

太浦河溢油污染数值模拟及对策措施研究

刘增贤, 王元元, 蔡 梅

(太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434)

摘要: 太浦河是太湖流域的重要供水通道,也是上海市金泽水库的取水水源,太浦河发生溢油污染事件将对上海市供水安全产生重大影响。本文利用 MIKE21 平台构建太浦河二维溢油数值模型,模拟了太浦河发生突发溢油事件后油性物质的输移过程,分析了不同应急调水方案下,事件对金泽水库取水口的影响。结果表明太浦闸下泄量对于溢油污染团在河道中迁移起主要作用,并提出了合理的应急调度方案及应对措施。该研究可为应对太浦河溢油污染、保障上海市供水安全提供决策依据。

关键词: 太浦河; 二维数值模拟; 溢油模型; MIKE21; 应急调度

中图分类号: X522

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 01-0025-07

Numerical simulation and countermeasures of spilled oil pollution in Tai Pu River

LIU Zengxian, WANG Yuanyuan, CAI Mei

(Water Conservancy Development Research Center of Taihu Basin Authority, Ministry of Water Resource, Shanghai 200434, Shanghai)

Abstract: Tai Pu River is an important water supply channel in Taihu River Basin, and also a water intake source of Jinze reservoir in Shanghai City. The oil spill in Tai Pu River will have a major impact on the water supply security in Shanghai. The two dimensional oil spill numerical model of Tai Pu River was built using the MIKE21 platform in this paper. The transport of oily substance after sudden oil spill in Tai Pu River was simulated. The effects of different emergency water diversion programs on the intake of Jinze Reservoir were analyzed as well. The results showed that the discharge amount of Tai Pu Sluice played a major role in the migration of oil spill pollution in the river. A reasonable emergency schedule and countermeasures were proposed. The study could provide a basis for policy-making on the oil spill pollution and the safety of water supply in Shanghai.

Key words: Tai Pu River; two dimensional numerical simulation; oil spill model; MIKE21; emergency dispatch

近年来,随着石油工业和石油运输业的发展,船舶溢油泄漏、企业事故排放以及公路事故泄漏等都易引起河流突发性水污染事故。河道溢油事故规模相对较小,一旦在河流中发生溢油事故,对工业生产用水、日常生活用水、生态环境等造成较大的影响^[1-3]。

溢油事件的数值模拟主要在溢油水域的水动力模型基础上,结合溢油事件特定的油品种类、溢油量、风向、风速、水温、气温等因素,模拟油性物质在运移过程中面积、厚度、组分、性质的变化及漂散速度,为制定相应的应急预案、调度方案、处理方式和事件损害评估提供科学依据和决策支

收稿日期: 2017-08-22

作者简介: 刘增贤 (1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水利科研及水利模型研发工作。

持。

1 研究背景

太浦河全长 57.6 km, 沿途跨越江苏省、浙江省和上海市, 既是太湖流域的主要排水出路, 又是流域水资源供需调度的主要通道, 同时还担负着干旱年份向上海市供水的重任, 对流域航运和水环境起重要作用。现状太浦河平望以西段为V级航道, 平望以东段、京杭运河和頔塘为IV航道, 航运也增加了突发船运污染事件发生的风险。

2013年10月, 上海市批复同意《黄浦江上游水源地规划》, 新建金泽水库供水工程。金泽水库工程位于青浦区金泽镇西、太浦河北岸(见图1)。工程占地约 2.7 km², 其中水面积 1.92 km², 总库容 910 万 m³。经过近 3 年的建设, 2016 年 12 月 29 日, 上海市太浦河金泽水库正式投入使用, 日供水规模 351 万 m³。研究太浦河突发溢油事件, 并提出相应的应急处置措施, 对于保证上海市青浦、松江、金山、闵行和奉贤 5 区的供水安全具有重要的现实意义。

