

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190312002

http://www.yykxjz.cn/

毕研军, 刘心田, 宋协法, 董登攀. 基于 GNOME 的溢油污染渔业资源损失评估. 渔业科学进展, 2020, 41(3): 01–10  
Bi YJ, Liu XT, Song XF, Dong DP. Oil spill pollution and fishery resource loss assessment based on GNOME. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(3): 01–10

# 基于 GNOME 的溢油污染渔业资源损失评估\*

毕研军<sup>1</sup> 刘心田<sup>2</sup> 宋协法<sup>1①</sup> 董登攀<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学水产学院海洋渔业系 青岛 266003; 2. 威海市渔业技术推广站 威海 264200)

**摘要** 基于 GNOME 溢油模型模拟“世纪之光”轮沉没溢油事件的漂移轨迹和扩散分布。采用 FVCOM 水动力模型模拟建立潮流场, 与《潮汐表》的结果基本吻合。采用美国国家环境预报中心(NCEP)的环境预报系统再分析资料(CFSR)的风场, 通过 GNOME 溢油模型进行数值模拟, 得出最小遗憾轨迹跟最佳预测区域, 并采用泰森分析法进行污染面积分析。结果显示, 将 21 h 的模拟结果与 MODIS 遥感监测数据对照发现, 漂移位置基本吻合。参照各种渔业资源的评估标准、海洋生态损害和损失补偿评估的方法, 将模拟结果与拖网调查数据相结合, 分别计算出游泳动物直接经济损失为 6.1 万元, 渔业资源 4 d 内的直接损失为 51.29 万元, 得出“世纪之光”轮 4 d 内的溢油损失已达到了 211.26 万元。本研究将数值模拟方法与渔业资源的评估相互联系, 不通过现场观测就可以对渔业资源的损失进行估算。GNOME 溢油模型可以运用于类似的溢油事故溢油轨迹和扩散的快速预报, 为溢油事故应急响应提供了参考。

**关键词** GNOME; 溢油; 渔业资源; 损失评估

**中图分类号** S932.2 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)03-0001-10

随着我国经济的不断发展, 海上运输逐渐增多, 特别是石油运输导致海洋船舶溢油事故逐渐增多。石油泄漏进入海洋, 导致海洋生态环境遭到破坏, 不仅影响浮游植物群落(宋广军等, 2016)及其他海洋生物, 在养殖区还会影响养殖生物的产量和品质, 进而影响人类的健康, 海洋船舶溢油事故已经引起了广大人民的普遍关注。

由于海洋船舶溢油事故发生的地点、时间不同, 在溢油事故发生后, 很难准确地鉴定溢油的范围。对于事故发生后渔业资源等方面的评估工作、恢复工作也带来了不小的难题。自 1950 年开始, 有大批国内外学者更新研究和改进溢油模型的运算过程, 在水动力的基础上研究开发了不同类型、不同功能的溢油模型。溢油模型发展可分为第 1 代、第 2 代、第 3 代模型(Alan *et al.*, 2012)。国外对溢油行为及其归宿预报的

研究发展较早, 比较有代表性的是 Fay(1969)提出的惯性力、粘性力和表面张力 3 个阶段理论; Shen 等(1987)基于欧拉法提出了模拟油膜在水表面漂移的 ROSS 模型; 汪德胜等(1996)在 ROSS 模型的基础上建立了油在河流中漂移的 ROSS2 双层数学模型。

20 世纪 80 年代中期, ASCE Task Committee (1996) 研究开发出了“油粒子”模型; 瞿波等(2009)运用 f Bm 模型研究海上污染物的运动规律; 郭为军(2011)在模拟大连附近海域“阿提哥”号油轮溢油事故中运用 f Bm 模型模拟, 其模拟结果和卫星观测数据相吻合; 郭为军(2007)采用 POM 普林顿海洋模型作为流场模拟海洋溢油。其他运用到溢油当中的模型还有油-水两相双流体模型(沈永明等, 1992)、单组份溢油风化模型(Blokkeer, 1964)、IKU 风化模型(Stiver, *et al.*, 1984)、OSIS 风化模型(Leech *et al.*, 1993)、ADIOS 风化模型

\* 国家重点研发计划项目(2016YFC0503600)资助 [This work was supported by National Research and Development Program of China (2016YFC0503600)]. 毕研军, E-mail: 1021471631@qq.com

① 通讯作者: 宋协法, 教授, E-mail: yuchuan@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-03-12, 收修改稿日期: 2019-04-01

(Lehr *et al.*, 1992)、Navy模型(Webb *et al.*, 1970)、OSCAR模型(Mark *et al.*, 1999)、OILMAP模型(孙俊等, 2002)、GNOME模型和FVCOM水动力模型(陈波昌等, 2013)等。

本研究参照丁东生等(2016)的方法,以 GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment)溢油模型为基础,在 FVCOM 模拟的流场与美国国家环境预报中心(NCEP)的环境预报系统再分析资料的风场条件下,对“世纪之光”轮溢油事故进行数值模拟,并通过遥感数据进行验证。确定污染范围之后,通过渔业资源评估的技术方法,结合数值模拟确定渔业资源的损失,从溢油检测到资源评估形成业务化体系。

## 1. 材料与方法

### 1.1 GNOME 溢油模型

GNOME 是免费提供溢油轨迹预测的专业溢油模型,模型由 HAZMAT(NOAAO R & R, 美国)危险品应急反应部门研究开发(张彩霞, 2013)。GNOME 模型包含标准模式、GIS 输出模式和诊断模式,可以通过 GNOME 模型的诊断模式对风场、流场及其他影响因素进行设定,预测溢油的最佳轨迹。通过设置流场、风场的不确定性对轨迹进行最小遗憾预测(90%置信区间分布)。

模型中通过设置岸线数据(地图数据)、流场数据、风场数据、溢油位置、溢油污染物类型、某些特殊环境因素等条件,对 GNOME 模型进行控制。黑色点为最佳预测区域油粒子分布,红色点为不确定性因素存在造成的最小遗憾轨迹粒子分布,流场数据与风场数据合成漂移速度。之后,将 GNOME 模型输出数据使用导入工具导入 Arcgis 中与地图进行整合,画图,再进行进一步的分析。

