

DOI: 10.5846/stxb202003140545

乔冰, 兰儒, 李涛, 陈明波, 聂宁, 石敬, 任利利, 段君雅, 俞博凡. 海洋溢油生态环境损害因果关系判定方法与模型研究. 生态学报, 2021, 41(13): 5266-5278.

Qiao B, Lan R, Li T, Chen M B, Nie N, Shi J, Ren L L, Duan J Y, Yu B F. Method and model for determining the causal relationship between marine oil spill and ecological environment damage. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5266-5278.

海洋溢油生态环境损害因果关系判定方法与模型研究

乔冰*, 兰儒, 李涛, 陈明波, 聂宁, 石敬, 任利利, 段君雅, 俞博凡

交通运输部水运科学研究院, 北京 100088

摘要:海洋溢油对生态环境造成污染损害,构成了对海洋环境安全和人体健康的重大威胁,科学地评估溢油污染损害可以发挥为损害修复和赔偿仲裁提供依据的重要作用,为成就这一目标,亟待加强有关溢油污染损害的因果关系及其判定方法与准则的相关理论、技术方法和业务化应用的研究。为此,在对不同原油的各馏分占比和分类组分及含量进行统计分析的基础上,构建了溢油成分统计均值指标体系,基于 WHO/IARC 化学物质引起人类癌症危险性评价,揭示了不同种类溢油所造成的海洋生态环境损害类型和程度有所不同的因果关系,进而研究提出了基于溢油环境归宿和 POPs 毒性理论的损害机理分析方法,构建了包括事故发生、成分含量、分类后果、时空分布 4 类判定准则及其相应指标体系的海洋生态环境损害因果关系判定方法,提出了包括因果关系判定模型、多类型辅助评估模型、调查试验诊断评估方法及业务化流程、以及损害基线与程度判定准则及指标体系的海洋生态损害评估模型体系总体架构,设计阐述了多类型辅助评估模型、损害基线与程度判定准则及指标体系的构建方案。针对辅助评估模型中具有代表性的易受损因子——海水水质指标的损害因果关系判定和损害程度量化问题,构建了基于溢油风化缩比仿真试验的溢油风化水质影响评估模型,采用溢油事故引起海水水质超过不同等级水质标准的超标面积,以及事故发生前后实测的相关海域海水水质超过不同等级水质标准的超标面积发生变化以及出现峰值的状况,作为判定损害因果关系存在和评估损害程度的量化指标,通过开展“塔兹曼海”、大连“7.16”等发生于渤海和黄海的溢油及危化品事故案例调查,实施了判定方法与模型的应用研究,对模型参数进行了率定,模型和实测结果均显示,在具有连通性的渤海和黄海水域,不同时段超过不同等级海水水质标准的超标面积增量与该海域实际发生溢油事故的时间存在显著的关联响应关系。综合判断,溢油污染损害与污染事故发生的时间和位置、所处海域的连通性及扩散条件、入海溢油的总量及环境污染持久性呈密切相关的因果关系。

关键词:海洋溢油;生态环境损害;因果关系判定;评估模型;损害基线

Method and model for determining the causal relationship between marine oil spill and ecological environment damage

QIAO Bing*, LAN Ru, LI Tao, CHEN Mingbo, NIE Ning, SHI Jing, REN Lili, DUAN Junya, YU Bofan

China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China

Abstract: Marine oil spill has caused pollution damage to the ecological environment, which constitutes a major threat to the safety of the marine environment and human health. Scientific assessment of oil spill pollution damage can play an important role in providing basis for damage repair and compensation arbitration. In order to achieve this goal, it is urgent to strengthen the research on the causality of oil spill pollution damage and the related theories, technical methods and operational application of the judgment methods and criteria. To this end, based on the statistical analysis of the proportion of each fraction and the classified components and contents of different crude oils, this paper constructs the statistical mean

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0503602)

收稿日期:2020-03-14; 修订日期:2021-04-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiaobing@wti.ac.cn

index system of oil spill components. And based on the WHO/IARC risk assessment of human cancer caused by chemical substances, this paper reveals the causal relationship between the different types and degrees of marine ecological environment damage caused by different types of oil spills. A damage mechanism analysis method based on the environmental fate of oil spill and persistent organic pollutants (POPs) toxicity theory is then proposed, and a causal relationship determination method of marine ecological environment damage is established, which includes four kinds of judgment criteria of accident occurrence, component content, classified consequence, temporal and spatial distribution and corresponding index system. The overall framework of marine ecological damage assessment model system is proposed, including causal relationship determination model, multi type auxiliary assessment model, investigation and test diagnostic assessment method and operational process, as well as damage baseline and degree determination criteria and index system. In addition, this paper further designs the construction scheme of multi type auxiliary evaluation model, damage baseline and degree judgment criteria and index system. Aiming at the problems of causality judgment and damage degree quantification of seawater quality index, which is the representative vulnerably damaged factor in the auxiliary evaluation model, an oil spill weathering water quality impact evaluation model based on scale-down simulation test of oil spill weathering is constructed. The area exceeding the water quality standards of different classes caused by the oil spill accident and the change and the situation of peak value of the area exceeding the water quality standards of different classes actually monitored before and after the accident are adopted as important indicators in order to determine the causal relationship of damage and evaluate the degree of damage. Through the investigation of oil spills and hazardous chemicals accidents happened in the Bohai Sea and the Yellow Sea, such as "Tazman Sea" and Dalian "7.16" oil spills, the application research of judgment method and model was carried out, and the model parameters were calibrated. Both the model and the actually monitored results show that there is a significant correlation between the area increment exceeding the water quality standards of different classes and the actual time of oil spill happened in the Bohai Sea and the Yellow Sea with connectivity. Comprehensive judgment shows that there is a close causal relationship between the oil spill pollution damage and the time and location of the pollution accident happened, the connectivity and diffusion conditions of the sea area, the total amount of oil spilling into the sea and the persistence of environmental pollution.

Key Words: marine oil spill; ecological environment damage; causality determination; assessment model; damage baseline

石油是人类生产和生活中重要的能源和资源,在全球范围内被广泛地开采、加工、存储和运输,在促进发展的同时,也存在着事故风险隐患。溢油污染事故往往造成巨大的环境经济损失^[1],构成了对海洋环境安全及人体健康的重大威胁。科学地判定海洋溢油对生态环境的污染损害,对于损害赔偿的司法仲裁^[2]和赔偿基金的索赔及理赔^[3]均具有重要的科技支撑作用,同时也是及时、充分地开展损害修复的重要依据。鉴于我国在生态环境损害评估范围的界定、阈值判定、评估方法、环境损害行政调节及监督机制等方面仍严重缺失^[4-6],国家重点研发计划也提出了相关研究方向,即:判定生态环境损害基线、因果关系、损害程度,为生态环境损害鉴定评估提供业务化技术支持^[7],海洋溢油生态环境损害判定是其中的重要内容。以往的相关研究侧重在污染源诊断和损害程度调查的方法与流程^[1]、海洋生态系统影响模型^[8]以及与之相耦合的溢油漂移模型^[9]、溢油风化模型^[10]等方面,对于溢油污染损害的因果关系及其判定方法与准则却鲜有专题研究,难以形成对海洋溢油生态环境损害司法鉴定等业务工作的有效支持,亟待加强相关理论、技术方法和业务化应用的研究,以保证损害鉴定评估工作的科学性、系统性、实用性和可操作性。本文基于对海洋溢油环境归宿和生态环境损害的机理分析,研究提出了海洋溢油与多生境多营养级海洋生态系统易受损因子所受损害之间的因果关系判定准则及其指标体系,从海洋溢油事故的损害鉴定评估以及生态风险评价等业务化应用角度,提出了服务于海洋溢油生态环境损害因果关系判定的损害评估模型体系及多类型辅助评估模型,包括溢油遥感监视模型、油指纹鉴别分析模型、溢油品种和成分检索模型、溢油风化模型、溢油源项分析模型、溢油海