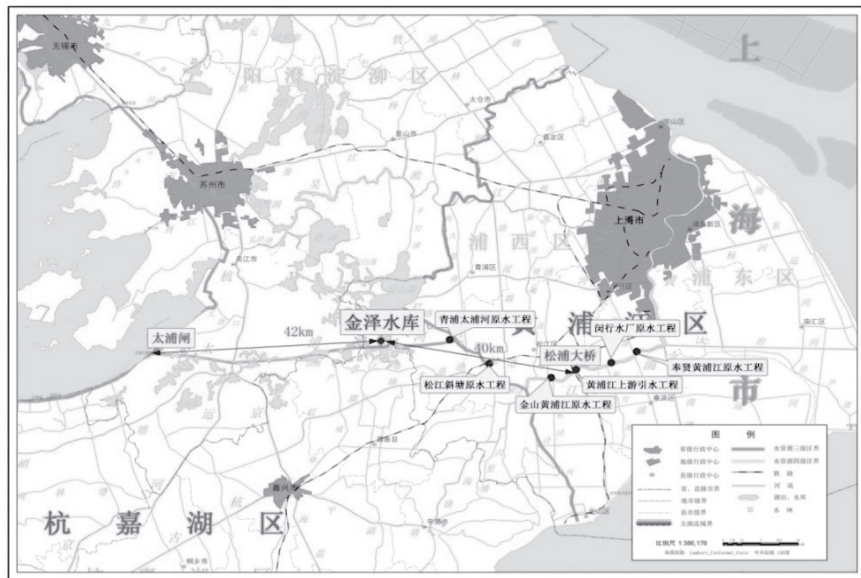


图1 金泽水库工程位置示意图

2 太浦河二维溢油模型的建立

本研究选用丹麦水环境研究所开发的 MIKE21 溢油分析(SA)模块开展模拟, 它是基于欧拉—拉格朗日理论体系, 通过对油膜在水体中的扩展、传输(水流和风场作用)、紊动扩散、分散(夹带)、蒸发、乳化、溶解等各种过程的模拟, MIKE21 SA 模

块能提供油膜随时间变化的漂移位置、厚度, 以及漂移过程中粘度、油膜表面温度、倾点等属性的变化^[4-8]。

2.1 水动力模拟原理

本文采用 MIKE 21HD 模块模拟的水动力结果为溢油扩散模型提供基础数据, 通过随机走动法来模拟粒子轨迹, 其对流扩散方程组为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} + \frac{\partial(vch)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[hD_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + hD_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[hD_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + hD_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 风化过程原理

溢油在漂移、输运等物理过程中经历着蒸发、乳化等风化过程, 直接影响溢油性质、溢油量的变化^[9]。其中蒸发率公式为

$$\frac{dQ}{dt} = -k_E A_{oil} XMP / RT \quad (2)$$

其中, $\frac{dQ}{dt}$ 为蒸发速率; K_E 为质量转移系数;

A_{oil} 为油膜面积; X 为摩尔质量; P 为饱和蒸汽压; R 为气体常数。

乳化过程主要采用含水率来表示乳化程度, 其公式如下:

$$Y_w = \frac{1}{Y_w} + (1 - e^{-KAKB(1+UW)^2 t}) K_A \quad (3)$$

式中:

Y_w —乳化物的含水量, $K_A=4.5\times 10^{-6}$; $K_B=1/Y^F W$; $Y^F W$ —最终含水率,取0.8。

2.3 太浦河二维水动力模型的建立

二维溢油模型计算的水动力条件是建立在二维水动力模型计算成果的基础上的,本次太浦河二维水动力模型建模范围为整条太浦河全长57.6 km,定义太浦闸为模型上边界,采用流量边界,太浦河出口800亩断面为模型下边界,采用太湖流域管理局研发的太湖流域水量水质模型为太浦河二维水动力模型提供上下边界及太浦河两岸支流源汇项,其他岸线则定义为陆地边界,河道底宽128~150 m,河底高程-1.5~-5.0 m。

根据太浦河地形特点通过多边形控制,采用三角网格和曲线网格相结合,对汾湖湖荡区域以及金泽取水口附近区域采用三角网格进行加密处理,以提高模拟的精确度,最终生成的非结构网格共包含3545个节点,4415个网格单元。建模成果如图2所示。

采用2014年太浦河调水试验期(2月24日~3月26日,共31 d)监测数据率定模型参数,根据参数分析及计算成果的合理性,绘制太浦河各率定断面水量水质各项指标计算值与实测值的对比图,金泽站水位过程如图3所示,金泽取水口断面

各浓度过程对比见图4所示。根据以上率定成果分析,太浦河二维水量水质模型的率定结果能较好地反映模拟区的水流运动过程 and 水质分布特征,展现该区域真实的流场情况,模型计算所选取的参数较为合理,可为本次溢油模型研究提供基本的流场背景。