### 1.2 FVCOM 水动力模型

FVCOM (Finite Volume Coast and Ocean Model)模型是一套结合溢油预报的原始方程组、三角形网格划分等多功能海洋水动力模型(杨红等, 2013)。与 2 种常用的解决大洋环流模型(有限差分方法、有限元方法)相比,具有精度高、运行简单、边界容易拟合、计算简便、几何灵活等优点。FVCOM 模型通过离散控制方程,以三角形网格为单位元,在三角形网格中结合数学计算方法,进行积分方程的求解。FVCOM 模型还包括了三维拉格朗日粒子追踪模型、生物模型、沉积模型、海冰模型等。本研究运用 FVCOM 水动力模型对黄、渤海地区的潮流进行数值模拟,将模

拟的潮流带入 GNOME 模型中进行溢油模拟。

### 1.3 遥感应用

遥感技术是 20 世纪 60 年代开始逐渐发展的一种探测技术,它作为海洋环境监测的一种重要的手段,已经得到了很好的发展和应用。

本研究采用 NASA 提供的 MODIS LIB 数据。MODIS 作为一种中高分辨率的卫星传感器,其通道较多,遥感影像有 250、500 和 1000 m 共 3 种空间分辨率,有 36 个离散光谱波段,其中,2 个波段分辨率为 250 m,5 个波段为 500 m,29 个波段为 1000 m。光谱范围宽为 0.4(可见光)~14.4  $\mu\text{m}$ (热红外)。本研究主要对 MODIS 影像进行选取、处理、增强等,将处理后带有溢油信息的影像与 GNOME 模拟的溢油位置进行对比。

### 1.4 渔业资源评估办法

根据沈新强等(2014)的方法,以近 3 年事故发生前张网捕捞产量和面积为估算依据,参照各类标准的生物损失率对溢油事故进行评估;丁东生等(2016)通过数值模拟的方法确定溢油面积,通过《山东省海洋生态损害赔偿和损失补偿评估方法》(DB37/T 1448-2009)对各区域、各类海洋生物生物量的估算,并对渔业资源进行了评估计算;牙韩争等(2014)参照曹妃甸某次生物体密度调查的数据,确定鱼卵、仔鱼死亡率,对污水排海污染造成的鱼卵、仔鱼进行了评估。

**1.4.1 调查采样** 调查数据选自“908”专项项目中国海洋大学的拖网调查数据。游泳动物调查网口宽度为 47 m。每站拖网时间为 1 h,平均拖速为 3 kn。采用保温箱和冰进行样品的保存。鱼卵、仔稚鱼调查采用口径为 80 cm、长为 270 cm、筛绢孔径为 0.505 mm 的大型浮游生物网进行水平拖曳取样,每次拖网 10 min,拖网速度约为 2 kn。样品采用 5%福尔马林溶液固定,带回实验室进行鉴定和分析。在调查海区共布设 16 个站位,站位设置见图 1。游泳动物资源密度计算采用公式如下:

$$D = \bar{C} / (a \times q)$$

式中, $D$  为游泳动物资源密度( $\text{kg}/\text{km}^2$ ); $\bar{C}$  为平均每小时拖网渔获量( $\text{kg}/\text{net}\cdot\text{h}$ ); $a$  为每小时的拖网面积( $\text{km}^2/\text{net}\cdot\text{h}$ ); $q$  为可捕系数。可捕系数依据《渔业污染事故经济损失计算方法》(GB/T21678-2008)。

鱼卵、仔稚鱼密度的计算采用滤水体积法。计算公式如下:

$$V = \frac{N}{S \times L}$$

式中,  $V$  为鱼卵、仔稚鱼分布密度(粒/ $m^3$ , 尾/ $m^3$ );  $N$  为平均每网鱼卵、仔稚鱼数量(粒/尾);  $S$  为网口面积( $m^2$ );  $L$  为水平拖网距离, 垂直拖网为绳长(m)。

**1.4.2 游泳动物经济损失** 根据《山东省海洋生态损害赔偿和损失补偿评估方法》(DB37/T 1448-2009)对山东近海 4 个海域的划分, 即山东半岛北部海域、山东半岛南部海域、莱州湾及渤海湾南部海域和海州湾海域。“世纪之光”轮的溢油地点属于山东半岛北部海域, 取山东半岛北部海域浮游动物的单位生物量为  $510 \text{ kg/km}^2$ 。参照“908”专项项目中国海洋大学于 2006 年 7 月 30 日~8 月 30 日的拖网调查数据, 鱼类、甲壳类和头足类的单位生物量分别为 2684.721、25.121 和  $53.334 \text{ kg/km}^2$ 。计算公式如下:

游泳动物损失量=事发前渔业资源密度 × 污染面积 × 损失率

游泳动物直接经济损失=当地水产市场价格 × 渔业资源损失量

**1.4.3 鱼卵、仔稚鱼经济损失** 参照中国海洋大学的拖网调查数据, 鱼卵的单位生物量为  $0.0306 \text{ 粒}/m^3$ , 仔鱼的单位生物量为  $0.0274 \text{ 尾}/m^3$ , 参照类似事故中污染海区密度, 鱼卵的单位生物量为  $0.0029 \text{ 粒}/m^3$ , 仔鱼的单位生物量为 0。根据《建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程》(SC/T 9110-2007)中对于污染事故中鱼卵和仔稚鱼折算成鱼苗的折算比率, 鱼卵生长成商品鱼苗的成活率按照 1%计算, 仔稚鱼生长成商品鱼苗的成活率按照 5%计算。

运用计算公式:

