

长江下游水域码头硫酸泄漏事故风险评价

刘晓东^{1,2}

(1. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 建立非恒定水流数学模型模拟长江泰州段潮流特性,在此基础上采用非稳态二维水质模型预测硫酸泄漏入江氢离子输移扩散过程。预测结果表明,硫酸泄漏事故发生于涨潮开始时对上游影响最大,发生于落潮开始时对下游影响最大,酸性污染带(pH 值超标)最大影响范围为码头上游 2 000 m 至下游 8 960 m。探索模拟硫酸泄漏后形成的酸性污染带的动态迁移过程,为潮汐水域酸性物质的水环境影响预测评价提供了技术支持。

关键词 码头 风险评价 硫酸泄漏 水流数学模型 输移扩散 长江下游

中图分类号 X507 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2009)03-0076-04

Risk assessment of vitriol leakage accident at wharf in downriver reach of Yangtze River

LIU Xiao-dong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ;2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract A mathematical model for unsteady flow was established to simulate flow details in the Taizhou reach of Yangtze River. A two-dimensional unsteady water quality model coupled with a flow model was applied to predict the diffusion and transportation of H⁺ in a vitriol leakage accident. The result shows that the accident that occurred during flood tide starting time had maximal influence on the water quality upstream of the wharf and vice versa. The maximal area of the acidic polluted zone (pH < 6) in the tide period was 2000 m upstream to 8960 m downstream of the wharf. The model was made to estimate the impact of the flood and ebb on diffusion and transportation of the acidic polluted zone due to the vitriol leakage accident. This provides the technical support for risk assessment of acidic matter leakage accidents in tide water.

Key words wharf ; risk assessment ; vitriol leakage ; hydrodynamic mathematical model ; diffusion and transportation ; downriver reach of Yangtze River

长江下游水域属感潮河段,潮汐属非正规半日潮,潮汐影响范围随天文潮周期与径流量的不同而不同。在河川径流和潮汐的共同作用下,水文情势复杂,污染物随水流迁移输运变化也十分复杂。同时,长江下游沿岸人口密集,经济发达,码头众多,航运繁忙。散装液体化学品运输因其低成本、大运输

量、装卸快捷等特点,增长态势明显。散装液体化学品运输的迅猛发展,对经济建设起到促进作用,同时对水域安全 and 环境也造成巨大的潜在风险。码头装卸作业是散装液体化学品运输的危险环节,液体化学品泄漏事故一旦发生,对长江沿线众多的取水口水质安全将会造成威胁^[1-2],其中硫酸等强酸性物质

泄漏影响尤为严重。因此,对长江下游水域码头硫酸泄漏事故进行风险预测,定量分析对长江水质的影响,具有重要的理论意义和实用价值。

液体化学品泄漏对长江水质的影响研究已有一定的成果^[3-7],但主要集中在溢油或中性化学品泄漏的影响研究,对硫酸等强酸性物质泄漏影响的研究较少。笔者以长江泰州段某码头假想发生硫酸这一典型强酸性化学品泄漏事故为例,针对潮汐水域采用非稳态二维水流水质模型进行酸性污染带的影响预测,为码头选址的风险评估提供部分技术依据。

1 非稳态二维水流水质模型

长江下游水域属感潮河段,水流和污染物在垂直方向上的变化相对于水平方向要小得多,故可采用非稳态二维水流水质耦合模型进行模拟。本文采用非稳态二维水流模型模拟长江泰州段潮流特性,采用非稳态二维水质模型模拟硫酸入江后氢离子浓度分布,再转化为 pH 值分布,最终得到酸性污染带的变化过程。

