

目 录

第1章 绪论	1
1.1 深水地质灾害定义	1
1.2 深水地质灾害研究历史和现状	1
1.2.1 深水地质灾害研究历史	1
1.2.2 深水地质灾害预警现状	2
1.2.3 我国深水地质灾害研究现状	4
1.3 深水地质灾害类型	4
1.3.1 海底滑坡	5
1.3.2 天然气水合物	9
1.3.3 浅层气	10
1.3.4 浅水流	14
1.3.5 地震海啸	16
1.4 深水地质灾害监测和预警关键技术	17
1.4.1 综合地球物理识别和预测技术	18
1.4.2 原位监测技术	24
1.4.3 数值模拟与风险定量评估技术	26
1.5 南海的深水地质灾害问题	27
1.5.1 海底滑坡	30
1.5.2 天然气水合物灾害	31
1.5.3 浅层气	31
1.5.4 浅水流	32
1.5.5 地震海啸沉积	34
第2章 海底滑坡	35
2.1 海底滑坡的概念	35
2.2 海底滑坡的分类	36
2.3 海底滑坡的触发机制	37
2.4 海底滑坡的识别特征	40

2.4.1	调查方法	40
2.4.2	地球物理响应特征	42
2.5	神狐海底滑坡	62
2.5.1	神狐海底滑坡结构与识别	62
2.5.2	滑坡的控制因素	68
2.5.3	海底滑坡的发育模式	73
2.6	白云海底滑坡	74
2.6.1	滑坡区地貌及地震响应特征	74
2.6.2	海底滑坡时间的界定	83
2.6.3	海底滑坡的控制因素	84
2.6.4	海底滑坡发育模型	87
2.7	琼东南深水海底滑坡	88
2.7.1	琼东南块体搬运体系的地震识别特征	89
2.7.2	成因机理探讨	92
第3章	天然气水合物灾害	94
3.1	天然气水合物概念及分类	94
3.1.1	水合物生成灾害	94
3.1.2	水合物分解灾害	95
3.2	天然气水合物灾害触发机制及特征识别	97
3.2.1	天然气水合物灾害触发机制	97
3.2.2	水合物特征识别	101
3.3	实例研究	108
3.3.1	地质框架	110
3.3.2	含水合物沉积物物性特征分析	117
3.3.3	数学模型	132
3.3.4	效果分析	137
第4章	浅层气灾害	154
4.1	浅层气的概念及其类型	154
4.2	浅层气的危害机理	154
4.3	浅层气的识别	156
4.3.1	地震响应特征	156
4.3.2	特殊地质标志	160

4.4 南海北部盆地浅层气的形成与分布规律	164
4.4.1 南海北部盆地浅层气形成的地质背景	164
4.4.2 南海北部盆地浅层气的识别与分布	167
4.4.3 南海北部盆地浅层气的分布	169
4.4.4 识别方法	171
第5章 浅水流灾害	183
5.1 浅水流灾害的概念及分类	183
5.2 浅水流灾害的触发机制	183
5.2.1 砂质沉积物	184
5.2.2 有效封堵层	187
5.2.3 异常压力	188
5.3 浅水流砂体的地球物理特征识别	191
5.3.1 岩石物性特征	191
5.3.2 地震反射特征	194
5.3.3 应力特征	208
5.4 南海北部浅水流灾害	210
5.4.1 浅水流砂体形成的地质背景	210
5.4.2 浅水流地球物理特征识别	215
5.4.3 压力场数值模拟	231
第6章 地震海啸灾害	251
6.1 海啸的产生与传播	251
6.2 南海海域地震海啸灾害	254
6.2.1 南海海域历史地震与海啸	255
6.2.2 南海海域海啸源区的构造研究	256
6.2.3 海啸数值模拟与海啸预警	268
6.2.4 南海海域海啸的模拟结果	270
6.3 总结	271
参考文献	272

第 1 章 | 绪 论

1.1 深水地质灾害定义

深水区域蕴藏着丰富的油气资源 (Weimer et al., 2006; 张功成等, 2007, 2009; 吴时国等, 2009)。然而, 深水油气开发面临着许多浅水区没有出现的重大地质灾害。海洋钻井与陆地钻井相比, 具有明显的投资高、风险大的特点。随着海上油气田开发深度的不断增加, 海底管线的铺设深度和长度也不断增加, 深水恶劣的自然环境不仅对深水浮式平台、水下生产系统、海上作业等提出了苛刻的要求, 而且给工作和运行在那里的连接各个卫星井、边际油田以及中心处理系统之间的从几千米、几十千米乃至数百千米海底管线带来更为严峻的考验。另外, 由多相流自身组成、海底地势起伏、运行操作等带来的一系列问题如固相生成 (水合物、析蜡)、段塞流、多相流腐蚀、固体颗粒冲蚀等已经严重威胁到生产正常进行以及海底生产系统和混输管线的安全运行, 由此引起的险情频频发生。国外深水油气钻探表明, 大约 70% 深水井都遇到过浅水流或天然气水合物灾害问题 (吴时国等, 2010)。海底滑坡和浅层软沉积物变形也常常导致深水油气钻井平台损坏。油气钻井平台损坏或原油渗漏往往造成巨大的环境灾害, 给沿海城市人们的生命财产安全带来重大损失。例如, 2010 年 4 月 20 日, 在美国墨西哥湾深水作业的 BP 公司“深水地平线”钻井平台发生爆炸, 出现了重大财产伤亡和漏油事故, 共造成 11 人死亡, 70 万桶原油泄漏并进入墨西哥湾, 由此给墨西哥湾海域带来前所未有的环境灾难, 保守估计造成的直接损失在 15 亿美元左右 (吴时国等, 2011)。

结合国内外深水勘探和开发实例, 梳理深水区钻遇的地质灾害, 我们将在大陆坡和深海进行科学研究和经济开发中所面临的各种地质灾害统称为深水地质灾害 (deepwater geohazard), 主要包括海底滑坡、浅层水合物、浅层气、浅水流和地震海啸等 (Field and Edwards, 1993; Kvenvolden and Lorenson, 2001; Canals et al., 2004; 刘志斌等, 2008)。