鱼卵、仔稚鱼损失量=(对照海区密度-污染海区密度) × 污染面积

鱼卵、仔稚鱼直接经济损失=当地商品苗市场价格 × 损失量

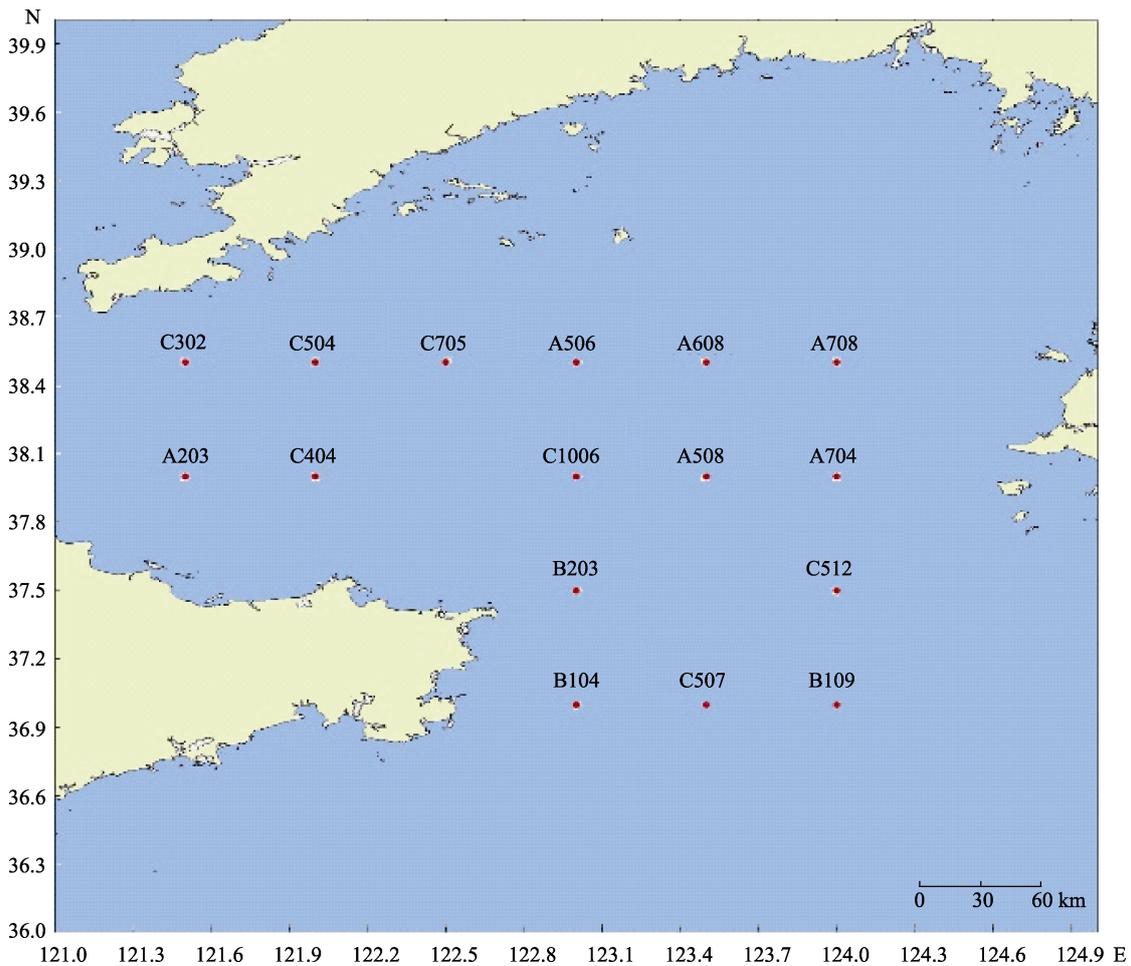


图 1 调查站位分布

Fig.1 Survey station distribution

## 2 结果与分析

### 2.1 案例概况

2010年5月2日05:23, 香港籍货轮“世纪之光”(Bright Century)轮与利比亚籍货轮“海盛”(Sea Success)轮在山东威海成山头以东海域(37°38.45'N, 123°7.54'E 附近)发生碰撞(图2), 导致“世纪之光”轮沉没。事故造成“世纪之光”轮大量燃料油外泄, 对事故海域产生了污染。15:30左右观测到黑色油污(呈灰、蓝、褐色)从沉船处间断性的泄漏至海面, 推测为重质原油。事发时, 该轮上存有油类污染物为546.4 m<sup>3</sup>。沉船点实际水深为65 m, 溢油区域平均水深为60 m。

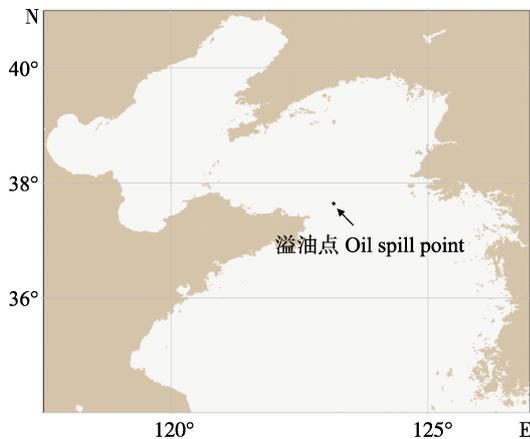


图2 “世纪之光”轮溢油点  
Fig.2 Oil spill point of “Century Light”

### 2.2 水动力模型的建立与验证

溢油模型的流场由FVCOM模拟获得。模型设置初始时间为2010年4月30日15:30, 模拟时间为6 d, 将模拟后4 d的输出结果进行分析。模型网格覆盖范

围为117.5°~127°N, 34°~41°E, 其中, 网格顶点个数为9814个, 网格个数为18700个, AB之间的直线为开边界线, 考虑到开边界的影响, 设置59个开边界点。开边界点的时间和水位由美国俄勒冈大学提供的4个分潮(M2, S2, K1, O1)调和得到, 网格划分见图3。插值水深数据后, 最大水深为111.4 m, 最小水深为1 m。

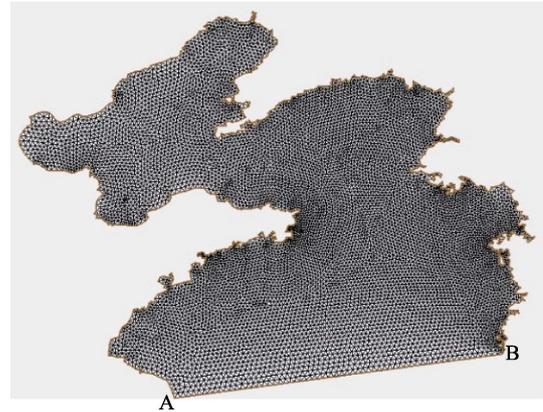


图3 黄、渤海海域网格划分

Fig.3 Mesh division of the Yellow Sea and Bohai Sea

经过4 d模拟得到流速流场数据。末时刻的水深数据、流场数据、水位起伏数据见图4。从图4可以看出, 末时刻最大水深为111.4 m, 最小水深为1 m, 平均水深为35.24 m;  $u$ 向流速在5.49 ~ -2.56 m/s之间, 平均 $u$ 向流速为0.01 m/s,  $v$ 向流速在2.56 ~ -2.88 m/s之间, 平均 $v$ 向流速为-0.10 m/s。