2.4 太浦河二维溢油模型参数设置

太浦河二维溢油模型模拟时长为8月份共31 d,计算时间步长为1800 s。本次溢油模型重要的参数值分别为:太浦河水温30.02℃;气温33.5℃;风速3.8 m/s,风向135°(东南风);卤化量0.75;油品类型为轻油。

3 太浦河突发水污染事故模拟分析

3.1 太浦河突发溢油事件情景设置

3.1.1 溢油事件位置

本研究借鉴2013年上海朱泾镇发生的苯乙烯水污染事故,假设平望大桥或汾湖大桥附近有装载化学品的运输车辆倾倒或者船舶泄露,造成太浦河水体受到污染。

3.1.2 溢油事件时间

模拟太浦河平望大桥或者汾湖大桥发生10 t

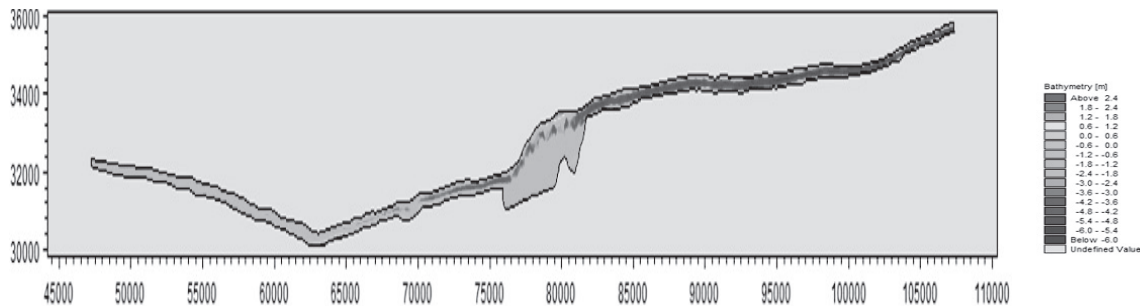


图2 太浦河二维地形概化图

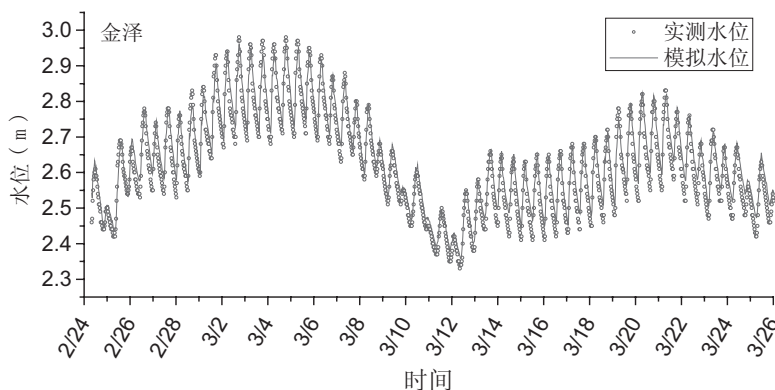


图3 金泽断面率定水位过程

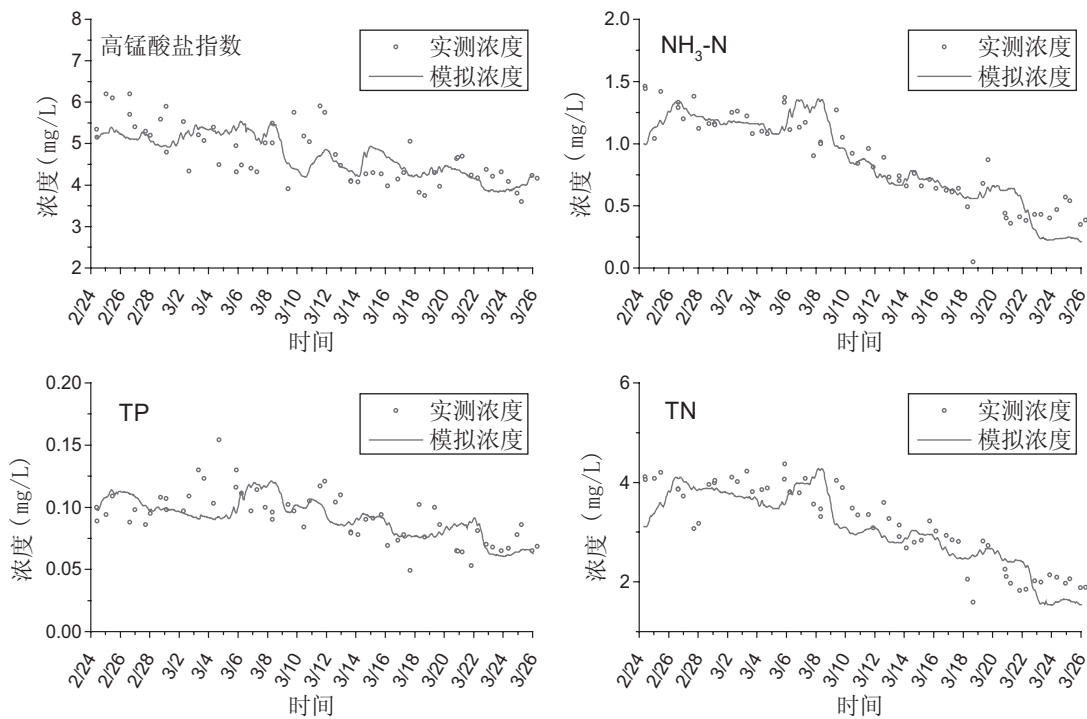


图 4 金泽取水口断面各指标浓度过程对比

油性物质泄漏事件,发生时间为 8 月 3 日 10 点,泄露事件持续时间 30 min。详见表 1。

3.2 事故影响分析

3.2.1 常规调度下平望大桥发生溢油事件模拟

在枯水年 8 月份常规调度下,太浦闸下泄流量为 90 m³/s,当 8 月 3 日 10:00 平望大桥发生 10 t 油性物质泄漏,30 min 质泄漏完毕,此时油膜面积

约 0.059 km²,最大厚度为 1.755 mm,平均厚度为 0.559 mm。油膜约以 800 m/h 度往下游漂散,油膜厚度也随着水流的运动而不断变化。油膜抵达太浦河沿线重要监测点时间及油膜面积、厚度如表 2 所示。

当平望大桥发生油性物质泄漏时,油膜以较快的速度往太浦河下游扩散,油膜面积不断扩大,

表 1 太湖下游地区发生突发水污染事件计算方案

方案	计算条件	污染事故发生点	污染源	太浦闸(泵)下泄流量