1.2 深水地质灾害研究历史和现状

1.2.1 深水地质灾害研究历史

深水地质灾害研究属于海洋地质灾害研究范畴, 它是由近海陆架地质灾害的研究发展而来, 并伴随着深水矿产资源的勘探、开发及其工程建设进程而不断深入。1947 年美国在

墨西哥湾建成了世界第一座钢结构固定平台，在钻井区和平台场址小范围内进行的浅海地质灾害研究为深水地质灾害研究奠定了基础。到 20 世纪 60 年代末，海上移动式钻井装置发展迅速，作业水深已经超过 200m，推动了海上石油勘探向大陆架的迈进。20 世纪 70~80 年代，随着平台和钻井技术的发展，海洋油气勘探开发水域范围进一步扩大，作业水深超过 500m，并成功开发了北海和墨西哥湾大陆架深水区油气资源，这一时期海洋地质灾害研究已经扩展到了陆架海域，并结合区域性的工程地质调查，特别是在海底土体滑移分析、砂土液化评价等方面取得了显著进步，拉开了深水地质灾害研究的序幕。20 世纪 90 年代，油气工业成功解决了温带海域油气开采面临的钻井、采油、运输和存储等技术问题，且在高寒水域的平台和管线技术难题方面取得了重大突破，海洋油气勘探开发取得巨大进步，作业水深不断刷新，2002 年达到 3000m，全球新发现近百个深水油气田，作业范围从北海、墨西哥湾等传统地区扩展到西非、南美及澳大利亚大陆架等海域，深水地质灾害研究逐渐引起工业界的重视。21 世纪初至今，深水工程技术突飞猛进，深水钻探和作业水深记录不断刷新，水下作业机器人（remote operated vehicle, ROV）作业水深已超过万米，深水正在成为 21 世纪重要的能源基地和科技创新的前沿阵地，这一时期的海洋地质灾害调查研究也扩展到了水深大于 500m 的大陆坡海域，陆坡土体失稳以及天然气水合物等地质灾害因素成了研究重点，这标志着深水地质灾害研究已成为海洋地质灾害研究的热点问题（李清平，2006；刘光鼎，2005；吴时国，2015；Wu et al., 2018）。

1.2.2 深水地质灾害预警现状

深水地质灾害事故频发，严重威胁着深水油气勘探开发过程的安全，深水油气开发中的地质灾害研究正日益成为国际研究的前沿课题。因此，对海洋钻井平台施工设备、工艺技术、井控、救生、逃生、环保、交通运输、拖航等均有较高的标准，安全必须绝对有保障。海洋地质灾害调查对于海洋开发规则的制订具有不可或缺的重要作用。海洋油气勘探开发的通用工作流程要求：在进行深水油气勘探开发之前，必须对地质灾害分布进行调查并明确其范围，并对钻井过程风险进行评价，避免潜在的地质灾害危险。对于深水油气勘探中的地质灾害识别及预测工作，必须合理规划并有步骤地进行，同时采取一定的快速评价技术，进行相应预测预警（Bowers, 1995；Carcione and Gangi, 2000；Carcione and Tinivella, 2001；Bowers, 2002；Binh et al., 2009；Zhang, 2011；Ahmed et al., 2015；Azadpour et al., 2015）。

国外发达国家对海洋地震、风暴潮、滑坡和海啸等海洋地质灾害开发了较完善的预测和评估技术。美国 Scripps 海洋研究所在 20 世纪 80 年代就研发了用于 4000m 深海海底沉积物通量研究的定点观测站；在此基础上又研制了监测深海海底生物化学变化过程的 ROVER 观测站，该观测站工作水深可达 6000m，连续工作最长时间为 6 个月。自 20 世纪 90 年代开始，美国国家、沿海州政府、灾害管理部门、保险公司等有关机构联合，采用业务化运行的风暴潮模式，进行了沿海各岸段风暴潮的调查评估。为实现深海区域的多站点综合观测，美国又于 1998 年启动了“海王星”海底观测网计划（the North East Pacific

Time-Integrated Undersea Networked Experiment, NEPTUNE), 在东太平洋 Juan de Fuca 洋脊处铺设了长达 3km 的高带宽的海底主光缆网络, 围绕着海底主光缆又建立了 50 多个定点观测站, 并在此基础上实施了 ORION (猎户座) 计划。2003 年, 美国启动了墨西哥湾天然气水合物海底观测计划 (Gulf of Mexico Gas Hydrates Seafloor Observatory Project), 其目标是通过实施长期的、多传感器的海底实时远程监测, 获得随时移地震推移的数据体, 分析墨西哥深水区的天然气水合物稳定带 (gas hydrate standard zone, GHSZ) 天然气水合物油气系统, 加强理解含油气系统在海底环境中的作用。调查包括物理、化学和微生物学研究, 由此建立一个模型以使更好地理解 and 评价天然气水合物和下伏的游离气体, 包括: ①传统的深水油气活动与地质灾害的关系; ②烃类气体排入水体, 并最终进入大气, 对全球气候变化的影响; ③水合物在未来能源中的角色。该计划已经积累了大量的物理、化学和微生物学数据。在美国 NEPTUNE 之后, 其他一些国家和组织, 如日本、加拿大、欧盟等相继开始了深海水下光缆观测网的建设。为了推动深海地质风险控制技术以促进海洋资源的持续利用, 大洋钻探欧洲联合体提出了“深海前沿——可持续未来的科学挑战”计划, 针对海洋资源开发区地质灾害的历史、监测和预报开展研究。2000 年启动的大陆斜坡稳定性 (Continental Slope Stability, COSTA) 研究计划是第 5 次欧洲联合框架研究计划的一部分, 选择 10 个典型研究区域进行调查, 建立起已发生或可能发生滑坡区的海底沉积物物理力学性质的数据库, 评价大陆边缘、河口三角洲和海湾在自然与人类活动作用下的海底斜坡稳定性。COSTA 研究计划除了开展常规的航次调查, 还开展利用现场原位测试设备和室内试验仪器获取沉积物工程地质特征的研究工作, 包括多波多分量地震监测地层超孔隙水压力的波普聚丙烯孔隙压力仪 (pop pp pore pressure instrument, PUPPI) 及贯入式测试原位地层岩土工程参数的彭菲尔德穿探计 (Penfeld penetrometer)。另外, 用加拿大发明的仪器和技术设备来测量沉积物的剪切强度、孔隙水压力及孔隙水。近年来, 在欧盟科学计划的大力资助下, 欧洲沿海国家开展了各种类型的坐底式自动观测站研究。为配合海底地球化学通量、海底表层沉积物变化的研究, 德国开发了工作水深 6000m 的 VESP、BS 等多种结构的观测站, 其中 VESP 观测站采用了可视化投放技术, 为选择海底安全投放地点提供了保障。在欧盟科学计划资助下, 英国、丹麦等研制了用于深海海底沉积动力过程研究的 BENBO 观测站, 该观测站采用无缆投放技术, 工作水深 4500m。荷兰科学家在 2005 年成功研制出具有多学科、多层次、多参数的原位监测系统——BOBO 观测站。BOBO 观测站采用水下无线通信, 工作水深 5000m, 为研究海底悬浮物沉积、扩散和物质循环过程提供了技术支撑。意大利、法国等联合研制了水深 6000m 的海底地球物理监测系统 (Geophysical and Oceanographic Station for Abyssal Research, GEOSTAR), 该观测系统采用简化的 ROV 投放与回收装置 (MODUS), 减少了回收式所必需的浮力系统, 在结构、水下定位以及操作的灵活性方面均有了很大提高。英国研制了一系列对水下生物及鱼类生活习性观测的专用深海观测站, 如 ROBIO 及 FRESP 系统等, 这些系统工作水深为 4000 ~ 6000m, 可以对底栖生物的生活习性、运动状态等进行现场观测。

