

深水溢油应急技术

安 伟 张前前 李建伟 赵宇鹏 等 著



科学出版社

深水溢油应急技术

安 伟 张前前 李建伟 赵宇鹏 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对深水溢油应急技术,首先综述深水油气田开发现状及溢油风险,进而阐述深水溢油监测技术、深水溢油预测技术、深水溢油量估算方法,全面调研深水溢油应急处置技术和全球深水溢油应急资源,然后介绍深水溢油应急体系与法律法规,最后展示南海深水溢油三维可视化系统的研究成果。

本书可供从事深水溢油应急技术的工作人员和科研人员参考,还可作为高等院校相关研究人员以及研究生的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

深水溢油应急技术/安伟等著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-049340-8

I. ①深… II. ①安… III. ①海上溢油-研究 IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 158014 号

责任编辑:彭胜潮 景艳霞/责任校对:何艳萍

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:358 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

海洋石油经过半个多世纪的发展,从浅水到深水、再到超深水,人类开发利用油气资源的程度正在不断深入。目前,海洋石油已经成为世界油气开发的主要增长点,而走向深水是当前海洋石油可持续发展的重要战略举措,是海上油气科技创新的前沿。深水油气开发既有广阔的前景,同时也面临着巨大的风险和挑战。2010年4月20日,墨西哥湾英国BP“深水地平线”钻井平台发生爆炸导致溢油事故,约有490万桶原油从油井中泄漏,给墨西哥湾海洋生态和沿岸经济造成巨大灾难,BP公司也为此付出上百亿美元的赔偿。这次事故处置过程和造成的影响警示我们:在油气勘探开发技术快速发展的今天,深水区水下溢油应急技术研发迫在眉睫。

我国南海特有的强热带风暴、内波等灾害环境以及我国复杂原油物性及油气藏特性,决定了我国深水油气田开发面临的深水溢油风险日益增加。我们应该借鉴国内外经验教训,加强深水溢油应急技术攻关,开展深水溢油风险防范、监测预测以及水下溢油应急处置等方面的研究,建立深水溢油应急反应技术和装备体系,提高我国深水溢油事故防范和应急处置能力,为我国深水油气田开发保驾护航。中国海洋石油总公司在“十二五”期间率先开展了深水区水下溢油数值模拟技术以及水下消油剂使用和喷洒技术的研究工作,总体科技成果达到国内先进水平,部分成果居国际领先水平。

本书是编写组在多年从事海上溢油防治管理和研究工作,并参阅国内外大量有关论著、文献资料的基础上完成的。以深水溢油应急反应为主线,涵盖了深水溢油风险评估、监测技术、溢油模拟、溢油量估算和应急处置等技术,并结合南海深水环境条件,开发了深水溢油三维可视化系统,以期为提高我国深水区溢油应急快速反应能力和技术水平提供帮助。全书共分8章,内容如下:第1章介绍深水油气田开发现状以及深水溢油应急技术研究进展;第2章介绍深水溢油监测技术和水下油污探测技术;第3章阐述深水溢油模型建立过程以及深水溢油模拟实验内容;第4章介绍深水溢油量的估算方法;第5章介绍深水溢油应急处置方法;第6章阐述了消油剂水下使用效果以及评估模型的建立;第7章介绍深水溢油应急资源与应急体系;第8章介绍了南海深水溢油三维可视化系统开发。本书由中海油能源发展股份有限公司北京安全环保工程技术研究院起草编写,由安伟、张前前、李建伟、赵宇鹏等著,宋莎莎、钱国栋、刘保占、靳卫卫、陈海波、

张庆范、李晓秋、栗宝鹃、赵建平参与编写工作。全书由安伟、张前前、李建伟统稿、定稿。

本书的撰写和出版，得到了中国海洋石油总公司质量健康安全环保部和科技发展部以及中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处恳请批评指正。

