

DOI: 10.5846/stxb202003310759

宋协法, 毕研军, 董登攀, 周广军. 溢油事故中渔业资源损失的数值模拟评估模式. 生态学报, 2021, 41(3): 1015-1020.

Song X F, Bi Y J, Dong D P, Zhou G J. Numerical simulation evaluation model of fishery resources loss in oil spill. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1015-1020.

溢油事故中渔业资源损失的数值模拟评估模式

宋协法^{1,*}, 毕研军^{1,2}, 董登攀¹, 周广军³

1 中国海洋大学水产学院, 青岛 266003

2 即墨区自然资源局海洋发展服务中心, 青岛 266200

3 烟台市海洋捕捞增殖管理站, 烟台 264003

摘要:海洋溢油污染不仅关系到天然渔业资源、海鸟等生物、海域环境、海岸线生态的破坏,而且对渔业、捕捞业、旅游业都会造成巨大损失,甚至会直接或间接地危害人类的健康。短期来看,一方面石油、燃料油等进入海洋后,对海洋生物资源造成影响;另一方面会危害附近海区的海洋环境,侵害海洋生物以及海鸟赖以生存和栖息的环境。长期来看,持续的海洋污染会导致的生态环境失衡,海洋的生产力也随之下降。溢油事故中的渔业资源损失评估作为追究污染事故责任,尽快恢复海域资源与环境的重要一环需要不断改进创新。为了定量确定海洋溢油事故发生后渔业资源的损失程度,将传统的评估模式与现代科学技术相结合,通过海洋动力学、流体力学、海洋生物学、环境化学等多个学科交叉融合,将流场风场模型、溢油模型、海域调查监测、卫星遥感技术、毒性效应和渔业资源的损失评估方法相结合,形成一种渔业资源损失评估的数值模拟评估模式,以完善溢油事故中渔业资源损失评估体系。在溢油事故现场监测数据的基础上,运用数学计算理论选择相对应的溢油模型,结合具体溢油事故案例的潮流数据和风场数据,模拟海上溢油污染的时空分布情况。采用卫星遥感技术根据不同油品在海水中不同的亮度表现,处理得到溢油油膜信息,与模拟得到的油膜信息进行比对验证,并对模型进行修正,通过模拟得出污染海域油浓度分布与溢油污染范围信息,结合溢油污染对不同海洋生物的毒性效应,得到渔业资源的损失程度,为溢油事故的渔业资源损失评估提供一种思路,为溢油事故发生后的损失评估和事故处理起到一定的参考辅助作用。

关键词:溢油;渔业资源;数值模拟;损失评估

Numerical simulation evaluation model of fishery resources loss in oil spill

SONG Xiefa^{1,*}, BI Yanjun^{1,2}, DONG Dengpan¹, ZHOU Guangjun³

1 College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Ocean Development Service Center, Jimo District Bureau of Natural Resources, Qingdao 266200, China

3 Yantai Marine Fishing and Breeding Management Station, Yantai 264003, China

Abstract: Marine oil spill pollution is not only related to the destruction of natural fishery resources, seabirds and other organisms, the marine environment, and the coastline ecology, but also causes huge losses to fisheries, fishing, and tourism, and even directly or indirectly endangers human health. In the short term, on the one hand, when oil and fuel oil enter the ocean, they will affect marine living resources; on the other hand, it will harm the marine environment in the nearby sea area, and infringe marine life and the environment on which seabirds live and inhabit. In the long run, continuous ocean pollution leads to an imbalance in the ocean's ecological environment, and the productivity of the ocean decreases accordingly. As an important part of investigating the responsibility for pollution accidents and recovering marine resources and the environment as soon as possible, the assessment of fishery resources loss in oil spills needs continuous

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503602)

