

溢油对地表水体影响预测模型的搭建

刘 冰 陈 忱 杨婧晖 侯祥宁

(中国石油安全环保技术研究院)

摘 要 以 M 原油管道在穿越 N 江处发生溢油事故为例,探讨了溢油对地表水体的影响、以及预测该影响所使用的预测模型。通过对石油类物质与水动力条件的作用分析,分析了一维水动力模型、污染物对流扩散模型的原理,探讨了两种模型的搭建。使用 MIKE 11 软件在河流水动力与污染物迁移两方面建立了预测模型,为后续模拟预测工作奠定了理论与模型基础。

关键词 原油管道; 溢油; 地表水体; 预测; 模型

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2017.03.011

文章编号: 1005-3158(2017)03-0036-03

0 引 言

管道溢油是人类活动造成的液态碳氢化合物释放进入环境,一旦发生溢油事故,会对广泛的水域造成污染,进而对河流的水生生态、河岸生态环境以及人类自身都造成危害。为了保护环境,将突发溢油事件污染降至最低,需要建立准确的溢油预测模型,以便及时、全面、科学地指导溢油事故的处理、避免造成更大的后续污染危害^[1]。

1 工程概况

M 原油管道采用跨越方式穿越 N 江。根据 HJ/T 169—2004《建设项目环境风险评价技术导则》,最大可信事故指在概率不为零的事故中,对环境(或健康)危害最严重的事故;重大事故是指爆炸、火灾和有毒有害物质的泄漏会给公众带来严重危害,会对环境造成严重污染。M 原油管道泄漏发生的最大可信事故,是管道受到人为破坏、自然因素破坏或管道腐蚀等原因引发管道泄漏直接污染 N 江水体。

M 原油管道在 N 江跨越处一旦发生原油泄漏突发性事件,若不及时对泄漏油品进行清理回收,将影响水生动物的生存环境,并可能对下游保护区、水电站及养殖户造成重大污染事件,因此对 M 原油管道 N 江穿越段进行溢油预测分析是十分必要的。

计算管道泄漏油品迁移时,本次预测考虑最极端情况,即一旦油品泄漏,便能直接进入水体,并在短时间内经历明显的水、油掺混过程。此时水中石油类浓度较高,接近饱和,因此本次模拟按初始石油类污染

物浓度为 10.0 mg/L 进行预测。同时,原油主要以油膜形式随水流向下游迁移。

管道发生溢油事故时,少量溶解态和乳化态的石油类物质在水流的紊动作用下均匀分布在水相中,并随着水流向下游迁移,对下游水生生态环境造成影响。这一过程可以用一维水动力模型和污染物对流扩散模型来进行描述^[2]。本项目中采用了丹麦水利研究所(DHI)开发的 MIKE 11 系列一维模型软件来构建一维水动力模型(MIKE 11 HD)与污染物对流扩散模型(MIKE 11 AD)^[3]。

2 模型原理

2.1 一维水动力模型

MIKE 11 HD 主要用于河渠灌溉系统的模拟预测研究,具有稳定、可靠性强、精度较高等特点,能模拟复杂河网水流,尤其适合复杂的情况,可以在河流纵向上研究污染物的迁移规律,模拟河流的水流。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} g + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gn^2 Q}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

方程组利用 Abbott-Ionescu 六点格式求解,该格式是按顺序交替计算流量和水位,分别称为 Q 点、h 点^[4]。

Abbott 格式的水位、流量交替示意图 1。

对连续性方程求解, b_s 为,

$$\frac{\partial A}{\partial t} = b_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