目 录

前言

第 1 章 深水油气田溢油应急概述	1
1.1 深水油气田开发现状	1
1.1.1 深水油气资源开发	1
1.1.2 南海深水油气田开发现状	4
1.2 深水溢油风险	7
1.2.1 深水溢油事故类型	7
1.2.2 深水溢油风险分析	7
1.2.3 深水溢油风险评估	14
1.2.4 深水溢油风险防范	19
1.3 深水溢油应急技术研究进展	20
1.3.1 深水溢油监测技术	20
1.3.2 深水溢油预测技术	23
1.3.3 深水溢油处置技术	24
参考文献	25
第 2 章 深水溢油监测技术	29
2.1 海面油污监测技术	29
2.1.1 卫星遥感	29
2.1.2 航空遥感	30
2.1.3 船载和岸基雷达	30
2.1.4 无人机监测	31
2.1.5 溢油跟踪浮标	32
2.2 水下油污探测技术	32
2.2.1 目视监测	32
2.2.2 采样分析	33
2.2.3 声呐探测技术	34
2.2.4 激光荧光雷达	37
2.2.5 荧光偏振	38
2.2.6 化学监测	39
参考文献	40
第 3 章 深水溢油数值模拟技术	42
3.1 水下溢油模拟	42
3.1.1 水下溢油模拟基本概念	42

3.1.2 水下溢油物理化学过程	44
3.1.3 水下溢油行为	46
3.2 深水水动力预报技术	53
3.2.1 资料分析	53
3.2.2 潮波模式研制	54
3.2.3 海流模式研制	74
3.3 深水溢油预测模型	79
3.3.1 羽流动力模型	81
3.3.2 对流扩散模型	84
3.3.3 含气的溢油模拟	85
3.3.4 模型验证	90
3.4 深水溢油模拟试验	96
3.4.1 模拟试验装置研制	96
3.4.2 深水溢油模拟试验	99
参考文献	104
第4章 深水溢油量估算	108
4.1 海面溢油量估算	108
4.1.1 油膜厚度的估算	109
4.1.2 油膜面积的估算	110
4.1.3 溢油量估算	110
4.2 水下溢油量估算	110
4.2.1 物质平衡法	111
4.2.2 声学估计法	113
4.2.3 粒子图像测速法	113
4.2.4 油藏/油井模型法	114
4.3 典型事故溢油量计算	115
4.3.1 管道溢油	115
4.3.2 井喷溢油	118
4.3.3 沉船溢油	118
4.3.4 地层破裂	119
参考文献	120
第5章 深水溢油应急处置技术	121
5.1 溢油源封堵技术	121
5.1.1 海底管道泄漏封堵	121
5.1.2 海底井喷封堵	122
5.1.3 船体泄漏封堵	123
5.2 救援井法	125
5.3 管中管技术	126

5.4 大规模溢油海面处置技术	127
5.4.1 机械回收技术	127
5.4.2 原位燃烧技术	134
5.4.3 深水环保船	136
5.5 深水溢油处置装备	136
5.5.1 深海油井干预系统	136
5.5.2 海底第一响应工具包	137
5.5.3 改进的盖帽装置	138
5.5.4 可互换无隔水导管干预系统	139
5.5.5 其他新技术	139
参考文献	140
第6章 消油剂水下使用技术	142
6.1 消油剂使用概述	142
6.1.1 消油剂组成及作用机制	142
6.1.2 消油剂使用效果评估现状	142
6.1.3 效果评估模型研究现状	145
6.2 消油剂水面使用效果评估	145
6.2.1 类型选择和理化性质	145
6.2.2 消油剂使用效果评估波浪槽模拟试验	147
6.3 消油剂水下使用效果评估	152
6.3.1 模拟试验装置试制	152
6.3.2 水下溢油模拟试验	153
6.3.3 消油剂水下使用效果评估模拟试验	164
6.4 消油剂水下使用效果评估模型研究	174
6.4.1 水下溢油油滴破碎模型建立	175
6.4.2 水下溢油油滴破碎模型验证	176
6.4.3 消油剂使用效果预测模型建立	178
6.4.4 消油剂使用效果预测模型参数确定	179
参考文献	183
第7章 深水溢油应急资源与应急体系	186
7.1 国际溢油应急服务公司	186
7.1.1 英国溢油响应有限公司	187
7.1.2 美国的溢油应急服务公司	188
7.1.3 加拿大溢油应急服务公司	189
7.1.4 澳大利亚海洋溢油中心	190
7.1.5 挪威清洁海洋协会服务公司	190
7.1.6 芬兰溢油应急服务公司	191
7.1.7 中海石油环保服务有限公司	191