收稿日期:2020-03-31; 网络出版日期:2020-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuchuan@ouc.edu.cn

improvement and innovation. This article combines traditional assessment models with modern science and technology. In order to quantitatively determine the degree of loss of fishery resources after a marine oil spill, we integrated the interdisciplinary knowledge of marine dynamics, fluid mechanics, marine biology, environmental chemistry and other disciplines. Combining flow field wind field model, oil spill model, sea area survey and monitoring, satellite remote sensing technology, toxicity effect and fishery resource loss assessment method, a numerical simulation assessment model for fishery resource loss assessment is developed to improve fishery resource loss assessment system in oil spill accident. On the basis of on-site monitoring data of oil spill accidents, the corresponding oil spill models are selected using mathematical calculation theory, combined with the tide data and wind field data of specific oil spill accident cases, to simulate the spatial and temporal distribution of oil spill pollution at sea. By satellite remote sensing technology, the oil film information is processed and compared with the simulated oil film information to verify the model according to the different brightness performance of different oil products in the seawater. The model is modified to obtain the concentration distribution and the polluted extent of oil on the surface of contaminated sea, which could be combined with the toxic effects of oil spill pollution on different marine organisms so as to provide us the degree of fishery resources loss. Also, it provides a way for the assessment of fishery resources loss caused by oil spill accidents, and plays a certain reference and auxiliary role for the loss assessment and accident settlement after the oil spill.

Key Words: oil spill; fishery resources; numerical simulation; loss assessment

海上突发性溢油事故导致石油泄漏进入海洋,影响浮游植物群落^[1],进而影响其他海洋生物,而且在养殖区,还会影响养殖业的产量和品质,进而影响人类的健康。同时溢油事故对当地渔业资源数量以及恢复会造成巨大的影响。

海上突发性溢油事故发生后,受地理位置、季节等因素影响,污染物的漂移轨迹很难确定,很难准确地鉴定溢油的范围,进而给渔业资源评估和恢复工作也带来了不小的难题。传统的渔业资源损失评估方法具有一定的局限性,随着科学技术的发展,可以采用计算机模拟的手段加以弥补和辅助。钱琴等^[2]采用湄洲湾案例证明了 GNOME 和 EFDC 模型模拟的准确性。国内外学者通过数值模拟的方面模拟溢油范围,并通过不同的案例证明了数值模拟溢油的可行性^[3-17]。本文参照采用数值模拟确定溢油范围的思路,结合渔业资源评估的技术办法,形成一种针对溢油事故中渔业资源损失的数值模拟评估模式,从而辅助确定渔业资源的损失,进一步完善业务化评估体系。

1 数值模拟评估模式

1.1 评估模式框架

渔业资源损失的数值模拟评估模式如图 1 所示,主要由模型选择、参数获取、模型计算、数据输出四部分构成。

1.2 海洋溢油模型选择

现代海洋溢油模型根据模型的数学计算理论不同,可分为基于欧拉-拉格朗日方法的溢油模型和基于蒙特卡罗方法的溢油模型两大类。基于蒙特卡罗方法的溢油模型在拉格朗日方法基础上采用蒙特卡罗方法随机生成扩散系数,来计算湍流的大小和油膜三维扩展情况^[18]。基于欧拉-拉格朗日方法的溢油模型是借助欧拉-拉格朗日方程组对事故发生后的油膜漂移扩散和油膜消失后的溶解态分布趋势进行计算预测,包括全动力轨迹模型和溢油归宿模型。这两类模型都可以借助风场、流场数据模拟出溢油漂移扩散趋势,进而计算出溢油浓度分布和溢油污染面积。可以通过基于欧拉-拉格朗日方法和基于蒙特卡罗方法的数学计算理论构建具有对应海域特征的海洋溢油模型,也可以运用相对比较成熟的专业溢油模型。代表性的溢油模型有: OILMAP^[19-20]、CWCM^[21]、GNOME^[22]、MIKE21SA 溢油模块^[23]等。OILMAP 对瞬时溢油和持续性的溢油都能