亚洲发达国家不甘落后。韩国建立了较完善的灾害预警基础设施、先进的灾难监测手段和快速应急处理流程。在海洋地质灾害研究方面, 日本已经走在了世界前列。日本在长

期应对灾害的实践中,建立了先进的灾害管理体系,若发生特大灾害,可利用各种渠道收集灾情信息资料。

1.2.3 我国深水地质灾害研究现状

尽管深水地质灾害最近几年来才引起我国学者的关注(胡光海等,2004;甘华阳等,2004;董冬冬等,2007;吴时国等,2011;叶银灿,2012;杨敬江等,2014),但在20世纪80年代初,国内各大石油公司便已开展了以含油气远景区的工程地质调查以及平台、管道等工程场址调查为目标的海洋地质灾害调查工作。1983年南海西部石油公司与中国科学院海洋研究所等率先开展了北部湾海区平台场址工程地质调查;之后,南海西部石油公司和中国科学院海洋研究所等在北部湾及南海西北部陆架又进行了20km×40km的区域性灾害地质调查;1985年,上海海洋地质调查局在东海陆架油气勘探区进行了1:20万区域工程地质调查;1986~1987年,中国科学院海洋研究所和中国科学院力学研究所根据黄海石油公司的要求,对南黄海123°E以西的浅海及苏北浅滩外缘进行了区域工程地质调查;1986~1990年,地质矿产部第二海洋地质调查大队在联合国开发计划署的资助下,在南海珠江口盆地开展了1:20万的海洋工程地质调查,共完成9个1:20万国际标准图幅;2006年中国海洋石油集团有限公司与赫斯基能源公司合作在珠江口盆地29/26深水区块发现Lw-3-1天然气田,标志着我国深水油气勘探开发也已全面启动。在工程选址、管道路由与平台场址调查中,国内工程勘察单位与辉固国际集团合作,对水深600~1500m陆坡的土体稳定性重点进行了调查研究,揭开了我国深海海洋地质灾害研究的序幕。但由于我国深水油气勘探刚刚起步,对于这一地质灾害的研究和预警技术尚不深入,深水地质调查装备及技术相对落后。因此,深水地质灾害对深水钻井安全的地质风险评价探讨较少,与发达国家仍有较大差距。2011年6月发生在我国渤海海域的蓬莱19-3油田的漏油事故,造成了重大经济损失和环境灾害。这也为我国正在开展的深水油气勘探开发敲响了警钟。随着我国深水油气勘探开发的不断深入和深海采矿工作的进一步推进,在获得巨大经济利益的同时,我们也要注意深海资源开发中的地质灾害问题,需积极开展针对深水地质灾害识别与预测技术研究,尤其是加强对海底滑坡、天然气水合物、浅层气、浅水流和地震海啸等深水地质灾害形成条件和特征识别的基础研究,加强深水地质调查装备,为将来深海开发中可能遇到的地质灾害问题做好理论和技术上的准备,避免出现由深水地质灾害带来的重大环境灾害问题。

1.3 深水地质灾害类型

将深水地质灾害类型作为海洋地质灾害类型的一方面,是海洋灾害地质学的一个基本的理论问题,其目的是更深入地认识所研究的深水地质灾害地质客体。国内外学者对于深水地质灾害的研究已有30余年,随着海洋灾害地质调查和研究工作的不断深入和发展,根据各自研究目的及其对地质灾害的认识,先后提出过多种分类方案。参照Carpenter等

(1980) 对外陆架各类地质灾害因素进行的系统划分方案, 深水地质灾害可划分为两大类: ①危险地质灾害 (genuine geohazard), 对海底油气工程具有高度潜在危险的因素, 如海底滑坡、活动断层、浊流、浅层气、浅水流、浅层水合物、地震海啸等; ②潜在地质灾害 (constraint geohazard), 对深水工程可能构成一定威胁或者给工程带来一些麻烦的因素, 如海底陡坎、埋藏古河道、活动沙波、凹凸地貌等, 其不一定造成灾害, 如果地质勘查详细、工程设计合理, 可以减轻或避免地质灾害事件发生。本书涉及的深水地质灾害主要指具有高度潜在危险的海底滑坡、天然气水合物、浅层气、浅水流及地震海啸等灾害。