情景 A	枯水年高温干旱期(1971 年型 8 月份)	平望大桥	油性物质 10 t 在 30 min 之内排入河道	常规 90 m ³ /s
情景 B		汾湖大桥		常规 90 m ³ /s

注:根据 2002 ~ 2012 年太浦闸逐月泄水量统计表,8 月平均泄水量 2.440 亿方,计算可得平均流量为 94.136 m³/s。

表 2 平望大桥漏油事件油膜污染统计表

油膜抵达点	距漏油历时(h)	抵达此地时间	大部分油膜离开此地时间	油膜面积(km ²)	平均厚度(mm)
平望大桥	0	8 月 3 日 10:00	8 月 3 日 11:30	0.059	0.559
汾湖大桥	62.5	8 月 6 日 0:30	8 月 7 日 19:00	0.160	0.524
金泽水库	76.5	8 月 6 日 14:30	8 月 8 日 16:00	0.167	0.501
练塘大桥	107.5	8 月 7 日 21:30	8 月 11 日 00:00	0.175	0.477
太浦河出口	112	8 月 8 日 2:00	8 月 11 日 20:00	0.191	0.437

油膜的平均厚度受水流的冲散作用, 越来越薄。油膜会在 76.5 h 到达金泽水库断面, 对金泽水库取水口水质影响时长约为 49.5 h 油性污染物约 112 h 后, 到达太浦河出口, 油性物质泄漏 202 h 后, 大部分油性物质完全漂离太浦河, 仍有部分在河湾中滞留的油膜不断释放油性物质, 对太浦河造成持续污染。

3.2.2 常规调度下汾湖大桥发生溢油事件模拟

当 8 月 3 日 10:00 时汾湖大桥处发生 10 t 油性物质泄漏, 在 30 min 后油性物质泄漏完毕, 此时油膜面积约 0.059 km², 最大厚度为 2.182 mm, 平均厚度为 0.483 mm。油膜约以 800 m/h 的速度往下游漂散, 油膜厚度也随着水流的运动而不断变化, 见表 3。

在距离金泽水库较近的汾湖大桥附近发生大量油性物质泄漏时, 若不采取任何应急措施, 油膜会在 8 h 到达金泽水库取水口, 滞留约 3.5 h 会对金泽水库取水口水质产生影响。