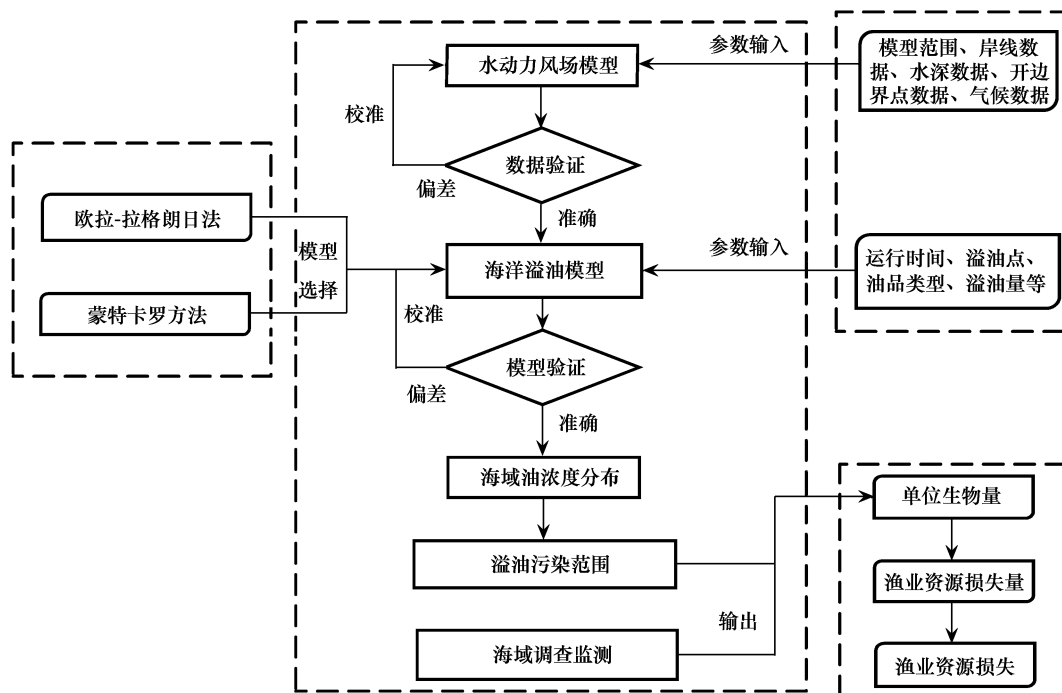


图1 溢油事故中渔业资源损失的数值模拟评估模式图

Fig.1 Diagram of numerical simulation evaluation model of fishery resources loss in oil spill

快速地预测轨迹,常用于溢油应急和预警预案支持;CWCM 模型不仅可以模拟石油溢出漂移,而且可以模拟化学品溢出归宿及影响;GNOME 模型标准模式用于模拟溢油泄漏和溢油演习,以及特定位置的溢油轨迹,诊断模式可以根据具体的溢油情况来模拟追踪溢油扩散轨迹,具有最佳预测和最小遗憾预测功能;MIKE21SA 溢油模块模拟悬浮物质的扩散和侵蚀,仅用于预报溢油问题、评估意外溢油预案分析。

1.3 参数获取

需要获取的参数有模型经纬度范围、岸线数据、水深数据、开边界条件数据、气候数据等运行水动力模型、风场模型所需的参数,以及模型运行时间、溢油点、油品类型、溢油量等海洋溢油模型所需的参数。

事故发生区域的岸线数据可以通过 GSHHG 全球地理信息数据集获取;水深数据可以采用由美国 NOAA 的国家环境信息中心(NCEI)官网提供的 ETOPO1 全球水深的再分析数据;开边界点数据通常采用由俄勒冈大学提供的开边界点调和常数,从 OTPS (OSU Tidal Prediction Software) 预报的时间水位中提取主要分潮。模型运行时间、溢油点、油品类型、溢油量根据具体溢油案例获取。

