第30卷第1期
2019年 2月

水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering

Vol. 30 No. 1
Feb. ,2019

DOI:10. 11705/j. issn. 1672 - 643X. 2019. 01. 16

闽江航道建设对下游敏感目标溢油风险预测

肖 洵[1], 逄 勇[1,2], 刘一童[1], 钟海涛[1]

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 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)

摘 要: 溢油事故是不可逆的环境污染事故,会破坏水体水质,危害生态系统,因而溢油事故的危害不容小觑。闽江下游有多个取水口及湿地保护区,闽江航道施工期及运营期均有溢油事故发生的风险,可能会对环境敏感目标造成影响。根据工程区域情况以及工程建设要求,以二维非稳态模型为平台,建立闽江下游水动力模型,基于实测资料进行模型可靠性分析。在准确的水动力模型基础上,以“油粒子”跟踪技术为指导,建立闽江航道溢油风险预测模型,对闽江下游航道建设施工期及运营期最不利条件下的溢油事故风险进行预测研究,可为闽江应急事故处置、溢油损害评价及取水口的安全管理提供支持和帮助。所提出的溢油事故风险预测方法及思路,能够对溢油事故的积极预防提供一定的参考依据。

关键词: 溢油; 二维非稳态模型; 水动力模型; 溢油预测模型; 闽江

中图分类号:X522　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2019)01-0104-10

Oil spill risk prediction of downstream sensitive targets during Minjiang River channel construction

XIAO Xun[1], **PANG Yong**[1,2], **LIU Yitong**[1], **ZHONG Haitao**[1]

(1. *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes*, *Ministry of Education*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Oil spill is an irreversible environmental pollution accident which will damage the water quality and destroy ecosystem. The risk of oil spill should not be overlooked. Minjiang River downstream has a number of water intakes and wetland protected areas. During Minjiang channel construction period and operation period there are risks of oil spills, which may have an impact on the environmentally sensitive targets. According to the conditions of the project area and the requirements of the project construction, this paper uses the two – dimensional unsteady model as a platform to establish the hydrodynamic model of Minjiang River downstream, then analysize Model reliability based on measured data. Based on the accurate hydrodynamic model, establish the oil spill accident prediction model guided by “oil particle” tracking technology to predict the risk of oil spill accident under the most unfavorable conditions of the construction and operation period of the Minjiang River, which provide support for the MInjiang emergency response, oil spill damage assessment and safety management of water intake. Presenting a set of methods and ideas for risk prediction of oil spill accidents and providing a reference for the active prevention of oil spill accidents.

Key words: oil spill; two-dimensional unsteady model; hydrodynamic model; oil spill prediction model; Minjiang River

1 研究背景

由于工业文明的迅速崛起,石油已然成为现代经济的命脉,然而溢油事故也频频发生。溢油是由于人类活动导致的液态石油碳氢化合物向环境的释放,是污染的一种形式。船舶溢油大致分为两类:一

收稿日期:2018-04-24; **修回日期**:2018-06-26
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2018ZX07208 - 003)
作者简介:肖 洵(1994-),女,广东人,硕士研究生,研究方向为水环境模拟与预测。
通讯作者:逄 勇(1958-),男,山东胶州人,博士,教授,博士生导师,主要从事环境规划与影响评价研究。

类是因错开阀门等操作不当导致的“操作性溢油”;一类是因碰撞、搁、触礁等海损事故导致的“事故性溢油”[1]。据统计,1973 – 2008 年的 36 年间,我国沿海发生了 2826 起船舶溢油事故。我国沿海船舶溢油事故,尤其 10 t 以上中型、大型、特大事故中,碰撞占据主要原因,其中 10 ~ 49 t 溢油事故中碰撞事故占到总事故的 55% ;50 ~ 699 t 溢油事故中碰撞事故占到 69% ;700 t 以上溢油事故中碰撞事故占到 42% 。沉痛的历史和残酷的现实告诉我们,溢油事故会污染水体,干扰毁坏生态系统,对环境造成不可逆的损害[2-4]。人类在震惊于事故破坏性的同时,也拉响了警钟,开始着力于溢油事故的预防及事后控制[5]。

相对于海洋溢油,河流溢油事故规模较小。但河流溢油事故诱因偏多,并且河流功能丰富,既包括航运运输,也包括取水水源地、工业用水、农业用水、水产养殖等诸多功能。因此,河流溢油的发生对人类生活用水、居住环境等均会产生不良影响[6-9],需要积极预防和及时控制,对溢油事故易发区进行溢油风险评价是非常必要的。

本文通过建立闽江下游水动力模型及溢油预测模型,对闽江下游航道建设施工期及运营期最不利条件下的溢油事故风险进行模拟预测分析研究,以期为闽江应急事故处置、损害评价及取水口的安全管理提供支持。

图 1　工程位置分布图

类比我国沿海和珠江口事故发生频率,按照闽江货物吞吐量考虑,同时兼顾进出港船舶数量增长水平,2015 年操作性事故发生概率 5 ~ 9 起。随着港口船舶安全和防污染管理水平和船员素质的提高,操作性事故发生概率会有所降低,但操作性溢油事故发生概率仍然保持在 0.5 ~ 0.8 年发生 1 次的范围内。通过 2001 – 2008 年长江口与珠江口水域所发生的海损性溢油事故统计,同时参考天津港某作业区统计资料,依据天津港水域各类船舶数量、珠江口船舶数量,对本项目所在区域大型非油类船舶的事故发生概率进行分析和预测得到闽江航道海损性事故发生概率约为每 8 ~ 20 a 发生一起。因此,本文按照闽江货物吞吐量考虑,同时兼顾进出口船舶数增长。对闽江航道施工期及运营期溢油风险进行操作性事故发生概率的预测分析。

