

基于 MIKE11 的突发性水污染事故模拟 及应急机制研究

余歆睿¹, 刘蔚^{2*}

(1. 苏州市水利工程管理处, 江苏 苏州 215151; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 以苏州市西塘河平原河网为研究对象, 基于 MIKE11 模型构建了突发性水污染事故预测模型, 模拟确定了西塘河正常引水条件下的污染物时间—迁移距离曲线, 进一步假定“水溶性高危险化学品 A”泄露污染工况, 模拟得到不同监测断面污染物浓度随时间变化情况, 以及同一时刻不同监测断面污染物浓度情况。以此为基础, 建立了一套西塘河突发性水污染事故应急机制, 为西塘河引水工程的长效管理提供定量化及体系化依据。

关键词: 西塘河; 突发性水污染事故; MIKE11; 模拟; 应急机制

中图分类号: X522

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 03-0043-05

Study on simulation and emergency mechanism of sudden water pollution accident based on MIKE11

YU Xinrui¹, LIU Wei^{2*}

(1. Suzhou water conservancy project management department, Suzhou 215151, Jiangsu;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 211098, Jiangsu)

Abstract: Taking Xitang River Plain River network in Suzhou City as the research object, the prediction model of sudden water pollution accident was built based on MIKE11 model. Simulations to determine the time-migration distance curve of pollutants under normal water diversion conditions in Xitang River. Further assumed the leakage pollution condition of water-soluble high-risk chemicals A, the simulation results showed that the concentrations of pollutants in different monitoring sections varied with time, and the concentration of pollutants in different monitoring sections was monitored at the same time. On this basis, a set of emergency mechanism for water pollution accident in Xitang River had been established, which provided a quantitative and systematic basis for the long-term management of Xitang River Diversion Project.

Key words: Xitang River; sudden water pollution accident; MIKE11; simulation; emergency mechanism

近年来,我国突发性水污染事故的发生频次逐渐增高^[1],严重威胁了国民经济与社会的稳定发展。而苏州市作为我国著名的水乡,其高度活跃的经济态势以及繁茂交错的河网水系,使其面临

着更大的暴露威胁。因此在河道的规划及管理过程中,亟需对突发性水污染事故进行模拟研究,针对不同污染源扩散输移规律构建预警应急体系^[2],以最大限度地降低事故危害,保障区域的健康发

收稿日期: 2017-08-29

作者简介: 余歆睿 (1983-), 男, 工程师, 主要从事工程管理、运行调度等方面工作。

通讯作者: 刘蔚 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源、水生态环境保护。

展。

1 研究区概况

西塘河地处于苏州城区西北角,属平原河网水系,北起望虞河琳桥港,途径裴家圩、三角咀湖荡区,入十字洋河,穿沪宁高速公路、312国道、沪宁铁路,于钱万里桥东侧进入苏州环城河,全长约17.87 km(见图1)。河道布置水质监测站3处,监测大断面10处(见图1、图2),基础资料较完备。沿线两侧有大小支河72条,“苏州市西塘河引水工程”实施后沿线支流全部建涵闸控制或封堵,河道自身生态防护、自净功能薄弱。沿线跨河新建桥梁23座,多条交通要道横穿而过,环境暴露性较高,且周边用地类型含括电子机械工业园、农田等,存在多种可能导致水质不达标的风险源。