将FVCOM模拟末时刻的潮流与国家海洋信息中心编辑的2010年《潮汐表》第1册鸭绿江口至长江口数据相对比, 验证点见图5。从图5可以看出, 验证点选择离事故发生较近的A点, 选取模拟最后1 d

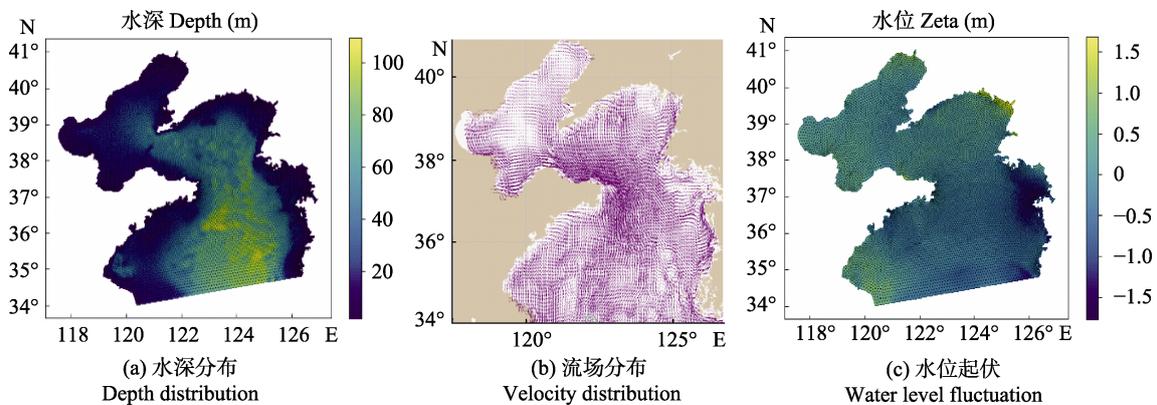


图4 第4天水深流场分布和水位起伏

Fig.4 Water depth distribution velocity distribution and water level fluctuation on the fourth day

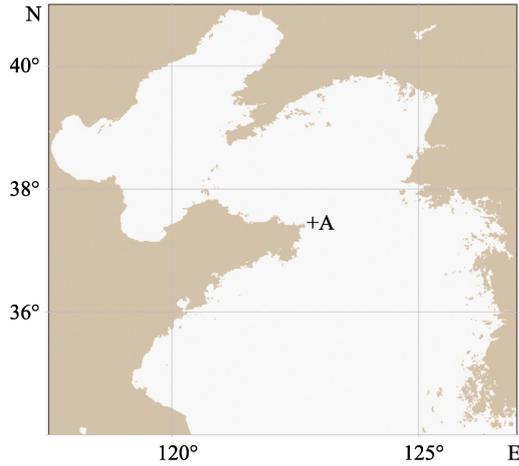


图 5 潮流验证点

Fig.5 Current verification point

内数据进行比较。验证点的信息见表 1。从表 1 可以看出, FVCOM 的模拟结果与《潮汐表》的数据比较接近, 普遍略高于《潮汐表》, 说明了 FVCOM 模拟潮流的可靠性。

### 2.3 溢油模型参数的设置与分析

采用 GNOME 模型的诊断模式, FVCOM 模型得到的流场、风场采用美国国家环境预报中心(NCEP)的环境预报系统再分析资料(CFSR), 设置 GNOME 的参数。“世纪之光”轮溢油点开始扩散时间为 2010 年 5 月 2 日 15:30, 油的类型为重质原油, 重质原油密度约为  $0.92 \text{ g/cm}^3$ , 溢油量约为 503 t, 用 1000 个“Splots”来表示, 油的扩散系数为  $105 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 油膜再漂浮期为 1 h; 流场扩散不确定比例设置为水平、垂直各 10%; 步长为 15 min。钱琴等(2018)研究表明, 在模拟湄公湾溢油事故发生 12 h 内溢油扩散最快, 并模拟 12 h 来预测溢油影响范围; 李怀明等(2014)模拟山东蓬莱 19-3 事故时, 模拟 72 h 时与实际溢油范围接近; 杨红等(2013)在模拟长江口锚地设置模型模拟时间为 4 d 内, 对漂移轨迹和溢油量变化进行分析。参考其模拟

时间及遥感影像提取油膜的清晰程度确定模拟时间为 4 d。GNOME 模型输出结果包括最佳轨迹预测和最小遗憾预测。分别输出 24、48、72、96 h 的油粒子分布见图 6。

从 4 d 的模拟结果来看, 溢油扩散主要受风场和流场的影响, 其中, 流场占主导作用。在这 4 d 中, 油膜面积逐渐扩大。将模拟第 21、96 小时的溢油轨迹数据通过 GNOME Import Tool vs 4.0 软件导入 Arcgis 中。根据 Galt 等(1996)提出将某个时刻的油粒子空间位置信息转化成相对油浓度分布的方法。把油粒子的分布空间使用泰森分析法, 将其转化为泰森多边形, 每个泰森多边形中只有 1 个油粒子, 根据油粒子所占的泰森多边形的面积来计算油粒子的相对浓度(即单位面积内的油粒子个数)。多边形的面积越小, 说明该区域油粒子越密集, 其密度也越大; 相反油粒子越疏散, 其密度也越小。此分析最佳预测区域时, 将大于最大密度的 16% 的区域定义为重油密度区域, 将密度大于最大密度 4% 且小于最大密度 16% 的区域定义为中油密度区域, 将密度大于最大密度 1% 且小于最大密度 4% 的区域定义为轻油浓度区域。Galt 等(1996)在分析存在不确定性因素的最小遗憾预测轨迹时, 将密度大于最大密度 1‰ 的区域定义为 90% 置信的溢油范围。根据这种方法分别得到 21、96 h 不同油密度区域分布图和 90% 置信区间最小遗憾预测的溢油范围(图 7 和图 8)。

