

## 新川沙江溢油扩散影响数值模拟研究

陆祥炜 张鑫 徐磊

上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434

[摘要] 吴淞江工程是国务院流域规划确定的流域性重点工程之一, 新川沙河段作为吴淞江工程(上海段)的重要组成部分, 本篇文章利用 Mike 21 水环境数学模型软件对溢油扩散影响进行数值模拟研究, 明确运行期通航船舶的溢油风险, 为后期针对下游饮用水源保护区水质保护措施的实施提供理论依据。

[关键词] 新川沙江; Mike 21; 溢油扩散

DOI: 10.33142/hst.v4i1.3454

中图分类号: X55

文献标识码: A

### Numerical Simulation Study on the Influence of Oil Spill Diffusion in Xinchuansha River

LU Xiangwei, ZHANG Xin, XU Lei

Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200434, China

**Abstract:** The Wusong River Project is one of the key river basin projects determined by the State Council's basin planning. The Xinchuansha River section is an important part of the Wusong River Project (Shanghai section). This paper uses Mike 21 water environment mathematical model software to carry out a numerical simulation study on the impact of oil spill diffusion, so as to clarify the oil spill risk of navigable ships and provide a theoretical basis for the later implementation of water quality protection measures in downstream drinking water source protection areas.

**Keywords:** Xinchuansha River; Mike 21; oil spill spread

#### 引言

新川沙江位于吴淞江下游, 连接入海口, 新川沙江的整治将提高嘉宝北片排涝能力, 为嘉宝北片达到除涝标准创造条件; 促进区域河网水体有序流动, 为上海北部地区水环境改善创造良好条件; 提高河道过流能力, 为承泄流域洪水创造条件; 提升河道两岸环境品质, 为生态廊道建设创造条件; 满足通航尺度要求, 为上海市内河航运发展规划的实现创造条件。由于新川沙江河道整治后作为航道使用, 运行过程中可能遭遇不良气象影响或者因为人工操作失误, 船只发生溢油事故, 将给新川沙江水环境造成严重影响。事故溢油扩散影响的研究, 对于防护和治理溢油污染对周边生态保护区等溢油敏感区域的危害具有重要意义。

当溢油事故发生的时候, 其走向及变化趋势的预测一直是难点。当油体涌入河道的时候, 由各类环境因素的影响, 油体将发生化学、物力、生物等一系列复杂的变化。其中漂移、扩散等动力学过程是国内外溢油研究的重点<sup>[1-2]</sup>, 现阶段国内很多水域也开展了相关研究。

本文采用丹麦水利研究所开发的 MIKE 21 水动力模型(HD)以及溢油模块(OS), 对新川沙江河道整治工程运行期建立了溢油扩散模型, 预测溢油风险下扩散方式, 以期为河道环境影响评价和下游饮用水源保护区水质保护措施的实施提供理论依据。

#### 1 模型与方法

##### 1.1 计算原理

###### (1) 水动力模型控制方程

本次模型建立在笛卡尔坐标系下的二维水动力控制方程是不可压流体三维雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深方向积分的连续方程和动量方程, 可用如下方程表示:

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{hu}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{hv}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \bar{h}u}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}vu}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{h}v}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}uv}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + hv_s S \quad (3)$$

式中,  $t$ ——时间;

$x, y$  ——笛卡尔坐标;

$h$  ——总水深;

$\eta$  ——水位;

$\rho$  ——水的密度;

$f$ ——Coriolis 因子 ( $f=2\Omega \sin\phi$ ,  $\Omega$  是地球自转的角速度,  $\phi$  是地理纬度);

$S$ ——源汇项;

$g$ ——重力加速度;

$\rho_0$ ——水的相对密度;

( $u_s, v_s$ )——外界排放到环境水体的速率;

$\tau_{sx}$ 、 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{sy}$ 、 $\tau_{by}$ ——不同方向的有效剪切应力。

## (2) 溢油模型基本方程

MIKE 溢油模块采用的是国际上得到广泛应用的“油粒子”模型,对溢油进入水体后发生扩展、漂移、扩散等情况进行有效的物理、化学变化模拟,其基本方程如下:

### ① 扩展运动

油膜扩散运动采用 Fay 重力-粘力公式计算油膜扩展:

$$\left(\frac{dA_{oil}}{dt}\right) = K_a A_{oil}^{1/3} \left(\frac{V_{oil}}{A_{oil}}\right)^{4/3} \quad (4)$$

式中,  $A_{oil}$ ——油膜面积,  $A_{oil} = \pi R_{oil}^2$ ;

$R_{oil}$ ——油膜直径;

$K_a$ ——系数;

$t$  ——时间。

### ② 漂移运动

油粒子漂移的作用力是水流和风拽力,油粒子总漂移速度由以下权重公式计算:

$$U_{tot} = c_w(z) \cdot U_w + U_s \quad (5)$$

式中,  $U_w$ ——水面以上 10m 处的风速;

$U_s$ ——表面流速;

$c_w$ ——风漂移系数,一般在 0.03 和 0.04 之间。

### ③ 紊动扩散

假定水平扩散各向同性,一个时间步长内  $\alpha$  方向随机扩散距离  $S_\alpha$  表示为:

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

式中,  $[R]_{-1}^1$ ——-1 到 1 的随机数;

$D_\alpha$ —— $\alpha$  方向上的扩散系数。

## 1.2 计算范围、网格及地形

本次模型通过对新川沙江及水源保护区进行概化,并按照实测地形数据插值生成,生成的模型计算范围网格及地形见图 1。

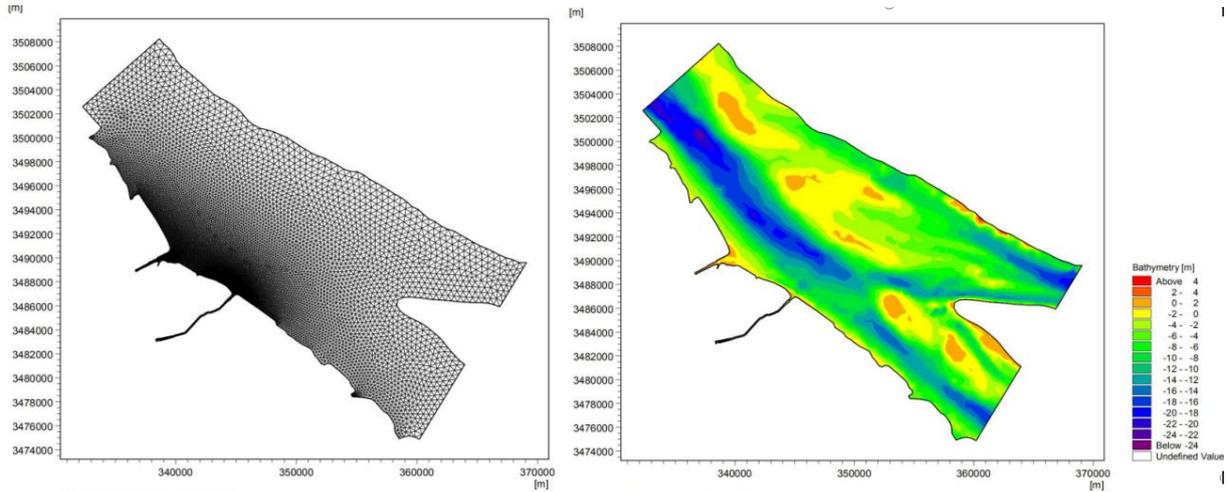


图1 计算区域网格概化及水下地形插值图

### 1.3 参数取值

溢油模型中部分参数在各种应用场合中变化幅度较小，在合理取值范围内对结果影响不大，采用相关文献的推荐值，纵向扩散系数和横向扩散系数取值反映了油粒子在水体中的扩散强度和随机紊动强度，对模拟结果的影响较大，而且在不同的应用场合下取值范围很大，取在本地区的已有经验值，具体参数值的选取见下表。

表1 溢油模型主要参数率定成果

系数	过程	取值
风漂移系数 $c_w$	对流	0.035
纵向扩散系数	扩散	0.5
横向扩散系数	扩散	0.1
油的最大含水率 $y_w^{max}$	乳化	0.85
吸收系数 ( $\kappa_1$ )	乳化	$5 \times 10^{-7}$
释出系数 ( $\kappa_2$ )	乳化	$1.2 \times 10^{-5}$
传质系数 $\kappa_s$	溶解	$2.36 \times 10^{-6}$
蒸发系数 $k$	蒸发	0.029
油辐射率 $l_{oil}$	热量迁移	0.82
水辐射率 $l_{water}$	热量迁移	0.95
大气辐射率 $l_{air}$	热量迁移	0.82
漫射系数 $\alpha$	热量迁移	0.1