1.3.1 海底滑坡

海底滑坡 (submarine landslide) 是指在地震、海啸、高沉积速率、火山、水合物分解等因素的诱发下, 快速沉积的结构疏松欠压实沉积物沿大陆坡滑动面发生块体搬运的过程, 是广泛发生在大陆坡的一种重力流搬运机制, 包括滑动 (slides)、滑塌 (slumps) 和碎屑流 (debris flows) 等重力流作用过程 (宋海斌, 2003; Haflidason et al., 2004; Hampton et al., 1996; Locat and Li, 2002; Weimer et al., 2007; 王大伟等, 2009a, 2009b, 2011; 吴时国等, 2011) (图 1-1)。

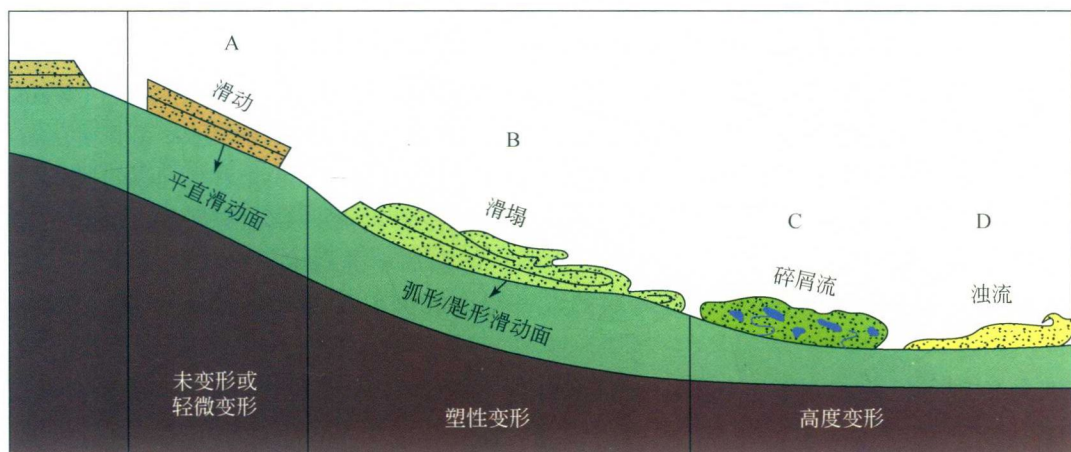


图 1-1 海底滑坡示意图

海底滑坡无论是被动大陆边缘还是活动大陆边缘都广泛发育, 规模不等, 最大可以达到几千平方千米, 对原生沉积具有极大的破坏和改造作用, 可将沉积物运移至数百千米甚至数千千米之外 (Haflidason et al., 2004)。海底滑坡的形成受多种因素控制, 按照周期可以分为长期因素和短期因素。长期因素包括陆坡坡度、海平面变化、天然气水合物分解、沉积物供给、沉积物内聚力、地壳均衡、构造活动或基质 (岩石) 强度等。短期因素由一些触发机制构成, 包括地震、海平面快速变化 (潮汐、海啸、风暴等)、底层水环流 (尤其是底水温度的显著变化)、淡水舌、冰山崩解、水合物分解、滑塌体的快速破裂和人为因素。但常见的触发机制主要是地震、潮汐或风暴潮的负载或卸载、海平面快速变化,

以及超压流体、火山和水合物分解 (Kvalstad et al., 2005; Normark et al., 1993; Micallef et al., 2009; Popenoe et al., 1993; Riboulot, 2013)。

早在 19 世纪后期,人们就已经注意到了海底滑坡的存在。1616~1886 年 270 多年间的 330 余次海底滑坡事件主要是由地震和火山爆发引起的。随着人类对海底利用范围的加深,海底电缆和油气管线的大规模铺设,因海底滑坡而引发的破坏事件不断发生,人们逐渐意识到加强海底斜坡稳定性研究的重要性。但是,最初的研究主要是定性地对海底滑坡进行分类,对海底滑坡的诱因进行笼统的总结。

直到 20 世纪 70 年代,以美国地质调查局为首的研究机构才开始对海底滑坡进行系统的研究。美国地质调查局会同几所大学在密西西比河水下三角洲进行了滑坡灾害研究。促使这一研究得以实施的主要原因是 1969 年发生在美国的卡米尔号飓风诱发了水下土体大规模滑动,造成 3 座平台破坏,其中 B 平台翻倒,此后海底滑坡引起了研究人员的极大关注。

进入 20 世纪 90 年代,有关海底滑坡的研究逐步深入。海底地质调查设备的长足进步使得获取大量海底地形数据、提升调查分析水平成为可能,提升了海底滑坡的研究层次。美国、加拿大、欧洲等相继开展了一系列针对海底滑坡的专项研究。例如,美国实施的大陆边缘沉积过程研究、加拿大实施的海岸斜坡稳定性研究、欧洲各国联合实施的大陆斜坡稳定性研究等都取得了丰硕的研究成果。它们对于海底滑坡的分类、海底滑坡的诱发机制、海底滑坡的形态等诸多方面进行了系统的研究。

在海底滑坡分类方面,科学家总结了全球大陆边缘的一些典型的海底滑坡 (Weimer et al., 2007)。表 1-1 列举了 23 种导致海底滑坡的情况,除了实际观测到海底滑坡在坡角极小的情况下都可能发生外,还发现发生滑坡的海底砂质大多以粉土和细砂为主要成分。对于海底滑坡的诱发机制,认为引起海底滑坡的因素主要包括:①地震海啸,如圣劳伦峡湾的滑坡 (Locat and Lee, 2002);②海底火山,如加那利群岛水下滑坡的块体运动与夏威夷群岛水下滑坡比较相似,认为海底的发育与海底火山有关 (Urgeles et al., 2006);③高沉积速率,如通过对比分析得克萨斯州、俄勒冈州、加利福尼亚州和新泽西州海域大陆坡上发育的 83 个滑坡体,比较滑坡体的面积、滑动距离、滑坡壁高度、滑动面坡度、裂隙以及周围海底的坡度,发现引起海底滑坡的主要因素是海底物质的沉积方式、侵蚀方式和区域海平面变化 (Mcadool et al., 2006);④失稳地形,如通过系统分析高纬度寒冷环境冰控边缘海和低纬度温暖环境河控边缘海发育的 8 个较大海底滑坡区域,获得了破裂面的面积、滑坡壁高度、滑动面坡度、裂隙数等主要参数,利用这些参数进行对比研究,发现这些滑坡,除了局部滑坡后壁坡度较缓外,主要的滑坡面坡度后壁较陡 (Canals et al., 2004);⑤沉积物液化,如在地中海西部 Eivissa (伊维萨)海峡发现该滑坡有 4 个滑动体且滑动速度较慢,但沉积物向下坡方向发生变形的速度较快,致使斜坡上的沉积物发生明显扰动,而滑动距离则不明显,推测碎屑流的搬运距离与其有效抗剪强度和黏性有关 (Lastras et al., 2004, 2005);⑥天然气水合物分解,通过对挪威大陆边缘 Storegga 滑坡和美国大陆边缘海底滑坡的研究,认为水合物分解可引起海底滑坡 (Best et al., 2003; Bünz and Mienert, 2004; Davie et al., 2004)。