2　研究区域概况

闽江下游从水口水电站经闽江南港到马尾罗星塔干流航道的总长度为 91.22 km。此段习惯通航里程 79 km,是内河 IV 级航道。航道建设工程主要包含疏浚工程、锚地工程、码头新建工程。工程区域内有两处疏浚区,分别为闽江南港航道疏浚区、闽清大桥疏浚区。为了满足闽江干流通航后船舶锚泊待装、待卸等需要,拟调整马杭洲锚地;在白沙镇附近设立白沙锚地;在闽清渡口作业区下游的马坪村附近设立马坪锚地,共计 3 个 1 000 t 级锚地。重建湾边水上搜救站趸船码头和永丰水上搜救站趸船码头。两处疏浚区、三处锚地、两处码头的具体平面位置详见图 1。

评价范围内水环境敏感目标有 12 个,分别为:西北区水厂取水口、福州市马尾水厂闽江备用水源保护区、飞凤山水厂水源保护区、义序水厂取水口、福清闽江调水工程峡南生活用水地表水源保护区、长乐市炎山饮用水源保护区、福州城门水厂饮用水源保护区、东南水厂取水口、上街镇清源水厂侯官水源保护区、闽侯自来水厂水源地、闽清县白石坑水厂取水口、闽江竹岐取水泵站。与本项目有关的生态湿地有 4 个,分别为:福州道庆洲 – 芦岐洲湿地公园、福州帝封江湿地公园、福州塔礁洲湿地公园、闽侯江滨湿地公园。评价区域饮用水源地保护区、生态湿地位置示意图见图 2。

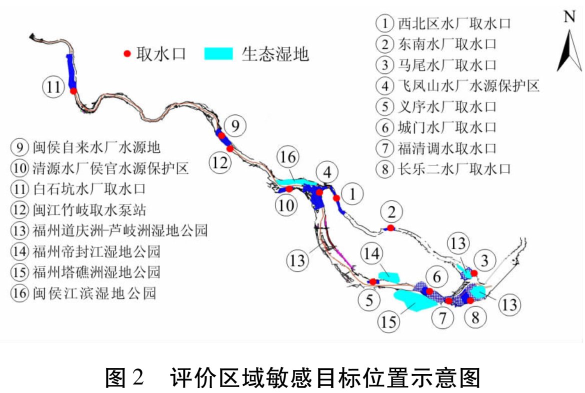

图 2　评价区域敏感目标位置示意图

3　研究方法

根据地形、边界条件等建立闽江下游二维水动

力模拟模型,确定模型计算条件并进行模型率定验证;评价水域溢油的风险等级,确定船舶溢油量、液体化工品泄露量、溢油发生地点;确定溢油设计水文条件及风况,建立闽江溢油模型,对溢油发生位置、溢油扩展、溢油漂移路径,油粒子蒸发、油的乳化等风化过程等进行模拟预测;通过闽江溢油模型,预测闽江水域溢油风险,评价溢油风险,提出预防措施[10-12]。

3.1 闽江下游水动力模型建立

溢油发生后在水体里的扩散主要受潮流、波浪等水动力的影响。因此,准确的水动力模拟条件是进行溢油数值模拟计算的基础[13-14]。本次水动力模型的建立采用平面二维模型来研究工程水域的水动力情况。建立闽江水口电站－闽江外海水环境模型,全长 160 km。模型的水下高程利用福建省航道管理局勘测中心 2014 年 11 月闽江水口－罗星塔测图、金刚腿－川石的海图资料以 ETOPO1 全球海底地形数据,模型计算基准面为闽江当地的罗零高程。模型计算使用三角形网格进行划分,内河网格边长约 120～140 m,航道局部加密至 50～100 m,外海网格边长约为 350～400 m,开边界网格边长 800 m,并对部分深窄河道进行加密,共划分节点 28 504 个、网格 53 751 个。该水动力模型的运算时间步长为 $t=30$ s,计算总时长为 1 个月[15]。

已知 2013 年 12 月 7 日－8 日在闽江竹岐、文山里、科贡、白岩潭、金刚腿、琯头水文站同步水文监测资料,其中另有科贡、文山里和金刚腿水文站的同步监测流量资料。根据率定得到闽江及外海海域糙率系数为 0.015～0.031;风拖曳系数为 0.001～0.0015。各率定断面水位及流量的计算误差见表 1、2,水位及流量的计算值与实测值对比见图 3、4。模型计算结果的水位绝对误差最大为 21 cm,流量相对误差最大为 24.95%,误差基本满足水位流量要求。