1.4 模型计算

1.4.1 水动力与风场模型运算

以 FVCOM 水动力模型为例,首先确定模型计算范围区域,结合具体案例提取岸线数据,在溢油发生区域内进行网格划分。采用表面水动力模型 SMS 生成非结构化三角形网格模型,控制网格质量使三角形单元最小内角 30° ,最大内角 130° ,最大斜率为 0.1,相邻三角形单元面积比小于 0.5,顶点连接三角形单元的个数小于等于 8。在网格点上插值水深,设置开边界条件构建好模型进行模拟运算。模拟的流场可以根据具体站位点的监测数据或《潮汐表》等数据验证校准。将模拟的流速误差控制在 20% 以内,流向误差控制在 20° 以内。

1.4.2 溢油污染范围计算

分别以水动力模型来模拟事故海域附近的流场变化、以风场模型模拟事故海域附近的风场变化,将模拟的流场、风场数据输入到海洋溢油模型当中,也可直接采用监测站实际监测的风场、流场数据转换格式后输入

海洋溢油模型。将构建的模型或通过专业溢油模型建立的相对应海域的溢油模型通过具体溢油案例进行验证和校准。可以采用卫星遥感技术^[24-29]将溢油事故区域影像进行几何校正、大气校正、去“蝴蝶结”处理、图像增强处理,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^[30]实验结论:在平均反射率上轻油种大于洁净海水,遥感影像中表现为较亮区域;而平均反射率上重油种(重柴油、大庆原油等)小于洁净海水,重油种在遥感影像中为较暗区域。结合油品性质提取溢油信息,将其与模型模拟的油膜漂移位置、面积进行比对验证,根据验证结果对模型进一步校准,直到模拟结果与验证案例相吻合。

通过模型模拟得到污染海域表层、中层、底层油粒子的分步规律,通过运算得出污染海域表层、中层、底层各个位置的油浓度分布情况。根据《渔业水质标准》^[31]中对油类污染物浓度要求,可以直接计算出不同污染程度下的溢油污染范围。

1.4.3 海域调查监测数据计算

海域调查监测参照《海洋监测规范》^[32]中站位的设置、拖网的规格要求、分析鉴定规范等要求进行实际的海域调查监测。将采集到的样本计数采用公式(1)、(2)分别计算鱼卵、仔稚鱼密度与游泳动物资源密度。

鱼卵、仔稚鱼密度的计算采用滤水体积法。计算公式如下:

$$V = \frac{N}{S \times L} \quad (1)$$

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

游泳动物资源密度计算采用公式:

$$D = \bar{C} / (a \times q) \quad (2)$$

式中, D 为游泳动物资源密度(kg/km^2); $\bar{C}$ 为平均每小时拖网渔获量($\text{kg 网}^{-1} \text{h}^{-1}$); a 为每小时的拖网面积($\text{km}^2 \text{网}^{-1} \text{h}^{-1}$); 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》^[33](GB/T21678—2008)。

1.4.4 渔业资源损失计算

(1) 鱼卵、仔稚鱼经济损失

根据 SC/T 9110—2007《建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程》^[34]对于污染事故中鱼卵和仔稚鱼损失的计算方法,将其按比例折算成鱼苗,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。参照《渔业污染事故经济损失计算方法》^[33]运用公式(3)(4)计算鱼卵、仔稚鱼折算成商品鱼苗后损失:

$$\text{鱼卵、仔稚鱼损失量} = (\text{对照海区密度} - \text{污染海区密度}) \times \text{污染体积} \quad (3)$$

$$\text{鱼卵、仔稚鱼直接经济损失} = \text{当地商品苗市场价格} \times \text{损失量} \quad (4)$$

(2) 渔业资源损失计算

由于不同种类游泳动物受污染物刺激影响不同,参照《山东省海洋生态损害赔偿和损失补偿评估方法》^[35]中油类污染物对不同种类游泳动物的损害系数要求,鱼类损害系数为 0.2—0.4,无脊椎动物为 0.3—0.6,浮游动物为 0.5—0.8,底栖动物为 0.2—0.8。按照污染重取高值,污染轻取低值的取值原则。根据对照海域的海域调查监测数据,将对照海域渔业资源密度作为事发前渔业资源密度。参照《渔业污染事故经济损失计算方法》^[33]分别计算鱼类、甲壳类、头足类等游泳动物直接经济损失,运用公式(5)(6)得到渔业资源直接经济损失。运用公式计算:

$$\text{渔业资源损失量} = \text{事发前渔业资源密度} \times \text{污染面积} \times \text{损害系数} \quad (5)$$

$$\text{渔业资源直接经济损失} = \text{当地水产市场价格} \times \text{渔业资源损失量} \quad (6)$$

根据《渔业污染事故经济损失计算方法》^[32],渔业资源的恢复费用取直接经济损失的 3 倍,计算渔业资源的恢复费用。则渔业资源损失为直接经济损失与渔业资源的恢复费用的和。

1.5 数据输出

评估模式主要输出的数据有各种类的单位生物量,鱼卵、仔稚鱼和游泳动物损失量,造成的渔业资源的经

济损失。

2 总结与分析

随着科学技术越来越先进成熟,越来越多的技术与设备投入到海洋环境监测与海洋环境治理当中来,溢油事故中的渔业资源损失评估不再单纯依靠实地检测。本文通过海洋动力学、流体力学、海洋生物学、环境化学等多个学科建立了渔业资源的数值模拟评估模式。渔业资源损失的数值模拟评估模式就是将流场风场模型、溢油模型、卫星遥感技术等计算机手段与海域调查监测、毒性效应和渔业资源损失评估等理论方法相结合,将各自独立的部分串联成一个整体,形成一套成熟的评估模式方法。以墨西哥湾溢油事故为例,原油泄露伴随着爆炸火灾,原油持续泄露了 87 天才得到控制,司法鉴定评估很难快速开展,且事故发生后几年时间内不断出现索赔诉讼,BP 公司最终同意赔偿 187 亿美元终结了墨西哥湾溢油事故,事故处理过程进行了 5 年多才结束。现阶段的渔业资源损失评估,特别是在确定溢油污染面积和溢油浓度范围上,采用布设取样点现场检测分析的方法,由于污染物仍在进行漂移风化等现象,计算存在一定的误差,不能真实反映出溢油污染的实时情况。且事故发生后常存在爆炸火灾,很难第一时间进行现场调查取证,给渔业资源损失评估工作带来一定时间的滞后性。当事故发生后渔业资源损失的数值模拟评估模式可以直接根据事故提供的参数,计算出实时的溢油污染情况,从数值模拟的角度计算不同时间段内渔业资源的损失,为溢油事故中的渔业资源评估提供了一定的辅助支持。

参考文献 (References):

