

中国海上突发环境事件预测预警系统研究及应用^{*}

杨永俊 赵 骞[#] 张建丽 席彦彬
(国家海洋环境监测中心,辽宁 大连 116023)

摘要 为提高海上突发环境事件预测预警工作效率,解决相关技术零散、不成体系的问题,梳理归纳了中国海上突发环境事件预测预警业务工作流程,将海洋水动力环境动态模拟预测、污染物迁移转化模拟预测和溯源、环境风险评价、预测预警报告编报、预测预警产品动态化展示和个性化订制等多项关键技术进行流程化、系统化集成整合,设计研发了中国海上突发环境事件预测预警系统,并应用于青岛某油轮溢油事故的预测预警。结果表明,预测预警工作历时约2 h,实测油污分布和预测结果较为吻合,预测预警系统具有较高的准确性和可靠性,可极大缩短预警响应时间,为海上突发环境事件的应急响应提供有力支撑。

关键词 突发环境事件 预测预警 海上应急 环境风险

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.11.020

Research and application of marine environmental emergencies prediction and early warning system in China YANG Yongjun, ZHAO Qian, ZHANG Jianli, XI Yanbin. (National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian Liaoning 116023)

Abstract: In order to improve the efficiency of prediction and early warning of marine environmental emergencies, and solve the problems of scattered and unsystematic related technologies, this study summarized and sorted out the business process of prediction and early warning of marine environmental emergencies in China. Many key technologies such as marine dynamic simulation prediction of hydrodynamic environment, simulation prediction and traceability of pollutant migration and transformation, environmental risk assessment, compilation and reporting of prediction and early warning reports, dynamic display and personalized customization of prediction and early warning products were integrated into a process-oriented and system-oriented manner, and then China's marine environmental emergency prediction and early warning system was designed and developed. The established prediction and early warning system had been applied to predict and early warning for oil spill accident of an oil tanker in the coastal waters of Qingdao. The results showed that the average duration of prediction and early warning work was about 2 hours, and the measured oil pollution distribution was relatively consistent with prediction result. The prediction and early warning system had high accuracy and reliability, which could greatly shorten the warning time and provide strong support for emergency response to sudden environmental events at sea.

Keywords: environmental emergencies; prediction and early warning; marine emergency; environmental risk

海上突发环境事件是指由于溢油、危险化学品和放射性泄漏等事故导致有毒有害物质进入海洋环境,造成环境质量下降,危及公众身体健康和财产安全,需要采取紧急措施予以应对的事件^[1]。随着海洋经济的高速发展,各种海上突发环境事件对海洋环境、海洋生物资源、沿海人民生产活动的影响也与日俱增,海洋石油工业、海上运输业和沿海石油化工业的快速发展导致海上溢油事故屡见不鲜。由于海洋环境的特殊性和复杂性,海上突发环境事件一旦发生,其发展演变非常迅速,若能在事件发生后第一时间预测污染物迁移路径、扩散范围、转化规律,研

判事件对海洋生态环境的潜在危害,及时做出风险预警,就可以最大限度地减轻事件造成的经济损失、生态环境危害和人员伤亡,因此开展海上突发环境事件的预测预警工作十分必要。

与发达国家相比,中国海上突发环境事件预测预警工作起步较晚,近几十年取得了较为长足的发展,在海洋水动力环境动态研判^[2-3]、海上污染物迁移转化模拟预测^[4-5]、海洋环境风险评价^[6-8]等关键技术方面的研究成果层出不穷,但仍存在很大的不足,主要表现在各种预测预警技术没有进行有效整合,难以形成合力,导致在海上突发环境事件预测预

第一作者:杨永俊,男,1985年生,硕士,高级工程师,主要从事海洋环境预测预警研究。[#] 通讯作者。

^{*} 生态环境部业务项目。

警过程中响应时间长,效率低下,延误应急处置的最好时机,无法满足海上突发环境事件应急响应及时高效的迫切需求。因此,为提高中国应对海上突发环境事件预测预警能力,有必要将相关技术进行有效的业务化整合,建立一套高时效、高精准的海上突发环境事件预测预警系统。为此,本研究基于中国海上突发环境事件预测预警工作基本业务流程,将海洋水动力环境动态模拟预测、污染物迁移转化模拟预测和溯源、环境风险评价、预测预警报告编报以及预测预警产品动态化展示与个性化订制等预测预警关键技术进行系统性优化整合,建立中国海上突发环境事件预测预警系统,为海上突发环境事件的应急处置提供高实效、高精准的技术支撑。