物”^[14],汽炼、裂化渣油和汽炼的石油沥青、原油均被 IARC 评价为“对人致癌性不能分类”^[16]。因此,在因果关系判定中,应首先对油品的种类和组分进行必要的定性及定量分析,再根据分析结果、溢出及清除状况、气象海况条件,以及借助必要的分析模型及数据库,判定进入海洋环境的主要成分及数量,并采用本文后续提出的判定方法和模型体系,进一步判定溢油事故对多生境多营养级生态环境的损害类型、时空分布及损害程度。

1.2 基于溢油环境归宿和 POPs 毒性理论的损害机理分析方法

溢油在进入多生境多营养级海洋生态环境之后,会发生一系列复杂的迁移转化过程,并对暴露的环境受体造成相应的污染损害。这些过程包括:溢油在海面及不同水深层漂移扩散,随自然风化作用部分蒸发于空气,或溶解及分散于水体(图 2),当接触到海岸、沉积层或海洋生物时,会发生多介质间的迁移转化和被生物吸收及累积,有可能经由食物链形成生物富集和生物放大,以及进入人体(图 3)。结合 POPs 对生物细胞分子的损害机理和毒理分析理论^[17-18],我们提出了海洋溢油生态环境损害机理,以及造成人体健康危害的途径及后果,具体说明如下:

当生物体暴露于油类污染物,其细胞及分子因功能和结构发生紊乱而启动自修复,一旦污染物暴露浓度达到一定水平,则会出现过度修复或引起修复受阻,进而产生一系列的毒理效应,包括:降低浮游植物分裂率和光合作用速率,引起生物体组织坏死及纤维化,导致后代成活率下降,发生遗传变异,抑制免疫系统功能,形成细胞增生、肿瘤以及恶性肿瘤等,相应地会损害生态系统的结构、过程和功能,危害人体健康,上述损害机理示意详见图 2。

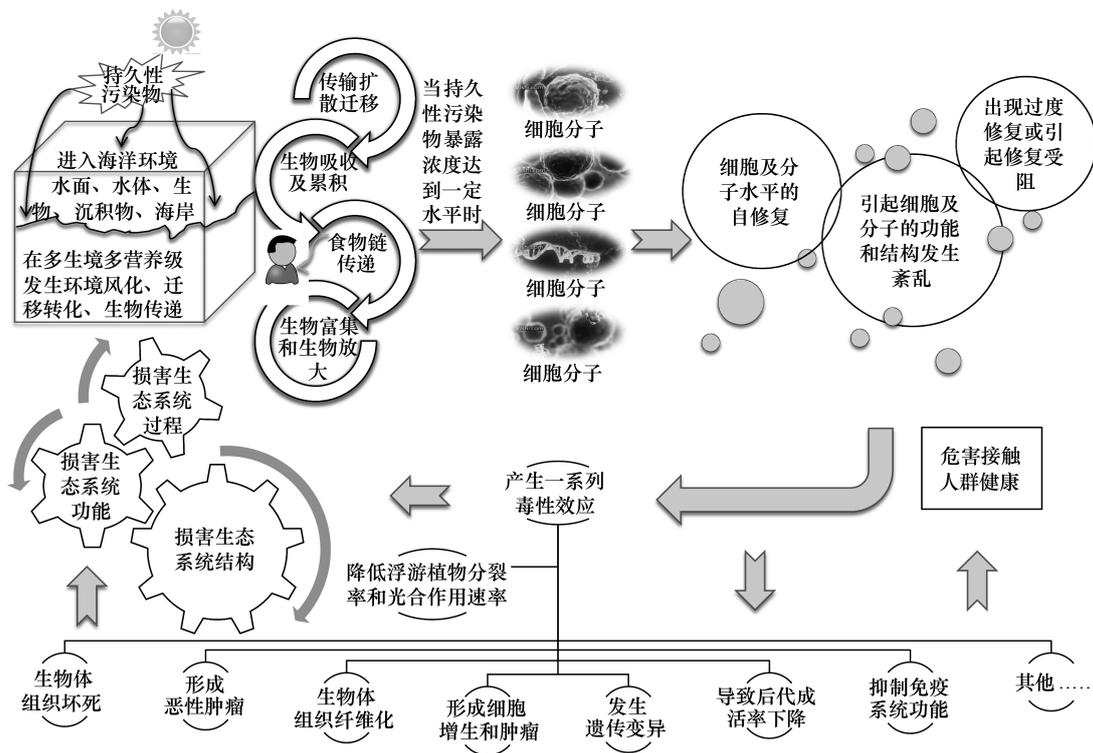


图 2 海洋溢油环境归宿及生态损害机理示意图

Fig.2 Environmental fate and ecological damage mechanism of marine oil spill

溢油进入人体的途径包括:呼吸摄入,皮肤接触吸收,通过海洋生物食物链进入鱼类、肉类、奶乳制品而被食入,以及通过胎盘及哺乳传入婴儿体内。油类污染物一旦富集于人体器官、脂肪和纤维,则有可能引起内分泌紊乱、神经行为失常、生殖及免疫系统破坏、癌症及肿瘤、发育不良等症状,进而形成接触人群中相关疾病发病率较高的危害后果,危害路径和后果示意详见图 3。

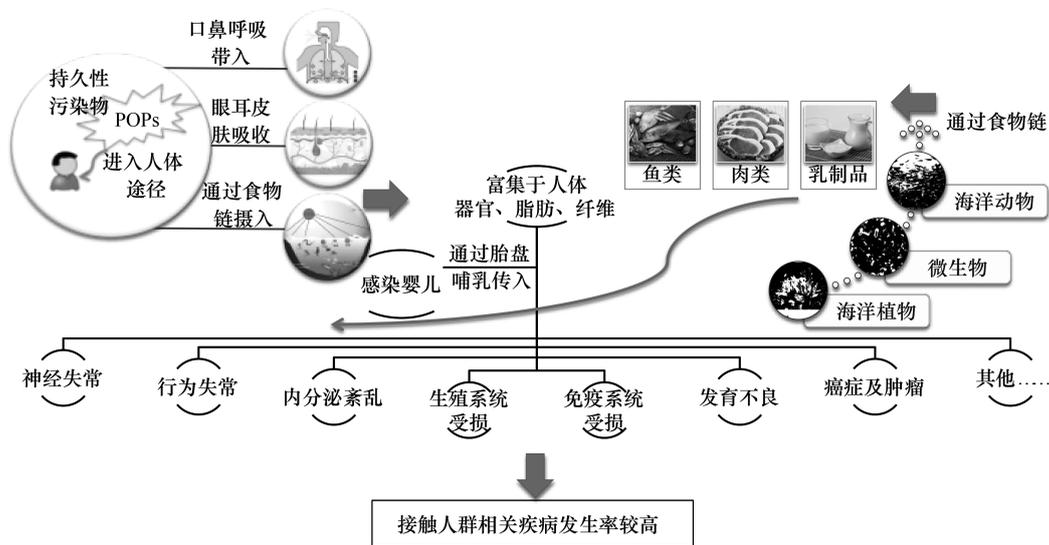


图3 海洋溢油生态环境损害造成人体健康危害的途径及后果示意图

Fig.3 Path and consequence of human health harm caused by marine oil spill ecological environment damage

