

长江下游化工码头溢油事故风险研究

林 凯

(江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘要 在流场数值模拟的基础上建立了长江下游溢油的数学模型, 并对某化工码头溢油事故进行了模拟, 分析了涨、落急不同情况下溢油事故对上下游取水口的影响。

关键词 长江下游; 码头; 溢油; 事故风险

中图分类号: X74 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)S1-0020-03

随着航运业的发展, 长江下游沿岸的石化码头逐年增多, 仅从南京至上海约 400 km 的沿江两岸就有十几处, 其吞吐量也逐年增加, 进出长江下游的船只数量不断增多, 且日趋大型化, 溢油事故的潜在危险也有所增加。另外, 部分江段码头与取水口相互交错, 据统计仅江苏省南京、镇江、扬州、常州、泰州、南通 6 市就有 11 个饮用水水厂取自长江^[1], 由此可见突发溢油事故必将对沿岸供水安全构成重大威胁。因此, 建立数学模型对溢油的演变过程进行数值模拟, 分析长江下游化工码头溢油事故对沿岸水环境影响具有十分重要的意义, 可以为提出有效的抗溢油应急措施提供科学依据。

1 水动力模型

1.1 基本方程

采用非稳态深度平均的二维水流连续方程及动量方程描述水流流场, 忽略风应力的二维非恒定浅水运动方程为

$$\begin{cases} h_t + (uh)_x + (vh)_y = 0 \\ u_t + (uu)_x + (uv)_y + gh(h + z_y)_x - \\ fv + gn^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u = \epsilon \nabla u \\ v_t + (vu)_x + (vv)_y + gh(h + z_y)_y + \\ fu + gn^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v = \epsilon \nabla v \end{cases}$$

式中: t 为时间; x 、 y 为纵向、横向坐标; g 为重力加速度; f 为柯氏系数; z_y 为床面高程; h 为垂线水深; z 为水位; u 、 v 为 x 、 y 方向的垂线平均流速; n 为河床糙率系数; ϵ 为紊动黏性系数。

1.2 坐标变换

由于计算区域边界弯曲, 为不规则边界, 故采用边界拟合坐标技术对模拟区域进行坐标变换。坐标变换后可将 $x - y$ 平面上不规则的物理区域变换为 $\xi - \eta$ 坐标系下的矩形区域:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q \end{cases}$$

式中: P 、 Q 为调节函数, 选取适当的 P 、 Q 可以使曲线网格正交。

1.3 定解条件

a. 边界条件

岸边界: 法向流速 $un = 0$

水边界: 设计潮位过程线 $z = z(t)$

上游边界条件: 由设计流量按谢才公式计算得到各垂线的垂线平均流速。

下游边界条件: 设计潮位过程线 $z = z(t)$, 下边界各计算垂线采用同样的水位过程。

b. 初始条件

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y)$$

$$v(x, y, 0) = v_0(x, y)$$

$$z(x, y, 0) = z_0(x, y)$$

c. 参数选取

根据长江以往计算结果糙率系数 n 取为 0.020 ~ 0.028。

2 溢油的动力学过程

2.1 溢油扩散模型

溢油自身的扩散是影响其漂移轨迹的重要因素

作者简介: 林凯(1976—), 男, 江苏靖江人, 工程师, 从事环境保护咨询工作。

之一。事故溢油多为突发性,因此计算其扩散时,通常将其视为自由状态。油比重较小,溢油初期在水面上受自身重力、黏性力、惯性力和表面张力等作用而扩散。由于随着油入水时间的增加,各作用力都将发生变化,按主要作用力来组合,油膜的连续扩散可分为3个阶段,即惯性重力阶段、重力黏性阶段和黏性张力阶段^[2]。各阶段油膜扩散可近似看成以D为直径的等效圆,其直径的计算公式如下:

$$D_1 = K_1(\beta g V)^{1/4} t^{1/2}$$

$$D_2 = K_2 \left(\frac{\beta g V^2}{\gamma_w^{1/2}} \right)^{1/6} t^{1/4}$$

$$D_3 = K_3 \left(\frac{\sigma}{\rho_w \gamma_w^{1/2}} \right)^{1/2} t^{3/4}$$

$$D_4 = \left(\frac{\beta^2 V^3}{\rho_w^2 \gamma_w} \right)^{1/8}$$

$$\beta = \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w}$$

$$\sigma = \sigma_{aw} - \sigma_{oa} - \sigma_{ow}$$

式中: D_1 、 D_2 、 D_3 分别为3个扩散阶段等效圆油膜的直径, D_4 为扩散结束后等效圆油膜直径; g 为重力加速度, m/s^2 ; V 为溢油的体积, m^3 ; t 为从溢油开始计算所经历的时间; ρ_o 、 ρ_w 分别为油和水的密度; σ_{aw} 、 σ_{oa} 、 σ_{ow} 分别为空气与水之间、油与空气之间、油与水之间的表面张力系数, N/m ; γ_w 为水的运动黏性系数; K_1 、 K_2 、 K_3 分别为3个扩展阶段的经验系数。上述各阶段的分段时间可用两相邻阶段扩展直径相等来判断。