1 海上突发环境事件预测预警业务流程

海上突发环境事件发生后,其预测预警工作大体要经历 3 个主要阶段,即预测预警启动判别阶段、预测阶段和环境风险预警阶段,3 个阶段的工作基本按顺序开展,但又相互交互,直至预测预警工作结束。中国海上突发环境预测预警工作的基本业务流程见图 1。

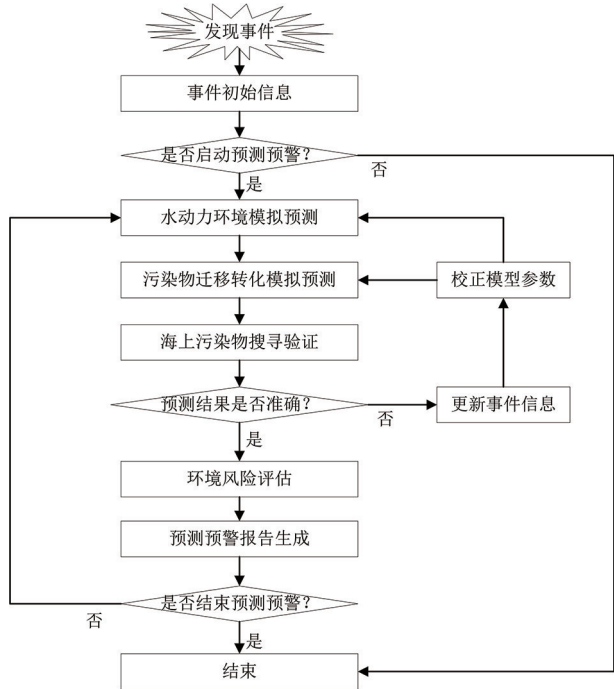


图 1 中国海上突发环境事件预测预警基本业务流程
Fig.1 Basic business process of prediction and early warning of marine environmental emergencies in China

在预测预警启动判别阶段,通过相关人员或单位报告、遥感监测、舆情等方式尽可能多地获取事件信息,比如事件类型、发生原因、发生位置以及已泄露或可能泄漏的污染物类型、数量、组成、理化性质、

扩散范围等情况,决策者根据上述信息判断是否组织力量启动预测预警工作。

在预测阶段,首先需要通过资料搜集分析、现场监测等手段获取事故附近海域海底地形、潮位、水文、气象等基础资料,启动事故海域水动力环境动态预测模型,模拟预测事故海域未来一段时间的流场情况;然后,将风场和流场等海洋水动力预报数据作为驱动力启动污染物迁移转化预测模型,根据启动判别阶段获取到的事件信息预测研判未来一段时间污染物漂移路径、扩散范围、转化过程等动态情况,为污染物搜寻与监测提供指引;随后,决策者根据这些指引信息,通过海上应急监测、卫星遥感、无人机侦察等方式组织力量开展海上污染物搜寻、处置等工作,并获取最新的污染物位置、扩散范围等信息;最后,预测预警技术人员根据新获取的事件信息,验证预测结果,判断分析造成预测结果与实际情况有所偏差的原因,并校正水动力环境和污染物迁移转化预测模型参数,进行新一轮的水动力环境和污染物迁移转化模拟。

在环境风险预警阶段,根据污染物迁移转化预测结果,并结合污染物漂移路径周边海域的功能区类型、海洋生物种类和数量等环境敏感性指标,定性或定量地对事件的环境影响风险进行评价,判断事件可能导成的环境危害风险,并形成预测预警报告报送决策者,为事件的应急处置和环境损失评估提供决策依据。

2 关键技术

溢油、危险化学品或放射性污染物进入海洋后,除了海上风、浪、流等自然因素影响输运和扩散外,污染物本身还会在各种环境因素的作用下产生复杂的化学和生物过程,导致污染物的数量、组成、理化性质、存在形态、扩散范围、漂移路径等发生变化,给后续的应急监测和处置带来困难。因此,要求预测预警系统具备强大的高性能数值计算能力、科学的环境风险评价和预警能力、快速高效的预测预警报告自动编报能力、实时动态和灵活多样的信息展示能力以及强有力的系统集成能力。海上突发环境事件预测预警系统的技术流程见图 2。