1.3 海洋溢油生态环境损害因果关系判定方法

依据上述机理分析,笔者认为,海洋溢油事故的发生是造成相应的海洋生态环境损害和人类健康危害的前提条件,两者之间存在因果关系是毋庸置疑的,因此,首先十分有必要对溢油的源项作出具体判定,包括时间、地点、环境条件、溢出物种类、数量及处置状况等。其次,溢油的种类、化学成分及含量决定了其在海洋环境中的归宿、危害程度和持续时间,是进一步判定溢油与损害之间因果关系的重要依据。第三,海洋溢油可造成对多生境多营养级生态环境因子的污染损害,因此需要科学、系统、全面地判定不同类型易受损因子所受损害的后果。第四,海洋溢油造成的生态环境损害及人类健康危害与其空间上的暴露分布和暴露的持续时间密切相关,为此需要在开展进一步的调查取证和分析评估基础上,作出相应的因果关系判定。综上所述,本文提出了海洋溢油造成生态环境损害和人类健康危害的因果关系判定方法,其包括具有逻辑递进关系、分别侧重事故发生、成分含量、分类后果和时空分布的4类因果关系判定准则,以及相应的判定指标,基本框架如图4所示,分类因果关系及判定指标详见图5。

2 海洋溢油生态环境损害评估模型体系

2.1 模型体系组成及总体架构

由于海洋溢油事故源项的地点、时间、油种、规模、应急处置状况、以及相应的地形、气象水文及环境条件千变万化,因此,事故源项、损害后果、因果关系的判定具有较大的科学挑战性和技术复杂性,需要得到多方面的技术支撑,以及实现在损害鉴定评估业务中的应用。笔者以因果关系判定模型中事故发生、成分含量、分类后果和时空分布这4类因果关系判定准则为主线,提出了与之对应配套的多类型辅助评估模型的具体构成(图6)。其中,与“判定准则(1)事故发生”相对应的遥感监视监测模型分别针对了损害的因(溢油)和果(影响受体)两个方面,需要建立污染前后遥感信息数据库和危害状况判定准则,油指纹鉴别分析模型及数据库和溢油溯源分析模型用于判定海洋溢油与可疑源项之间的相关关系;与“判定准则(2)成分含量”相对应的溢油品种和成份检索模型及数据库能够快速检索出不同类型原油和成品油的主要化学成分及统计平均含量,溢油成分急慢性毒性模型及数据库能够快速检索出主要溢油成分的急性和慢性毒性指标和定量化毒性阈值判定指标;与“判定准则(3)分类后果”相对应的溢油环境风化模型及数据库能够提供相应溢油品种蒸发、扩展、乳化、悬浮、溶解、沉降的状况和比例;与“判定准则(4)时空分布”相对应的是多种用于定量分析溢油生态环

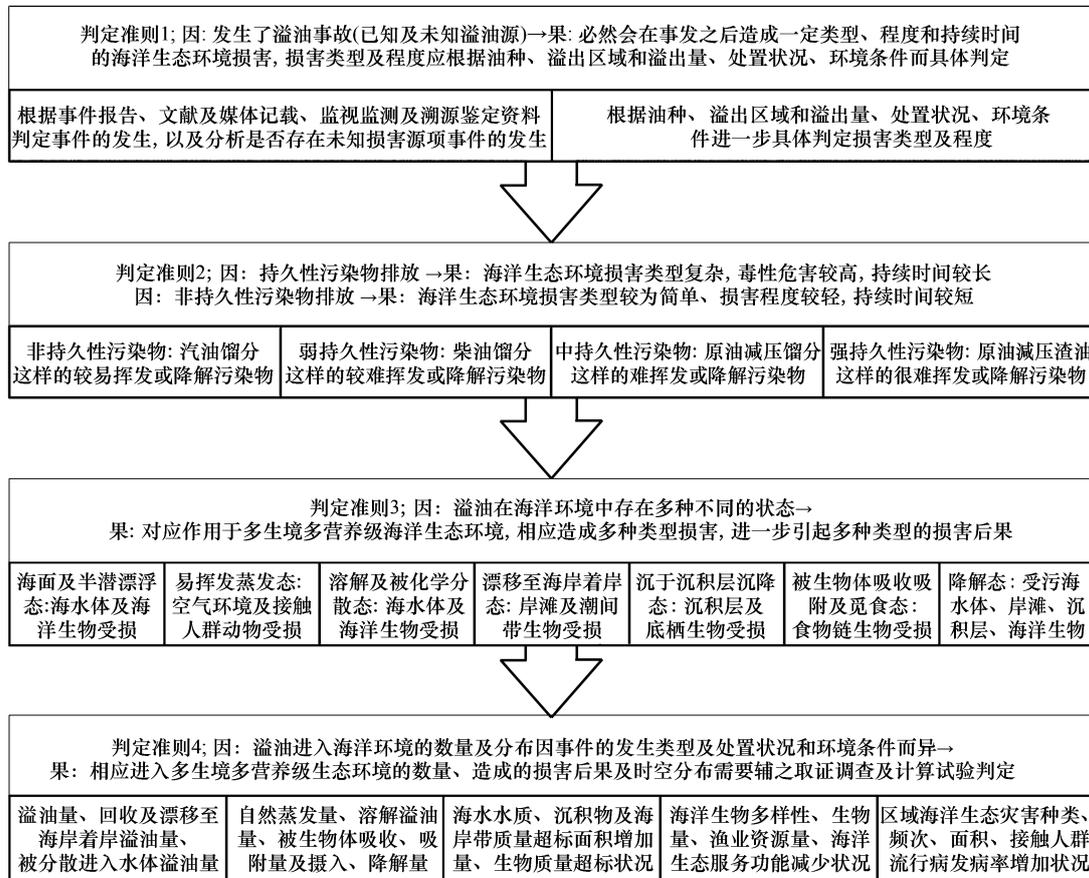


图 4 海洋溢油生态环境损害因果关系判定方法基本框架及流程

Fig.4 Basic framework and process of causal relationship determination method for marine oil spill ecological environment damage

境损害影响及其时空分布的模型,包括源项分析模型及数据库、海洋生态影响动力模型、多生境多营养级生态损害模拟模型、接触人群健康风险分析模型,其中,海洋生态影响动力模型还要以区域海流模型及数据库、海面风场诊断模型及海流耦合模型、溢油漂移轨迹及变化分析模型、区域水质基线及影响模型及数据库、浮游动植物影响动力模型及数据库为基础。为了使上述因果关系判定模型和与之相对应的配套多类型辅助评估模型得以业务化、标准化的建设和运行,还需要构建成套的调查试验诊断分析方法及业务化流程和海洋生态环境损害基线与程度判定准则及指标体系,前者包括已有、将有和应有的相关判定方法及业务化流程,后者包括不同区域、不同类型易受损因子、不同指标项目及等级的定性和/或定量判定指标。上述海洋溢油生态环境损害评估模型体系的组成及总体架构详见图 6。