从图 7a 和图 8a 可以看出, 黑色为重油密度区域, 深灰色为中油密度区域, 浅灰色为轻油浓度区域。从图 7b 可以看出, 粉红色为 90% 置信区间溢油污染区域。其中, 21 h 重油密度区域面积为  $0.05 \text{ km}^2$ , 中油密度区域面积为  $0.67 \text{ km}^2$ , 轻油浓度区域面积为  $1.13 \text{ km}^2$ , 总污染面积为  $1.85 \text{ km}^2$ ; 90% 置信区间区域面积为  $314.89 \text{ km}^2$ 。从图 8b 可以看出, 96 h 重油密度区域面积为  $3.37 \text{ km}^2$ , 中油密度区域面积为  $11.63 \text{ km}^2$ , 轻油浓度区域面积为  $9.89 \text{ km}^2$ , 总污染面积为  $24.89 \text{ km}^2$ ;

表 1 FVCOM 潮流验证

Tab.1 FVCOM Current verification

验证点 Point	站位名称 Name	站位坐标 Coordinate	验证时刻 Time	流速		流向	
				Velocity of flow (m/s)		Flow direction (°)	
				潮汐表 Tide table	模拟值 Analog value	潮汐表 Tide table	模拟值 Analog value
A	成山角 Chengshanjiao	37°25.10'N, 122°44.00'E	05:20	0.67	0.71	163	163
			11:43	0.57	0.54	343	340
			17:51	0.46	0.51	163	165
			23:58	0.57	0.58	343	345

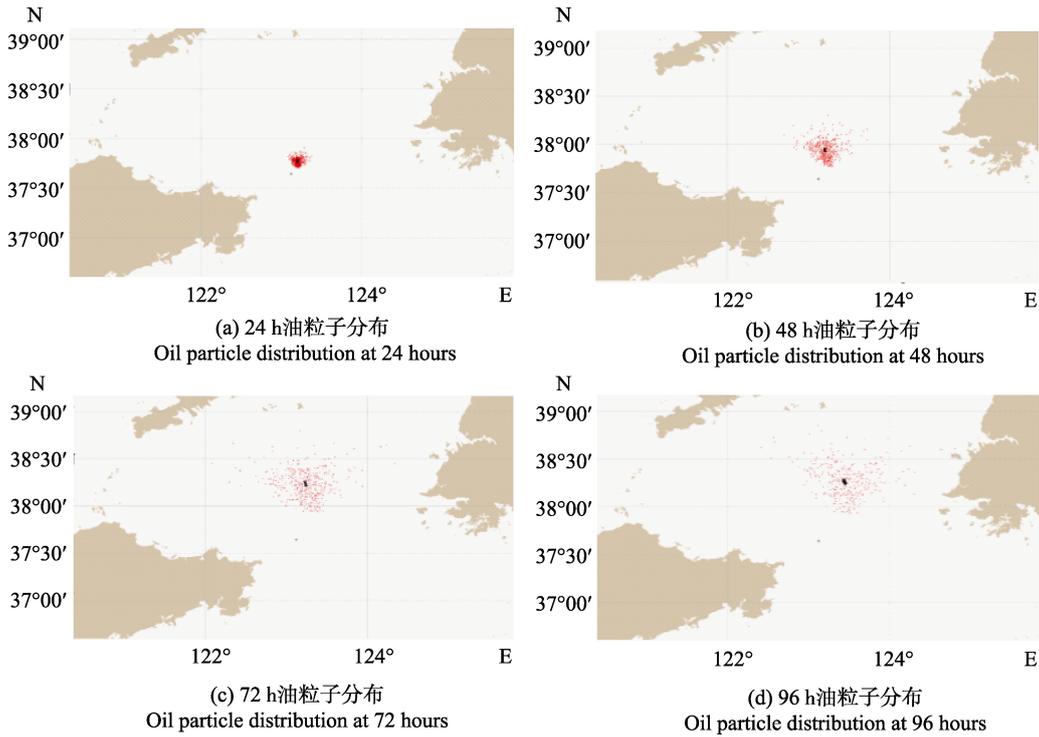


图 6 96 h 内油粒子分布  
Fig.6 Oil particle distribution within 96 hours

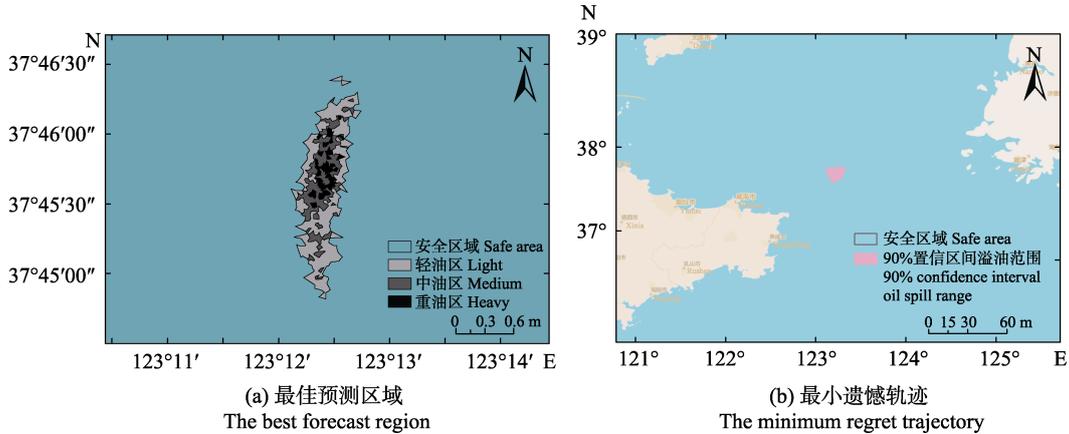


图 7 21 h 最佳预测区域和最小遗憾轨迹  
Fig.7 The smaller best guess area and the minimum regret trajectory in 21 hours

90%置信区间区域面积为 41575.56 km<sup>2</sup>。

### 2.4 MODIS 遥感验证

由于在“世纪之光”轮溢油发生之后的几天里云较多，云层较厚，采用由 NASA 提供的 2010 年 5 月 3 日 04:55 的 MODIS L1B 数据。使用 ENVI 5.3 软件对数据进行预处理，包括“蝴蝶结”现象去除、几何校正、大气校正等。通过直方图均衡化和高斯对比度拉伸处理，调节图像灰度值、对比度。根据侯懿峰 (2012) 研究结果可以看出，在平均反射率上，轻油种