2.2 溢油漂移模型

溢油入水后很快便扩展成油膜,在水流和风生流的共同作用下发生漂移,同时溢油本身扩散的等效圆油膜还不断地增大。因此,溢油污染范围就是这个不断扩大而漂移的等效圆油膜所经过的水域面积。溢油的漂移与扩散不同,它与溢油量无关,漂移大小通常以溢油等效圆中心位移来判断。如果油膜中心初始位置为 S_0 , 经过 Δt 时间后,其位置

$$S = S_0 + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} V_0 dt$$

油膜中心漂移速度

$$v_0 = K_1 v_1 + K_2 v_{10}$$

式中: v_1 为垂向水流平均速度; v_{10} 为水面上10m处的风速, K_1 取1.10, K_2 根据油密度的大小取0.030~0.035; S_0 为初始位置; t_0 为初始时间。

2.3 油浓度预测模型

油浓度垂向分布

$$C(z) = C_0 \exp[-\alpha(z_0 - z)] \quad (1)$$

式中: z_0 为水面处水深; C_0 为对应于 z_0 处的油浓度; z 为计算点水深; α 为与垂向紊动扩散系数和油

滴上浮速度相关的参数,取 α 为 $2.4 m^{-1}$ 。

3 化工码头溢油水污染事故影响分析

以长江下游某化工码头为例,进行化工溢油水污染事故影响分析。本码头主要进行化工原料的装卸工作,码头上游3160m,下游8484m、9480m处各有一取水口,分别记为1#、2#、3#取水口(图1)。码头所处江段为强感潮河段,受潮汐影响,本江段在部分时间(主要是平水期、枯水期)会发生双向流动,码头作业过程中的水污染事故可能对上下游取水口的水质产生影响。

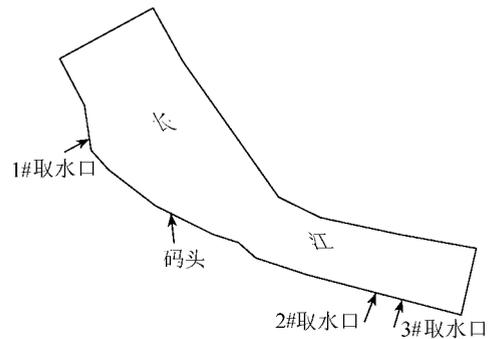


图1 取水口位置

事故源强考虑装船效率 $180 m^3/h$,事故持续时间60s,则一次事故溢油量为 $3 m^3$ 。

3.1 流场模拟

选择大通水文站作为一二维耦合水量计算的上边界,确定以1979年1月为典型月。根据以上边界条件、初始条件及参数,计算得落急和涨急平面流场分布图见图2、图3。

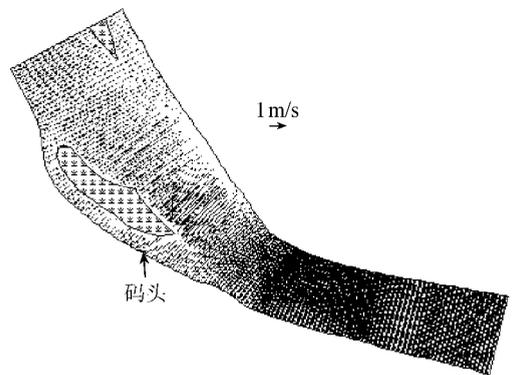


图2 落急流场

3.2 涨、落潮流影响分析

结合水动力模型的计算结果,利用溢油扩散、漂移模型分别计算码头在涨、落急情况下发生溢油事故时油膜的扩延特征值,见表1。

由表1可知,在枯水期、涨急情况下,该化工码头发生溢油事故时,大约2.5h后油膜即可漂移扩散到1#取水口表面,等效圆油膜直径为158.6m;在枯水期、落急情况下,码头突发溢油事故时,油膜经过