- [1] 宋广军,李爱,吴金浩,王召会. 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.
- [2] 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.
- [3] Berry A, Dabrowski T, Lyons K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(11): 2489-2501.
- [4] Guo W J, Wang Y X. A numerical oil spill model based on a hybrid method. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(5): 726-734.
- [5] 黄瑞,韩龙喜,张防修. 长江溢油事故中数值模型的研究与应用. 长江科学院院报, 2019, 36(6): 9-13.
- [6] 金戈,董仁杰,蔡睿,陈红刚,金生. “桑吉轮”碰撞事故溢油模拟研究. 水利规划与设计, 2019, (9): 64-67, 122-122.
- [7] 丁东生,马绍赛,陈碧聘,崔正国,赵俊,刘传霞,张旭志,曲克明. 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.
- [8] 周群群,何利民. 海上溢油数值模拟研究进展. 油气田环境保护, 2018, 28(1): 4-9.
- [9] 李小虎,吴云波,崔小爱. 基于三维水动力模型的溢油扩展迁移规律的数值模拟. 中国水运(下半月), 2018, 18(1): 86-88.
- [10] 刘增贤,王元元,蔡梅. 太浦河溢油污染数值模拟及对策措施研究. 江苏水利, 2018, (1): 25-31.
- [11] 李燕,杨逸秋,潘青青. 海上溢油数值预报技术研究综述. 海洋预报, 2017, 34(5): 89-98.
- [12] 吴凡杰,吴钢锋,董平,张科锋. 象山港溢油数值模拟研究//第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 重庆:中国海洋学会海洋工程分会, 2019: 226-232.
- [13] 谢挺,王彬谕,顾一凡,倪云林,陈维. 舟山薄刀咀围垦工程船舶溢油数值模拟. 中国航海, 2019, 42(3): 110-114.
- [14] 张海文,赵懿珺,纪平. 福宁湾海域溢油扩散影响的数值模拟研究. 应用海洋学学报, 2019, 38(1): 84-92.
- [15] 邹长军. 航海模拟中船舶溢油应急仿真及可视化[D]. 大连:大连海事大学, 2018.
- [16] 刘建华,王振法,王忠. 海底管道溢油风险识别与数值模拟研究. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(14): 162-164.
- [17] 傅贵. 某港区工程海域溢油事故影响分析的数值模拟研究. 中国水运. 航道科技, 2019, (5): 9-17.
- [18] 杨红,洪波,陈莎. 海洋溢油模型及其应用研究进展. 海洋湖沼通报, 2007, (2): 156-163.
- [19] Toz A C, Buber M. Performance evaluation of oil spill software systems in early fate and trajectory of oil spill: comparison analysis of OILMAP and PISCES 2 in Mersin bay spill. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(9): 551.
- [20] Environmental Monitoring; Investigators at Dokuz Eylul University Detail Findings in Environmental Monitoring (Performance evaluation of oil spill software systems in early fate and trajectory of oil spill: comparison analysis of OILMAP and PISCES 2 in Mersin bay spill). Energy Weekly News, 2018..
- [21] 乔冰. 海上溢出物蒙特卡罗三维溶出模型-CWCM. 水运科学研究所学报, 1999, (3): 170-174.

- [22] 杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 潘灵芝, 丁丽丽. 基于 GNOME 的长江口锚地溢油模拟. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 384-390.
- [23] 王翠, 郭洲华, 李青生, 戴娟娟. 基于 MIKE SA 模型的厦门西港海域溢油影响的数值模拟研究. 应用海洋学学报, 2014, 33(2): 229-235.
- [24] 陆应诚, 刘建强, 丁静, 石静, 陈君颖, 叶小敏. 中国东海“桑吉”轮溢油污染类型的光学遥感识别. 科学通报, 2019, 64(31): 3213-3222.
- [25] 陈韩, 谢涛, 徐辉, 孟雷, 陈伟. 基于 TM 遥感影像溢油识别方法的比较研究. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2019, 41(3): 305-311.
- [26] 邴磊. 基于遥感和 GIS 的海上溢油风险识别及区划研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2019.
- [27] 孙乐成, 周青, 王娟. 海洋溢油遥感探测技术现状及预见. 海洋开发与管理, 2019, 36(3): 49-53.
- [28] 常俊芳, 史爱琴, 刘晓燕, 潘灵芝, 张栋. 星载 SAR 在上海沿海溢油监测中的应用. 海洋信息, 2018, 33(3): 31-38, 61-61.
- [29] 邴磊. 基于星载 SAR 的海上主要溢油风险源遥感识别方法. 船海工程, 2018, 47(2): 64-66.
- [30] 侯懿峰. MODIS 数据解析及海面溢油分类研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [31] 国家环境保护局. GB 11607—1989 渔业水质标准. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.1—2007 海洋监测规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21678—2008 渔业污染事故经济损失计算方法. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [34] 中华人民共和国农业部. SC/T 9110—2007 建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [35] 山东省质量技术监督局. DB37/T 1448—2009 山东省海洋生态损害赔偿和损失补偿评估方法. 山东省质量技术监督局, 2010.