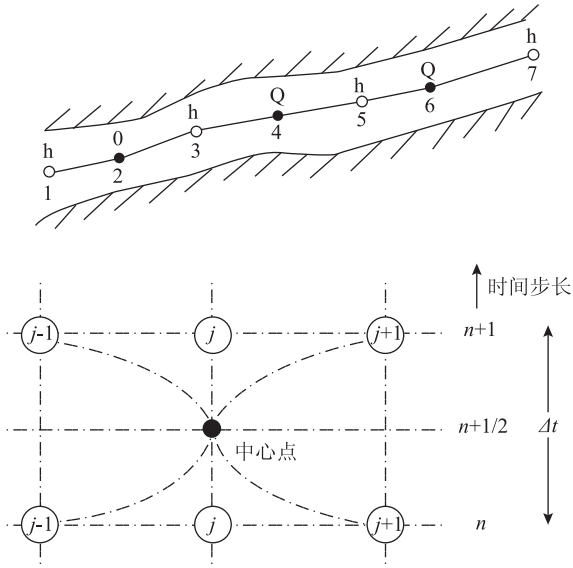


图1 Abbott格式的水位、流量交替

则连续方程可以写为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (4)$$

在时间步长 $n+1/2$ 时:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{(Q_{j+1}^{n+1} + Q_{j+1}^n) - (Q_{j-1}^{n+1} + Q_{j-1}^n)}{2\Delta x_j} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{(h_j^{n+1} - h_j^n)}{\Delta t} \quad (6)$$

而 b_s 又可以写为:

$$b_s = \frac{A_{oj} + A_{oj+1}}{\Delta 2x_j} \quad (7)$$

A_{oj} 为两个计算点之间的面积,代入连续性方程:

$$\alpha_j Q_{j-1}^{n+1} + \beta_j h_j^{n+1} + \gamma_j Q_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (8)$$

式中 α, β, γ 随 Q 的大小而变化。

6点 Abbott 格式求解连续性方程见图2。

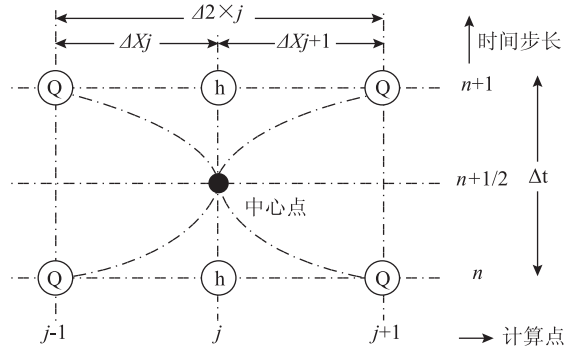


图2 6点 Abbott 格式求解连续性方程

动量方程的求解:对每一个 q 点求解动量方程,结果见图3。

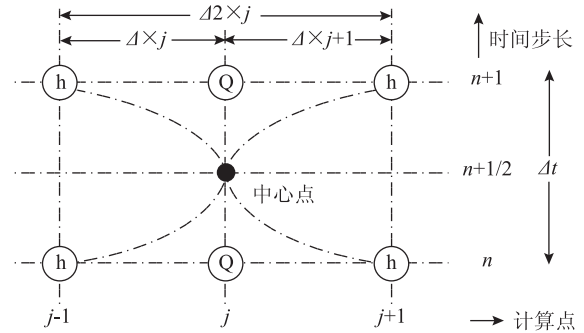


图3 6点 Abbott 格式求解动量方程

通过数值变换,动量方程可以写为:

$$\alpha_j h_{j-1}^{n+1} + \beta_j Q_j^{n+1} + \gamma_j h_{j+1}^{n+1} = \delta_j \quad (9)$$

$$\begin{cases} \alpha_j = f(A) \\ \beta_j = f(Q_j^n, \Delta t, \Delta x, C, A, R) \\ \gamma_j = f(A) \\ \delta_j = f(A, \Delta x, \Delta t, \alpha, q, v, \theta, h_{j-1}^n, Q_{j-1}^{n+1/2}, Q_j^n, h_{j+1}^n, Q_{j+1}^{n+1/2}) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 污染物对流扩散模型

MIKE 11 AD 是对河流中污染物的对流扩散进行模拟的工具,它以 HD 模块的水动力方程为基础,可作为水质模型使用^[5]。MIKE 11 AD 采用一维模型的方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC \quad (11)$$