2.2 多类型辅助评估模型构建方案

多类型辅助评估模型由经过验证的多种类型专业化模型组成,其专业类型主要包括:人工智能辨识模型、数据库及检索模型、缩比仿真试验模型、毒理评估模型、漂移扩散数学模型、风险分析统计模型等^[1,8-10,19-20],可用于相关因果关系判定的辅助技术支持,分类构建方案详见表 1。

2.3 损害基线与程度判定准则及指标体系构建方案

从海洋溢油生态环境损害的机理(图 2)和分类后果(图 5)可以看出,溢油在海洋环境中可呈现多种状态。尽管不同的溢油状态,其所对应的损害受体、类型及后果有所差异,但却比较集中于对某些生态环境因子造成损害,本文将此类环境因子简称为易受损因子,主要包括:海洋水质、海洋底质、海洋生物质量、海洋生物种类组成及数量、栖息密度和生物量、人类健康等。由于溢油的多种状态常同时发生,因此,造成海洋生态环

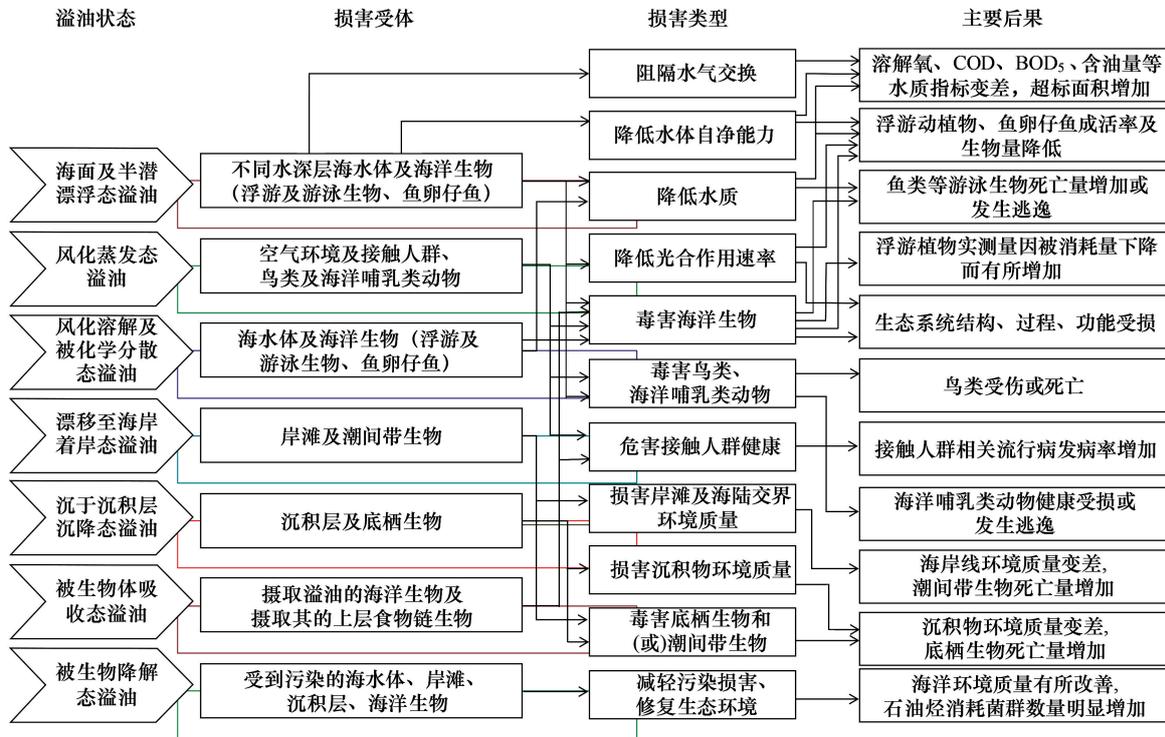


图 5 基于溢油在海洋环境中状态分类的因果关系及判定指标示意图

Fig.5 Causal relationship and judgment index diagram based on classification of oil spill state in marine environment

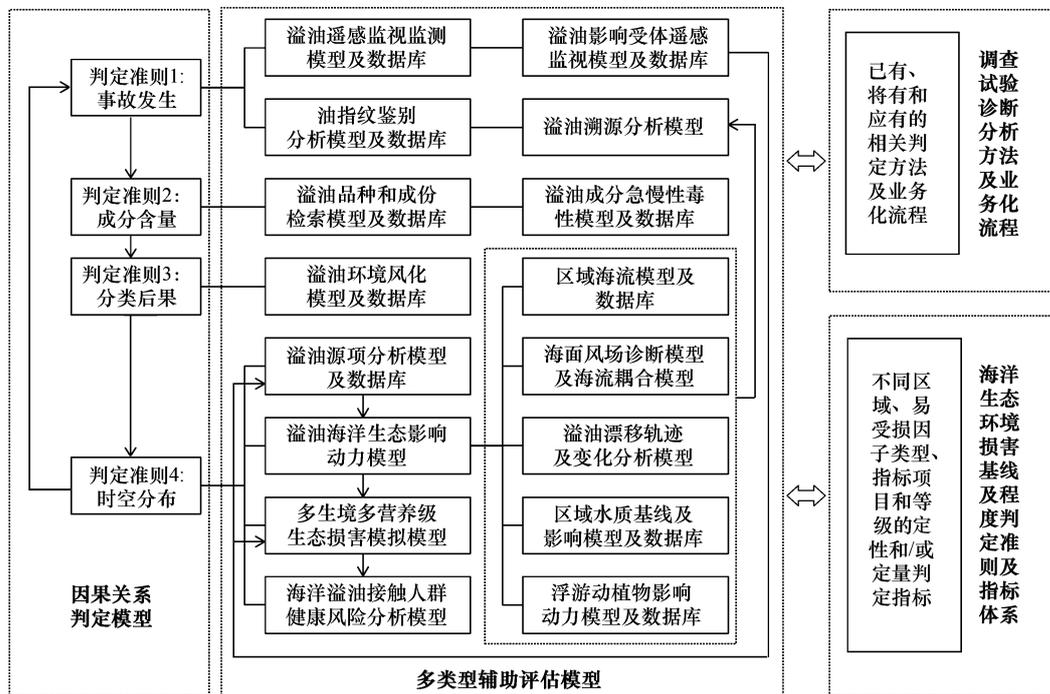


图 6 海洋溢油生态环境损害评估模型体系的组成和总体架构

Fig.6 Composition and overall framework of marine oil spill ecological environment damage assessment model system

境损害的类型及后果具有多生境多营养级广布的特点,存在易受损因子所受损的叠加累积效应。为了判定海洋溢油生态环境损害的程度及其时空分布,需要调查和评估溢油事故发生之前相关区域易受损因子的状态,即:生态环境基线^[21],以及事故发生后受到损害的状态。多生境多营养级易受损因子损害基线和程度判定准则及指标体系的构建方案如表 2。