表 1 各率定断面水位计算值平均绝对误差 cm

竹岐	文山里	科贡	白岩潭	金刚腿	琯头
17	19	21	13	14	13

表 2 各率定断面流量计算值相对误差 %

科贡	文山里	金刚腿
24.95	22.3	23.97

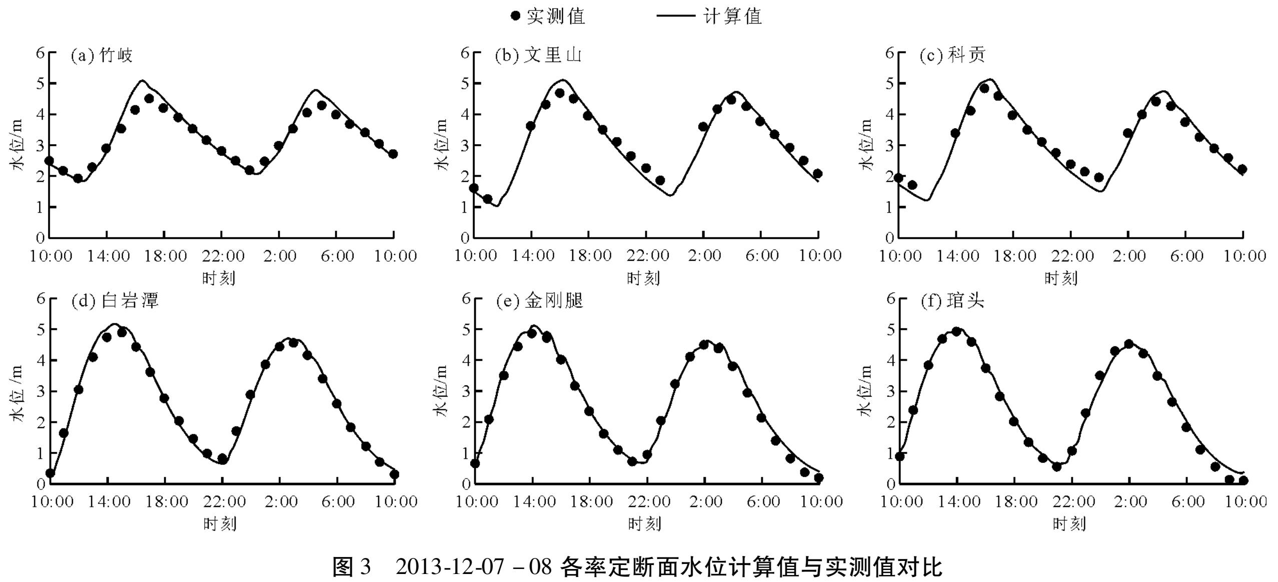

图 3 2013-12-07－08 各率定断面水位计算值与实测值对比

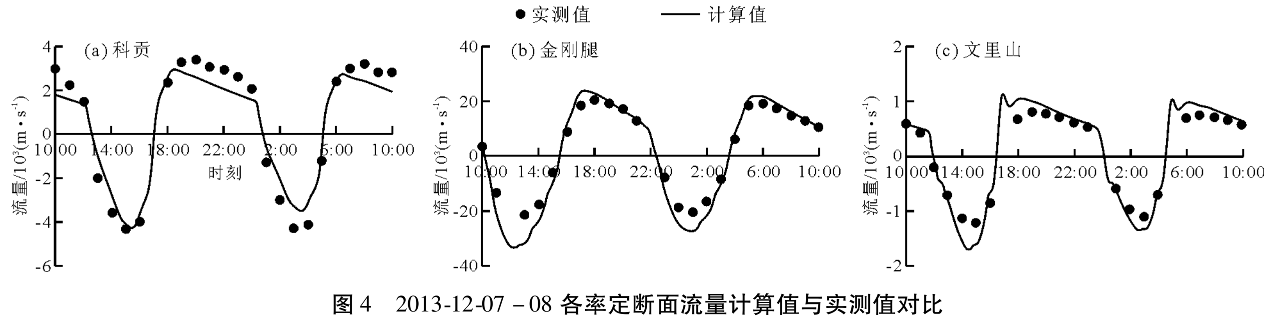

图 4 2013-12-07－08 各率定断面流量计算值与实测值对比

3.2 闽江下游溢油模型建立

3.2.1 溢油模型基本公式　溢出的油到达水体后会在水面上扩展、漂移,发生溶解、蒸发、沉淀、乳化等作用,然后渐渐消失。“油粒子”模型将油膜离散成相互独立的油粒子,通过模拟每个油粒子的运动从而预测溢油的输移、风化过程,以到达追踪的目的。“油粒子”模型具有较高的可靠性和稳定性[16-18]。

(1)输移过程。油粒子的输移会导致油粒子的位置发生转移,但并不影响其组分的改变。扩展、漂移、扩散等作用都属于输移过程。

①扩展运动:可用修正过的 Fay 重力 - 黏力公式描述油粒子的扩展运动情况[19]:

$$\left(\frac{\mathrm{d}A_{oil}}{\mathrm{d}t}\right) = K_a \cdot A_{oil}^{1/3} \cdot \left(\frac{V_{oil}}{A_{oil}}\right)^{4/3} \tag{1}$$

式中:A_{oil} 为油膜面积,$A_{oil} = \pi R_{oil}^2$,R_{oil} 为油膜直径;t 为时间;K_a 为系数;V_{oil} 为油膜体积,其计算公式为:$V_{oil} = R_{oil}^2 \cdot \pi \cdot h_s$,$h_s$ 为油膜初始厚度,$h_s = 10$ cm。

② 漂移运动:漂移运动主要由水流以及风拽力决定,通过如下的权重公式计算油粒子总漂移速度:

$$U_{tot} = C_w(z) \cdot U_w + U_s \tag{2}$$

式中:C_w 为风漂移系数,通常在 0.03 ~ 0.04 之间取值;U_w 为水面以上 10 m 处的风速,m/s;U_s 为水体表面流速,m/s。风速可通过气象部的数据得知,而流速需要通过二维水动力模型计算得到平均垂向流速,从而估算得到垂向流速分布情况。

③ 紊动扩散:在各向同性的水平扩散的情况下,在 Δt 时间内,可通过公式(3)计算得到 α 方向上的可能扩散路程:

$$S_\alpha = [R]_{-1}^{1} \sqrt{6D_\alpha \cdot \Delta t_p} \tag{3}$$

式中:S_α 为扩散路程;D_α 为 α 方向上的扩散系数;$[R]_{-1}^{1}$ 为 -1 与 1 之间的任意值;Δt_p 为时间。

(2)风化过程。风化过程会影响油粒子的组分但不会影响油粒子的位置转移。蒸发、溶解、乳化等作用均属于风化过程。

①蒸发:蒸发的影响因素包括太阳照射强度、水体温度、风速、气温等。假设:内部的油膜扩散是无限制的扩散(气温在 0℃ 以上和油膜厚度小于 5 ~ 10 cm 时扩散基本是无限制的扩散);油膜完全混合;与蒸汽压相比,不考虑大气中的油组分分压。通过公式(4)计算蒸发率:

$$N_i^e = k_{ei} \cdot \frac{P_i^{SAT}}{RT} \cdot \frac{M_i}{\rho_i} \cdot X \tag{4}$$