2.1 海洋水动力环境动态模拟预测技术

海表风场、流场、波浪和湍流等海洋水动力环境是影响污染物漂移扩散的关键因素,在很大程度上决定着污染物的迁移路径和扩散范围,而事故发生后临时对事故海域进行水动力调查不切实际,需要

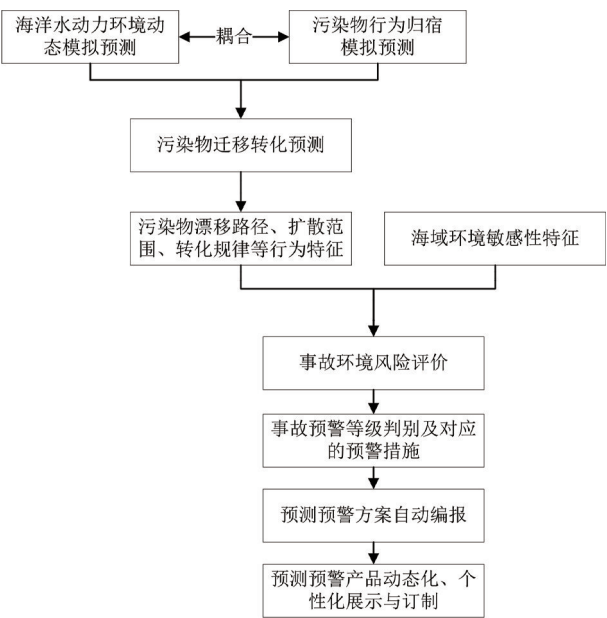


图2 中国海上突发环境事件预测预警系统技术流程
Fig.2 Technical process of marine environmental emergencies prediction and early warning system in China

利用成熟的数值模拟技术来模拟预测海洋水动力环境变化过程,实现对事故海域水动力状况的实时动态研判。因此,为了能在海上突发环境事件发生后及时、快速、有效地预测污染物的迁移扩散情况,预测预警系统集成了水动力环境动态模拟技术。针对海上突发环境事件高发海域并结合《“十四五”海洋生态环境保护规划》(环海洋〔2022〕4号)中美丽海湾建设要求,采用 MIKE、FVCOM、ROMS 等区域海洋模型系统构建了 69 个大、中、小各种尺度的海区、海湾、河口,以及核电海域的三维水动力环境动态预测模型,组成了中国管辖海域精细化的水动力环境动态预测模型库(见表 1),这些模型在水平方向上采用结构化正交网格(大尺度模型)或非结构化三角网格(中、小尺度模型)拟合岸线,并在关键区域

进行局部加密,在垂向上采用 σ 坐标,能较好地适应近岸海域复杂多变的海底地形。一旦海上突发环境事件发生,预测预警系统会在收到事件发生位置信息后第一时间启动相应海域水动力环境动态预测模型,并根据决策需要模拟预测未来一段时间事故海域的海流、海浪、水位等水动力环境状况,为污染物迁移转化模拟预测提供水动力驱动场,极大缩短了响应时间,提高了响应效率。

2.2 污染物迁移转化模拟预测和溯源技术

预测是预警的前提,只有对污染物的迁移、扩散和转化规律进行科学预测才能够实现准确有效的预警。因此,预测预警系统在海洋水动力环境动态预测模型的基础上集成了污染物迁移转化模拟预测和溯源技术,动态模拟预测或回推污染物随海水运动的迁移扩散和转化过程,实现污染物迁移路径、扩散范围和形态转化规律的动态研判以及污染源头查找。针对溢油、危险化学品和放射性泄漏等海上突发环境事件,预测预警系统集成了拉格朗日粒子追踪^[9]、染色示踪^[10]等污染物漂移扩散模拟技术,以及美国应用科学咨询公司开发的 SIMAP 溢油行为归宿模型^[11],将其与水动力环境动态预测模型相耦合,构建了中国管辖海域精细化的污染物迁移转化预测和溯源模型。水动力环境动态预测模型为污染物迁移转化和溯源模型提供计算网格和水动力环境场,污染物迁移转化模型进一步预测污染物的漂移路径、扩散范围、转化过程等行为特征,预测结果为污染物的搜寻提供指引,搜寻反馈结果进一步优化预测模型参数,提高模拟预测精度;污染物溯源模型则可以根据当前发现的污染物位置和范围,并结合历史风场、流场和海浪等海洋水动力环境参数,实现污染物的回推追溯,为查找污染源头提供依据。一