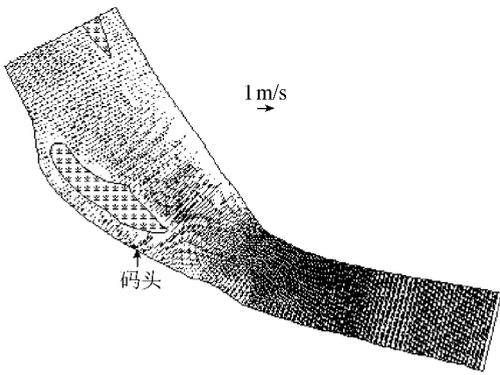


图3 涨急流场

表1 涨、落急时油膜的扩延特征值

时间/s	直径/m	面积/m ²	距码头距离/m	
			涨潮	落潮
			60	35.2
120	49.8	1939.2	38	76
180	60.4	1910.0	65	121
300	67.8	3602.0	110	210
480	76.2	4555.6	166	324
600	80.6	5094.4	220	399
720	84.4	5579.2	270	479
1080	93.2	6832.8	358	729
1800	106.0	8820.0	630	1251
2000	108.8	9296.8	705	1336
2400	114.0	10186.4	902	1620
3600	126.2	12476.5	1278	2466
5400	139.6	15280.0	1903	3699
7200	150.0	17643.6	2520	4869
9000	158.6	19726.0	3173	6030
10000	162.8	20792.8	3525	6600
11000	166.0	21282.0	3850	7130
12000	170.4	22778.0	4200	7860
15000	180.2	25467.5	5250	10052

3 h 的漂移扩散后到达 2 # 取水口表面,等效圆油膜直径 166.0 m,而到 3 # 取水口处表面则需要 3.3 h,此时等效圆油膜直径 170.4 m。

3.3 油浓度垂向分布

在涨潮流的情况下,当溢油到达 1 # 取水口时,取水口表面处的油质量浓度为 3.4 mg/L,根据公式(1)计算取水口不同水深处油浓度增量如表 2 所示。

表2 1#取水口油质量浓度增量 mg/L

水深/ m	油质量 浓度增量/ (mg·L ⁻¹)	水深/ m	油质量 浓度增量/ (mg·L ⁻¹)	水深/ m	油质量 浓度增量/ (mg·L ⁻¹)
0.5	1.02400	2.0	0.02800	4.0	0.00020
1.0	0.30800	3.0	0.00300	5.0	0.00002

从表 2 中可以看出,油膜漂移至 1 # 取水口时,在水面下 3 ~ 4 m 处,油质量浓度增量为 0.0030 ~ 0.0002 mg/L,在 5.0 m 水深以下对水质基本没有影响。1 # 取水口位于水面以下 3.6 m,依据地表水环境质量标准^[4]中相关物质的浓度限值,事故状态在涨潮时不影响 1 # 取水口水质要求。

在落潮流的情况下,当溢油到达 2 #、3 # 取水口时,取水口表面处的油质量浓度分别为 3.3 mg/L 和 3.2 mg/L,根据公式(1)计算取水口不同水深处的油质量浓度增量见表 3。

表3 取水口油质量浓度增量

水深/油质量浓度增量(mg·L ⁻¹)			水深/油质量浓度增量(mg·L ⁻¹)		
m	2#取水口	3#取水口	m	2#取水口	3#取水口
0.5	0.96400	0.99400	3.0	0.00200	0.00200
1.0	0.29000	0.29900	4.0	0.00020	0.00020
2.0	0.02600	0.02700	5.0	0.00002	0.00002

表 3 表明,油膜漂移至 2 #、3 # 取水口处时,水厂取水口位于水面下 3 ~ 4 m 处,污染物质量浓度增量仅为 0.002 ~ 0.0002 mg/L,对 5.0 m 水深以下基本没有影响。对照地表水环境质量标准限值,事故状态下在落潮时对 2 #、3 # 取水口水质没有影响。

4 结论与建议

在流场数值模拟的基础上建立了长江下游溢油的数学模型。运用该模型对长江下游某化工码头溢油事故进行了模拟。水污染事故对取水口影响持续时间大约 5 min,在漂浮油面通过取水口断面后则影响消失。在影响时段内,最不利情况下,3 个水厂取水口位置(水面下 3 ~ 4 m 处)污染物浓度均低于相关标准限值要求,不影响水厂正常取水。

但事故发生后,水厂仍应密切关注污水团漂移情况,开展应急跟踪监测,确保取水口水质安全。

参考文献:

- [1] 王万杰,束龙仓,毛旭东,等.长江下游石油码头水污染事故影响分析及应急预案[J].水资源保护,2006,22(6): 102-104.
- [2] 王建华,于红兵,宋运法,等.珠江口溢油数值模拟[J].海洋技术,2006,25(4): 29-32.
- [3] 逢勇,姚琪,褚君达,等.太湖地区河网水体石油类浓度预测[J].湖泊科学,1997,9(4): 374-376.
- [4] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].

(收稿日期 2007-06-03 编辑 舒建)