7.1.8 国际溢油应急服务的组织	192
7.2 深水溢油应急体系	194
7.2.1 海洋溢油应急国际公约体系	194
7.2.2 英国溢油应急计划及法律法规	196
7.2.3 美国国家溢油应急计划及法律法规	198
7.2.4 加拿大国家溢油防备和响应制度	202
7.2.5 澳大利亚溢油应急体系及法律法规	204
7.2.6 中国溢油应急体系及法律法规	206
参考文献	208
第8章 南海深水溢油三维可视化系统开发	211
8.1 系统功能设计	211
8.1.1 系统功能介绍	211
8.1.2 系统开发技术路线	212
8.2 系统开发介绍	214
8.2.1 数据管理系统	214
8.2.2 插值子系统	216
8.2.3 溢油仿真子系统	218
8.2.4 其他功能	228
8.3 系统使用说明	230
8.3.1 运行环境及安装、卸载	230
8.3.2 菜单栏	230
8.3.3 浮动栏	236
8.3.4 工具栏	240
8.3.5 快捷键	240
参考文献	241

第 1 章 深水油气田溢油应急概述

1.1 深水油气田开发现状

1.1.1 深水油气资源开发

1. 深水油气田定义

1887 年，在美国加利福尼亚海岸数米深的海域钻探了世界上第一口海上探井，拉开了海洋石油勘探的序幕。经历了从近岸、浅水到深水的发展阶段，不同领域深水定义的尺度并不一致，海洋工程界通常认为，300 m 以上为深水，1500 m 以上为超深水(王丽勤等, 2011)。2002 年在巴西召开的世界石油大会提出，将 400 m 作为划分深水的标志线，即： ≤ 400 m 为浅水， >400 m 为深水， >1500 m 为超深水(Durham, 2010)。本书在描述深水溢油过程中采用工程界的划分方法，认为 300 m 以上的为深水环境。20 世纪 80 年代初海洋石油作业水深达到 300 m，90 年代达到超深水 1500 m，2010 年超过了 3000 m。

2. 深水油气田发展趋势

据统计，2000 年以来深水油气产量在整个油气产量中的比例明显上升，由 2001 年的 250 万桶油当量/日上升到 2010 年的 720 万桶油当量/日(廖谟圣, 2007; Müller, 2014)。2004 年深水石油产量 1.2×10^8 t，约占全球石油产量的 5%；2006 年深水石油产量大约为 2.6×10^8 t，约占全球石油产量的 7%(牛华伟等, 2012)。2007~2012 年全球深水油气产量占整个油气产量的 7%，陆地和浅水则分别占 60% 和 33% (Nelson et al., 2013)。图 1.1 显示，

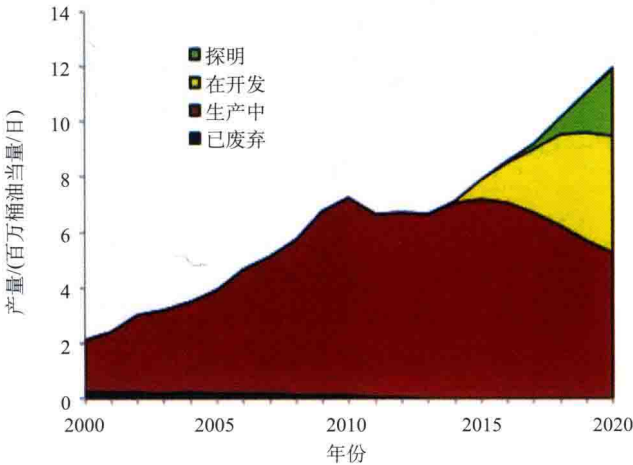


图 1.1 2000~2020 年全球深水油气产量及预测 (Müller, 2014)