1.1 基本方程

二维水流水质模型基本方程组的守恒形式可表达为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (1)$$

式中: $q = [h, hu, hv, hC]^T$ 为守恒物理量; $f(q) = [hu, hu^2 + gh^2/2, huw, huC]^T$ 为 x 向通量; $g(q) = [hv, hvw, hv^2 + gh^2/2, hvC]^T$ 为 y 向通量; $b(q) = [b_1, b_2, b_3, b_4]^T$ 为源(汇)项,其中, $b_1 = 0, b_2 = gh(S_{0x} - S_{fx}), b_3 = bh(S_{0y} - S_{fy}), b_4 = \nabla \cdot (D_i \nabla hC) + S/A - KhC$; x, y, t 分别为空间及时间坐标; h 为水深; u, v 分别为 x 和 y 向沿水深积分平均流速分量; C 为污染物沿水深积分的垂线平均浓度; g 是重力加速度; S_{0x}, S_{fx} 分别是 x 向的水底底坡和摩阻坡度; S_{0y}, S_{fy} 分别是 y 向的水底底坡和摩阻坡度; D_i 为水平不同方向上的混合系数; K 为降解系数; $\nabla \cdot \nabla$ 为 Laplace 算子。

1.2 边界条件

1.2.1 上边界

对于入流边界 Γ_0 ,须给定水位或流速随时间的变化值:

$$\xi(x, y, t) | \Gamma_0 = \xi_i(t)$$

$$\text{或 } u(x, y, t) | \Gamma_0 = u_i(t), v(x, y, t) | \Gamma_0 = v_i(t) \\ C(x, y, t) | \Gamma_0 = C_0(t)$$

1.2.2 下边界

采用自由出流边界,即:

$$\frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial \xi}{\partial s} = \frac{\partial C}{\partial s} = 0 \quad (s \text{ 为流线方向})$$

1.2.3 固壁边界

在码头墩面、江岸等固壁边界采用不可入条件即可滑移条件,即: $v_\eta = 0$ (η 为边界法线方向)。

1.2.4 动边界处理

在潮流计算中,滩地和潜洲时没时出,因此笔者采用‘干湿法’模拟动边界。当单元水深小于某一较小值时,视为干单元,不参与计算,反之则参与计算。

1.3 基本方程的有限体积法离散

对于任意四边形网格单元 Ω ,其边界为 $\partial\Omega$,通过积分公式(1)并利用散度定理可得到有限体积法的基本方程

$$\iint_{\Omega} q_i d\omega = - \int_{\partial\Omega} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega \quad (2)$$

式中: n 为单元边界 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量; $d\omega, dL$ 为面积分和线积分微元; $F(q) \cdot n$ 为法向数值通量, $F(q) = (f(q), g(q))^T$ 。

采用一阶精度离散和 f, g 具有的旋转不变性,得到式(2)的等价公式:

$$A \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) L_j + b^*(q) \quad (3)$$

式中: $T(\Phi)$ 为坐标轴旋转角度 Φ 的变换矩阵; m 为单元边总数; L_j 为单元边 j 的长度; A 为单元面积; $b^*(q) = (Ab_1, Ab_2, Ab_3, \sum D_i (\nabla hC) L + S - AKhC)$ 。

在单元每一边两侧的 q 值不同,问题归结为如何确定法向通量 $f(\bar{q})$,这可通过解局部一维黎曼问题求得^[8]。

1.4 模型的率定与验证

本文建立的非稳态二维水流水质耦合模型在长江仪征段^[3]和长江口北支^[8]等潮汐水域得到了很好的验证,表明了模型的正确性和可靠性。曼宁糙率系数根据水深调整修正,取值为 0.020 ~ 0.028。考虑预测结果偏安全,硫酸的降解系数取 0.0。纵向和横向扩散系数参照使用附近江段的研究成果, $D_x = 6.0 hU_*$, $D_y = 0.5 hU_*$,其中 U_* 为摩阻流速。

2 风险识别

2.1 码头风险分析

拟建码头位于泰州市长江下游扬中河段太平洲左汊古马干河河口上游侧,上游 2 km 处为泰州市第三自来水厂取水口,下游 4.2 km 处为泰兴市三水厂取水口,位置较为敏感。由于所在江段处于长江潮区界与潮流界之间,在枯水期和小水年的汛期为双向流。码头泄漏事故不仅会对下游水质产生影响,也会对上游水质产生影响。码头储存产品中以工业