表 1 辅助评估模型分类构建方案一览表

Table 1 List of classification construction scheme of auxiliary evaluation model

模型名称 Model name	模型组成 Model composition	所需信息 Information required	主要辅助功能 Main auxiliary functions	拓展辅助功能 Expand auxiliary functions
溢油遥感监视模型 Remote sensing monitoring model of oil spill	人工智能辨识模型及数据库	环境遥感信息	判定溢油事故的发生及环境损害程度和范围	辨识海面油膜、着岸溢油、影响受体状况等
油指纹鉴别分析模型 Oil fingerprint identification analysis model	辨识比对模型及数据库 漂移模型及数据库	采集油样谱图信息 溢油发现及气象信息	鉴别事故油种	回推溢油源地点及时间
溢油品种和成分检索模型 Retrieval model of oil spill varieties and components	检索模型及数据库 毒理模型及数据库	原产地及成品油馏分类型信息	检索溢油的成分及含量	溢油毒性评价
溢油风化模型 Oil spill weathering model	用于开展溢油风化试验的物理模型	溢油风化试验信息	判定溢油的环境归宿及分类后果	分析分类风化作用试验模型
溢油源项分析模型 Analysis model of oil spill source term	源项分析模型及数据库	溢油发生及处置情况、主要成分及含量、海面油膜及风化状况等信息	分析估算进入多生境多营养级环境受体的溢油量	根据海面油膜的厚度和面积计算溢油量
溢油海洋生态影响动力及服务功能模型 The dynamic and service function model of the oil spill marine ecological impact	溢油漂移轨迹模型、海洋水质影响模型、浮游动植物影响动力模型、海面风场诊断模型、海流模型、数据库	溢油源项、地形条件、模型边界条件、动态观测等信息	定量模拟海面及半潜溢油、溶解及分散溢油、水质和浮游动植物环境基线及受影响程度的传输扩散时空分布	分析评价相关海洋生态系统结构、过程、功能受到损害的程度和范围
多生境多营养级生态损害评估模型 Ecological damage assessment model of multi habitat and multi trophic level	评估模型及数据库	分季节损害基线和损害程度调查信息	评估沉积物及岸滩环境、底栖生物、渔业资源损害	同上
海洋溢油人体健康风险评估模型 Human health risk assessment model of marine oil spill	健康危害风险分析模型、人群相关流行病学统计分析模型	人群相关流行病学统计调查信息	评价人体健康危害的风险概率及后果	调查分析人群相关流行病学发病率

表 2 受损因子损害基线和程度判定准则及指标体系构建方案一览表

Table 2 List of damage baseline and degree judgment criteria and index system construction scheme of damage factors

易受损因子 Vulnerable factors		判定准则及指标 Determining criterion and indicators		损害基线判定原则 Principle of damage baseline determination
类别 Category	项目 Items	损害基线 Damage baseline	损害程度 Damage degree	
海洋水质 Marine water quality	石油类、溶解氧、COD、BOD ₅ 、苯系物、多环芳烃、苯并芘	溢油事故发生前三年内所在海域指标超过《海水水质标准》(GB 3097-1997)一类至四类标准的面积	一定区域及时段内超过一类至四类海水水质标准的面积增加值	基线值取面积总合较低年份数值
海洋底质 Marine sediment	石油类	溢油事故发生前三年内所在海域指标超过《海洋沉积物质量》(GB18668—2002)一类至三类标准的面积	一定区域及时段内超过一类至三类海洋沉积物质量标准的面积增加值	基线值取面积总合较低年份数值

续表

易受损因子 Vulnerable factors		判定准则及指标 Determining criterion and indicators		损害基线判定原则 Principle of damage baseline determination
类别 Category	项目 Items	损害基线 Damage baseline	损害程度 Damage degree	
海洋生物质量 Marine biological quality	贝类(双壳类)生物石油类	溢油事故发生前三年内所在海域指标超过《海洋生物质量》(GB18421—2001)一类至三类标准生物量	一定区域及时段内超过一类至三类海洋生物质量标准的生物量增加值	基线值取3年平均值
海洋生物种类组成及数量、栖息密度和生物量 Species composition and quantity, habitat density and biomass of marine organisms	浮游植物、浮游动物(包括鱼卵仔稚鱼)、底栖动物、潮间带底栖生物、渔业资源	溢油事故发生前三年内事故所在海域相同季节指标值	根据事故所在海域相同季节海洋生物物种数量、栖息密度和生物量减少量及持续时间判定生态系统结构、过程、功能受损程度	基线值取3年平均值 判定浮游植物指标值的变化应扣除因其他受影响生物指标值减少而带来的消耗量减少值
人类健康 Human health	与溢油相关的流行病(如:消化道、内分泌、神经系统疾病等)发病率	溢油事故发生前三年内事故所在海域周边陆域及海产品主要供应区域人群相关流行病发病率	根据相关人群流行病发病率增加值及持续时间判定	基线值取3年平均值
缺失数据及生态系统服务功能等其他相关指标 Lack of data and ecosystem services and other related indicators	—	采用历史资料 ^[22-28] 、对照区域数据、经验证与实际吻合的模型模拟值判定	根据同类事故和仿真试验类比分析、模拟模型分析、专题研究、参考标准中的相关判定指标确定	可参考《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T 087-2005)和《近岸海域海洋生物多样性评价技术指南》(HY/T 215-2017)等确定

3 判定方法与模型的应用研究

3.1 溢油风化水质影响评估模型

根据本文前述的机理分析,海洋水质是溢油造成环境污染损害的代表性易受损因子。在日常监测和发生溢油事故开展应急监测中,常见的水质监测指标包括 DO、COD、含油量、BOD₅等。以往的溢油模型研究主要集中在溢油漂移扩散的短期预报,预报参量主要为漂移扩散的位置、扫海面积、着岸区域、着岸溢油量、受污岸线长度,用于辅助支持溢油应急行动方案的制定和实施^[9],模拟时长一般不超过溢出后一个月。关于溢油事故对水质污染损害的监测调查,也主要集中在事故附近海域^[1]。然而,进入水体的溢油随着风浪流的联合作用,会漂移扩散到距事发地更远的连通海域,对水质及相关易受损因子构成更大范围、更长时间的污染损害。而现有的模型技术和事故调查由于在模拟时长、水质易受损因子模拟功能、专项监测调查范围等方面存在不足,尚难以辅助支持调查取证与评估溢油事故对水质的较长期影响。为解决这一技术难题,笔者结合溢油风化实验建立了水质影响评估模型(式(1)–(5)),通过将实验结果与文献报道的“塔斯曼海”轮、大连“7.16”溢油事故实测值^[1,29]相比较(该两起溢油事故基本情况的简要介绍详见本文第3.2节),对模型中 DO、COD、含油量、BOD₅浓度的缩比仿真比值作出率定^[10]。继而根据调研的源项资料^[30-31],采用污染面积估算模型(式(4))计算大连“7.16”事故当年及第二年黄海、渤海海域石油类浓度新增超一类海水水质标准的面积。在叠加了大连7.16事故次年发生蓬莱“19-3”溢油事故的影响面积之后^[32],采用式(5)估算的海水水质指标超标面积增加值与海洋环境状况公报实测增加值^[28]能够相互印证(图7),其中,水质超标损害的定量化程度判定指标为:不同海域(渤海、黄海)、不同时段(事故后第一年、第二年)、不同水质超标等级(超一类、二类、三类、四类水质标准)的超标面积增加值(即已扣除了可能隐含的超其他等级水质标准的面积)。上述溢油风化水质影响评估模型计算结果与事故海域水质实测结果的相互印证,体现了如下模型构建及应用方法的优势,一是支持了对该两起溢油事故造成水质超标损害的因果关系判定,二是充分利用了国家现有的海水水质监测指标和监测成果,三是证明了本研究提出的多类型辅助评估模型中的“溢油环境风化模型及数据库”能够有效