表 1-1 世界范围内主要海底滑坡分布

海底滑坡位置	组（地层）	年代
布鲁克斯山脉（美国阿拉斯加州北部）	Torok	早白垩纪
英国西北部，加拿大，哥伦比亚	Isaac	新元古代
美国加利福尼亚中心，Pt. Lobos	Carmelo	古新世
特拉华山区（美国得克萨斯州西部）	Cutoff	二叠纪
沃希托山区（美国，阿肯色州中心）	Jackfork	宾夕法尼亚纪
下加利福尼亚，墨西哥	Rosario	晚白垩纪
墨西哥东部	Chicontepec	新生代
智利南部	Tres Pasos	晚白垩纪
阿根廷	Jejienes	石炭世纪
爱尔兰西部（克莱尔郡）	Ross	晚石炭世
法国南部 Peira Cava	Gres D' Annot	始新世-渐新世
西班牙北部 Ainsa 盆地	Santa Liestra, Campodarbe Groups	始新世
塔韦纳斯（西班牙北部）	Gordo Megabed	中新世
南非 Karoo	Vischkuil	二叠纪
新西兰，北岛西部	Mt. Messenger	中新世
中国、南海	第四系	第四纪

资料来源：Weimer et al.，2007。

近年来，随着深水石油勘探的日益升温，国外公司通过对大陆斜坡深水区 3D 地震调查发现，沿着绝大多数的深水区边界，存在广泛分布的海底滑坡（图 1-2）。某些盆地中，第四纪晚期的个别沉积层序可能大半由海底滑坡及其变形沉积物组成。例如，位于墨西哥湾西北部 Brazos-Trinity 盆地 50% 的深水层序由滑坡体组成（Beaubouef et al.，2003）；在文莱深水区的沉积层序中包含了 50% 的滑坡体搬运沉积（Gilvery and Cook，2003）；尼日尔近海区也有 50% 的滑坡体沉积，并且在某些地区，近 90% 的地层层序由滑坡体构成（Newton et al.，2004）。



图 1-2 全球主要海底滑坡分布（Paul et al.，2009）

海底滑坡的搬运及变形可促使沉积层内部水分排出,在地下浅层($<100\text{m}$)沉积物中,滑坡体表现为过压实,这导致在射流或打桩操作时穿透率低(Shipp et al., 2004),而深水钻井装置成本平均每天达25万~40万美元,因此缩短钻井时间是十分迫切的。此外,海底滑坡能够导致浅地层结构受到破坏,加之深水钻探位于大陆坡区,因而给深水油气和天然气水合物钻井及深海工程带来巨大影响。1929年11月18日,Grand Banks地震触发了 20km^2 的海底滑坡,有27人在该事件中遇难,形成的沉积物流把 200km^3 的碎屑带入深水中,切断了跨大西洋的海底电报电缆,造成了巨大的经济损失,这是最早的关于海底滑坡的工程灾害报道。1969年卡米尔号飓风袭击密西西比河三角洲,引起海底大面积土体滑移,造成3个平台破坏,使其中一个平台翻倒并沿斜坡向下滑出30m,造成的损失超过1亿美元;1975年3月20日,墨西哥湾内的一个自升式平台钻到高压浅层气,引起井喷,接着平台开始倾斜、起火燃烧,最后倾覆、沉没。此外,海底滑坡还可以引发海啸。2004年12月26日苏门答腊岛沿海发生的巨大海啸,造成了巨大的生命财产损失(马宗晋和叶洪,2005)。在国内海底滑坡导致的破坏事件也屡屡发生。例如,钻井船“渤海二号”的滑移造成我国船员遇难和财产损失;渤海浅海层发生海底大面积的滑塌和底辟导致输油管道被切断;南海某石油钻井平台曾因软弱地层滑动导致倾覆。因此,海底滑坡不仅涉及深水油气开发的商业利益,而且对沿海地区人们的生存环境造成巨大的影响。

过去十年里,许多公司利用三维地震资料来评估钻井突发事件,设计了相应的油气勘探和开发方案。三维地震资料可通过确定钻井路径和套管位置来研究海底滑坡问题。因此,从经济方面来说,为了减少投资风险,了解浅层的滑坡和块状搬运沉积分布情况是非常重要的。Shipp等(2004)回顾了穿过海底浅层的海底滑坡(海面以下50~100m)的深水钻井条例中出现的钻井时间延长情况,认为海底滑坡受土力学性质的影响。他们归纳如下:①海底滑坡沉积物和其上下的深海沉积物具有不同的压实作用。②定量证据表明与周围深海沉积物相比,海底滑坡沉积物有轻微过压实现象。海底滑坡沉积物的含水率比周围沉积物低15%~20%(Piper et al., 1997)。这么低的含水率(由于过压实)是由与海底滑坡沉积物和滑坡变形有关的脱水作用引起的。③海底滑坡沉积物增加的过压实将影响钻井和开发井射孔的地表导管间隔。