式中:N^e 为蒸发率;M 为分子量的大小;P^{SAT} 为蒸汽压力值;ρ 为油组分密度;T 为温度;k_e 为物质转移系数;R 为气体常数值;i 为各种油组分类型。k_{ei} 可由公式(5)估算得到:

$$k_{ei} = k \cdot A_{oil}^{0.045} \cdot Sc_i^{-2/3} \cdot U_w^{0.78} \tag{5}$$

式中:Sc_i 为表组分 i 的蒸气 Schmidts 数;k 为蒸发系数。

②乳化。

a. 水包油乳化物:溢油发生后,油通过溶解、扩散、沉淀等方式向水中运动,其中扩散是较为重要的过程。扩散作用的发生是由于水流的紊动使油膜破裂,油滴被水分子包围,进而形成了水包油的乳化物。这些乳化物有活性剂粘附于表面,活性剂的作用使得乳化物无法返回到油膜中去。通过公式(6)测算扩散过程中油膜的减少量:

$$D = D_a \cdot D_b \tag{6}$$

式中:D_a 为水体中油的含量;D_b 为已经进入水体中无法返回油膜系统的油量。

$$D_a = \frac{0.11(1 + U_w)^2}{3600} \tag{7}$$

$$D_b = \frac{1}{1 + 50\mu_{oil} \cdot h_s \cdot r_{ow}} \tag{8}$$

式中:r_{ow} 为油 - 水界面的张力;μ_{oil} 为油的黏度。

b. 油包水乳化物:油在水中会吸收大量的水分,可通过下述的平衡方程得到油中含水率变化:

$$\frac{\mathrm{d}y_w}{\mathrm{d}t} = R_1 - R_2 \tag{9}$$

式中:R_1 为水的吸收速率;R_2 为水的释出速率。

$$R_1 = K_1 \cdot \frac{(1 + U_w)^2}{\mu_{oil}} \cdot (y_w^{\max} - y_w) \tag{10}$$

$$R_2 = K_2 \cdot \frac{1}{As \cdot Wax \cdot \mu_{oil}} \cdot y_w \tag{11}$$

式中:$y_w^{\max}$ 为油膜所能达到的最大含水率;y_w 为实际油中的含水率;As 为沥青在油中的重量比含量;K_1 为吸收系数;K_2 为释放系数;Wax 为总石蜡在油中的重量比含量[20]。

③ 溶解:溶解率表示如下:

$$\frac{\mathrm{d}V_{dsi}}{\mathrm{d}t} = Ks_i \cdot C_i^{sat} \cdot X_{mol_i} \cdot \frac{M_i}{\rho_i} \cdot A_{oil} \tag{12}$$

式中:C_i^{sat} 为组分 i 的溶解度;X_{mol_i} 为 i 的摩尔分数;M_i 为其摩尔重量、Ks_i 为表示组分传质推动力大小的溶解传质系数,可以通过公式(13)进行估算:

$$Ks_i = 2.36 \times 10^{-6} e_i \tag{13}$$

$$e_i = \begin{cases} 1.4 & \text{烷烃} \\ 2.2 & \text{芳香烃} \\ 1.8 & \text{精制油} \end{cases} \tag{14}$$

3.2.2 *评价水域溢油风险分析及溢油模型主要参数选取* 船用燃料油是成品油中的一种,属于易蒸发、易挥发的易燃性物质。根据物质的危险性,国家标准将物质的危害程度分为4个等级,通过中毒危害、致癌性等标准进行判别。根据残渣型船用燃料油、重柴油的性质以及物质危险性评价标准[21]。分析可知,燃料油属于易燃化学品但无毒无腐蚀性,可评定为Ⅲ类中度危害。

闽江下游二维溢油模型是在二维水动力模型基础上建立的,重点在于定义各种模型参数值。根据闽江下游实际情况,以及参考文献[22-24],确定溢油模型参数,闽江下游溢油模型部分参数取值见表3。

表3 闽江下游溢油模型部分模型参数取值

系数	过程	取值	系数	过程	取值
风漂移系数 C_w	对流	0.035	蒸发系数 k	蒸发	0.029
油的最大含水率	乳化	0.85	油辐射率 l_{oil}	热量迁移	0.82
吸收系数 K_1	乳化	5×10^{-7}	水辐射率 l_{water}	热量迁移	0.96
释出系数 K_2	乳化	1.2×10^{-5}	大气辐射率 l_{air}	热量迁移	0.82
传质系数 Ks_i	溶解	2.36×10^{-6}	漫射系数(Albedo)a	热量迁移	0.10

3.2.3 *船舶溢油量及溢油点确定*

(1)施工期。根据施工船型资料,施工船舶均为小于1 000 t级的船舶。施工船舶型号多为988 t和丰5型,根据船舶吨位与燃料油的关系可知,其可装载燃油总重为115 t,有2个燃油舱,其中单个燃油舱最大容积为70 m^3。

综合分析工程的实际情况,考虑在最不利的情况下,施工船舶发生碰撞造成较大型溢油事故,结合上述对船舶燃油舱的分析,模拟溢油情形为:施工期施工船舶因碰撞或搁浅而导致柴油泄露,最不利情形下,油舱单舱油全部泄露入江,即柴油的溢油量为60 t/次。

考虑到疏浚区域船舶通行频繁,且南港疏浚区附近环境保护目标较多,故选取1-1#闽江南港航道疏浚区作为溢油事故预测点位。具体位置详见图5。

(2)营运期。水口水电站大坝以下至马尾罗星塔航段属于感潮区潮段,600~1 000 t级的货船可乘潮在此感潮段通航。现阶段闽江航道的主要通航船型为自卸式散货船。1 000 t货船尺寸为:(56.0~58.0 m)(长)×9.3 m(宽)×(2.5~2.7 m)(深),600 t货船尺寸为:(50.0~52.0 m)(长)×8.5 m(宽)×(2.0~2.2 m)(深)。

根据本航道通航船舶类型分析,考虑最不利情况,环境污染风险源强按1 000 t级标准船舶油舱全部泄漏考虑,即风险源强为燃油60 t/次。泄露时间为0.5 h。

营运期选取距离环境保护区较近的锚地,上游马坪锚地距离环境敏感区较远,不选取;选取距离北港飞凤山水厂和西北区水厂取水口较近的永丰海事搜救站;湾边大桥距离下游城门水厂取水口较近,选取为溢油点;马杭洲锚地与乌龙江大桥较近,选择乌龙江大桥作为溢油点。