大于洁净海水，轻油种在 MODIS 大部分通道中，遥感影像表现为较亮区域；而平均反射率上重油种(重柴油、大庆原油等)大于洁净海水，重油种在遥感影像中为较暗区域。“世纪之光”轮溢油属于重油种，在遥感影像中为较暗区域，即为溢油区域。提取油膜信息导入 Arcgis 中处理。遥感数据与 GNOME 的模拟结果相对照见图 9a。

从图 9b 可以看出，黑色的点状轨迹为 GNOME 模拟的最佳预测轨迹点，红色点为 GNOME 最小遗憾轨迹点，蓝色区域为从遥感 MODIS 数据中提取的油

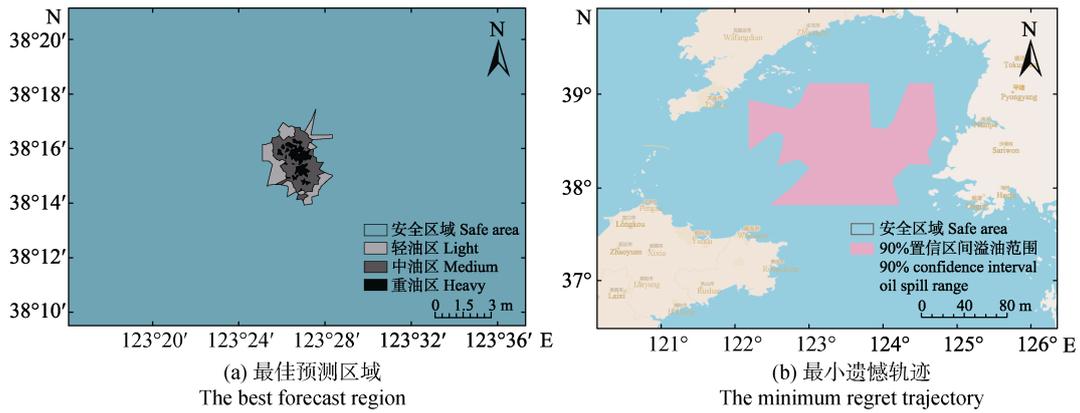


图 8 96 h 最佳预测区域和最小遗憾轨迹

Fig.8 The smaller best guess area and the minimum regret trajectory in 96 hours

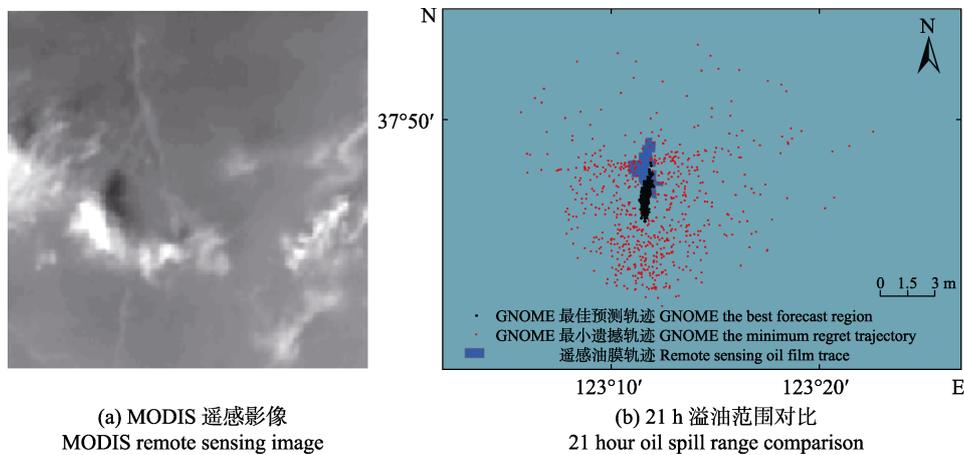


图 9 MODIS 遥感影像和溢油范围对比

Fig.9 MODIS remote sensing image and oil spill range comparison

膜轨迹。与 GNOME 模拟结果相比, 遥感提取的油膜面积比最佳预测轨迹要大, 与最佳预测轨迹的位置相吻合, 但又略有不同, 说明实际油膜在扩散漂移过程中, 受到了很多不确定因素的影响, 导致它并不能达到最佳的预测轨迹位置; 但其处在 GNOME 的最小遗憾轨迹范围之内, 说明 GNOME 的模拟结果比较准确可靠, 可以反映溢油事故发生后油膜扩散漂移的走向。

### 2.5 渔业资源损失

根据 GNOME 模拟 4 d 的溢油范围以及《渔业水质标准》(GB11607-1989)中对油类污染物浓度要求, 确定第 4 天油类污染物超过 0.05 mg/L 的污染范围为 24.89 km<sup>2</sup>, 污染水深按照 1.5 m 计算。

根据游泳生物对污染物的回避反应, 参照《山东省海洋生态损害赔偿和损失补偿评估方法》对油污染的要求, 鱼类损害系数为 0.2~0.4, 无脊椎动物损害系数为 0.3~0.6, 浮游动物损害系数为 0.5~0.8, 底栖

天然动物损害系数为 0.2~0.8。由于此次污染事故比较严重, 取鱼类损害系数为 0.4, 无脊椎动物(甲壳类、头足类)损害系数为 0.6, 浮游动物损害系数为 0.8。根据中国海洋大学的拖网调查数据, 渔获物种类共 13 种, 包括日本鳀(*Engraulis japonicus*)、鲈鱼(*Scomber japonicus*)、蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)、黄条鲷(*Seriola aureovittata*)、太平洋鲱鱼(*Clupea pallasii*)等。其中, 鱼类 11 种, 分布隶属于 5 目 11 科 11 属, 占渔获种类的 84.62%; 甲壳类 1 种, 为太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*), 没有蟹类, 占渔获种类数的 7.69%; 头足类 1 种, 为太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*), 占渔获种类数的 7.69%。根据 2010 年山东威海市各种类的市场价格, 经济鱼类平均市场价格为 18 元/kg; 甲壳类市场价格为 18 元/kg; 头足类市场价格为 25 元/kg。鱼卵、仔鱼经济损失计算过程、渔业资源直接经济损失计算过程见表 2 和表 3。