表 1 中国近岸海域水动力环境动态预测模型库
Table 1 Hydrodynamic prediction model library of China offshore area

尺度	区域	模型
大尺度	海区	渤海、黄海、东海、南海
		渤海(4个):金普湾、辽东湾、渤海湾、莱州湾 黄海(6个):大连湾、套子湾、桑沟湾、北湾、胶州湾、海州湾
中尺度	海湾	东海(16个):杭州湾、象山港、三门湾、台州湾、临海湾、乐清湾、温州湾、三沙湾、罗源湾、福清湾、兴化湾、湄洲湾、泉州湾、厦门港、东山湾、诏安湾
		南海(17个):汕头港、碣石湾、红海湾、大亚湾、广海湾、镇海湾、海陵湾、水东湾、湛江港、雷州湾、安铺港、铁山湾、廉州湾、钦州湾、防城港、铺前港湾、后水湾
		渤海(1个):滦河口 黄海(2个):鸭绿江口、灌河口 东海(2个):长江口、闽江口 南海(2个):珠江口、大风江口
小尺度	河口	
	核电	渤海(1个):红沿河核电厂 黄海(3个):石岛湾核电厂、海阳核电厂、田湾核电厂 东海(5个):秦山核电厂、方家山核电厂、三门核电厂、宁德核电厂、福清核电厂 南海(6个):岭澳核电厂、大亚湾核电厂、台山核电厂、阳江核电厂、防城港核电厂、昌江核电厂

旦发生海上突发环境事件,预测预警系统在收到事件位置、范围等信息以及事故海域水动力环境参数后,迅速启动污染物迁移转化预测和溯源模型,根据需要模拟预测污染物迁移路径、扩散范围、转化规律等未来变化趋势,或回推追溯污染源头,为事故应急提供有效的决策信息,最大程度地降低环境破坏、经济损失和人员伤亡。

2.3 环境风险评价技术

海上突发环境事件发生后,应急处置措施的制定是由事故的环境风险程度决定,科学准确地评判事故环境风险并及时进行预警将有助于制定适度的应急措施,避免造成不必要的人力、物力和财力浪费,因此预测预警系统在海洋水动力环境动态预测模型以及污染物迁移转化预测模型的基础上集成了包含环境风险评价指标体系、评价方法的环境风险评价技术,根据污染物迁移转化模拟预测结果和周边海域环境敏感性来评价事件的环境风险程度,自动确定预警级别和预警措施。早期的环境风险评价技术主要根据污染物量、污染物特性、污染范围等一些简单、易获取的指标通过加权计算来评价事件的环境危害程度^[12]。这种方法只是通过污染物自身的危害程度来评估事件对海洋生态环境的危害,缺少事故发生海域的环境特征因素等。随着海上污染物模拟预测技术的发展,结合污染物行为特征模型和事故海域环境特征来定量评估事件对周围环境敏感区的危害性已经成为发展趋势^[13-14]。本研究采用层次分析法^[15],通过搜集资料、专家咨询、统计分析等手段,考虑污染物量、扩散面积、漂移速度和方向、离岸距离等污染行为特征和周边海域功能区类型、岸滩和岸线类型、生物量、生物多样性等海域环境敏感性特征,建立具有代表性、可评价性的海上突发环境事件环境风险评价指标体系和评价方法,对风险因子进行叠合分析来评估事件环境风险程度。

2.4 预测预警报告编报技术

预测预警报告是决策者处置海上突发环境事件过程中最需要的辅助决策文件,自动快速生成海上突发环境预测预警报告对提高应急效率至关重要。本研究构建的预测预警系统集成了预测预警报告编报技术,可以自动将污染物迁移转化模拟预测技术和环境风险评价技术得到的污染物迁移路径、扩散范围、到达环境敏感区的可能时间,以及环境风险危害程度、预警等级和措施等预测预警数据和相关图集进行整合,并按照标准行文格式进行编报,生成海上突发环境事件预测预警报告,为事件应急处置提