因此运行期溢油点为:2-1#永丰海事搜救站、2-2#湾边大桥、2-3#乌龙江大桥。具体位置详见图5。

3.2.4 *设计水文条件及风况* 根据国家相应规范、规程要求,从偏安全的角度,应采用90%保证率最枯月日均流量作为设计流量。本工程计算采用水口水库下泄流量作为本河段流量。统计水口电站近几十年的月平均流量,经频率计算得到:枯水期90%保证率的最枯月平均流量为2003年10月份的447 m^3/s。闽江为典型正规半日潮,一日内有2次高潮及2次低潮,涨潮落潮历时基本相等,约为6 h。从偏安全角度考虑,选取最不利风向和强风速5 m/s时,分析船舶溢油事故发生后对敏感目标的影响。工程对敏感点不利情况下的溢油风险预测方案见表4,点位见图5。

4 风险预测结果与讨论

4.1 施工期溢油风险预测

施工期溢油风险影响的预测点位为闽江南港航道疏浚区,由于其上下游均有环境敏感目标,故模拟在最不利风向(西北风5 m/s、东南风5 m/s)的背景风场下以及最不利释放时刻(涨潮和落潮)情况下发生溢油后的污染影响,预测闽江水域溢油风险,并提出有效预防

措施。具体模拟结果见表 5、6 和图 6 ~ 9。

表 4　对敏感点不利情况下的溢油风险预测方案

时期	方案	溢油点	位置	单舱泄漏量	风向风速	排放时刻
施工期	方案 1	1 - 1#	闽江南港航道疏浚区	燃料油：60 t	西北风，5m/s	涨潮期
	方案 2					落潮期
	方案 3				东南风，5m/s	涨潮期
	方案 4					落潮期
	方案 5	2 - 1#	永丰海事搜救站码头	燃料油：60 t	西北风，5m/s	涨潮期
	方案 6					落潮期
	方案 7				东南风，5m/s	涨潮期
	方案 8					落潮期
运行期	方案 9	2 - 2#	湾边海事搜救站码头	燃料油：60 t	西北风，5m/s	涨潮期
	方案 10					落潮期
	方案 11				东南风，5m/s	涨潮期
	方案 12					落潮期
	方案 13	2 - 3#	乌龙江大桥	燃料油：60 t	西北风，5m/s	涨潮期
	方案 14					落潮期
	方案 15				东南风，5m/s	涨潮期
	方案 16					落潮期

分析方案 1 ~ 方案 4，根据溢油张落潮释放时刻以及背景风场情况可知，方案 1 和方案 4 为逆流风场情况下的溢油风险预测，而方案 2 和方案 3 为顺流风场情况下的溢油风险预测。通过油膜 12、24 h 内上下游漂移面积的对比可知，方案 2 为落潮时刻释放且处于顺流风场的情况下，油膜向下游漂移的距离最远，24 h 内最远达到 23 095 m，且对义序水厂水源地、城门水厂水源地、福清市闽江调水工程峡南水源地、长乐市炎山水源地、福州帝封江湿地公园、福州塔礁洲湿地公园都造成影响。方案 3 溢油为涨潮时刻释放且顺流风场东南风的情况下，油膜向上游漂移的距离最远，12 h 内最远达到 8 235 m，且影响到上游福州市飞凤山水厂水源保护区、上街镇清源水厂候官水源保护区、闽江江滨湿地公园。方案 2 和方案 3 是逆流风场下的溢油风险模拟，油膜污染面积较顺流风场下小，但仍然对水源地保护区、湿地保护区造成严重影响。综合分析可知，若闽江南港航道疏浚区发生溢油事故，最不利情况下在 4. 17h 后油膜会漂移到福州市飞凤山水厂水源保护区，所以最好在 4. 17 h 内采取必要的应急措施，遏制污染影响扩大。

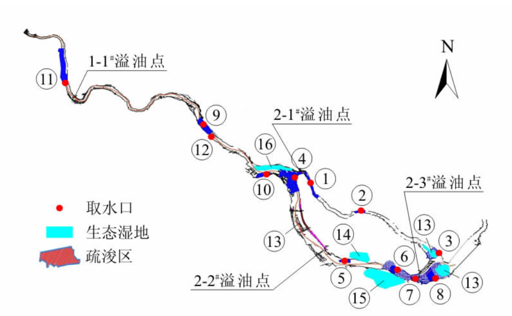

图 5　溢油风险预测点位分布图

表 5　方案 1 ~ 方案 4 油膜漂移至上游及下游的最远距离

方案	12 h 内漂移最远距离		24 h 内漂移最远距离		油膜污染面积	
	上游/m	下游/m	上游/m	下游/m	12 h 内	24 h 内
方案 1（西北风，涨潮时刻释放）	8058	6176	8058	13202	17.6	21.2
方案 2（西北风，落潮时刻释放）	3487	9381	3487	23095	45	50.1
方案 3（东南风，涨潮时刻释放）	8235	4390	8235	6139	13.7	22.3
方案 4（东南风，落潮时刻释放）	6364	10396	6364	14527	13.4	20.4

4.2　运营期溢油风险预测

鉴于篇幅有限，在此仅详细讨论运营期 2 - 2# 点位（湾边海事搜救站码头）（方案 9 ~ 方案 12）溢油风险模拟情况。具体模拟结果见表 7、8 和图 10 ~ 13。

分析方案 9 ~ 12，根据溢油涨落潮释放时刻以及背景风场情况可知，方案 10 和方案 11 为逆流风场情况下的溢油风险预测，而方案 9 和方案 12 为顺流风场西北风情况下的溢油风险预测。通过油膜 12、24 h 内上下游漂移面积的对比可知，方案 10 为落潮时刻释放且处于顺流风场的情况下，油膜向下游漂移的距离最远，24 h 内最远达到 22 530 m，且对义序水厂水源地、城门水厂水源地、福清市闽江调水工程峡南水源地、长乐市炎山水源地、福州帝封江湿地公园、福州塔礁洲湿地公园都造成影响。方案 11 溢油为涨潮时刻释放且顺流风场东南风的情况下，油膜向上游漂移的距离最远，12 h 内最远达到10 838 m，且影响到马尾水厂水源地、义序水厂水源地、城门水厂水源地、福清市闽江调水工程峡南水源地、福州帝封江湿地公园、福州塔礁洲湿地公园。方案 10 和 11 是逆流风场下的溢油风险模拟，油膜污染面积较顺流风场下小，但仍然对水源地保护区、湿地保护区造成严重影响。综合分析可知，若湾边海事搜救站码头发生溢油事