MIKE 11 AD 通过经验公式来估算对流扩散系数 E_x :

$$E_x = \alpha V^b \quad (12)$$

在 2.1 与 2.2 所列的各式中: Q 为流量, m^3/h ; x 为空间坐标, m ; α, β, γ 为动量校正系数; A 为横截面积, m^2 ; C 为谢才系数; R 为水力半径, m ; q 为旁侧入流流量, m^3/h ; h 为水位, m ; V 为水流流速, m/s ; t 为时间, h ; θ 为角度; g 为重力加速度, $9.8 m/s^2$; a 和 b 是设定的参数。

3 模型搭建

3.1 一维水动力模型

MIKE 11 HD 建模需要地形、水文等数据,实测的历史水文数据用于模型的率定和验证。

①河网和断面

河网断面参考所涉及河道的防洪影响评价报告,断面缺失处通过河道坡降和河面宽度内插得到。

②边界条件

由于管道穿越的河道多为资料缺乏地区河道,因此综合各条河道的防洪影响评价以及部分河道的水文年鉴数据,对各条河道的水文状况进行了综合分析。考虑到一旦泄漏事故发生在丰水期时油膜向下游迁移速度较快,统计了丰水期的流量(考虑到最不利极端情况以及河道的穿越规模,大型开挖采用百年一遇洪水峰值流量,中型开挖采用五十年一遇洪水峰值流量);考虑到一旦泄漏事故发生在枯水期水流较小时,虽然油膜迁移速度较慢,但溶解性石油类有机物浓度较高,统计了枯水期的平均流量^[6]。

流量统计见表1。

表1 流量统计 m^3/s

河名	枯水期流量	丰水期流量
N 江	1.1	7.7

3.2 一维污染物对流扩散模型

水质对流扩散模型选择了溶解性石油类污染物作为模拟对象。

①边界条件

根据计算,按照M原油管道在N江穿越段发生完全断裂时的最大泄漏量作为源强。

②一维对流扩散模型的参数取值

一维对流扩散模型中主要的参数包括污染物的扩散系数和一级衰减系数。

就扩散系数而言,纵向离散取决于非均匀流的流速分布和扩散的联合作用。在河流流速大的情况下,

非均匀流的流速分布所带来的作用远远大于分子扩散和湍流扩散的影响。也就是说,污染物在河流中各处的浓度主要受控于河道水文条件,本次预测模型中溶解性石油类污染物的扩散系数均假设为 $10.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

就一级衰减系数而言,虽然现实情况下由于泥沙吸附等原因溶解性石油类污染物会有所减少,但是考虑到预测的最不利条件,本次预测模型中溶解性石油类的一级衰减系数假设为0。

4 结束语

采用MIKE 11水环境软件对M原油管道发生溢油事故的情景进行模型搭建,能够为溢油事故的可视化模拟预测提供模型基础,最终能够确定溢油的影响范围,为风险应急措施的制定提供科学依据。

参考文献

- [1] 李锦秀,廖文根.水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究[J].环境科学研究,2002,15(3):45-48.
- [2] 姜云超,南忠任.水质数学模型的研究进展及存在的问题[J].兰州大学学报,2008,44(5):7-11.
- [3] 万金保,李媛媛.湖泊水质模型研究进展[J].长江流域资源与环境,2007,16(6):805-809.
- [4] 刘俊勇,张云,崔树彬.MIKE软件在珠江流域水资源管理与规划中的应用[J].人民珠江,2010,31(1):56-59.
- [5] J.J.德朗克,韩曾萃,周潮生.河流、近海区和外海的潮汐计算[J].水利水运工程学报,1973(s5):27-70.
- [6] 熊献金.准确计算烷烃、环烷烃和芳烃在水中溶解度的新方法[J].炼油设计,1998,28(4):43-46.

(收稿日期 2017-05-29)

(编辑 王薇)