2011~2014年深水油气生产处于持平阶段,最高产量仍是2010年创下的720万桶油当量/日,占总产量的7%,其中,深水石油产量620万桶油当量/日,产地为巴西、美国墨西哥湾、尼日利亚、安哥拉;深水天然气产量100万桶油当量/日,产地为美国墨西哥湾、印度、埃及、巴西、尼日利亚。2015年深水项目比例提高,2020年深水油气产量将有望提高近80%(Müller, 2014)。

3. 深水油气田资源分布

世界上深水油气盆地主要为滨大西洋深水盆地群、滨西太平洋深水盆地群、新特提斯构造域深水盆地群和环北极深水盆地群(牛华伟等, 2012)。被动陆缘深水油气区特殊的构造演化历程造就了优越的石油地质条件,巴西近海、美国墨西哥湾、西非近海、亚太地区大陆边缘是全球四大被动陆缘富油气深水区,其中,巴西、美国墨西哥湾和西非(主要是安哥拉和尼日利亚)是世界深水油气勘探和开发的热点,已经发现了20多个大型油气田,被称为深水油气的“金三角”(钟广见等, 2009),2013年深水(水深>500 m)油气生产的82%来自上述三个地区(Müller, 2014)。此外,在东非的莫桑比克-坦桑尼亚发现了深水大气田,地中海的以色列和塞浦路斯,内海如黑海和加勒比海,即俄罗斯、伊朗和罗马尼亚地区,也发现了深水油气田。其他新的深海油气国家包括圭亚那、利比亚、中国和法属圭亚那。据统计,全球大约60个国家在深水发现约 3.0×10^{10} t的石油储量(牛华伟等, 2012)。全球深水油气分布见图1.2。



图 1.2 全球深水油气分布图(张位平, 2013)

4. 深水油气田开采装备

美国是世界上石油设备制造和供应大国,其制造和供应量约占全球的60%,预计接下来的10年内美国、英国、法国、巴西、挪威的深水技术装备将继续引领世界潮流。深水油气田开发,包括钻井、完井、海洋工程建造、海上施工安装、深水油田生产、安全应急响应和后勤支持保障等全方位的综合技术装备。经过30多年的发展,深水油气勘探开发技术日趋成熟,随着开采水深的逐年推进,海上油气田开发逐渐由固定平台转变为深水浮式生产设施(FPS,图1.3)、水下生产系统。