3.3 应急调度方案及效果分析

3.3.1 应急方案设计

根据《太湖流域洪水与水量调度方案》确定的太浦河闸泵工程水量调度原则: 为保障太湖下游地区供水安全, 原则上太浦闸下泄流量不低于 50 m³/s; 当太湖下游地区发生饮用水水源地水质恶化或突发水污染事件时, 可加大太浦闸供水流量, 必要时启动太浦河泵站增加流量。另外, 2013 年上海朱泾镇发生的苯乙烯水污染应急监测数据表明, 太浦河大流量供水对抑制污染物随潮水上

溯、增大水体稀释能力, 加快污染物下移、减短取水口受影响时间, 起到了积极的作用。

借鉴以往应对突发水污染事件经验, 采取增大太浦河下泄流量来应对污染事件。本研究共拟定了 2 套应急方案, 详见表 4。

3.3.2 平望大桥发生突发溢油事件应急模拟

针对平望大桥发生突发溢油事件, 太浦闸(泵)分别加大下泄流量至 200 m³/s 或者 300 m³/s, 发生溢油事故后油膜抵达各断面历时及油膜变化情况对比如图 5 所示。

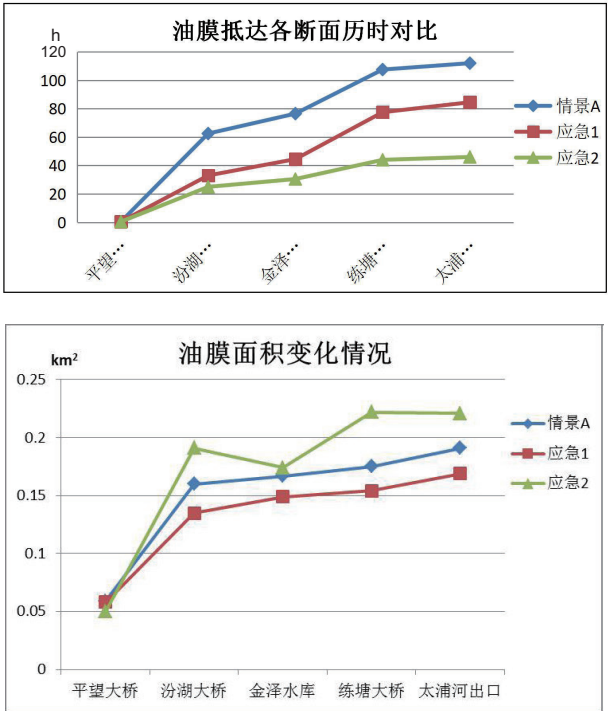


表 3 汾湖大桥漏油事件油膜污染统计表

油膜抵达点	距漏油历时 (h)	抵达此时时间	大部分油膜离开此地时间	油膜面积 (km ²)	平均厚度 (mm)
汾湖大桥	0	8 月 3 日 10:00	8 月 3 日 11:30	0.059	0.483
金泽水库	8	8 月 3 日 18:00	8 月 3 日 21:30	0.248	0.257
练塘大桥	45.5	8 月 5 日 6:30	8 月 6 日 7:30	0.190	0.447
太浦河出口	48.5	8 月 5 日 10:30	8 月 6 日 11:00	0.231	0.366

表 4 太浦河突发水污染事件短期应急调控研究方案设计

方案	计算条件	污染源	太浦闸 (泵) 下泄流量
应急方案 1	枯水年高温干旱期	油性物质 10 t 在 30 min 之内	200 m ³ /s
应急方案 2	(1971 年型 8 月份)	排入河道	300 m ³ /s

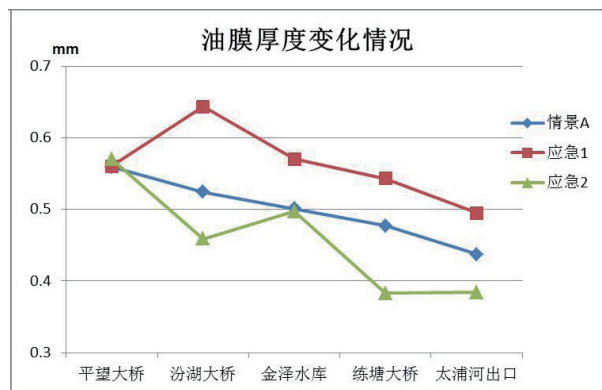


图5 平望大桥发生溢油事故后油膜变化情况对比

较大的下泄量会加剧油膜的冲散作用,不利于进行打捞、投加吸附剂等物理、化学处置。应急方案1下,太浦闸按 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 下泄,既能推动油膜向下游扩散,又不至于把油膜冲散,且在油膜在河道湖湾处集聚明显,利于进行打捞、投加吸附剂等物理、化学处置,故而在情景A下,推荐采取应急方案1。