地辅助支持因果关系判定模型中“判定准则 3:分类后果”,具体的模型应用计算参数详见表 3。

$$AP_{r_slick_i} = W_{r_spill_i} / A3_r / [T_r(C1_r + C2_r + C3_r + C4_r)] \tag{1}$$

$$W_{r_dpsnd_i} = \max\{\max\{\Delta C'_{i,oil,k}\} \times AP_{r_slick_i} \times H_r, (W_{r_spill_i} - W_{r_recover_i})\} \tag{2}$$

$$\Delta C'_{i,oil,k} = (C_{i,oil,k} - C_{0,oil,k}) \times M_{i,oil,k} \times H_{e,k} / H_r \times T_r / T_{e,k} \tag{3}$$

$$AP_{r_dpsnd_{i,n}} = W_{r_dpsnd_i} / H_r / (S_{oil,n} - C'_{0,oil}) \times F_{i,k,n} \tag{4}$$

$$AP_{i,n} = AP_{0,n} + AP_{r_dpsnd_{i,n}} \tag{5}$$

式中, $AP_{r_slick_i}$:待评估区域溢油在第 i 时段的油膜覆盖面积; $W_{r_spill_i}$:待评估区域溢油在第 i 时段的溢出规模; $T_r, A3_r$:待评估区域溢油最大油膜厚度、油品密度; $C1_r, C2_r, C3_r, C4_r$:待评估油种重度、中度、轻度、其他污染区油膜厚度调整因子; $\Delta C'_{i,oil,k}$:根据风化实验结果计算的第 k 油种风化实验第 i 时段水中含油量浓度变幅; $C_{0,oil,k}, C_{i,oil,k}$:第 k 油种风化实验水中含油量背景浓度和第 i 时段实验浓度; $M_{i,oil,k}$:第 k 油种风化实验第 i 时段水中含油量浓度变幅调整因子; $H_{e,k}, H_r, T_{e,k}$:第 k 油种风化实验水深、溢油案例水域水质采样点平均水深、第 k 油种风化实验油膜厚度; $W_{r_recover_i}$:待评估区域第 i 时段溢油回收量; $W_{r_dpsnd_i}$:待评估区域第 i 时段进入水体溢油的重量; $AP_{r_dpsnd_{i,n}}$:溢油对非封闭水域水质造成超第 n 类水质标准的影响区域面积; $S_{oil,n}$:第 n 类水质标准的水中含油量限值; $C'_{0,oil}$:待评估区域水中含油量背景浓度; $F_{i,k,n}$:第 k 油种第 i 时段第 n 类水质影响系数, $F_{i,k,n} = F1_{i,k} \times F2_{i,k} \times F3_{i,k,n}$, $F1_{i,k}$:第 k 油种第 i 时段溢油引起其他水质指标超标系数, $F2_{i,k}$:第 k 油种第 i 时段污染物降解系数, $F3_{i,k,n}$:第 k 油种第 i 时段第 n 类水质标准影响的溢油量占比; $AP_{i,n}$:第 i 时段超第 n 类水质标准海域面积; $AP_{0,n}$:溢油事故发生前超第 n 类水质标准海域面积。

从式(1)可以看出,在根据油膜面积估算溢油量时,需要将溢油体积转换为重量,油品密度和不同厚度油膜面积是决定转换结果的重要参量。从式(2)一(4)可以看出,水中含油量和回收溢油情况是判别水质超标面积的重要指标。上述重要参量和指标对于溢油事故损害程度的定量判定具有敏感性,应作为相关调查取证的重要证据,尽可能减少其不确定性。

表 3 大连“7.16”事故当年及次年水质影响评估模型的部分参数取值

Table 3 Partial parameter values of water quality impact assessment model in the year and the next year of Dalian“7.16” accident

区域 Region	参数 Parameter								
指标 Index	H_r/m	$F1_{i=1,k}$	$F2_{i=1,k}$	$F1_{i=2,k}$	$F2_{i=2,k}$	$AP_{0,n=1}/km^2$	$AP_{0,n=2}/km^2$	$AP_{0,n=3}/km^2$	$AP_{0,n=4}/km^2$
渤海 Bohai Sea	18	5.3	1	5.3	0.6	8970	5660	4190	2730
黄海 Yellow Sea	33	5.3	1	5.3	0.6	11250	7930	5160	2150
指标 Index	$C'_{0,oil}/(m/L)$	$F3_{i,k,n=1}(i=1)$	$F3_{i,k,n=2}(i=1)$	$F3_{i,k,n=3}(i=1)$	$F3_{i,k,n=4}(i=1)$	$F3_{i,k,n=1}(i=2)$	$F3_{i,k,n=2}(i=2)$	$F3_{i,k,n=3}(i=2)$	$F3_{i,k,n=4}(i=2)$
渤海 Bohai Sea	0.032	0.18	0.08	0.38	0.35	0.275	0.185	-0.17	0.71
黄海 Yellow Sea	0.032	0.03	0.00	0.16	0.81	0.03	-0.01	-0.10	1.08

表变量符号 H_r 为溢油案例水域水质采样点平均水深; $C'_{0,oil}$ 为待评估区域水中含油量背景浓度; $F1_{i=1,k}, F1_{i=2,k}$ 为第 k 油种第 $i=1, i=2$ 时段溢油引起其他水质指标超标系数, $F2_{i=1,k}, F2_{i=2,k}$ 为第 k 油种第 $i=1, i=2$ 时段污染物降解系数; $F3_{i,k,n=1}, F3_{i,k,n=2}, F3_{i,k,n=3}, F3_{i,k,n=4}$ 为第 k 油种第 i 时段第 $n=1, n=2, n=3, n=4$ 类水质标准影响的溢油量占比; $AP_{0,n=1}, AP_{0,n=2}, AP_{0,n=3}, AP_{0,n=4}$ 为溢油事故发生前超第 $n=1, n=2, n=3, n=4$ 类水质标准海域面积

3.2 海洋溢油生态环境损害因果关系判定

根据本世纪以来发生于渤海和黄海的溢油及危化品污染事故概况(表 4)^[1, 20, 29, 33-37] 和原国家海洋局海洋水质超标面积实测公布资料,通过因果关系的判定和与实测资料的相互印证(图 8),证实了所有较大规模及以上溢油事故均造成了大面积的严重污染损害,致使事故当年所在海域水质指标超标面积出现峰值。从不同海区损害程度(超标等级和面积)及持续时间(事故后各超标等级超标面积的回落)来看,其与事故位置所处海域及扩散条件、事故发生时间、入海溢油的总量及持久性呈密切相关性。例如:发生于渤海湾内的塔斯曼海油轮破损泄漏和黄海大连湾内的“阿提哥”油轮搁浅事故由于扩散条件所限,主要造成各自所在海域海水