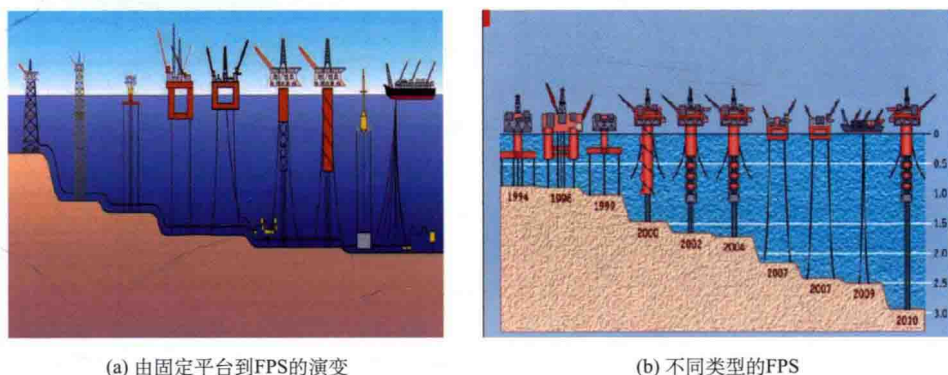


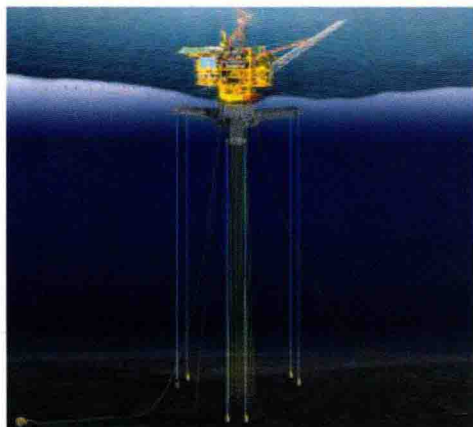
图 1.3 海洋石油开采装备随水深的推进历程

1) 深水浮式生产设施

深水钻井平台主要有张力腿平台(TLP)、立柱式平台(SPAR)、半潜式平台(SEMI)(谢彬等,2006)和深水钻井船等,如图1.4所示。不同海洋环境条件下,选用不同的深水钻井平台(船),其中张力腿平台和立柱式平台主要用于墨西哥湾,半潜式平台在墨西哥湾和巴西都有使用,深海钻井船则在巴西、安哥拉、尼日利亚广泛使用(廖谟圣,2006)。适用于超深水钻井的主要是半潜式平台和钻井船,2014年7月Moon统计了全球用于作业水深大于4000 ft^①的197个钻井平台,发现均为半潜式平台或深海钻井船,其中36个为常规锚泊定位,161个为动力定位(Moon,2014)。

浮式生产储油装置(floating production, storage and offloading, FPSO)将集油计量、油气水处理、储油、装卸运输4种功能综合在一个油轮上实现,是发展最快的深水浮式生产设施,2015年8月Offshore刊发统计结果显示,世界上正在用于生产的浮式生产储油装置有161艘,其中巴西37艘,英国14艘,中国14艘,安哥拉和尼日利亚各13艘,澳大利亚11艘(详见<http://www.offshore-mag.com/maps-posters.html>)。

① 1 ft=0.3048 m。



(a) 张力腿平台 (TLP)



(b) 立柱式平台 (SPAR)



(c) 半潜式平台 (SEMI)



(d) 深海钻井船

图 1.4 四种常见的深水浮式生产设施

2) 水下生产设施

水下生产系统是将油气生产装置及辅助设施的部分或全部直接放置在海底，成为一个完整的水下工程建筑物，进行自动采油、集油、输油生产的系统。深水海底树的安装有垂直和水平两种类型。全世界已有 3 500 多套水下生产设施，水下生产技术和设备将是今后海洋油气开发生产的关键（单日波，2012）。

1.1.2 南海深水油气田开发现状

1. 深水石油工业技术现状

若从 1956 年莺歌海油田调查算起，我国海洋石油工业已经走过了 60 多年的发展历

程。中国石油、中国石化公司在 20 世纪 70 年代先后启动海上油气的勘探、开采工作,但目前主要的开采工作仍集中在浅海区域。1982 年中国海洋石油总公司成立,承担着国内绝大部分的海上油气勘探、开采任务,标志着我国海洋石油工业实现了从合作开发到自主开发的技术突破(李清平, 2006)。

近年来,随着深水勘探开发不断获得新的进展,深海油气田开发已成为海上油气工业的热点。海洋石油工程股份有限公司是目前中国最大、实力最强的集海洋石油及天然气工程设计、建造和海上安装、调试、维修以及液化天然气、炼化工程为一体的总承包公司,也是亚太地区成长最快的公司之一。设计技术方面已具备 300 m 水深以内的海上油气田设计能力和经验,初步达到国际水平;实现自主设计,并已为众多国际客户提供技术服务,初步掌握了深水平台 TLP 和 SPAR 的总体关键设计技术。建造技术方面已有建成国内 90% 以上的海洋工程上部设施的业绩,具有万吨级导管架和组块的建造能力与称重技术;具备年产 3×10^5 t 海洋工程设备的制造能力,可以涵盖各种深水平台(TLP、SPAR、SEMI 等)、大型组块与导管架的建造。安装技术方面已具有万吨级组块的浮托安装技术和滑移下水安装技术,具备整体吊装 7500 t 组块的能力、水深 300 m 内铺设 3~60 inch^①海底管线的能力。维修技术方面已具备海底管道干式检测与维修技术、FPSO 拖航连接技术,初步掌握浅水区废弃平台拆除技术、300 m 水下作业检测技术(单日波, 2012)。