故,最不利情况下在 3 h 后油膜会漂移到义序水厂水源地,所以最好在 3 h 内采取必要的应急措施,遏制污染影响扩大。

表 6 方案 1 ~ 方案 4 发生溢油油膜影响范围及影响持续时间

序号	敏感区	最快到达时间/h				影响持续时间/d			
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	西北区水厂(原厝水源地)			21.00	39.50			3	3
2	东南区水厂(鳌峰洲)水源地								
3	马尾水厂水源地	87.67	70.33			1	1		
4	福州市飞凤山水厂水源保护区	4.17		4.67	12.67	1		4	4
5	义序水厂水源地	22.00	6.50	35.33	16.67	3	4	3	4
6	城门水厂水源地	34.83	17.00		31.17	3	4		3
7	福清市闽江调水工程峡南水源地	36.00	18.00			3	4		
8	长乐市炎山水源地	59.33	19.17			2	4		
9	闽侯自来水厂水源地								
10	上街镇清源水厂候官水源保护区			17.83				4	
11	白石坑水源保护区								
12	闽江竹崎取水泵站								
13	福州道庆洲、芦岐洲湿地公园	60.83	43.33			2	2		
14	福州帝封江湿地公园	23.33	15.83		18.33	3	4		4
15	福州塔礁洲湿地公园	34.67	17.00		31.17	3	4		3
16	闽江江滨湿地公园			17.83	25.83			4	3

表 7 方案 9 ~ 方案 12 发生溢油油膜影响范围及影响持续时间

序号	敏感区	最快到达时间/h				影响持续时间/d			
		方案 9	方案 10	方案 11	方案 12	方案 9	方案 10	方案 11	方案 12
1	西北区水厂(原厝水源地)				67.33				2
2	东南区水厂(鳌峰洲)水源地								
3	马尾水厂水源地	59.17		59.17		2		2	
4	福州市飞凤山水厂水源保护区				25.50				3
5	义序水厂水源地	8.17	3.00	8.17	3.67	4	4	4	4
6	城门水厂水源地	10.50	5.50	10.50	6.33	4	4	4	4
7	福清市闽江调水工程峡南水源地	11.33	6.33	11.33	7.67	4	4	4	4
8	长乐市炎山水源地		7.50				4		
9	闽侯自来水厂水源地								
10	上街镇清源水厂候官水源保护区								
11	白石坑水源保护区								
12	闽江竹崎取水泵站								
13	福州道庆洲、芦岐洲湿地公园	23.67	17.33			4	4		
14	福州帝封江湿地公园	8.83	4.00	11.00	4.00	4	4	4	4
15	福州塔礁洲湿地公园	10.17	5.33	23.33	5.67	4	4	4	4
16	闽江江滨湿地公园								

表 8　方案 9～12 油膜漂移至上游及下游的最远距离

方案	12 h 内漂移最远距离/m		24 h 内漂移最远距离/m		油膜污染面积/km^2	
	上游	下游	上游	下游	12 h 内	24 h 内
方案 9（西北风，涨潮时刻释放）	9760	13988	9760	19491	39.0	39.5
方案 10（西北风，落潮时刻释放）	7694	17848	7694	22530	34.5	43.2
方案 11（东南风，涨潮时刻释放）	10838	8255	10838	12589	18.0	18.7
方案 12（东南风，落潮时刻释放）	7383	14602	7383	14721	28.3	29.5