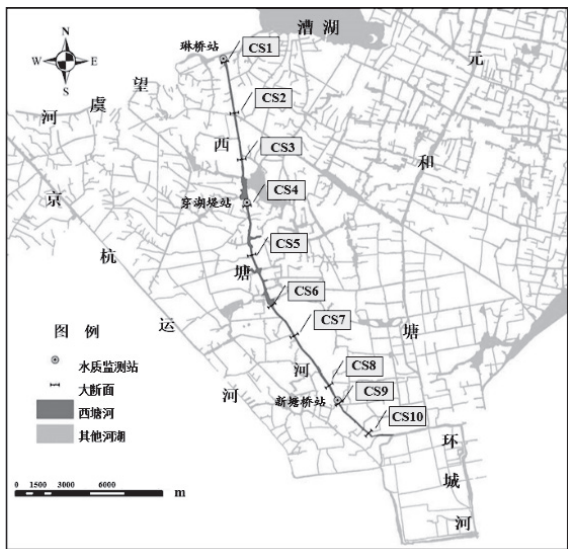


图1 西塘河水系及监测断面概化图

2 研究方法

2.1 突发性水污染事故风险模型

河流水质模型是对河道水体中可溶性污染物随空间和时间迁移转化规律的数学描述^[3], MIKE11模型在水质模拟方面的科学性已经得到学术界公认。故以 MIKE11 软件为基础,根据其 HD 和 AD 模块,耦合水量水质模型^[4],建立西塘河突发性水污染事故风险模型。

(1) 水动力(HD)模块

水动力模块中描述一维非恒定水流运动规律的控制方程组为圣维南方程组,由质量守恒的连续性方程和能量守恒的动量方程组成^[5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:

- Q —流量;
- x —沿水流方向空间坐标;
- B_w —调蓄宽度,指包括滩地在内的全部河宽;
- Z —水位;
- t —时间;
- q —旁侧入流流量(入流为正,出流为负);
- u —断面平均流速;
- g —重力加速度;
- A —主槽过水断面面积;
- B —主流断面宽度;
- n —糙率;
- R —水力半径。

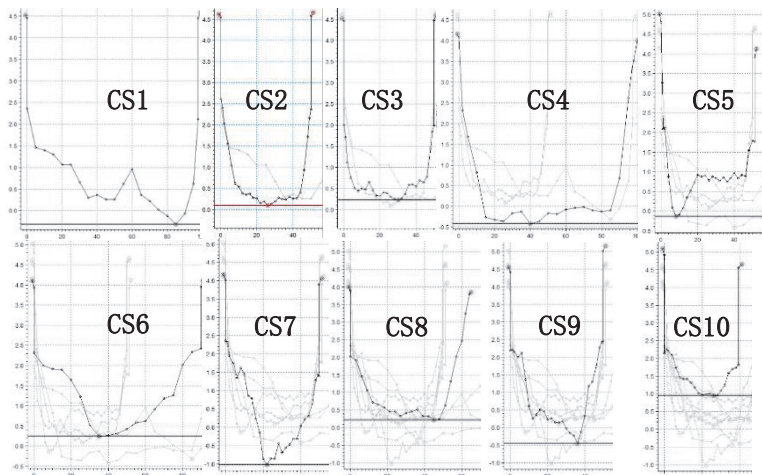


图2 监测断面形态分布图

西塘河水动力模块的构建主要包括河网文件、断面数据文件、边界条件^[6]和模型参数文件, 由于西塘河两侧闸站均已截流, 因此概化时仅考虑西塘河一条河道。①河网文件: 河段长 17.87km, 节点 18 个; ②断面文件: 根据实测 CS1-CS10 的 10 个断面属性录入生成, 具体断面分布及参数统计情况见表 1、图 2; ③边界文件: 设置上边界为 CS1(琳桥闸), 下边界为 CS10, 由于西塘河两侧闸站截流, 两侧无出、入流, 故无内部边界条件; ④参数文件: 主要包括初始数据和糙率 n 。

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N})}}$$

(2)

$$\delta = \frac{\sum \frac{|X-Y|}{X} \times 100\%}{N}$$

(3)