硫酸的周转量最大,因此码头最大可信事故为硫酸泄漏对长江水体及保护目标产生的影响,作为该码头风险预测的主要内容。风险评价因子为 pH 值。

2.2 风险源强

硫酸事故性泄漏的原因众多,主要有输送管道泄漏、船与码头相撞、操作失误等,以输送管线泄漏的风险概率最大。当管线破裂时,硫酸连续排入长江,液体泄漏速度可用柏努利方程计算:

Q = C_d A \rho \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho} + 2gh}

式中:Q 为液体泄漏速度,kg/s;C_d 液体泄漏系数;A 为裂口面积,m²;ρ 泄漏液体密度,kg/m³;P 为容器内介质压力,Pa;P_0 为环境压力,Pa;g 为重力加速度,9.8 m/s²;h 为裂口之上液位高度,m。

计算得到硫酸泄漏量为 170.06 kg/s,该码头采取了自动控制方案,可在最短时间内切断输送管线,预测时间为 10 s。

3 码头硫酸泄漏事故风险分析预测

3.1 设计条件

根据大通站各月多年平均流量系列,最小流量出现在 1 月份,其多年平均流量为 10 300 m³/s,2005 年 1 月 23 日、24 日大通站流量接近该值,故取 2005 年 1 月 23 日 0 00~25 日 0 00 高港与过船港实测潮位过程为计算上、下游边界条件,代表枯水期水文条件。pH 值本底取现状监测均值。

3.2 数学模型计算网格布置

计算范围为从高港到过船港断面,全长约 18 km,计算区域面积约 42 km²,对计算水域采用自适应四边形网格布置,以贴合长江河道天然岸线边界。网格数为 8 225 个,节点数为 8 496 个,在码头附近进行了局部网格加密,网格尺度变幅范围为 30 m × 50 m ~ 100 m × 120 m。

3.3 预测方案

由于计算区域处于感潮河段,在一个计算潮型中,潮位及流速每时每刻都在变化,事故发生时间不同,所形成的影响范围也不一样。一般当事故发生于涨潮开始时对上游水体的影响较大,当事故发生于落潮开始时对下游水体的影响较大,因此本次预测计算事故发生时间分 2 种典型情况进行,预测方案见表 1。

表 1 预测方案

方案	预测因子	代表水情	起始泄漏时刻	泄漏量/(kg·s ⁻¹)	泄漏持续时间/s
1	pH	枯水期	涨潮开始时	170.06	10
2			落潮开始时		

3.4 预测结果分析与评价

3.4.1 评价区域水流特性模拟

采用上述二维水流模型,模拟评价区域水流运动状态,模拟结果较好地反映该河段涨急、涨憩、落急、落憩的周期变化过程,主流基本沿主槽方向流动。

3.4.2 风险影响预测

硫酸泄漏对长江水质的影响可通过对水体 pH 值的影响来反映,采用上述二维水流水质模型模拟得到 H⁺ 浓度分布,再通过公式 pH = -lg[H⁺] 转化为 pH 值。pH 值现状均值为 7.97,酸性污染带外包络线 pH 值取标准下限 6。各预测方案下全潮超标污染带(包络线)的特征值统计见表 2。

表 2 全潮超标污染带(包络线)特征值统计

方案	代表水情	泄漏排放时刻	酸性污染带特征值		
			长度(上游/下游)/m	最大宽度/m	最大面积/km²
1	枯水期	涨潮开始时	10500(2000/8500)	500	4.946
2		落潮开始时	8960(0/8960)	390	3.218

由表 2 可知,硫酸泄漏发生于涨潮开始时对上游影响最大,最远距离为码头上游 2 000 m,发生于落潮开始时对下游影响最大,最远距离为码头下游 8 960 m。各预测方案硫酸泄漏对取水口 pH 值的影响程度见表 3,变化是一个动态过程,表 3 中给出了取水口的最小 pH 值。