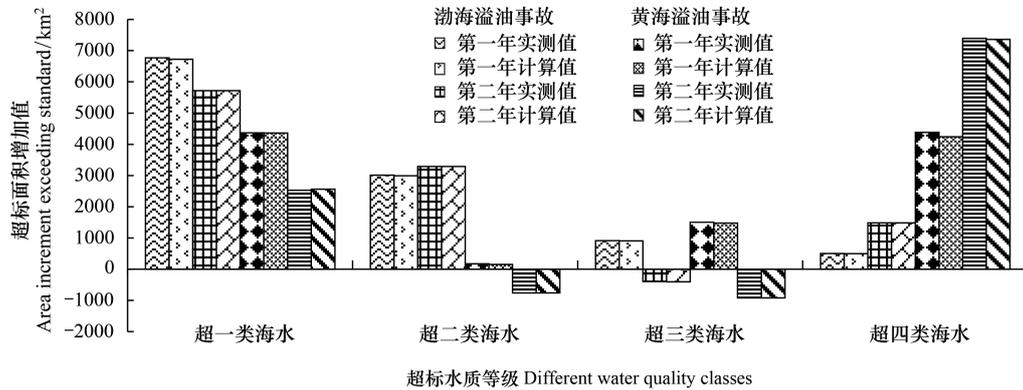


图7 大连“7.16”事故后新增超标面积估算值与公报实测增加值相互印证图

Fig.7 Mutual confirmation of the estimated value of the new area exceeding the standard after the “7.16” accident in Dalian and the measured value added in the bulletin

水质超标面积明显增长,并未造成同期周边海域(分别为黄海和渤海)的水质超标面积明显增加,而其他事故由于所处位置及扩散条件均造成了所在海域及与之联通海域的水质超标面积明显增加;塔斯曼海油轮破损泄漏和黄海大连湾内的“阿提哥”油轮搁浅事故分别泄漏的轻质原油和重质原油,尽管泄漏规模基本相当,但重质原油(“阿提哥”事故)造成的水质超标程度和超标面积却明显高于轻质原油(“塔斯曼海”事故);大连“7·16”和蓬莱“19-3”溢油事故泄漏量较大,且溢油种类为重质原油,同时造成渤海和黄海海域各类超标水域面积的明显增加,造成的水质超标程度和超标面积明显高于其他污染事故。

表4 渤海和黄海溢油及危化品污染事故概况

Table 4 Overview of oil spill and hazardous chemicals pollution accidents in Bohai Sea and Yellow Sea

发生时间 Time of occurrence	事故名称 Accident name	地点 Place	事故简述 Brief introduction of the accident	污染状况 Pollution status	油种 Oil type
2002-11-23	塔斯曼海油轮破损泄漏	天津大沽口东部海域	满载油品的马耳他籍油轮“塔斯曼海”号与中国“顺凯1号”轮相撞	出现长4.6 km、宽2.6 km原油漂流带 ^[1]	轻质原油
2004-04	渤海油田井喷事故	曹妃甸南部海域	大量原油进入附近海域	形成大面积溢油污染 ^[20]	渤海原油
2005-04-04	“阿提哥”油轮搁浅	大连港附近海域	触礁搁浅的葡萄牙籍油轮“阿提哥”号,船舱底部破损	发生原油泄漏 ^[20]	原油
2006	渤海原油污染事故	渤海	渤海油轮事故和海上油田盗油,造成原油泄漏	渔业资源、海洋生态损失 ^[33]	原油
2007-05-12	“金盛”轮沉没溢油	烟台海域	圣文森特籍“金盛”轮和韩国籍“金玫瑰”轮船舶碰撞、翻沉	渔业资源、海洋生态损失 ^[33]	燃料油
2010-07-16	大连“7.16”溢油事故	大连及周边海域	油轮卸油停止后,向输油管道注入脱硫剂未停,导致突发爆炸,引发火灾,大量原油泄漏入海	海上漂油达183km ² ,其中较重污染面积50 km ² ^[29]	重质原油
2011-06— 2011-09	蓬莱“19-3”溢油事故	渤海	B23平台压力注水,C平台回注岩屑,平台作业遇超高压,造成断层开裂,沿断层形成海底溢油	浮游生物种类和多样性明显降低,生物群落结构受到影响 ^[34]	渤海原油
2013-11-22	中石化输油管线破裂事故	青岛海域	约1000平方米路面被原油污染,部分原油沿着雨水管线进入胶州湾,泄漏点发生燃爆	海面过油面积约0.03km ² ^[35]	原油
2015-08-12	天津瑞海危险品火灾爆炸事故	天津海域	瑞海公司危险品仓库发生火灾爆炸事故,造成165人遇难、8人失踪,798人受伤住院治疗,304幢建筑物、12428辆商品汽车、7533个集装箱受损	空气中甲苯、VOCs超标,有硫化氢气味,可能对海水造成污染 ^[36]	危化品
2002—2013	约18起溢油事件	渤海	溢油事故率:1—10t 2.7次/年,100—1000t 0.2次/年	造成相应海洋污染损害 ^[37]	原油为主

从图 8 可以看出,自 2002 年以来连续 13 年,各类溢油及危化品事故对海洋水质及其与之紧密关联的海洋生态环境及位于食物链顶端的人类健康的危害是难以避免和不容忽视的。如表 2 所述,通过对事故所在海域周边陆域及海产品主要供应区域人群相关流行发病率(如消化系统、代谢系统、内分泌系统新发癌症发病率增加值)的调查取证,将能够作出对人类健康危害相关因果关系的分析判定。

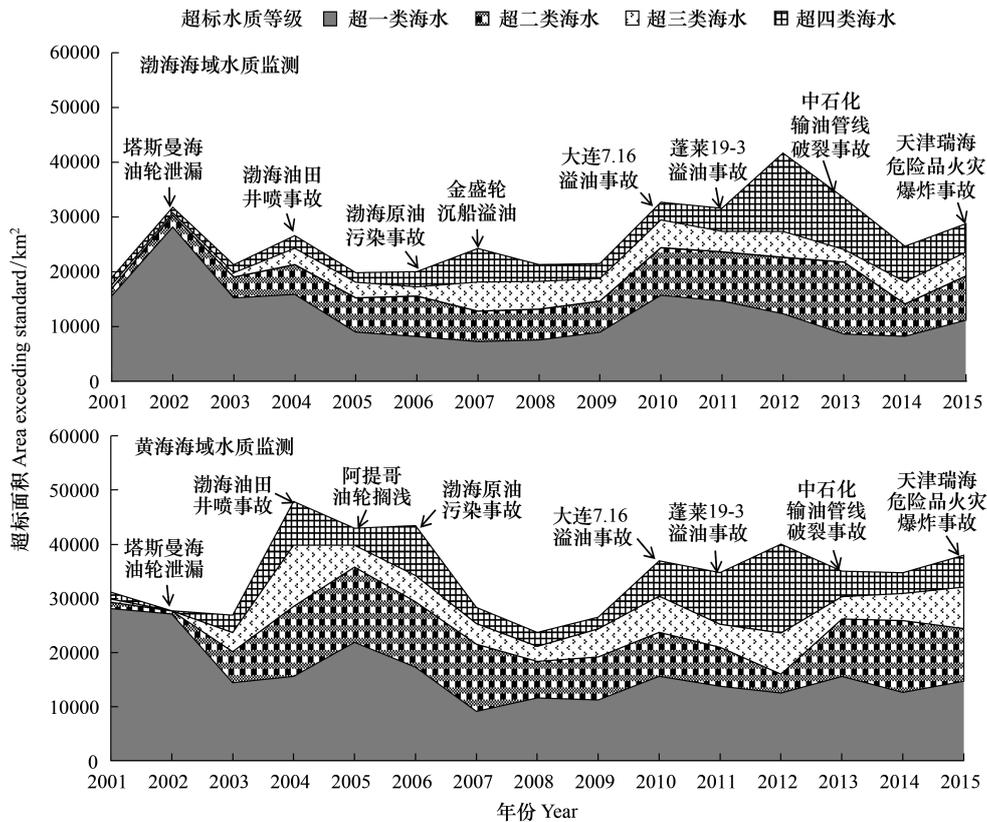


图 8 渤海和黄海溢油及危化品事故对水质影响因果关系印证图

Fig.8 The causal relationship between oil spills and hazardous chemicals accidents in Bohai Sea and Yellow Sea on water quality