## 2 新川沙江溢油影响预测

### 2.1 溢油点位置选取

由于不同溢油时间、地点、数量对水环境敏感目标的影响都不同，计算无法将所有情况一一描述清楚，本次拟选取代表性的溢油点位预测分析。综合考虑船舶发生事故的可能性以及溢油对环境敏感目标的最大影响，本次计算共设置了三个溢油点，1号溢油点位于工程起点，罗盖河新川沙河交叉处，船舶在转弯段由于视线受阻，存在碰撞发生溢油事故的可能。

2号溢油点位于潘泾与新川沙河交叉处，距陈行二级水源保护区约1.0km，距下游拟建新川沙河闸约2.4km。潘泾为宝山区骨干河道，现状为VI级航道，交通形势复杂，受不良气象条件和水文条件影响，存在船舶发生溢油事故的可能性，发生溢油事故后，油膜将很快漂至陈行水源地二级保护区。

若陈行饮用水二级水源保护区发生溢油事故，在引水工况下，溢油向西南侧漂移将对水源保护区带来不利影响。考虑最不利工况下，3号溢油点设置于拟建新川沙泵闸处，计算分析运行期通航船舶在拟建新川沙泵闸处发生溢油事故对水源保护区的不利影响。

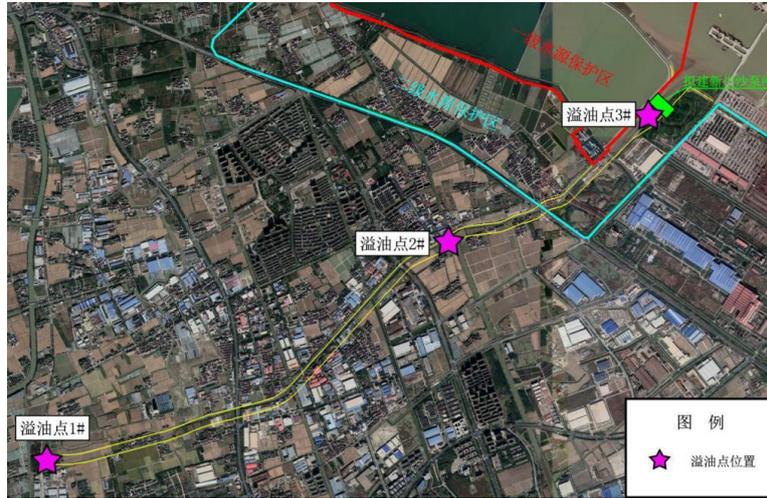


图2 溢油点布置图

## 2.2 计算方案设置

为综合分析船舶溢油对水环境的不利影响，1号、2号溢油点位分别设置3组风况，分别为静风、宝山区主导风向以及不利风向。根据调查，宝山区主导风向为东南风（SE），年平均风速为3.7m/s，不利风向为西南风，取2017~2019年汛期宝山区最大日平均风速6.88m/s。

表2 溢油模型计算方案

计算方案	溢油点	溢油源强	风向	风速	水文条件
方案1	1号溢油点	运行期通航船舶溢油20t	静风	-	“639”典型排涝工况
方案2			主导风向	3.7m/s	
方案3			不利风向	6.88m/s	
方案4	2号溢油点		静风	-	
方案5			主导风向	3.7m/s	
方案6			不利风向	6.88m/s	
方案7	3号溢油点		不利风向	6.88m/s	引水工况
方案8			不利风向	6.88m/s	