3.3.3 汾湖大桥发生突发溢油事件应急模拟

针对汾湖大桥发生突发溢油事件,太浦闸(泵)分别加大下泄流量至 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 或者 $300\text{ m}^3/\text{s}$,发生溢油事故后油膜抵达各断面历时及油膜形状变化情况对比如图6所示。

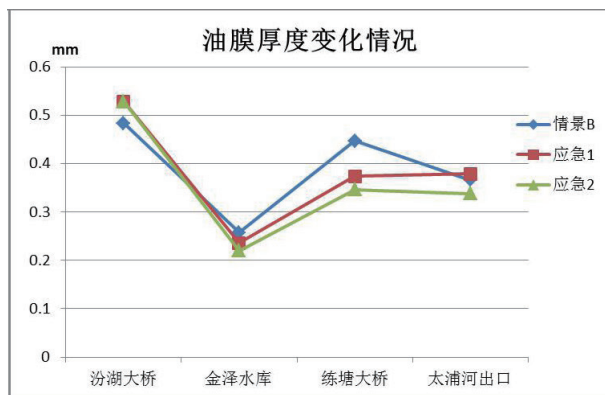
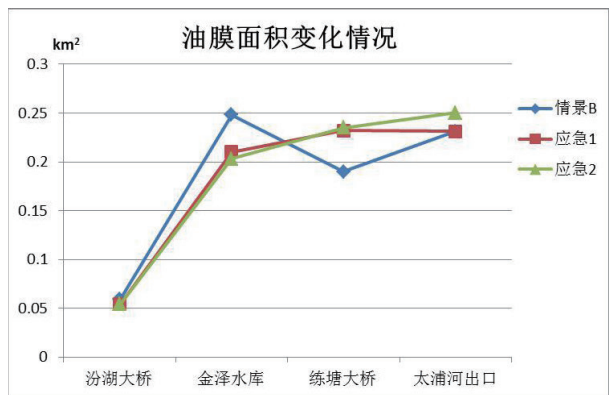
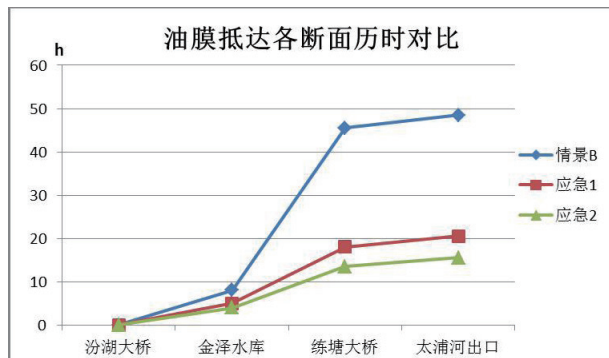


图6 汾湖大桥发生溢油事故后油膜变化情况对比

综合油膜面积和油膜厚度来看,情景B下,太浦闸按 $90\text{ m}^3/\text{s}$ 下泄,油膜面积维持在 $0.05 \sim 0.25\text{ km}^2$ 之间,油膜平均厚度在 $0.25 \sim 0.5\text{ mm}$ 之间;实施应急方案1和应急方案2,均会推动油膜快速向下游移动,由于太浦闸距离事故点较远,加大流量对油膜扩散影响较小,应急方案1和应急方案2起到的作用相当,相比而言,应急方案2在金泽水库取水口处油膜面积和厚度均最小,推荐应急方案2。

4 太浦河突发溢油事件应对措施

根据特定年份常规数值的模拟分析,总结出太浦河发生突发溢油事件的一般规律,提出突发溢油事件应对措施及响应分级如下:

4.1 突发油性物质泄漏事件响应时间及应急响应等级

当平望大桥发生漏油事件时,3种调度方案中油膜最快可在 30.5 h 之后到达金泽水库,而当汾湖大桥发生漏油事件之后,油膜在 4 h 之后即可到达,因此尽量当油膜尚未到达金泽水库时,要适当控制太浦河闸泵的下泄量,给油膜处置预留好充分的时间。