根据我国南海的水深范围、钻井操作以及油气开发工艺对上部设施的要求, TLP 和 SPAR 两种形式可作为其优选方案。针对中国南海深海油气田开发的现实条件(如深水钻井船较少,没有管网等现有设施),并结合国际上相关新技术的发展,南海深水油田开发的工程模式初步设定为钻井和井口浮式平台+钻井辅助船+ FPSO+周边未来小区块的水下井口。

随着南海勘探开发的不断深入,一批深水油气田相继进入开发评价、方案实施和生产阶段。2006 年 8 月在南海东部成功钻探中国第一口深水井 LW3-1-1; 2011 年 1 月,中国海洋石油公司及其合作伙伴哈斯基完成荔湾 3-1 深水气田总体开发方案; 2013 年 9 月,荔湾 3-1 天然气中心处理平台机械性完工; 2014 年 4 月 24 日,荔湾 3-1 深水气田正式实现向下游用户商业性输气; 2014 年 8 月 18 日,“海洋石油 981”在南海西部陵水 17-2-1 井成功完成测试。

经过国家的支持和自主创新,我国建造的一些深海油气资源开发设备已达到国际先进水平。例如,2010 年世界最先进的 3000 m 深水半潜式钻井平台——海洋石油 981 顺利出坞,填补我国在深水装备领域的空白,并使中国跻身于具有世界深水装备领先水平的国家之列。

2. 我国深水油气开发面临的挑战

我国海洋深水区域具有丰富的油气资源,但深水区域特殊的自然环境和复杂的油气储藏条件决定了深水油气勘探开发具有高投入、高回报、高技术、高风险的特点。迄今

^① 1 inch=2.54 cm。

为止,我国海洋石油工程与国外飞速发展的深水海洋石油工程技术尚有一定距离,我们需要面对如下问题(李清平,2006):

(1)深水油气勘探技术。深水油气勘探是深水油气资源开发首先要面临的挑战,包括长缆地震信号测量和分析技术、多波场分析技术、深水大型储集识别技术及隐蔽油气藏识别技术等。技术上的巨大差距是我国深水油气田开发面临的巨大挑战,因此实现深水技术的跨越发展是关键所在。

(2)复杂的油气藏特性。我国海上油田原油多具高黏、易凝、高含蜡等特点,同时还存在高温、高压、高 CO_2 含量等问题,这给海上油气集输工艺设计和生产安全带来许多难题。当然,这不仅是我们所面临的问题,也是世界石油界面临的难题。

(3)特殊的海洋环境条件。我国南海环境条件特殊,夏季有强热带风暴,冬季有季风,还有内波、海底沙脊沙坡等,使得深水油气开发工程设计、建造、施工面临更大的挑战。

(4)深水海底管道及系统内流动安全保障。深水海底为高静压、低温环境(通常 4°C 左右),这对海上和水下结构物提出了苛刻的要求,也对海底混输管道提出了更为严格的要求。来自油气田现场的应用实践表明,在深水油气混输管道中,由多相流自身组成(含水、含酸性物质等)、海底地势起伏、运行操作等带来的问题,如段塞流、析蜡、水化物、腐蚀、固体颗粒冲蚀等,已经严重威胁到生产的正常进行和海底集输系统的安全运行,由此引起的险情频频发生。