2.2 污染物时间—迁移距离曲线

表 1 大断面参数统计表

断面 编号	坐标 (纬度、经度)	距琳桥闸 距离 (m)	断面 编号	坐标 (纬度、经度)	距琳桥闸 距离 (m)
CS1	31° 28' 01.6"	0	CS6	31° 22' 37.1"	10323.3
	120° 31' 59.0"			120° 33' 11.8"	
CS2	31° 26' 57.5"	2210.2	CS7	31° 21' 46.5"	11839.5
	120° 32' 13.5"			120° 33' 52.7"	
CS3	31° 25' 49.3	4164.6	CS8	31° 20' 50.2"	14354.3
	120° 32' 25.8"			120° 34' 41.7"	
CS4	31° 24' 49.0"	6069.2	CS9	31° 20' 04.7"	15160.5
	120° 32' 33.7"			120° 35' 18.5"	
CS5	31° 23' 44.7"	8109.6	CS10	31° 19' 45.6"	16927.6
	120° 32' 41.2"			120° 35' 43.4"	

(2) 对流扩散 (AD) 模块

AD 模块的构建包括边界条件和模型参数文件。①边界条件: 将 AD 模块与 HD 模块进行耦合, 在 HD 模块边界的基础上加上水质边界, 选用的模拟水质组分为 COD_{Mn}、NH₃-N, 浓度数据根据相应的时间序列文件获取; 由于西塘河两侧完全截污, 故无其他内边界条件; ②参数文件: 扩散系数根据经验确定 $D=10\text{ m}^2/\text{s}$, COD_{Mn} 及 NH₃-N 的衰减系数根据经验赋初值。

(3) 模型率定与验证

模型率定验证时, 时间序列的选取原则为: ①西塘河从望虞河连续引水的时间段; ②实测数据 (包括水量和水质数据) 连续的时间段。

根据式 (2)、式 (3), 对实测值和模拟值进行对比分析, 检验两者相对误差 δ 是否满足 $< 10\%$, Pearson 相关系数 r 是否满足 $> 90\%$, 以保证模拟结果的正确性。最终率定并验证得西塘河糙率 $n=0.025$ 、COD_{Mn} 的衰减系数为 0.12/d、NH₃-N 的衰减系数为 0.060/d。

了解污染物的迁移规律, 分析计算事故发生后的缓冲时间是十分必要的。危险化学品的种类各种各样, 物理化学性质也不尽相同, 对于西塘河浅窄型河道, 影响污染物迁移的主要因素为流速和河道本身规模。本节在模型率定验证的基础上, 模拟计算西塘河在正常引水条件下 (从望虞河引水流量 $Q=25\text{ m}^3/\text{s}$ 左右) 的污染物时间—迁移距离曲线 (见图 3), 进而对突发性水污染事故的应急提供指导。

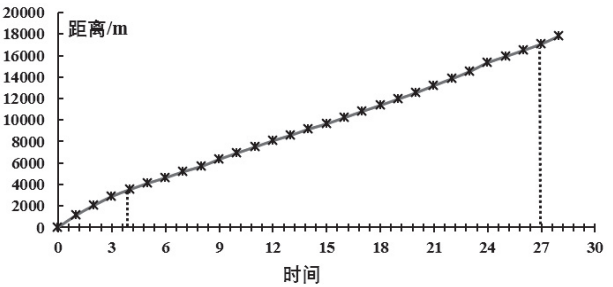


图 3 正常引水条件下西塘河污染物时间—迁移距离曲线

3 突发性水污染事故模拟

3.1 模型工况设定

西塘河沿线道路密集, 多条交通要道横穿而过, 其中 S9 苏绍高速(距离琳桥闸 1.64 km) 车辆侧翻事件时有发生。因此, 假定 2016 年 9 月 15 日上午 10 时装有可溶性高危化学品 A 的车辆于 S9 苏绍高速发生侧翻, 在 20 min 的时间内, 共有 2000 L 的化学品 A 泄流进入西塘河。假设 A 是纯物质, 可溶于水, 衰减系数为 0, 相对于水的密度为 1, 则浓度为 1 kg/L=1000000 mg/L, 排放流量为 1.67 L/s (或者设浓度为 1000 mg/L, 流量 1.67 m³/s 亦相同)。