表2 鱼卵、仔鱼经济损失评估

Tab.2 Economic loss assessment of fish eggs and larvae

项目 Items	鱼卵 Fish eggs	仔鱼 Fish larvae
单位生物量 Unit biomass	0.0277 (cell/m <sup>3</sup> )	0.0274(ind./m <sup>3</sup> )
损害系数 Impairment ratio	1	1
单位受损生物量 Unit biomass of the impaired	0.0277 (cell/m <sup>3</sup> )	0.0274 (ind./m <sup>3</sup> )
污染体积 Contaminated volume (km <sup>3</sup> )	0.037	0.037
转化率 Conversion rate (%)	1	5
受损生物量 Biomass of the impaired (ind.)	10249	50690
单价 Price (yuan/ind.)	1.0	1.0
经济损失 Economic losses (yuan)	10249	50690
损失总计 Total loss (yuan)	61000	

表3 直接经济损失评估

Tab.3 Assessment of direct economic losses

项目 Items	鱼类 Fish	甲壳类 Crustacean	头足类 Cephalopod	浮游动物 Zooplankton
单位生物量 Unit biomass (kg/km <sup>2</sup> )	2684.721	25.121	53.334	510
损害系数 Impairment ratio	0.400	0.600	0.600	0.8
单位受损生物量 Unit biomass of the impaired (kg/km <sup>2</sup> )	1073.888	15.073	32.000	408
污染面积 Contaminated area (km <sup>2</sup> )	24.890	24.890	24.890	24.89
转化率 Conversion rate (%)	100.000	100.000	100.000	10
受损生物量 Biomass of the impaired (kg)	26729.070	375.170	796.480	1015.51
单价 Price (yuan/kg)	18.000	18.000	25.000	5
直接经济损失 Direct economic loss (yuan)	481123.260	6753.060	19912.000	5077.55
损失总计 Total loss (yuan)	512900.00			

从表2和表3可以看出,此次事故对鱼卵、仔鱼的经济损失为6.1万元,渔业资源4d内的直接损失为51.29万元。根据《山东省海洋生态损害赔偿和损失补偿评估方法》,渔业资源的恢复费用一般不低于直接经济损失3倍的原则。由于此次污染事故的严重性,渔业资源的恢复费用取直接经济损失的3倍,即153.87万元。该事故4d内对渔业资源造成的损失共计211.26万元。

### 3 结论

通过采用FVCOM模型得到的流场、美国国家环境预报中心(NCEP)的环境预报系统再分析资料(CFSR)的风场,在GNOME模型中分别模拟出24、48、72、96h的溢油轨迹以及油粒子分布情况。MODIS遥感油膜位置与GNOME模拟结果比较接近。采用GNOME溢油模型可以较好的模拟油粒子的运动情况。在实际溢油处理中,可以参考最佳预测轨迹和最小遗憾轨迹进行预测和评估。将数值模拟的溢油面积

与渔业资源评价方法相结合,对4d内造成的渔业资源损失进行评估。

由于风场数据采用的是3h的再分析数据,给GNOME溢油模拟带了一定的误差,可以采用更高分辨率的数据来提高模拟质量。由于该事件发生期间的MODIS遥感数据云层较厚,对于油膜提取存在一定的难度,不能很好的反映油膜的实际范围。通过GNOME与MODIS比较来看,溢油扩散实际开始时间与观测时间存在误差,实际海况不确定等因素的影响,以及采用风场数据的分辨率不够高,实际溢油轨迹并没有达到最佳预测区域水平,但会在最小遗憾范围之内,与最佳预测位置相近。根据模型的特征与风场数据精度的限制只进行了4d的溢油模拟,得出了4d内对渔业资源造成了损失。由于4d之后污染范围仍然在扩大,损失也将增大。本研究仅通过这种方法对溢油损失评估提供一种思路和参考。可以通过进一步的数据精确性和数据连续性,对长时间的溢油进行模拟并得出溢油损失。

