

[10] ASA. Chemmaptechnical manual [M]. [S. l.]: Applied science associates Inc,2002.

[11] ASA. Technicalmanual oilmap for windows[M]. [S. l.]: Applied science associates Inc,2004.

[12] 李涛,李筠,陈俊峰,等.基于 OILMAP 模型的洋浦港溢油风险研究[J].交通节能与环保,2012,8(3):61-67.

[13] 陈琴.基于 Delft3D 的洪水污染物输移过程研究[J].人民长江,2013,44(3):67-74.

[14] CHAO XIAOBO, JIA YAFEI, SHIELDS JR F D, et al. Numerical simulation of sediment associated water quality processes for a mississippi delta late [J]. Ecohydrology,2009,2(3):350-359.

(收稿日期 2017-06-27)
(编辑 王 薇)

广 告 索 引

前视红外光电科技(上海)有限公司	封	二
“石油与环保”摄影作品征集	封	三
投稿要求	封	底