对于近地表钻井或在开发深水区注水井,Shipp等(2004)提出了如下建议:①在钻井之前,应该先了解该地区沉积物的分布情况和沉积环境;②在考虑了沉积环境的影响之后,再去选择地表的钻井位置;③表层套管的长度设计应考虑到沉积环境(对于沉积物受到较强压实作用的,则应使用短套管)。

对于管道设计和定位来说,海底地形的不稳定性是主要问题(Kaluza et al., 2004)。在铺设管道之前,对海底的研究必须从以下几点进行常规检查:①沿着海底,确认近期是否发生过可能导致管道形变或者破裂的沉积物运动;②研究所有滑塌沉积物存在区域的沉降作用。一般,平坦的海底是由晚更新世的块状搬运沉积和滑坡体组成的,这些晚更新世的块状搬运沉积和滑坡体被后期全新世的沉积物覆盖,覆盖的厚度从两米到数十米。由于差异性沉降,横向覆盖在下伏块状搬运沉积体上的全新世沉积物的厚度有所不同,因此,

这会给工程设计造成困扰。对于这种问题,解决方法是采用柔韧性相对较好的管道和建立跨桥连接通过潜在可疑区域的管道,但其造价非常昂贵。因此,了解陆坡沉积物上部的滑坡沉积体系分布是非常重要的。

1.3.2 天然气水合物

天然气水合物(gas hydrate),也称“可燃冰”,是一种水和气体分子组成的笼状化合物,通常赋存于水深200~1500m的海底沉积层中,含天然气水合物的沉积层一般是未固结的地层,水合物填充在孔隙空间,或者与沉积物颗粒胶结在一起。天然气水合物的研究具有重要的科学意义:一方面,天然气水合物储量巨大,有望成为未来重要的替代能源(Brooks et al., 1986; Andreassen et al., 1990; Brown et al., 1996; Alexei and Roger, 2001; Baba and Yamada, 2004; Boswell, 2009; Boswell et al., 2012, 2014);另一方面,它在海底灾害预测和全球气候变化研究中具有不可忽视的作用(Bouriaik et al., 2000; Archer, 2007; Sloan and Koh, 2008; 吴时国, 2015)。

深水油气一般位于被动大陆边缘的陆坡区,该区域也是海底天然气水合物的存在区域(张光学等, 2003; 呈时国等, 2015),区域的地质构造如斜坡、不规则地层、水合物沉积层的不稳定等构成了工程灾害的潜在因素,特别是浅地层水合物层的存在对工程的安全性具有更直接的影响。深水钻井作业经验表明,水深 $\leq 300\text{m}$,一般没有水合物;水深在300~600m,如果没加水合物抑制剂,水合物形成的可能性较大;水深 $\geq 600\text{m}$,必定生成水合物,电解质抑制剂不起作用。因而,水深超过600m以后,水合物成为深水钻探开发的主要难题。但目前对地层中水合物分解引起的各种灾害行为的研究还不深入,现有研究成果表明,含水合物沉积层孔隙度降低、速度增加、反射空白、地层渗透率降低。低地层渗透率不利于下层游离气向上运移,在孔隙不均匀分布情况下,很容易产生超压地层,导致作业事故的风险大为增加;气体的突然释放也会对输送管道产生破坏作用。美国曾发生过多起因天然气水合物堵塞管线而造成的停钻事故,其中最严重的一次发生在墨西哥湾海域,作业水深为945m,影响作业进度近120h。西非几内亚湾也出现过深水固井过程中的水合物风险,险些酿成灾害事故。目前世界上识别出与天然气水合物分解有关的海底滑坡主要有挪威外陆架的Storegga滑坡、大西洋大陆斜坡上的Cape Fear、南美亚马孙冲积扇、加拿大西北岸波弗特海、西地中海的Balearic巨型浊流层和西非大陆架、哥伦比亚大陆架、美国太平洋沿岸以及日本南部的海底滑坡体。

因此,在勘探开发常规深水油气资源的同时,还需要对海洋天然气水合物进行探查和开展水合物风险控制研究,如美国在墨西哥湾区域,专门制订了天然气水合物的联合开发计划。在该计划中,除了将开发天然气水合物资源作为主要目标外,还将工程风险评价作为主要研究内容。

1.3.3 浅层气

浅层气(shallow gas)指海底浅层未固结沉积物中含有的游离气体,具有压力高、井

喷强烈且速度快、允许波动压力低以及处理难度大的特点，浅层气多在快速沉积的地区钻遇，浅层气灾害是海洋钻井作业中经常遇到的灾害事故之一。在平台上发生的浅层气井喷可以造成巨大的经济损失。例如，1987~1988年出现的一起浅层气井喷，给平台带来了严重的经济损失，据报道损失达两亿美元。表1-2~表1-5列出了浅层气井喷给部分钻井装置和平台带来的损失和井喷持续时间（图1-3）。

表 1-2 浅层气井喷造成的平台损失

时间	平台	损失情况	地点
1957 年	South Pass 27	轻	墨西哥湾
1962 年	Grand Isle 9	严重	墨西哥湾
1962 年	Middle Grand Shoals	严重	库克湾
1965 年	S. Marsh Island 48	严重	墨西哥湾
1967 年	S. Timbalier 67	严重	墨西哥湾
1974 年	E. Cameron 338	轻	墨西哥湾
1974 年	High Island A-563	全损	墨西哥湾
1976 年	Fateh L	全损	阿拉伯湾
1976 年	High Island A-511	严重	墨西哥湾
1976 年	Eugene Island 380	中等	墨西哥湾
1977 年	S. Marsh Island 96	中等	墨西哥湾
1977 年	S. Marsh Island 146	轻	墨西哥湾
1978 年	West Cameron 180	全损	墨西哥湾
1978 年	West Delta 79	轻	墨西哥湾
1978 年	Vermilion 23	轻	墨西哥湾
1980 年	High Island 368	全损	墨西哥湾
1981 年	Khafji 156	严重	阿拉伯湾
1982 年	Eugene Island 361	严重	墨西哥湾
1982 年	Campeche	中等	坎佩切湾
1983 年	Forties Delta	严重	北海
1983 年	East Breaks	严重	墨西哥湾
1985 年	Grayling	中等	库克湾
1987 年	Steelhead	严重	库克湾