3.2 水溶性高危化学品 A 泄漏污染事故模拟

将工况设定带入水量水质耦合模型, 增加内部边界条件。在河道正常引水情况下, 模拟泄漏事件发生后 7 个不同监测断面化学品 A 的浓度随时间的变化(见图 4), 以及同一时刻 7 个不同监测断面化学品 A 的浓度变化情况, 根据模型模拟结

果, 化学品 A 的监测统计见表 2。

由图表可知, 在正常引水情下, 化学品 A 从发生泄漏到裴家圩站监测到异常, 历时 $\Delta t=5$ h, 可为及时处理泄漏提供预警; 从泄漏断面到下边界(环城河)监测到异常, 历时 $\Delta t=27$ h, 即有 27 h 的时间采取应急措施。高危化学品 A 的浓度于 9 月 15 日 11 时达到最大值 15.7 mg/L, 虽经过长距离、长时间的稀释, 但下边界的最高浓度仍有 1.74 mg/L, 需采取必要的应急处理措施。

4 突发性水污染事故应急机制

4.1 建立应急组织机构

为使应急救援工作高效、精准、有序地开展, 必须建立西塘河突发性水污染事故“应急救援组织机构”^[7]以协调各方的工作。储备人员必须进行定期培训和演习, 掌握应急防治设备器材的操作使用。西塘河突发性水污染事故的应急组织机构应

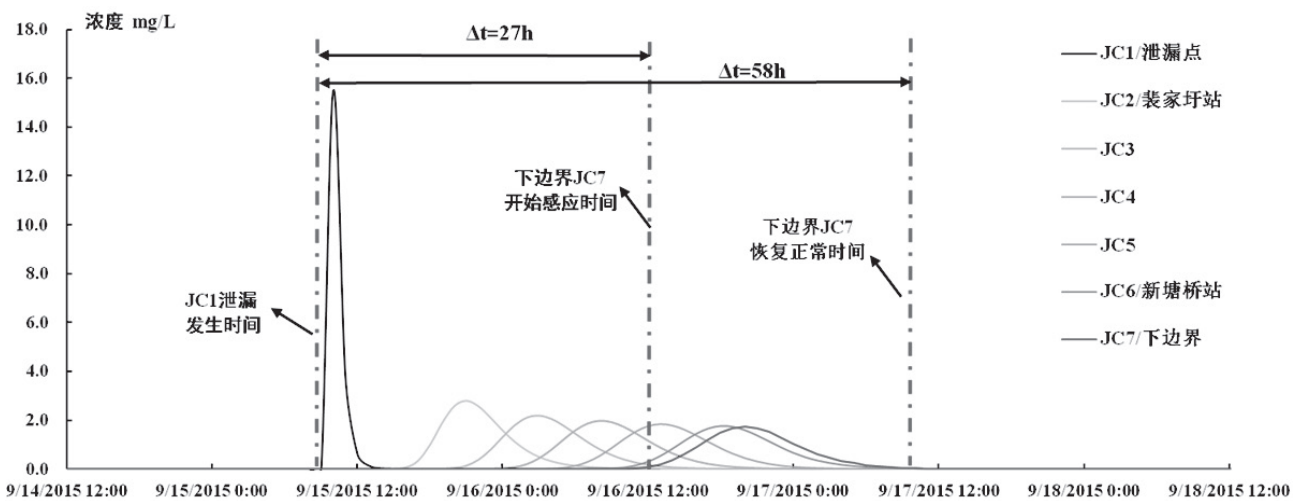


图 4 不同监测断面水溶性高危化学品 A 浓度随时间变化图

表 2 化学品 A 监测统计表

模拟要素	JS1 断面 泄漏点	JS2 断面 裴家圩站	JS6 断面 新塘桥站	JS7 断面 下边界出口口
距泄漏点距离 (m)	0	4599.2	13500.5	15267.6
事件发生到监测到异常 Δt	0	5 h	24 h	27 h
最大浓度出现时间	/	9 与 15 日 22 时	9 与 16 日 18 时	9 与 16 日 20 时
最大浓度 (mg/l)	/	2.802	1.751	1.741