供决策支持。该项技术解决了传统的由专家汇总信息、集体讨论、人工编写报告等因素导致的响应时间长、主观因素强等弊端,大大节省了时间,提高了应急效率。

2.5 预测预警产品动态化展示和个性化订制技术

直观、动态、灵活、友好的预测预警产品展示将有助于决策者更加高效地掌握海上突发环境事件发展演变趋势,进而提高应急决策的科学性和有效性。因此,预测预警系统集成了预测预警产品动态化展示和个性化订制技术,基于地理信息系统(GIS)平台,通过 GIS 技术为用户提供对基础地理信息、海洋水动力环境要素、海洋功能区、海洋红线区、污染物迁移转化预测或溯源结果等各类数据的分层叠加可视化集成与展示,使用户对事故发展动态进行更为直观的把握。在水动力环境要素方面,提供未来 72 h 海域水位和三维流场、水温、盐度等水动力环境动态可视化产品,包括不同时间的水位分布等值图,不同时间和剖面水层的欧拉流场、拉格朗日粒子流场和温盐分布等值图,任意点位的剖面海流和温盐时间变化趋势线,以及任意截面的海流和温盐剖面分布图;在污染物迁移转化预测和溯源方面,可以根据需要提供未来(或过去)一段时间的污染物迁移转化预测(或溯源)动态可视化产品,包含污染物分布范围、迁移路径、外缘线和扫海面积等产品,并集成了遥感应急监测结果,用于对预测结果的对比验证;同时,系统还可以根据不同用户的需要,根据时段、空间范围、产品格式和分辨率等选项组合订制个性化产品,查询对应的数据,生成相应的图集,以满足不同的个性化需求。此外,系统还可以叠加海洋功能区划、生态红线区、风场等信息用于综合分析决策。

3 系统实现及应用

3.1 系统软件实现

预测预警系统的软件开发严格遵循规范化、流程化、模块化、实用性、易操作、易维护的基本原则,基于 GIS 平台和 Oracle 数据库,采用高性能并行计算、三维时空大数据处理、动态图形渲染、多任务同步执行、跨平台数据交互等信息技术将各类相关硬件设备和软件功能模块高度集成融合,为海上突发环境事件的应急决策提供高效精准的预测预警服务。海上突发环境事件系统结构框架见图 3。

系统硬件设备主要包括高性能计算集群系统、GIS 服务器、数据库服务器和终端显示等,其中高性能计算集群系统强有力地保障了海洋水动力环境动

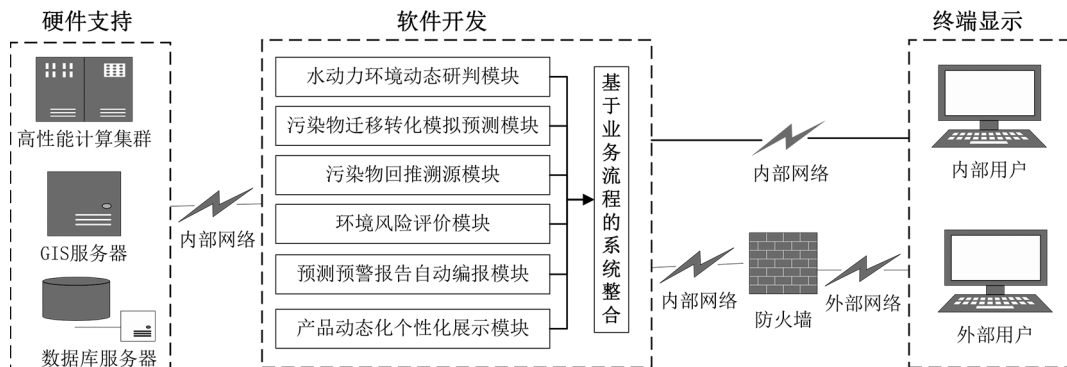


图3 海上突发环境事件预测预警系统结构框架

Fig.3 Structural framework of marine environmental emergency prediction and early warning system

态研判和污染物迁移转化模拟预测应急业务工作的快速高效开展;GIS服务器用于运行基于ArcGIS平台的各类地图服务,可动态生成三维水动力场、污染物分布场等地图产品,供应急决策查看调用;数据库服务器基于Oracle关系型数据管理技术,将海洋水动力环境参数、污染物迁移转化预测数据,以及海域海洋功能区划、生态红线区划、环境敏感资源分布、污染物特性参数、相关法律规划预案等各类数据源进行科学化、规范化和标准化管理。系统软件开发遵循模块化原则,主要包括水动力环境动态研判、污染物迁移转化模拟预测、污染物回推溯源、环境风险评价、预测预警报告自动编报、产品动态个性化展示6大功能模块,各个模块功能明确,按照业务流程进行系统整合,模块之间通过建立通讯接口进行数据交互,相互独立但又相互依赖、相互配合实现预测预警工作的顺利开展。系统生成的预测预警产品动态发布在信息平台上,内部网络授权用户登录平台即可查看相关产品,外部网络授权用户则需要通过VPN账号加密登录平台进行查看。