表 1-3 浅层气井喷造成的自升式及沉底式钻井装置的损失

时间	承包商	钻井装置	损失情况	地点
1958 年	Odeco	不详	不详	墨西哥湾
1968 年	Fluor	Little Bob	全损	墨西哥湾
1972 年	Reading & Bates	M. G. Hulme	全损	爪哇海
1972 年	Marine	J. Storm II	全损	墨西哥湾
1974 年	Offshore	Meteorite	全损	尼日利亚
1975 年	Zapata	Topper III	全损	墨西哥湾
1978 年	Pebro	Penrod 61	轻	墨西哥湾
1979 年	Odecod	Ocean Patrior	不详	墨西哥湾
1980 年	Reading & Bates	Ron Tappmeyer	严重	阿拉伯湾
1981 年	Sedco	Sedco 250	全损	安哥拉
1983 年	Pebro	Penrod 52	全损	墨西哥湾
1983 年	Santa Fe	Santa Fe 134	中等	加里曼丹
1985 年	Beaudril	Molikpad	中等	蒲福海
1988 年	Sedco	Sedco 251	全损	爪哇海
1989 年	Sedco	Sedco 252	全损	印度

表 1-4 浅层气井喷造成的半潜式钻井装置的损失

时间	承包商	钻井装置	损失情况	地点
1971 年	Odeco	Ocean Driller	轻	墨西哥湾
1973 年	Santa Fe	Mariner I	全损	特立尼达
1973 年	Santa Fe	Blneater 2 I	全损	墨西哥湾
1973 年	Santa Fe	Mariner II	全损	墨西哥湾
1978 年	Sedneth	Sedneth I	中等	墨西哥湾
1980 年	Sedco	Sedco 135C	全损	尼日利亚
1981 年	Wilhelmsen	Treasure Saga	中等	北海
1981 年	Odeco	Ocean Scout	轻	墨西哥湾
1984 年	Wilhelmsen	Treasure Seeker	中等	北海
1985 年	Smedvig	West Vanguard	严重	北海

表 1-5 浅层气井喷造成的钻井船及驳船的损失

时间	承包商	钻井装置	损失情况	地点
1964 年	Reading & Bates	C. P. Baker	全损	墨西哥湾
1969 年	Reading & Bates	E. W. Thomson	中等	马来西亚
1970 年	Offshore	Discoverer II	轻	马来西亚
1970 年	Offshore	Discoverer III	中等	爪哇海
1971 年	Fluor	Wodeco II	全损	秘鲁
1971 年	Atwood Oceanics	Big John	全损	文莱
1975 年	Offshore	Discoverer I	轻	尼日利亚
1981 年	Petromarine	Petromar V	全损	中国南海
1982 年	Global Marine	Conception	中等	加里曼丹
1988 年	Viking Offshore	Viking Explorer	全损	巴厘巴板

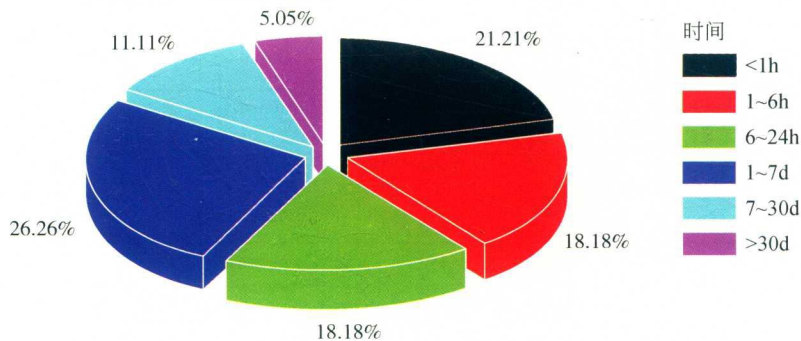


图 1-3 美国大陆架 1971 ~ 1991 年井喷持续时间 (据 MMS^①)

由于前期调查及研究不充分，海底浅层气在墨西哥湾海域油气资源勘探及工程施工中都遇到过，它们是各种海底设施和建设施工的一大难题和灾害隐患。钻井权威和井控专家公开宣称，在所有井控问题中处理浅层气井喷最为困难，相比于控制井喷，强行起下管柱、不停产（或失控）情况下分接管线、冻结技术或其他井控专家经常提到的问题更具有技术上的挑战。

美国大陆架：1971 ~ 1991 年，在美国大陆架作业中共发生 87 次井喷事故（钻井共 21 436 口，其中开发井占 63.6%），11 次井喷导致了灾难性事故，大部分为浅层气井喷，其中 46 次井喷是发生在勘探井中。由于大部分探井非商业可采，因而，在墨西哥湾所发生的井喷与产量联系密切，其中 58 口井是在钻至 5000ft^② 前所发生的，均因未被检测到或

① MMS, Minerals Management Service, 美国资产资源管理局。
② 1ft = 3.048 × 10⁻¹ m。

对试层气高压控制不当所造成。尽管开发井钻井时，确立了许多地质参数，井喷率较低，但是在实际钻探时，37 口开发井中仍有 25 口由浅层气喷出导致了井喷事故（图 1-4，图 1-5）。