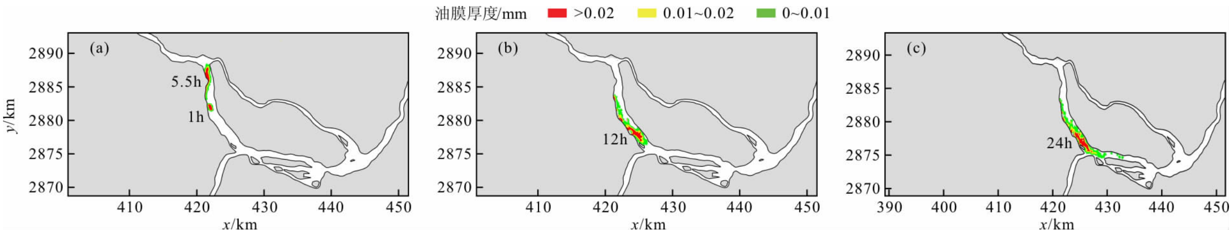

图 6　方案 1 发生溢油油膜影响范围（1、5.5、12、24 h）（其中 5.5 h 为油膜到达上游最远处的情形）

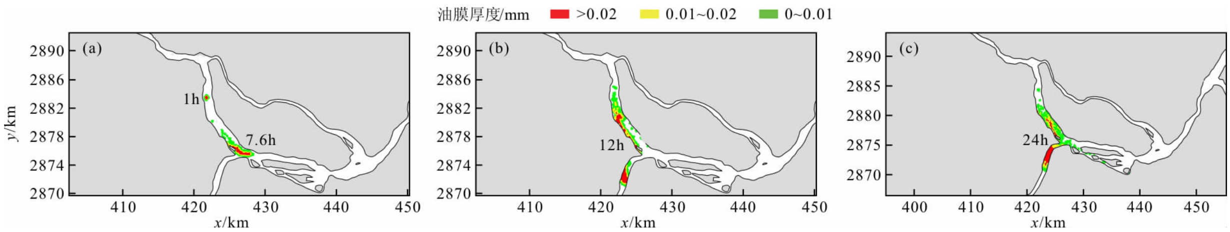

图 7　方案 2 发生溢油油膜影响范围（1、7.6、12、24 h）（其中 7.6 h 为油膜到达下游最远处的情形）

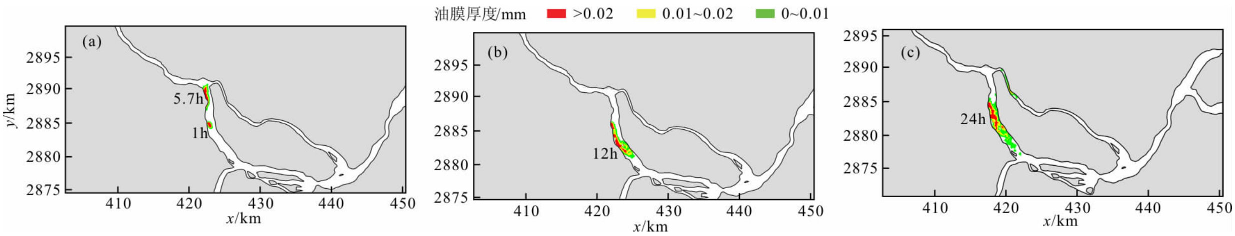

图 8　方案 3 发生溢油油膜影响范围（1、5.7、12、24 h）（其中 5.7 h 为油膜到达上游最远处的情形）

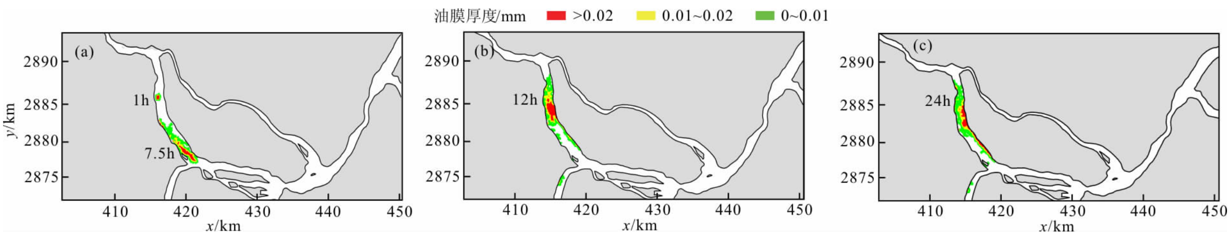

图 9　方案 4 发生溢油油膜影响范围（1、7.5、12、24 h）（其中 7.5 h 为油膜到达下游最远处的情形）

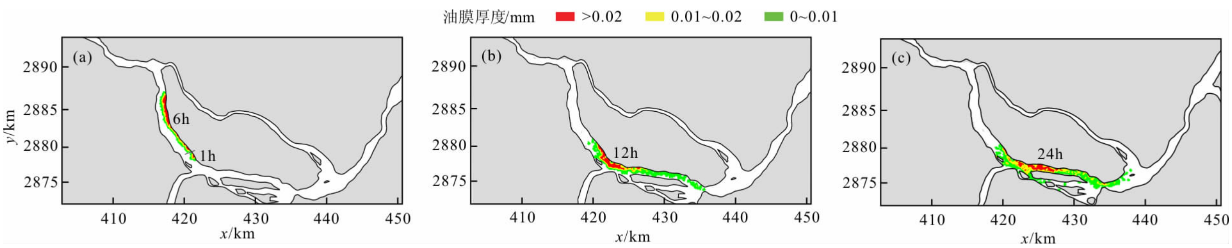

图 10　方案 9 发生溢油油膜影响范围（1、6、12、24 h）（其中 6 h 为油膜到达上游最远处的情形）

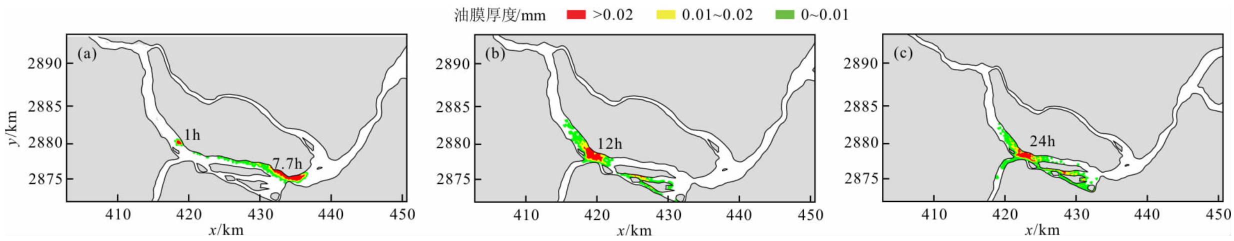

图 11 方案 10 发生溢油油膜影响范围(1、7.7、12、24 h)(其中 7.7 h 为油膜到达下游最远处的情形)

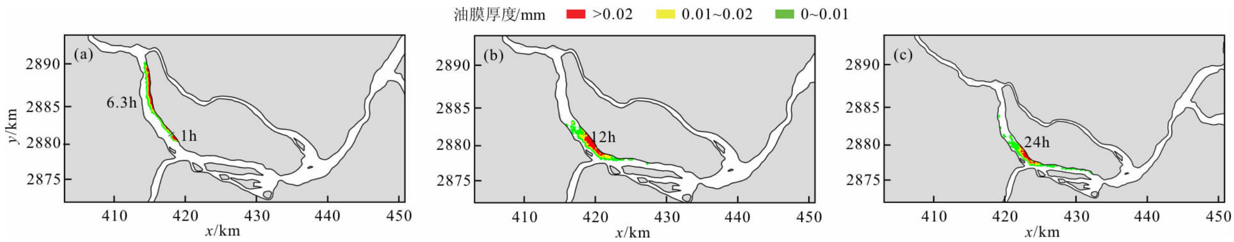

图 12 方案 11 发生溢油油膜影响范围(1、6.3、12、24 h)(其中 6.3 h 为油膜到达上游最远处的情形)