3.2 实战应用

3.2.1 事故基本概况

2021年4月27日8:51,杂货船“义海”轮与油船“交响乐”轮发生碰撞,事故导致约9400t船载货油泄漏入海,造成海域污染,构成特别重大船舶污染事故^[16]。事故点位于青岛朝连岛农渔业区海洋功能区内,水深约35m,在青岛市东南方向约65km,距朝连岛约19km,距领海外部界限最近距离约4.5km。事故周边70km范围内有6个海洋保护区,需要启动突发事件的预测预警响应。

3.2.2 预测预警系统运行

于2021年4月27日17:00开始海上突发事件预测预警工作,搜集事故海域海面风场预报数据,运行海上突发环境事件预测预警系统。首先,启动水

动力环境动态研判模块,运行水动力环境动态预测模型库中的黄海大尺度和胶州湾中尺度嵌套水动力环境动态预测模型,借助高性能计算集群,17:40左右得到事故海域附近未来7d的流场、水位和温盐等水动力环境参数预测结果。

随后,启动污染物迁移转化模拟预测模块,运行SIMAP溢油行为和归宿模拟系统,以4月27日9:00为起报时间,根据获取到的事故信息设置油品特征、溢油量、溢油速率等参数,将事故海域风场和流场预测结果作为驱动力,18:10左右计算得到未来2d的油污漂移路径、扩散范围和转化情况等数据和图集。模拟预测结果显示,在风和潮流的共同作用下,溢油入海后污染面积不断扩大,整体向东北向运移,12h后,最远扩散至偏东北约15.2km处,扩散范围约35.7km²,扫海面积约65.1km²;24h后,最远扩散至偏东北约16.0km处,扩散范围约85.3km²,扫海面积约206km²;48h后,最远扩散至偏东北约29km处,扩散范围约166.1km²,扫海面积约453.7km²。

然后,启动环境风险评价模块,综合油污迁移转化模拟结果和周边海域环境敏感特征,18:30左右得到事故造成的环境危害程度和预警等级;按照预定好的文本格式集成整合预测预警数据和主要图集,18:50左右自动编报生成《黄海“交响乐”轮溢油事故应急预测预警报告》;最后,19:10左右预测预警产品上传至预测预警系统平台前端进行动态化展示。本次预测预警工作历时约2h。海上事故应急监测和处置队伍根据系统提供的油污漂移路径和扩散范围等指引信息在事故周边海域开展油污搜寻和环境监测,海上实测油污分布和预测结果有较高的吻合度,充分证明了预测结果的准确可靠性。

利用“交响乐”轮溢油事故对预测预警系统进行了全面、长时间的业务化实战检验,检验结果证明,

原有零散、不成体系的海上突发环境事件预测预警关键技术按照业务流程进行系统化、信息化整合后表现出强大的合力,各集成模块之间衔接顺畅,大大缩短了海上突发环境事件预测预警响应时间,极大提高了应急效率,为应急处置决策的制定赢得了宝贵时间,有效保障了应急工作的顺利开展。

4 结 语

海上突发环境事件预测预警是应急响应的前提和基础,为污染物的搜寻、应急监测和处置提供指引,在很大程度上影响着应急决策的科学性和有效性。中国海上突发环境事件预测预警系统的研发在很大程度上解决了相关技术零散、不成体系的问题,实现了预测预警关键技术高度的流程化、系统化整合,大大提高了预测预警效率,为应急决策提供了科学有效的支撑作用。目前,系统的有效性和准确性已在近年发生的多起海上突发环境事件中得到了应用和证明,但仍然有待于进一步完善,主要包括进一步完善水动力环境动态预测模型库,建立覆盖中国管辖海域以及西太平洋等周边重点海域的高分辨率、精细的水动力环境动态预测模型库;弥补危险化学品泄漏和放射性污染迁移转化模拟预测技术短板,研发或引进相关模型产品;进一步论证和完善环境风险评价指标体系、评价方法和预警等级划分标准,更加科学定量地评估事件的环境危害程度。随着系统的不断优化完善和大力推广应用,将进一步提高中国海上突发环境事件预测预警能力,为海洋突发事件的应急响应保驾护航。

参考文献:

[1] 张硕,姚子伟.海洋突发环境事件应急响应体系:现状及建议[J].环境保护,2019,47(11):19-24.