表 3 取水口最小 pH 值

方案	代表水情	泄漏时刻	最小 pH 值	
			泰州三水厂取水口	泰兴水厂取水口
1	枯水期	涨潮开始时	6.04	5.10
2		落潮开始时	本底值	4.95

由表 3 可见,泰州市第三自来水厂取水口位于码头上游,本案例硫酸泄漏事故发生于落潮开始时不会对泰州市第三自来水厂取水口 pH 值产生影响,发生于涨潮开始时将会对其 pH 值产生影响;泰兴水厂取水口位于码头下游,事故发生于涨潮或落潮时均会对其 pH 值产生影响。在全潮过程中,泰州市第三自来水厂取水口最小 pH 值可达 6.04,尚能满足要求。泰兴水厂取水口最小 pH 值达 4.95,取水口 pH 值已出现超标。

硫酸泄漏引起水体 pH 值的变化为一动态过程,各预测方案硫酸泄漏不同时间后 pH 值分布见图 1 和图 2(其中“三水厂”指泰州市第三自来水厂)。

4 结 语

笔者利用四边形网格剖分计算区域,建立长江

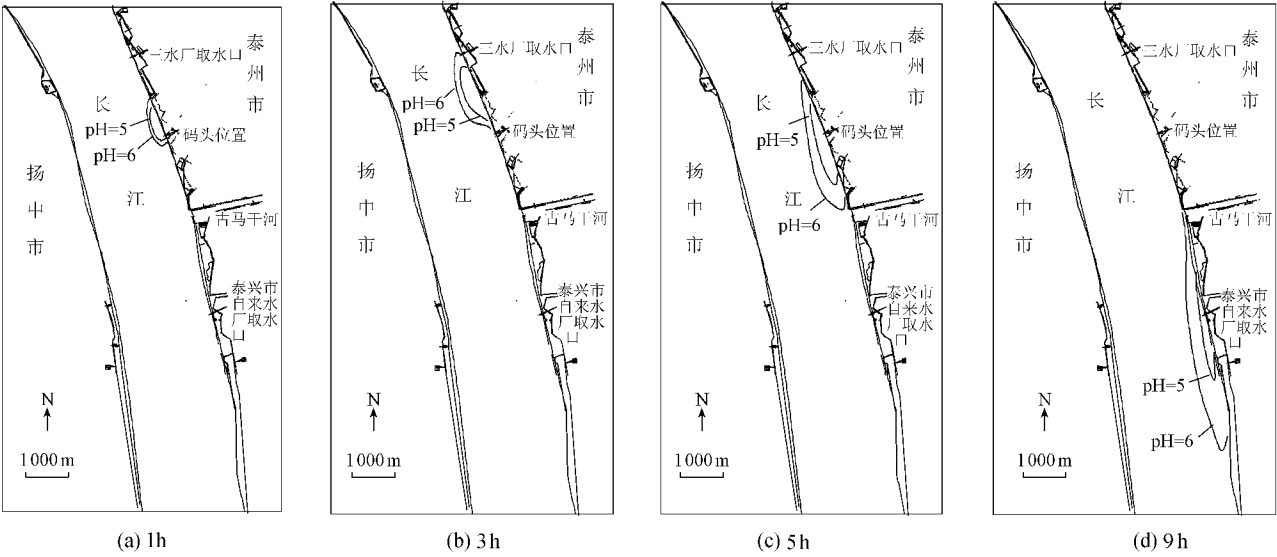


图 1 硫酸泄漏事故发生于涨潮时酸性污染带迁移分布

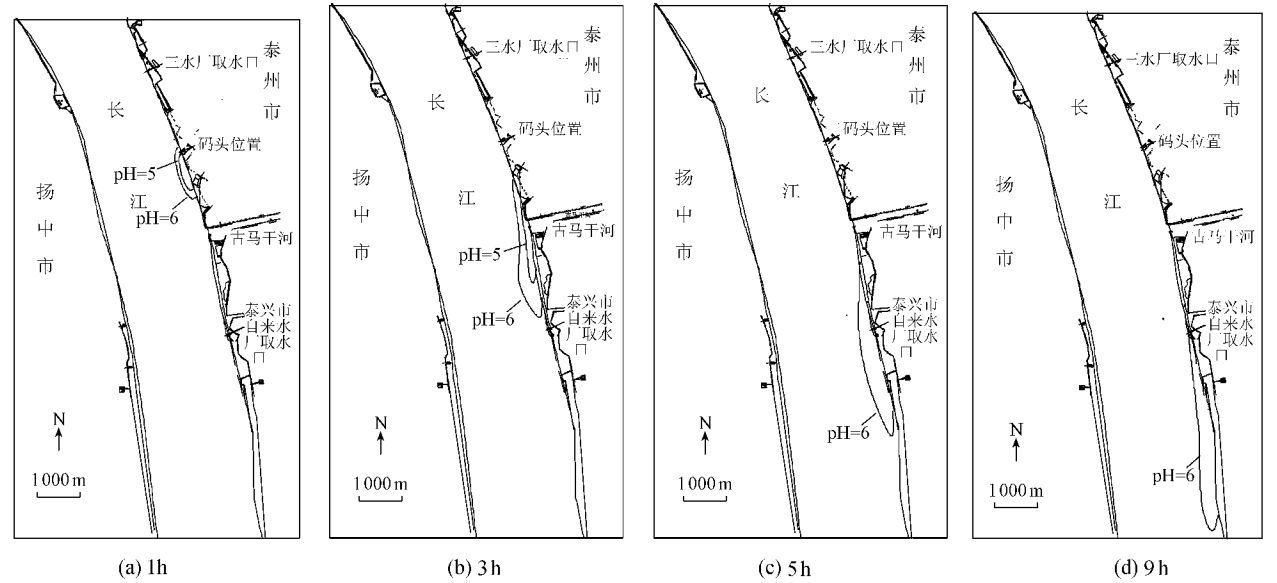


图 2 硫酸泄漏事故发生于落潮时酸性污染带迁移分布

下游水域水流数学模型模拟长江泰州段潮流特性。在此基础上采用非稳态二维水质模型预测硫酸泄漏入江输移扩散过程,计算模拟了酸性污染带的动态迁移过程。预测结果表明,硫酸泄漏事故发生于涨潮开始时对上游影响最大,最远超标距离为码头上游 2000 m;事故发生于落潮开始时对下游影响最大,最远超标距离为码头下游 8 960 m。