## 2.3 溢油扩散影响预测分析

本次计算分析运行期遇“639雨型”区域排涝，新川沙泵闸全力排涝的工况下，溢油事故对水环境的影响。

### 2.3.1 油膜漂移轨迹

不同工况下发生20t溢油事故后油膜漂移轨迹如图。由计算可知“639”典型排涝工况下，新川沙河工程起点处发生溢油事故（溢油点1#），在无风条件下（方案1），溢油事故发生后第4h40min，油膜漂至新川沙泵闸枢纽，此时表面油膜总面积为0.11km<sup>2</sup>，油膜厚度为0.055mm；在汛期主导风向东南风条件下（方案2），在发生溢油后第5h20min，油膜漂至新川沙泵闸枢纽，此时的油膜厚度为0.047mm，表面油膜总面积为0.097km<sup>2</sup>，在6.88m/s的不利风向西南风作用下（方案3），事故发生后第3h50min，油膜漂至新川沙泵闸处，此时的油膜厚度为0.064mm，表面油膜总面积为0.104km<sup>2</sup>。

新川沙河与潘泾交叉处发生溢油事故（溢油点2#），在无风条件下（方案4），溢油事故发生后第1h20min，油膜漂至新川沙泵闸枢纽，此时表面油膜总面积为0.076km<sup>2</sup>，油膜厚度为0.105mm；在汛期主导风向东南风条件下（方案5），在发生溢油后第1h30min，油膜漂至新川沙泵闸枢纽，此时的油膜厚度为0.101mm，表面油膜总面积为0.079km<sup>2</sup>，在6.88m/s的不利风向西南风作用下（方案6），事故发生后第1h10min，油膜漂至新川沙泵闸处，此时的油膜厚度为0.106mm，表面油膜总面积为0.068km<sup>2</sup>。

溢油点 3#位于拟建新川沙泵闸枢纽处，一旦行洪排涝期间发生船舶溢油事故，未及时关闭新川沙闸，油膜将很快漂至长江，引水期 3 号溢油点环境风险事故影响分析按费伊 (Fay) 公式计算其扩展过程，在河流流速取引水期平均流速 0.5m/s，水面宽 96m，风速按最大 6.88m/s 计，通过分析计算事故发生后第 30min 到达陈行二级饮用水源保护区边界，第 141min，溢油将漂至工程起点处，具体结果见表 3。

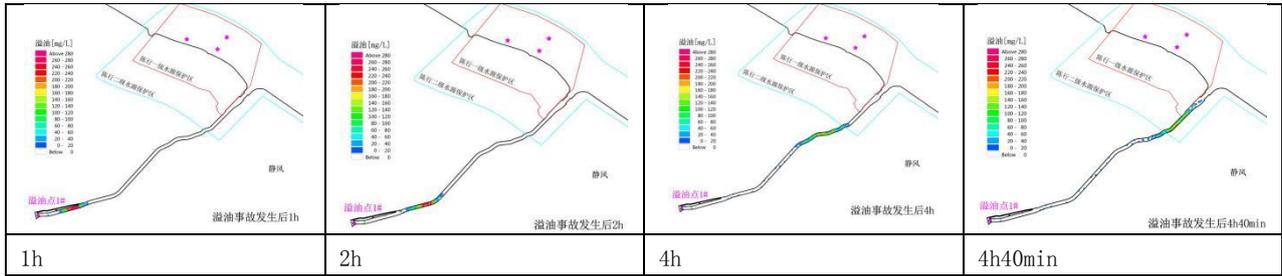


图 3 方案 1 油膜轨迹图 (静风, 溢油点 1#)

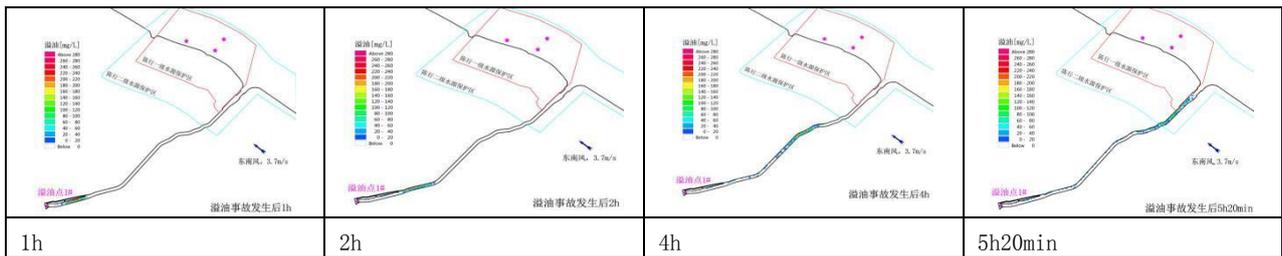


图 4 方案 2 油膜轨迹图 (东南风, 溢油点 1#)