(5)经济高效的边际油气田开发技术。我国的油气田特别是边际油气田具有底水大、压力递减快、区块分散、储量小等特点,在开发过程中往往需要考虑采用人工举升系统,这使得许多国外边际油气田开发的常规技术(如水下生产技术等)面临着更多的挑战,意味着水下电潜泵、海底增压泵等创新技术将应用到我国边际油气田的开发中;同时也意味着,降低边际油气田的开发投资,使这些油气田得到经济、有效的开发,将面临更多的、更为复杂的技术难题。

3. 南海油气开采的法律法规

南海拥有丰富的油气资源而逐渐成为热点争议地区,争议区的面积达到 $5.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。南海主权争端愈演愈烈,相关周边国家已在南沙群岛海域钻井1000多口,发现含油气构造200多个、油气田180个,参与采油的国际石油公司超过200家,年开采量超过 $5 \times 10^7 \text{ t}$,相当于大庆油田的年产量。受政治、外交、技术等因素限制,我国在南海的油气开发步履迟缓,仅限于南海北部陆坡。

回顾我国在海洋油气开采方面的法律法规,1982年中国政府颁布了《中华人民共和国对外合作开采海洋石油资源条例》,第一章第二条明确规定:“中华人民共和国的内海、领海、大陆架以及其他属于中华人民共和国海洋资源管辖海域的石油资源,都属于中华人民共和国国家所有……在前款海域内,为开采石油而设置的建筑物、构筑物、作业船舶,以及相应的陆岸油(气)集输终端和基地,都受中华人民共和国管辖。”1998年《中华人民共和国专属经济区和大陆架法》开创了中国对200海里专属经济区和大陆架海域依照国际法行使主权和管辖权的历史。此外,中国先后颁布实施了多项法律法规,如《中华人民共和国海洋石油勘探开发环境保护管理条例》(1983年)、《中华人民共和

国海洋倾废管理条例》(1985年)、《中华人民共和国海洋环境保护法》(2000年)等,在海洋油气勘探开采、安全管理、环境保护、油气税费等方面的政策和法令。面对南海争端,2002年中国政府与东盟签署《南海各方行为宣言》,提出了“主权归我,搁置争议,共同开发”的和平解决手段。为了维护南海地区的和平稳定,中国在南海油气资源的勘探开发问题上保持了克制,没有采取任何使事态扩大化、复杂化的行动,不仅没有实施南海深海区域的油气开发活动,而且在《南海各方行为宣言》基础上2011年签署《落实〈南海各方行为宣言〉指导方针》,倡导“搁置争议、共同开发”的原则。2005年中国、越南、菲律宾三方石油公司签署了《在南中国海协议区三方联合海洋地震工作协议》。令人遗憾的是,由于某些国家缺乏应有的诚意,致使“共同开发”原则未能得到有效落实,中国的克制也没有使周边国家的非法开采活动有所收敛,上述工作协议未能续约而不得不终止(李国强,2014)。

综上所述,我国南海深水油气开发面临的挑战,一方面来自技术的落后;另一方面来自争议海域油气资源共同开发的困境,后者有待国家从法律层面给予政策支持。

1.2 深水溢油风险

1.2.1 深水溢油事故类型

海洋油气田溢油事故多发生在勘探、生产、运输过程中。在勘探过程中,溢油形式多以钻井管道断裂发生井喷方式出现。在生产过程中,由于涉及大量易燃、易爆的石油和天然气,加上开发工艺和设备运行的复杂性,发生油气泄漏的潜在风险极高。在运输过程中,油船和海底油气管道是主要事故风险源。其中,运输船舶由于漂移作用以及误操作都可能碰撞立管导致油气泄漏;海底油气管道则容易因管内腐蚀、地震和船舶抛锚破坏等意外导致油气泄漏。此外,台风和热带风暴等自然灾害性天气引起的极端波浪能够破坏海洋平台结构甚至倾覆,可能引起钻井和管道的损伤而产生油气泄漏。

海洋溢油事故类型包括:井喷(blowout)——钻井平台爆炸起火或其他井口事故(well head accident)、井涌(well kick)或侧漏(edge leakage)、注水和岩屑回注增加了地层压力而导致的溢油、油气管线破裂(pipeline leakage)以及船只沉没泄漏(shipwreck)。