## 参 考 文 献

- Alan B, Tomasz D, Kieran L. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2489–2501
- ASCE Task Committee on modeling of oil spills of the water resources engineering division. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122(11): 594–609
- Blokker PC. Spreading and evaporation of petroleum products on water. Proc. of the Fourth International Harbour Conference. Antwerp Belgium, 1964, 911–919
- Chen BC, Wei H. Simulation of the tide and current in the Bohai Bay with FVCOM. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2013, 28(4): 40–43, 69 [陈波昌, 魏皓. FVCOM 模型在渤海湾潮流潮汐模拟中的应用. *天津科技大学学报*, 2013, 28(4): 40–43, 69]
- Ding DS, Ma SS, Chen BJ, *et al.* Evaluation of the natural fishery resources loss caused by an oil spill accident in the central Bohai. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(4): 36–42 [丁东生, 马绍赛, 陈碧鹃, 等. 基于欧拉—拉格朗日方法的某溢油事故天然渔业资源损失评估方法案例研究. *渔业科学进展*, 2016, 37(4): 36–42]
- Fay JA. The spread of oil slicks on a calm sea. *Oil on the sea*, Plenum. New York, 1969, 53–64
- Galt JA, Payton DL. Digital distribution standard for NOAA trajectory analysis information. Hazardous Materials Response and Assessment Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1996
- Guo WJ. Study on the three-dimensional oil spill numerical model and its application in the coastal area. Doctoral Dissertation of Dalian University of Technology, 2011 [郭为军. 三维溢油数值模式研究及其在近海的应用. 大连理工大学博士研究生学位论文, 2011]
- Guo WJ. Numerical simulation of oil spill based on POM. Master's Thesis of Dalian University of Technology, 2007 [郭为军. 基于 POM 的溢油数值模拟研究. 大连理工大学硕士研究生学位论文, 2007]
- Hou YF. The research on MODIS data processing and marine oil spill classification. Master's Thesis of Dalian Maritime University, 2012 [侯懿峰. MODIS 数据解析及海面溢油分类研究. 大连海事大学硕士研究生学位论文, 2012]
- Leech M, Walker M. OSIS: A windows 3 oil spill information system. Proceedings of 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 1993, 549–572
- Lehr WJ, Overstreet R. ADIOS-automated data inquiry for oil spills. Proceedings of the Fifteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 1992, 31–35
- Li HM, Lou AG, Wang J, *et al.* A numerical simulation of the oil spill accident at Penglai 19–3 oil field. *Marine Sciences*, 2014, 38(6): 70–77 [李怀明, 娄安刚, 王璟, 等. 蓬莱 19–3 油田事故溢油数值模拟. *海洋科学*, 2014, 38(6): 70–77]
- Mark R, Oistien J, Brandivik PJ, *et al.* Oil spill modeling towards the close of 20th century: Overview of the state of the art. *Spill Science and Technology Bulletin*, 1999, 5(1): 3–16
- Qian Q, Zhao DB, Ji HD. Numerical simulation of oil spill based on GNOME and EFDC models—A case study of Meizhou Bay. *China Water Transport*, 2018, 18(5): 73–75 [钱琴, 赵东波, 姬厚德. 基于 GNOME 和 EFDC 模型的溢油数值模拟研究—以湄洲湾为例. *中国水运(下半月)*, 2018, 18(5): 73–75]
- Qu B, Paul SA, Christopher TM. Application of fractional Brownian motion particle tracking model to coastal contaminant dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(12): 1517–1523 [瞿波, Paul SA, Christopher TM. 加速分数型布朗运动粒子追踪模型在水面污染扩散中的应用. *水利学报*, 2009, 40(12): 1517–1523]
- Shen HT, Yapa PD, Petroski ME. A simulation model for oil slick transport in lakes. *Water Resources Research*, 1987, 23(10): 1949–1957
- Shen XQ, Yuan Q. The identification and assessment of environmental pollution damage to fisheries. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2014, 4(3): 1–5 [沈新强, 袁骥. 环境污染对渔业损害的鉴定与评估中国. *渔业质量与标准*, 2014, 4(3): 1–5]
- Shen YM, Ni HQ, Zhao WQ, *et al.* The two-fluid model of turbulent buoyant recirculating oil-water two-phase flow. *Acta Mechanica Sinica*, 1992, 24(5): 546–555 [沈永明, 倪浩清, 赵文谦, 等. 油-水两相湍浮力回流双流体模型. *力学学报*, 1992, 24(5): 546–555]
- Song GJ, Li A, Wu JH, *et al.* Influence of 19–3 oil spill accident on phytoplankton community in the Liaodong Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(4): 60–66 [宋广军, 李爱, 吴金浩, 等. 19–3 油田溢油对辽东湾浮游植物群落的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(4): 60–66]
- Stiver W, Mackay D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental Science and Technology*, 1984, 18(11): 834–840
- Sun J, Yu JQ, Huang LW. Oil spilled information management system of China Zhoushan harbor based on OILMAP. *Computer Simulation*, 2002, 19(4): 76–78 [孙俊, 俞济清, 黄立文. 基于 OILMAP 的中国舟山港溢油管理信息系统. *计算机仿真*, 2002, 19(4): 76–78]
- Wang DS, Yang XQ, Shen HD. A two-layer mathematical model for oil slick transport in river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996(8): 71–76 [汪德胜, 杨小庆, 沈洪道. 油在河流中传输的双层数学模型. *水利学报*, 1996(8): 71–76]
- Webb L, Taranto R, Hashimoto E. Operational oil spill drift forecasting. Proceedings of 7th navy symposium of military oceanography, Annapolis, Maryland, 1970
- Yang H, Liu CX, Li RG, *et al.* Numerical simulation of oil-spill

- in the south channel of the estuary Yangtze River estuary. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(3): 345–351 [杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 等. 长江口南港水道溢油数值模拟. *海洋通报*, 2013, 32(3): 345–351]
- Ya HZ, Chen XY, Dong DX. Quantitative analysis of the fishery resources damage caused by sewage marine disposal engineering. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2014, 30(3): 161–164, 169 [牙韩争, 陈宪云, 董德信. 污水排海工程渔业资源损害定量分析. *广西科学院学报*, 2014, 30(3): 161–164, 169]
- Zhang CX. Study on numerical simulation of oil spill in Yueqing day. Master's Thesis of Ocean University of China, 2013 [张彩霞. 乐清湾溢油数值模拟研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2013]

(编辑 陈 严)

## Oil Spill Pollution and Fishery Resource Loss Assessment Based on GNOME

BI Yanjun<sup>1</sup>, LIU Xintian<sup>2</sup>, SONG Xiefa<sup>1①</sup>, DONG Dengpan<sup>1</sup>

(1. Department of Fisheries, College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003;  
2. Weihai Fisheries Technology Extension Station, Weihai 264200)

**Abstract** By using the GNOME model of oil spillage, the drift trajectory and diffusion distribution of the “Century Light” oil spill were simulated. First, the FVCOM hydrodynamic model was used to simulate the tidal field, which was broadly consistent with the results of the tide tables. The wind field was determined by using the Climate Forecast System Reanalysis Data (CFSR) of the National Center for Environmental Prediction (NCEP). The GNOME oil spill model was used for numerical simulation, and Tyson’s method was used for the analysis of the contaminated area. The “minimum regret” trajectory and the best forecast region were obtained through numerical simulation. The comparison of the simulation results after 21 hours with the MODIS remote sensing monitoring data showed that the drift position was basically consistent. This paper describes the assessment criteria for various fishery resources and methods for determining marine ecological damage and loss compensation assessment. Combining the simulation results with the trawl survey data, the direct economic loss of swimming animals was calculated to be 61000 yuan, with the direct loss of fishery resources, within 4 days, reaching a value of 511900 yuan. The oil loss from the “Century Light” event reached a value of 2112600 yuan within 4 days. In this paper, the method of numerical simulation was related to the assessment of fishery resources, and the loss of fishery resources was estimated without on-site observation. The GNOME oil spill model can be applied to similar oil spill trajectories and for rapid prediction of flooding, to provide a method and reference for emergency response to oil spill accidents. The combination of numerical simulation of oil spills and on-site observations will be an important reference method for new ideas in future calculations of fishery resource losses and fishing losses, leading to more comprehensive and scientific handling of oil spills.

**Key words** GNOME; Oil spill; Fishery resources; Loss assessment

① Corresponding author: SONG Xiefa, E-mail: yuchuan@ouc.edu.cn