建议以溢油事故点与金泽水库的距离和油膜运动速度来划分响应等级:①当溢油事故点距离金泽水库 30 km 以上,且油膜运动速度小于 800 m/h 时,启动Ⅲ级应急响应,需在 72 h 内完成应急处置;②当溢油事故点距离金泽水库 30 km 以上,且油膜运动速度大于 800 m/h 且小于 1200 m/h 时,启动Ⅱ级应急响应。需在 48 h 内完成应急处置;③当溢油事故点距离金泽水库 30 km 以上,且油膜运动速度大于 1500 m/h 时,或当溢油事故点距

离金泽水库 10 km 以内时,启动 I 级应急响应,需在 24 h 内基本消除水中污染物,以保障金泽水库供水安全。

4.2 金泽水库取水口关闭时间

通过分析油膜在金泽水库监测点的滞留时间,可以看出油膜对金泽的影响时间在 20 ~ 50 h 之间,因此金泽水库应当在监测到上游发生轻油泄漏事件后,提前做好蓄水准备,以便在 48 h (2 d) 之内无法取水时,充分利用应急水源。

4.3 太浦河闸泵调度

通过上述不同情景方案模拟统计分析的结果来看,盲目加大太浦河闸泵下泄量,对于控制油性物质污染物、减少其影响并不完全可行。需要根据实时情况做出分析决策,当突发污染事件刚发生,距离水源地取水口较远时,应当减少闸泵下泄量,以实现将油性污染物围起来集中处置;当油性污染物接近水源地或者已经影响到水源地取水时,应当适当加大闸泵下泄量,以实现将油性污染物冲散,降低污染物厚度。太浦闸 200 m³/s 的下泄量能够使得油膜面积较小,相对厚度较大,有利于针对油膜开展包围打捞等应急处理。

4.4 太浦河两岸及支流对于污染物的控制

根据相关研究发现,风场和河道形态是影响油膜在河道中漂移速度和影响范围的重要因素。当风速较大时,油膜在漂移过程中极易在弯曲河道靠岸,在河湾处集聚,这是河道中油膜有别于海洋中的特殊运动规律,对应急决策和现场清污有重要的意义。同时,还应当加强太浦河两岸支流口门建筑物的控制,在突发水污染事件期间,尽量将沿岸口门关闭,避免污染物向支流扩散,减少两岸支流对污染物形态、面积、厚度所引起的不确定性变化,加大污染物清理难度。

5 结论

通过构建太浦河二维溢油模型,模拟平望大桥、汾湖大桥发生突发溢油事件后油性物质的运

移过程。结合溢油事件特性,设计太浦河突发溢油事件短期应急调控方案,定量分析了不同调水方案对污染物扩散的影响。从模型结果可以看出,当太浦河上发生油性物质泄漏,实施加大太浦闸下泄量应急调度时,并非流量越大越好,要根据事故发生位置和调度目的作具体分析。采用数值模型的方法能够为突发溢油处理提供应急决策依据,为保障金泽水库供水安全提出了科学的应急响应预案。

参考文献:

- [1] 袁群. 浅析长江航运油污染现状、原因及其对策[J]. 水运管理, 2004 (5):22-24.
- [2] 徐祖信,尹海龙. 黄浦江干流二维水动力实时数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2003 (3): 372-378.
- [3] 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.
- [4] 许婷. 丹麦. MIKE21 模型概述及应用实例[J]. 水利科技与经济, 2010, 16 (8):867-869.
- [5] 赵如箱. 浅谈溢油模型的发展及其应用设想[J]. 交通环保, 2000 (4):15-17.
- [6] 殷健,陈志铮,梁珊珊. 长江口区域溢油事故对青草沙水源地影响的数值模拟[J]. 净水技术, 2014, 33 (4):41-48.
- [7] 马晓雪,杨军,毛媛媛,等. 平原河网区突发性水污染事件应急调水数值模拟分析[J]. 中国农村水利水电, 2015 (4):47-49.
- [8] 吴兆春. 潮汐河道溢油扩展漂移的数值模拟[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [9] 匡翠萍,邢飞,刘曙光,等. 黄浦江突发水污染事件应急措施数值计算分析[J]. 人民长江, 2010, 41 (7): 43-47.
- [10] 黄成,赵利平,肖剑. 广西近海溢油扩散数值模拟[J]. 河道港口, 2013, 34 (2):174-179.