4 结论

海洋溢油构成了对生态环境安全及人体健康的重大威胁,对生态环境造成的损害随事故源项的地点、时间、油种、规模、应急处置状况、地形、气象水文及环境条件千变万化,损害的类型及后果具有多生境多营养级广布的特点,存在易受损因子所遭受的叠加累积效应。因果关系的判定需要从判定事故的发生、主要成分及含量、溢油状态及分类后果、溢油源项及损害后果的时空分布依次展开。

海洋溢油生态环境损害评估模型体系以因果关系判定准则及指标体系为主线,由相应的多类型辅助评估模型、调查试验诊断评估方法及业务化流程、损害基线与程度判定准则及指标体系集合而成,用于为因果关系的判定及其业务化应用提供技术支持。应用研究显示,经与实测资料相互印证,本世纪以来在黄渤海海域发生的较大规模及以上溢油事故均造成了大面积的严重污染损害,其对海洋生态环境及位于食物链顶端的人类健康危害令人担忧。

参考文献 (References):

- [1] 高振会, 杨建强, 王培刚. 海洋溢油生态损害评估的理论、方法及案例研究. 北京: 海洋出版社, 2007.
- [2] 司法部, 环境保护部. 关于规范环境损害司法鉴定管理工作的通知: 司发通[2015年]118号, 2015.

- [3] 交通运输部海事局. 关于发布《船舶油污损害赔偿基金理赔导则(试行版)》和《船舶油污损害赔偿基金索赔指南(试行版)》的通知: 海危防[2016]376号, 2016.
- [4] 王金南, 刘倩, 齐霁, 於方. 加快建立生态环境损害赔偿制度体系. 环境保护, 2016, 44(2): 25-29.
- [5] 唐小晴, 张天柱. 环境损害赔偿之关键前提: 因果关系判定. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(8): 172-176.
- [6] 杨寅, 韩大雄, 王海燕. 生境等价分析在溢油生态损害评估中的应用. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2113-2118.
- [7] 吴钢, 曹飞飞, 张元勋, 张洪勋, 余志晟, 乔冰, 朱岩, 董仁才, 吴德胜, 高振会, 张迺嘉. 生态环境损害鉴定评估业务化技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7146-7151.
- [8] 乔冰, 唐孝炎. 海上溢油生态系统影响评估与风险防治//海峡两岸“海上溢油应急计划暨集装箱运输”学术研讨会论文集. 北京: 中国航海学会, 2002.
- [9] Qiao B. Oil spill model development and application for emergency response system. Journal of Environmental Sciences, 2001, 13(2): 252-256.
- [10] Qiao B, Wu H T, Xiao F, Zhao Y, Lan R, Zhou Y S, Li C C. Comparative study on water quality impacts between marine oil spill weathering experiment and real oil spill//中国航海科技优秀论文集:2015年. 上海: 上海浦江教育出版社, 2015: 602-617.
- [11] 梁文杰, 阙国和, 刘晨光, 杨秋水. 石油化学. 东营: 石油大学出版社, 1995: 16-16, 19-19, 30-34.
- [12] 佚名. 汽油为什么会危害人体? 湖南安全与防灾, 2007, (5S): 60-60.
- [13] 李旭东, 么鸿雁, 阚坚力, 周宗灿. IARC 公布的化学物质和混合物及暴露环境对人致癌性的综合评价(续三). 环境与健康杂志, 2009, 26(3): 267-268.
- [14] 李旭东, 么鸿雁, 阚坚力, 周宗灿. IARC 公布的化学物质和混合物及暴露环境对人致癌性的综合评价(续二). 环境与健康杂志, 2009, 26(2): 171-174.
- [15] 李旭东, 么鸿雁, 阚坚力, 周宗灿. IARC 最新公布的化学物质和混合物及暴露环境对人致癌性综合评价(续一). 环境与健康杂志, 2009, 26(1): 79-81.
- [16] 李旭东, 么鸿雁, 阚坚力, 周宗灿. IARC 公布的化学物质和混合物及暴露环境对人类致癌性的综合评价. 环境与健康杂志, 2008, 25(12): 1107-1110.
- [17] 余刚, 牛军峰, 黄俊. 持久性有机污染物——新的全球性环境问题. 北京: 科学出版社, 2005.
- [18] 惠秀娟. 环境毒理学. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [19] 乔冰. 海上污染防治及应急技术研讨会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [20] 马里. 渤海海域溢油卫星遥感监测研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [21] 环境保护部办公厅. 关于印发《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲》和《生态环境损害鉴定评估技术指南 损害调查》的通知: 环办政法[2016]67号, 2016.
- [22] 洪华生. 中国区域海洋学——化学海洋学. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [23] 孙松. 中国区域海洋学——生物海洋学. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [24] 李永祺. 中国区域海洋学——海洋环境生态学. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [25] 唐启升. 中国区域海洋学——渔业海洋学. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [26] 乔方利. 中国区域海洋学——物理海洋学. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [27] 王修林, 李克强. 渤海主要化学污染物海洋环境容量. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 张宇峰, 张雪英, 徐炎华, 王晓蓉. 海洋环境基线值表达方式的探讨. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2003, 25(2): 82-87.
- [29] 涂重航. 检察机关介入大连油污事故调查. 新京报, 2010-07-20(A16). <https://news.qq.com/a/20100720/000089.htm>.
- [30] 吴卫红, 王津, 张爱美. 溢油事故对沿海城市旅游业影响的研究——以 2010 年大连新港“7·16”溢油事故为例. 生态经济: 学术版, 2012, (2): 183-186, 205-205.
- [31] 李楠, 宋永刚, 宋伦, 王年斌, 吴金浩, 陈远. 大连湾新港石油管道爆炸溢油对保护区影响跟踪评价. 河北渔业, 2012, (5): 14-18, 24-24, 55-55.
- [32] 国家海洋局. 2011 年中国海洋环境状况公报(一). (2012-06-25). http://www.gov.cn/govweb/jrzg/2012-06/25/content_2169369.htm.
- [33] 夏军. 海上溢油事故考验中国环境法律. (2011-07-28). <https://www.chinadialogue.net/article/show/single/ch/4433-Losses-at-sea>.
- [34] 国家海洋局. 蓬莱 19-3 油田溢油事故联合调查组关于事故调查处理报告. (2012-06-23). <http://news.zgkqw.com/news/system/2012/06/23/010187038.shtml>.
- [35] 张媛媛, 王敏, 卢宏伟, 张海江, 贺世杰, 王传远. 青岛黄潍输油管道泄漏爆炸事故溢油风化规律. 环境化学, 2015, 34(9): 1741-1747.
- [36] 杨嘉睿. 化工安全与环境保护的重要性——从天津大爆炸说起. 化工管理, 2016, (2): 239-239.
- [37] 李云斌, 刘敬贤, 魏蕾, 许军辉. 渤海海域溢油应急基地多目标优化选址方法. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(4): 533-537, 624-624.