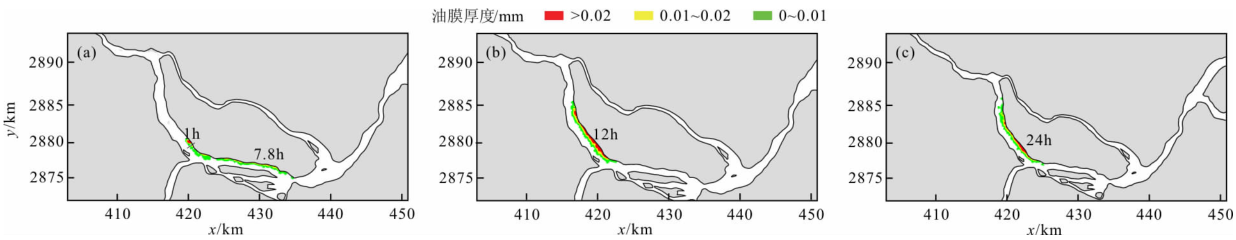

图 13 方案 12 发生溢油油膜影响范围(1、7.8、12、24h)(其中 7.8 h 为油膜到达上游最远处的情形)

5 结论与建议

(1)通过建立闽江下游水动力模型及溢油预测模型,对闽江下游航道建设施工期及运营期最不利条件下的溢油事故风险进行模拟预测分析研究。

(2)设定的 16 个方案模拟结果表明,溢油于涨潮时刻释放时,油膜先向上游漂移,再随潮流向下游漂移;落潮时刻释放时,油膜随潮流向下游漂移。涨潮时刻释放的油膜向上游漂移面积较大,落潮时刻释放的油膜向下游漂移面积较大。当风场为逆流风场时,油膜向下游的漂移运动减弱,当风场为顺流风场时,油膜向下游的运动加快,对下游的影响范围较逆流风场时大。在河道窄小弯曲处,油膜部分被岸滩所吸附,剩余部分随潮流漂移。

(3)闽江下游航道建设区段湾边水上搜救站码头下游的环境敏感目标较多,需要重点防范此处溢油事故的发生。

(4)油膜在 72 h 内不会漂入海洋,而是在潮汐的作用下于河道中往复漂移,但随着时间的迁移,未降解的油膜会随水流漂入海洋,污染海洋水体。故溢油事故发生后应及时采取措施,避免油膜迁移入海洋。

(5)应建立足够的应急预防措施,竭力预防溢油事故的发生。具体的措施包括:建设方应在施工前制定船舶溢油事故风险应急预案;提前配备好一定数量的应急设备及应急器材;做好应急预案工作,如若发生溢油事故,立即启动并实施应急预案,及时通知主管部门,尽快采取减缓措施,控制溢油影响面积的扩大;应对施工相关人员进行岗前培训教育,督促工作人员按照要求进行施工操作,规避操作事故发生;严格管理船舶作业区的范围,严禁船舶擅自扩大作业范围,拒绝一切无关船只靠近或进入施工作业区域;在施工区域设置专用标志;定期检查船舶性能等。

(6)由于研究方案有限,未能考虑到常风情况下溢油影响情况,也仅挑选了风险较大的溢油点进行模拟计算,未能考虑所有的溢油点,建议加强完善后续模拟工作,为溢油风险的预测提供更加全面的模拟支持,为预防溢油事故以及溢油事故的应急处置提供决策上的支持。

参考文献:

[1] 樊海涛. 船舶溢油原因和影响因素分析[J]. 科技资讯,2008(32):70.

[2] 宓慧菁,王麒麟,谷德贤,等. 溢油污染对天津海域鱼卵、仔稚鱼的影响[J]. 河北渔业, 2014(10):13 - 15.
[3] LIU Xin, GUO Mingxian, WANG Yebao, et al. Assessing pollution - related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016,110(1):194 - 202.
[4] 廖国祥. 基于 GIS 的溢油污染对海洋生物资源损害评估研究[D]. 大连:大连海事大学, 2008.
[5] 陈命男. 海上溢油风险的数值模型预警[J]. 环境影响评价,2015,37(1):71 - 77.
[6] 祁佩时,曹 猛,刘云芝,等. 河流突发性溢油事故数值模拟研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2011,27(6):796 - 799.
[7] 赵琰鑫,王永桂,张万顺,等. 河道溢油污染事故二维数值模型研究[J]. 人民长江,2012,43(15):81 - 84.
[8] 蒋文燕. 河道溢油污染事故三维解析解模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2017,32(3):301 - 307.
[9] 宋泽坤,程和琴,刘昌兴,等. 长江口溢油数值模拟及对水源地影响[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(8):1055 - 1063.
[10] 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.
[11] 宋朋远. 渤海油田溢油扩散与漂移的数值模拟研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
[12] DOMINICIS M D, BRUCIAFERRI D, GERIN R, et al. A multi - model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill[J]. Deep - Sea Research Part II, 2016,133:21 - 38.
[13] 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),2003,18(3):372 - 378.
[14] 赵琰鑫,王永桂,张万顺,等. 河道溢油污染事故二维数值模型研究[J]. 人民长江,2012,43(15):81 - 84.
[15] 欧 剑,马进荣,张行南,等. 大通至长江口整体水动力模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(3):258 - 262.
[16] 杨 红,王 珂,胡 松,等. 油粒子体积对扩散的影响及油膜粒子化改进[J]. 环境科学与技术,2011,34(4):18 - 22 + 26.
[17] 蔡忠清. 海上船舶溢油粒子化及适应性数值模拟研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
[18] 龙绍桥,娄安刚,谭海涛,等. 海上溢油粒子追踪预测模型中的两种数值方法比较[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2006,36(S1):157 - 162.
[19] FAY J A. The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea[M]// Oil on the Sea. Springer US, 1969:53 - 63.
[20] GUO W J, WANG Y X. A numerical oil spill model based on a hybrid method[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009,58(5):726 - 734.
[21] 吕伯钦,傅慰祖. GB5044 - 85 中华人民共和国标准职业性接触毒物危害程度分级[J]. 化工劳动保护,1999(S3):31 - 33.
[22] 义 刚,王时悦,朱 嫄,等. 海洋溢油数值模拟中相关参数敏感性分析[J]. 海洋环境科学,2013,32(6):930 - 933.
[23] 袁春光,王义刚,黄惠明,等. 大亚湾芒洲岛海域移动溢油数值模拟研究[J]. 海洋通报,2014,33(6):659 - 667.
[24] Al - Rabeh A H. Estimating surface oil spill transport due to wind in the Arabian Gulf[J]. Ocean Engineering, 1994,21(5):461 - 465.