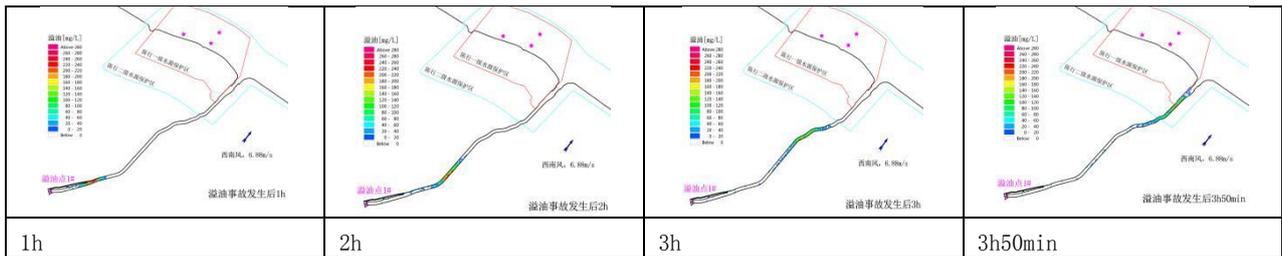


图 5 方案 3 油膜轨迹图 (西南风, 溢油点 1#)

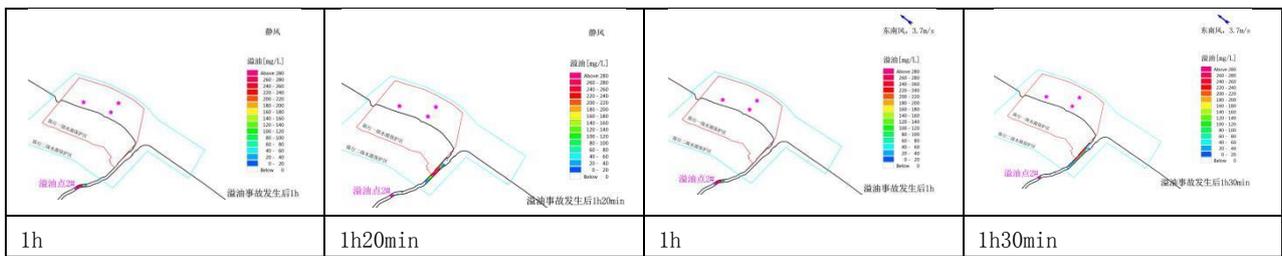


图 6 方案 4 油膜轨迹图 (静风, 溢油点 2#)

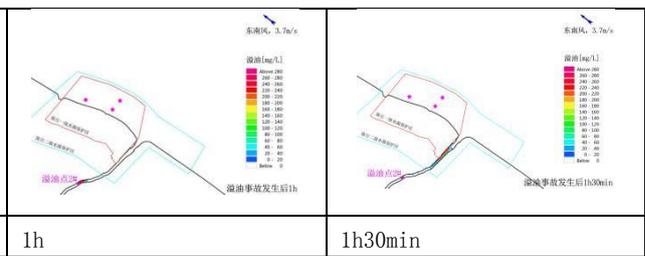


图 7 方案 5 油膜轨迹图 (东南风, 溢油点 2#)

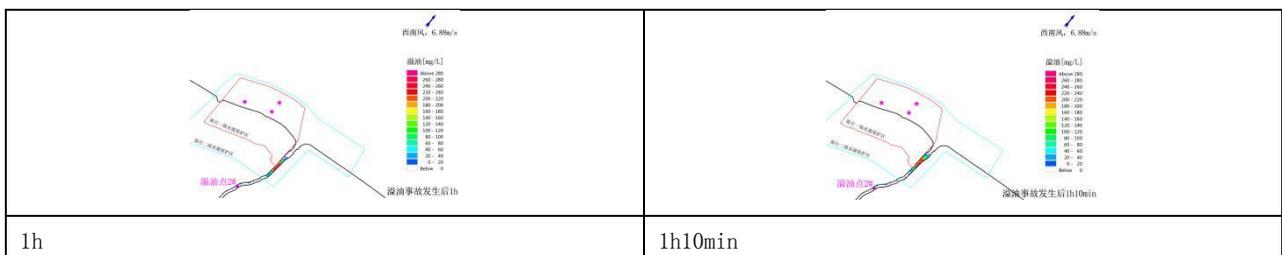


图 8 方案 6 油膜轨迹图 (西南风, 溢油点 2#)