包括图5所示的4个方面。

进入水体,发生扩散,则应立即关闭下游控制闸,并

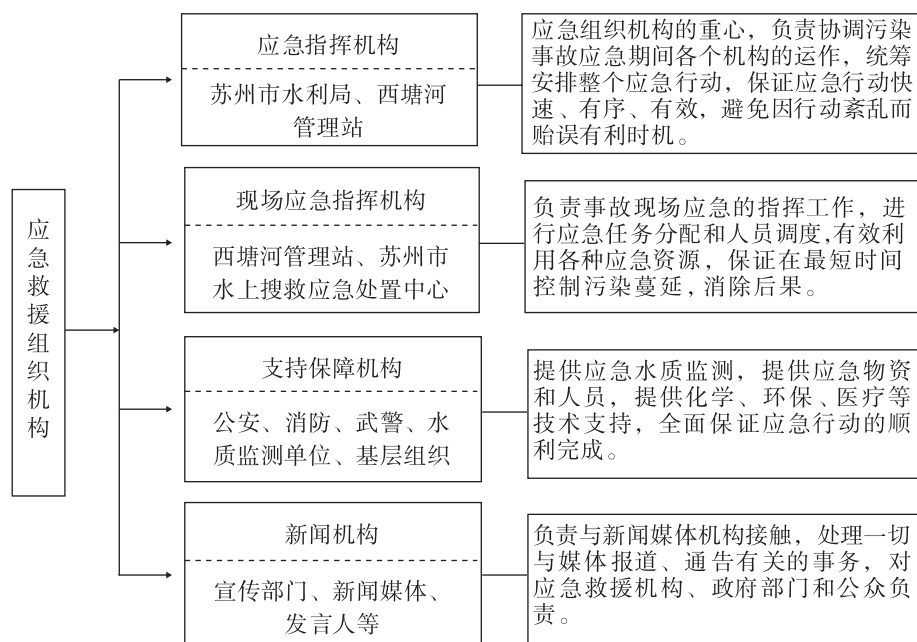


图5 西塘河突发性水污染事故应急救援组织机构图

4.2 启动应急程序

西塘河突发性水污染事故的应急程序应包含“事故报警、事故评估、应急行动、恢复/重新进入”4大步骤:

(1) 事故报警

报警途径分为人员报警与监测报警2种^[8]。人员报警即事故第一发现者直接报警或告知相关单位,该途径要求接警人员详细快速得询问事故发生时间、地点、性质、人员联系方式等;监测报警即通过西塘河沿线3处水质监测站监测到水质异常,这种方式要求当值人员迅速上报西塘河“应急指挥机构”,并保留原始水质记录,同时进行数据初步分析与跟踪监测^[9]。

(2) 事故评估

西塘河“应急指挥机构”接报后,应到达现场对污染事故的污染范围和程度做出评估。

①若事故发生点与水体保持一定距离或仅很少部分进入水体且危害程度不大,则可由西塘河“应急指挥机构”直接进行事故评估,并上报西塘河“现场应急指挥机构”。

②若污染物已部分进入水体且初判其危害较大,则应迅速上报“现场应急指挥机构”与“现场保障机构”,迅速组建专家团队,借助专业软件、仪器设备进行事故评估。

③若到达现场后发现污染物为剧毒且已大量

紧急上报区政府、“现场应急指挥机构”、“现场保障机构”与新闻机构,快速建立专家团队进行事故评估。

(3) 应急行动

突发性水污染事故的应急行动是一项系统工程,由现场指挥部、专家组、监测组、救援组、医护组、后勤组、宣传组构成。其中,“现场指挥部”由“现场应急指挥机构”下派,其余小组均由“现场指挥部”联系组建。

①现场指挥部:负责统筹安排人员物资的调度,并协调、监督各个小组间的任务安排;