[2] 马继瑞,韩桂军,李威,等.海洋三维温盐流数值模拟研究的有关进展和问题[J].海洋学报,2014,36(1):1-6.

[3] 朱国平,周梦潇.海洋数值模型发展及其在海洋生物扩散模拟研究中的应用进展[J].海洋渔业,2020,42(2):245-256.

[4] 匡翠萍,胡成飞,冒小丹,等.秦皇岛海域洪季水动力及污染物扩散数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(9):1355-1360.

[5] 穆迪,陶建华,张秋丰.渤海湾近岸海域氮磷营养盐和浮游生物的数值模拟[J].水动力学研究与进展 A 辑,2013,28(2):135-143.

[6] 崔萍,刘桂云,陈周滨,等.港口船舶污染海洋环境风险分级评估研究[J].水道港口,2022,43(5):668-676.

[7] 刘书明,李潇,张健,等.天津市海洋环境风险综合评价研究[J].环境污染与防治,2018,40(11):1300-1305.

[8] 王刚,张霞飞.海洋环境风险:概念、特性与类型[J].中国海洋大学学报(社会科学版),2016(1):7-12.

[9] 匡翠萍,谢华浪,苏平,等.蓬莱 19-3 溢油运移与归宿数值模拟和分析[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(10):1585-1594.

[10] 褚芹芹,李磊,李培良.胶州湾潮流场的示踪粒子数值模拟研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(11):29-34.

[11] 章耕耘.基于 SIMAP 的海洋溢油生态损害评估方法研究[D].厦门:集美大学,2015.

[12] KOOPS W.Emergency level scale assessment model; ELSA. A new diagnostics system to support decision making in case of accidental spills in the marine environment[J]. Oil & Chemical,1990,6(4):307-320.

[13] 毕研军,刘心田,宋协法,等.基于 GNOME 的溢油污染渔业资源损失评估[J].渔业科学进展,2020,41(3):1-10.

[14] 段驰,宁灏,丁志斌,等.基于 MIKE21 的三都港溢油风险研究[J].中国水运,2023,23(2):47-49.

[15] 杨永俊,赵骞,韩成伟,等.基于公平原则的海域—流域水污染物总量分配方法研究[J].海洋环境科学,2019,38(5):796-803.

[16] 宋鹏斐.海上突发溢油事故应急处置案例研究[J].三峡生态环境监测,2022,7(2):67-74.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2023-05-15)

(上接第 1590 页)

[26] AL OBAIDI M A, LI J P, KARA ZAÏTRI C, et al. Optimisation of reverse osmosis based wastewater treatment system for the removal of chlorophenol using genetic algorithms[J]. Chemical Engineering Journal,2017,316:91-100.

[27] BHATTI M S, KAPOOR D, KALIA R K, et al. RSM and ANN modeling for electrocoagulation of copper from simulated wastewater: multi objective optimization using genetic algorithm approach[J]. Desalination,2011,274:74-80.

[28] BRAUNS E, VAN HOOFF E, HUYSKENS C, et al. On the concept of a supervisory, fuzzy set logic based, advanced filtration control in membrane bioreactors[J]. Desalination & Water Treatment,2011,29(1/2/3):119-127.

[29] MOGHADDAM A H, HAZRATI H, SARGOLZAEI J, et al. Assessing and simulation of membrane technology for modifying starchy wastewater treatment[J]. Applied Surface Science,2017,7(6):2753-2765.

[30] BADRNEZHAD R, MIRZA B. Modeling and optimization of cross-flow ultrafiltration using hybrid neural network-genetic algorithm approach[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2014,20:528-543.

[31] SOLEIMANI R, SHOUSHARI N A, MIRZA B, et al. Experimental investigation, modeling and optimization of membrane separation using artificial neural network and multi-objective optimization using genetic algorithm[J]. Chemical Engineer Research,2013,91(5):883-903.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2023-05-21)