1.2.2 深水溢油风险分析

1. 深水溢油风险及危害

海上油气田开发溢油事故风险因素众多,与浅水区相比,海洋环境、油气储藏条件和钻井作业等容易引发石油设施倾覆、井漏、井涌和井喷以及火灾和爆炸,从而引发大型溢油事故(殷志明等,2011;吴时国等,2007),同时由于深水油气田一般都是产量大、距离陆地远,给事故后应急处置带来极大困难,见表1.1(安伟等,2011)。加之深水环境脆弱的生态系统,溢油从水下上升至水面过程中对整个水体造成污染,因此深水溢油事故会给社会经济和生态环境带来灾难性影响。

表 1.1 深水油气田开发主要溢油风险及其危害

主要溢油风险	风险因子及危害
海洋环境	(1)海底高压、低温环境：对海上和水下结构物及海底混输要求苛刻；低温对钻井液及水泥浆的流变性将有较大影响； (2)波、浪、流、台风：深海海域较强波、浪、流和台风给石油设施安全带来很大影响；给溢油应急造成困难； (3)内波：时间不定，流速无常，持续时间短，区域分布差异较大，对深水石油设施威胁较大； (4)水深：对溢油应急处置技术和设备要求高，常规方法难以奏效。溢油从水下上升至水面，污染整个水体； (5)海底滑坡、海底断层和泥石流
复杂油气藏条件	(1)浅层气和浅层流：易引起地质灾害和井喷； (2)天然气水合物：天然气水合物易阻塞节流管线、压井管线、BOP 组件等，影响钻井和井控作业；其分解导致的海底滑坡和海水密度的降低有可能会使石油平台或钻井船倾覆；另外，气体的突然释放会对输送管道产生破坏作用，重则造成火灾或井喷
钻井工程技术	钻井参数及钻井液体系选择、井口压力和钻井液当量循环等一旦控制不当，容易引发溢油、井漏、井涌和井喷等事故
疲劳老化	主要包括管架及锚缆腐蚀性、支撑管架结构、焊点材料性能、阀及管件完好程度。设施的疲劳老化可造成泄露危害，降低生产效率，埋下事故隐患，更严重可导致人员伤亡
第三方破坏	主要包括船舶撞击、直升机撞击、其他设备碰撞和军事活动等。严重威胁深水海洋设施的稳定，造成石油平台的倾覆，导致严重的火灾爆炸
人为操作	主要包括人员技术等级、安全教育培训情况和规章制度执行情况

2. 主要溢油风险因子分析

1) 井喷和井涌溢油风险因子

随着海洋石油勘探开发的蓬勃发展，其规模也不断扩大，越来越多的石油平台出现在海洋中。然而，由于碰撞、腐蚀或操作不当造成的油气井喷、平台或钻井装置倾覆等事故与日俱增，使大量的石油进入水体和沉积物，严重威胁着海洋生态平衡，给经济和海洋环境带来了巨大损失和严重危害。2010 年墨西哥湾钻井平台发生爆炸导致溢油事故，约 490 万桶原油泄漏入海，事故发生后的应急处理和事故造成的影响警示我们，事故防范比事故应急更有意义(安伟等，2011)。

井喷和井涌是一种地层中流体喷出地面或流入井内其他地层的现象，大多发生在开采石油天然气的现场。引起井喷和井涌的原因有多种，如地层压力掌握不准、泥浆密度偏低、井内泥浆液柱高度降低、起钻抽吸以及其他不当措施等。有时井喷、井涌属于正常现象，措施得当处理及时就不会演化为事故；但出现井喷、井涌事故，天然气喷出后与空气摩擦，容易发生燃烧爆炸；若里面含有有毒气体，就更加危险，因此应高度重视。常见的抢险方法是将密度大的重晶石粉灌到井里，以增加压力，止住井喷、井涌继续发生。