②专家组:应包含水文、水工、化学等各领域专家,负责对污染程度与范围进行现场勘查,并提供现场处置指导;

③监测组:负责对污染物扩散程度的实时监测,数据直接反馈给其他各小组;

④救援组:应包含水利、公安、水上救援等专业人员,负责现场实施具体处置方案;

⑤后勤组:负责储配应急物资,并联系安排交通工具;

⑥宣传组:负责对外接触新闻媒体,处理一切与媒体采访、新闻发布相关工作。

(4) 恢复/重新进入

应急行动完成后,由监测组对河道水质进行

(下转第51页)

（上接第 47 页）

详细监测,若最终确认突发事故已得到有效控制且危害消除,则由“现场应急指挥机构”负责宣布进入恢复/重新进入状态^[10]。

4.3 污染物应急处置方式

依据本文第 4 章对水溶性高危险化学品 A 泄漏事故的模拟结果,在正常引水情况下,从泄漏断面到裴家圩站断面,历时 $\Delta t=5$ h,从泄漏断面到下边界(环城河),历时 $\Delta t=27$ h。对于化学品 A,由于监测站不一定具有完备的监测项目,因此要对路况信息进行及时了解。水溶性有毒液体物质中有一部分,如酸性、碱性、有毒液体物质^[11]在水体中污染可以用中和剂处理。但由于这些物质在水中扩散迅速,因此在开阔的水域环境中,用中和剂进行处理的效果微乎其微;在一些狭窄、敏感的水域中大的泄漏可以用中和剂处理,处理过程要与当地的环境、生态专家进行磋商,尽可能快地进行,处理过程要用 pH 监测器监控。酸的处理剂可用碳酸钠;而碱的处理剂可采用磷酸二氢钠。

5 结语

本文以苏州市西塘河为研究区,利用 MIKE11 模型构建了西塘河突发性水污染事故风险模型,并针对高危水溶性污染物 A 进行假定工况模拟,获得沿程不同断面污染物到达的时间和影响历时,确定了事故响应时间。基于此,从组织机构、应急程序等方面构建了西塘河突发性水污染事故应急机制,明确了应急队伍建设与处置流程,并确定了模拟污染物的处置方式,力求最大限度降低事故危害。这一“模拟—应急”机制为河道抵御突发性

水污染事故提供一种新思路,可广泛运用于河道及河道水利枢纽水体的保护建设中。

参考文献

- [1] 翁士创. 珠江下游突发性水污染事故预警预报系统研究[D]. 广州: 中山大学, 2008.
- [2] 李肖肖, 赵晓冬, 徐雪松. 长江南京河段液体污染物扩散模型试验[C]. Conference on Environmental Pollution and Public Health, 2012.
- [3] 汪家权, 陈众, 武君. 河流水质模型及其发展趋势[J]. 安徽师范大学学报(自科版), 2004, 27(3):242–247.
- [4] 刘伟, 刘洪超, 徐海岩. 基于 MIKE11 模型计算河水功能区纳污能力方法[J]. 东北水利水电, 2009, 27(8):69–70.
- [5] 朱永澍, 向龙, 曹飞凤, 等. 极端条件下联圩区外河网洪水安全研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(2):62–66.
- [6] 葛蕴. 苏州市古城区河网水流数值模拟可视化研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [7] 师立晨, 曾明荣, 魏利军. 事故应急救援指挥中心组织架构和运行机制探讨[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2):115–118.
- [8] 何进朝. 突发性水污染事故预警应急系统研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [9] 徐兴东. 流域突发性水污染事故风险应急防范系统研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [10] 任玉辉, 肖羽堂. 浅谈突发性水污染事故应急体系的建设[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(12):10–13.
- [11] 耿红, 杨建刚, 陈轩. 船载散装有毒有害物质溢漏应急处理技术研究[C]. 船舶防污染国际公约实施学术交流研讨会, 2008.