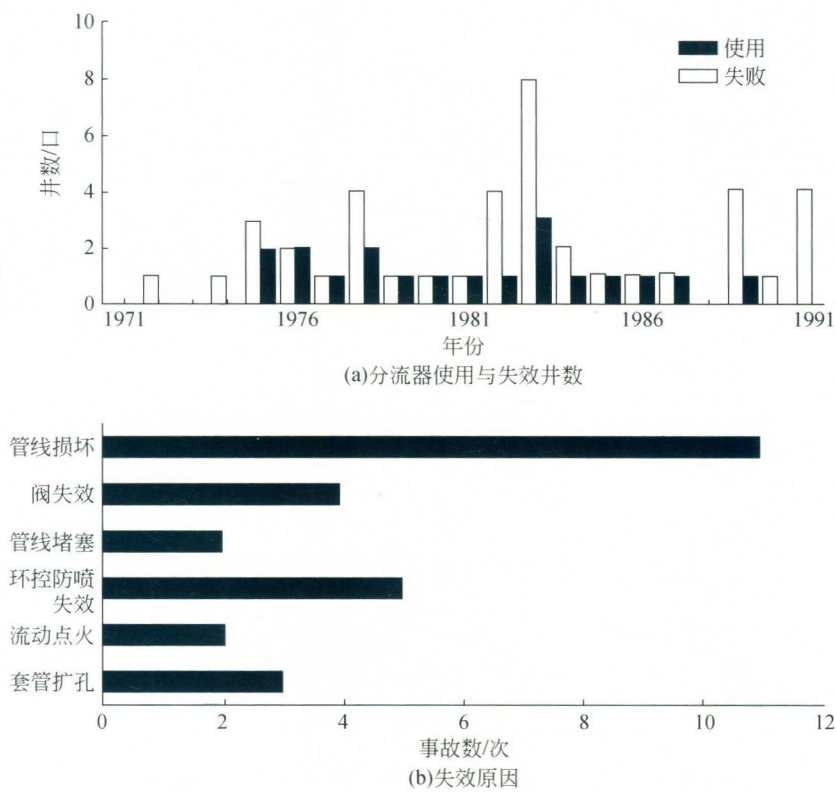


图 1-4 美国大陆架 1971 ~ 1991 年分流器使用与失效井数和失效原因

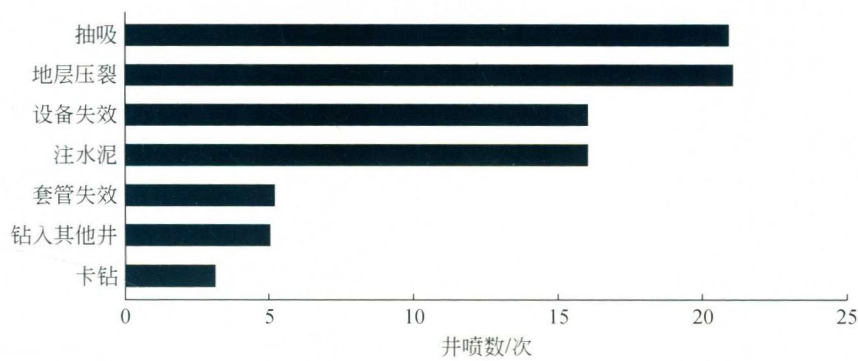


图 1-5 美国大陆架 1971 ~ 1991 年浅层气井喷原因（据 MMS）

挪威大陆架：截至1987年11月，在挪威大陆架钻进的567口探井和评价井中有155口井钻遇了浅层气，7口井发生了井喷，多口井发生了井涌。1985年10月6日晚在挪威6407/6区块Vanguard，半潜式平台发生了浅层气井喷，在12-1/4 in井眼钻进过程中发生井喷。结果爆炸与大火引发了巨大的灾难，造成了巨大的经济损失。

浅层气灾害主要体现在3个方面：①难预测。气体一般来源于海底以下1000m浅地层内聚集的生物成因气体，横向分布不均匀，难以识别。②难控制。浅层气不仅发生突然，警报信号的反应时间短促，通常来不及报警就喷出地表，造成井喷，而且来自浅层气的压力能够使油井很快卸载，一旦井喷，即使流量很小也可以使所有泥浆喷出，尤其是在起钻过程中向井眼内灌泥浆时，分流作用失效50%的海洋浅层气事故与此有关。现场经验和数学模型表明，一旦发生浅层气井涌，浅层气井喷几乎是不可能予以控制。事实上，很多浅层气的停喷是由地层坍塌而制止的。③伴生灾害。在表层套管以上地层一般埋藏深度浅、地层极为松散、地层承压能力弱，属于薄弱层，浅地层（从早期钻穿的表层土至导管/表层套管的下入深度）破裂压力梯度低，不能用普通的关井技术来控制井涌，这是因为浅层气井喷发生在导管或表层套管下的裸眼部分，或在表层套管外面（原因是气窜通过水泥而引起），防喷设备少。发生井喷时，不能强行关闭，否则将憋漏表层，造成烧毁钻机 etc 事故，通常为了防止憋裂地层，一般使用分流器，分流器只能控制井喷，而不能约束井喷。

海洋钻井预防浅层气井控工作极为重要，它直接关系到海上钻井施工人员、设备、地下资源及海洋环境的安全，因此迫切需要研究总结一套适合海洋钻井的浅层气钻井技术，以有效防止浅层气井喷事故的发生（吴时国等，2015）。

1.3.4 浅水流

浅水流（shallow water flow, SWF）指深水钻探阶段，发生于浅部地层的持续砂水垂向流动现象。在深水区，当钻井通过异常压力、未固结、未压实砂层时，受高孔隙压力驱动，沿结构套管内侧或外侧迅速向海底喷出的浅水流砂体，浅水流可侵蚀钻井的支撑构架导致套管弯曲破裂（图1-6），破坏井眼完整性让井控失效[图1-6（b）]，将大大增加钻井开发和维护的成本（Alberty et al., 1997；Huffman and Castagna, 2001）。浅水流是深水油气开发中的常见灾害，在墨西哥湾也是所有地质灾害中影响最大的。

通过对墨西哥湾、挪威、里海等深水油气区（以墨西哥湾为主）浅水流发生区域资料的调研发现，浅水流通常发生在水深大于400m，埋深300~800m内沉积速率高的深水盆地（图1-7）。当钻井钻过该地层后，高速水体就从钻孔中喷出，这是深水油气钻井遇到的主要事故，其形成条件和形成机制、岩石物理特性、地球物理识别标志等是研究的热点问题。1985年，在墨西哥湾首次发现浅水流事件，根据墨西哥湾深水钻井资料（图1-8），浅水流多发生在450~2000m埋深小于200m且具有高沉积速率的高压砂层之上。钻井引起的压力释放导致砂水流沿着井孔内侧或外侧持续流动。对于已空钻的井孔，在水流的不断侵蚀下，井孔周围还会被淘空，在缺少支撑的情况下，井孔很容易发生变形，进而威胁钻井的安全。