表 3 引水期船舶溢油事故扩散距离计算结果表

时间 (min)	油膜直径 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	厚度 (mm)	距事故泄漏点的扩散距离 (m)	溢油状态
1	42.8	1440.7	16.33	65.9	
11	142.0	15847.8	1.48	571.5	惯性扩展结束
30	183.6	26482.1	0.89	1471.4	溢油到达二级水源保护区边界
43	200.9	31704.9	0.74	2076.4	粘性扩展结束
141	487.7	186812.9	0.13	7240.2	溢油到达工程起点
451	1166.2	1068190.9	0.02	/	最终扩展状态

### 2.3.2 溢油对敏感目标的影响

提取不同工况条件下溢油发生到达敏感目标时间, 及对敏感目标的影响, 见下表。

表 4 溢油事故对水源保护区的影响分析 单位: h

计算方案			敏感目标名称	到达时间 (h)	超标时间 (h)	超标持续时间 (h)	最大浓度 (mg/L)		
方案 1	溢油点 1	静风	陈行饮用水二级水源保护区	3.8	持续超标	部分油膜吸附至岸边, 产生持续影响	653		
方案 2		东南风, 3.7m/s		4.5			1129		
方案 3		西南风, 6.88m/s		3.2			675		
方案 4	静风	0.7		1189					
方案 5	溢油点 2	东南风, 3.7m/s		0.7			2951		
方案 6	西南风, 6.88m/s	0.5		1453					
方案 1	溢油点 1	静风	新川沙泵闸	4.8			持续超标	部分油膜吸附至岸边, 产生持续影响	1386
方案 2		东南风, 3.7m/s		5.5					894
方案 3		西南风, 6.88m/s		3.8					1485
方案 4	静风	1.3		944					
方案 5	溢油点 2	东南风, 3.7m/s		1.5					2135
方案 6	西南风, 6.88m/s	1.2		2703					

### 3 结论

本研究基于非结构化网格的 MIKE 21 水动力数学模型, 建立了新川沙江整治工程运行期溢油扩散的数学模型, 对 3 种不同工况条件下, 3 个溢油点分别发生 20t 事故溢油工况溢油扩散数值模拟。

计算结果表明, 溢油在水面的漂移过程中受风的影响较大。行洪除涝期间不同工况下溢油扩散均会对陈行饮用水水源保护区水质产生一定影响, 且到达时间较快; 引水工况下新川沙闸溢油将会扩散至起点处, 通航船舶的溢油风险, 可能对饮用水源保护区水质造成隐患, 须加强管理, 如溢油发生后, 应立即通知河道管理部门等, 关闭新川沙闸, 避免溢油扩散至水源保护区, 将工程对周围环境的影响降至最低。

本次船舶溢油数值模拟预测能为环境影响评价以及船舶溢油应急措施的制定提供科学依据。

#### [参考文献]

- [1] REED M, JOHANSEN O, BRANDVIK P J, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(1): 316.
- [2] 刘伟峰, 孙英兰. 海上溢油运动数值模拟方法的探讨与改进[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009(3): 90-97.
- [3] 杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 等. 长江口南港水道溢油数值模拟[J]. 海洋通报, 2013, 32(3): 345-351.
- [4] 陈文婷, 周毅, 张卫. 港口码头油污事故安全定量分析[J]. 化工管理, 2019(19): 46-47.
- [5] 牟林, 武双全, 宋军, 等. 渤海海域溢油应急预测预警系统研究 II. 系统可视化及业务化应用[J]. 海洋通报, 2011(6): 713-717.

作者简介: 陆祥炜 (1993.10-) 男, 毕业院校: 毕业于合肥工业大学, 研究生专业: 水文学及水资源, 就职于上海勘测设计研究院有限公司, 职务: 生态环保设计研究院员工, 职称级别: 助理工程师