因此,必须加强事故防范,杜绝事故的发生;事故一旦发生,应采取应急措施,控制污染影响范围和程度,同时追踪酸性污染带,并及时通知沿线引水工程停止取水。

参考文献:

[1] 徐国毅,晨晓光,徐 . 分析长江下游水域散装液态危险货物运输风险管理[J]. 航海技术,2002(5):12-14.
[2] 李保刚,周克,林涛,等. 水源地保护及突发性水污染事

件预警应急的研究与实施进展[J]. 水资源保护,2008,24(1):87-91.
[3] 古丽扎,姚琪,周莉华. 仪征石化码头溢油事故风险[J]. 水利科技与经济,2005,11(9):526-527.
[4] 杨柳俊. 阳鸿石油码头水环境风险事故影响评价[J]. 水资源保护,2005,21(9):46-48.
[5] 石剑荣. 水体扩散衍生公式在环境风险评价中的应用[J]. 水科学进展,2005,16(1):92-102.
[6] 刘晓东,卢磊. 长江感潮河段码头油污染事故风险影响预测[J]. 环境科学与技术,2007,30(5):58-60.
[7] 畅明琦,刘俊萍,黄强. 突发性水资源安全风险[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(3):281-285.
[8] 刘晓东,姚琪,王鹏. 长江口北支基于混合网格的通量差分裂水水质计算模式[J]. 水动力学研究与进展,2004,19(5):565-570.

(收稿日期 2008-05-21 编辑 高渭文)