

# 基于高分辨率水深地貌数据的海底滑坡对深水油气田开发与海底管道工程的影响分析

刘 磊 (中海油田服务股份有限公司物探事业部工程勘察公司, 天津 300459)

**摘要:** 本研究从多个角度,多层次地研究海底滑坡灾害对深水油气资源开发及海底管道安全的影响。研究基于高分辨率水深地貌数据,深入剖析海底滑坡的多尺度地貌特征、构造控制机制及流体相互作用机理,揭示其对钻井平台就位、海底管线铺设以及水下生产系统的潜在威胁。以深水油气田为研究对象,开展滑坡与海底工程设施相互作用机理研究,提出从选址优化、自适应性结构设计到全生命周期监测预警等多层次综合风险控制策略,为深水油气田安全高效开采提供科学依据与技术支持。

**关键词:** 海底滑坡;深水油气田;海底管道;地质灾害;风险评估

**中图分类号:** P756.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167(2025)036-0112-03

## Impact Analysis of Submarine Landslides on Deepwater Oil and Gas Field Development and Subsea Pipeline Engineering Based on High-Resolution Bathymetric and Geomorphic Data

LIU Lei (Engineering Survey Company, Geophysical Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** This study examines the impact of submarine landslide disasters on the development of deepwater oil and gas resources and the safety of submarine pipelines from multiple perspectives and at multiple levels. Based on high-resolution water depth geomorphic data, the research deeply analyzes the multi-scale geomorphic features, structural control mechanisms and fluid interaction mechanisms of submarine landslides, revealing their potential threats to the positioning of drilling platforms, the laying of submarine pipelines and underwater production systems. Taking deepwater oil and gas fields as the research object, this study focuses on the interaction mechanism between landslides and submarine engineering facilities, and proposes multi-level comprehensive risk control strategies ranging from site selection optimization, adaptive structural design to full life cycle monitoring and early warning, providing scientific basis and technical support for the safe and efficient exploitation of deepwater oil and gas fields.

**Keywords:** submarine landslide; deepwater oil and gas field; subsea pipeline; geological hazard; risk assessment

深水油气的开采环境与地质情况十分复杂,存在各种隐患,尤其是海底滑坡,是一种分布范围广、破坏性大的典型地质灾害,给深海工程建设带来了挑战。因此,深入理解海底滑坡的形成机理、运动特征及其对海洋工程的危害,是保障深水油气田安全高效开发迫切需要解决的重要科学问题。在此基础上,进行海洋环境下的滑坡高精度探测和系统研究,有助于推进深海工程地质灾害风险评估和防控技术的发展。

### 1 深水区海底滑坡特征分析

基于高分辨多波束与三维地震数据,深水区海底滑坡呈现出多尺度、复杂的特点。典型滑坡系统由三个主要的地貌单元组成:上部侵蚀区、中部滑移带及远端堆积区。上部侵蚀区多为高30—80m的弧形陡坎,其下缘发育密集的张裂体系;中部滑移带由一系列平行的滑移脊、槽群组成,单条滑移带宽达200m,延伸长度超过5km。远端堆积为块体流与浊流混合堆积,形成厚度为10—50m的不规则反射层。地球物理资料

表明,在滑坡内部,有明显的透明层与杂乱反射层交替分布,这是多期次滑移事件叠加的标志。滑坡坡度一般为5—15°,部分坡度大于25°。

### 2 海底滑坡影响因素及形成机制

#### 2.1 地质构造控制因素

大陆边缘深水区的海底滑坡发育显著受到断裂系统和褶皱构造的刚性控制。南海北部陆坡区海底地层受多条断层控制,呈台阶状发育,既削弱了斜坡整体性,又为后续滑移提供了定向通道。同时,背斜脊等挤压构造对沉积物的侧向阻隔作用可引起地层内应力积聚,南沙海槽一大型海底滑坡事件的发生,与持续抬升的背斜脊对高供给率沉积物的阻挡密切相关。

深层构造活动对海底斜坡的稳定模式起着重要的控制作用。这些底坡体上穿时,上覆沉积层拱曲破裂,形成局部陡坡或软弱带。已有研究表明,大型低倾角海底滑坡底部滑动面往往沿弱地质层分布,且平行于正常沉积地层,是滑坡多期、后退式发育的基础。大

陆坡的构造演化史从而直接预设了海底滑坡的空间分布框架与潜在规模。

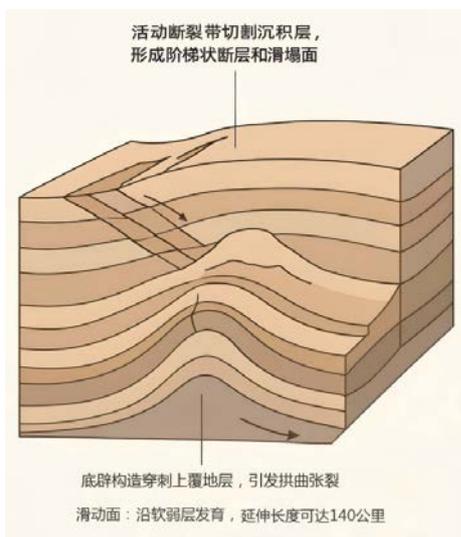


图1 海底滑坡地质构造控制机制示意图

## 2.2 流体活动与沉积物特性

流体活动改变了沉积物的力学性质，直接引起海床的不稳定，而超压流体的形成与运移是其核心机理。高压气体沿着断层、烟囱等通道向上运移，使地层压力增高，剪切强度下降，形成潜在的破裂面。该机制已在珠江口盆地陆架坡折带得到证实，并在低角度海底滑坡发育中扮演着重要角色。水合物分解相变过程产生大量超压流体，数值模拟结果显示，Cascadia 陆缘边缘超压高达 114 帕，足以显著降低地层安全系数并诱发滑坡。

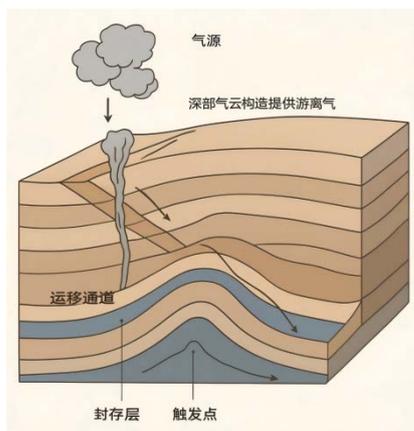


图2 流体活动与沉积物特性耦合机制图

## 2.3 外部触发机制

地震活动是海底斜坡失稳最直接的激励源，强烈地震动荷载可以瞬间破坏沉积物骨架结构。地震波在海底软泥层中传播时，会导致土体发生液化，使其内聚力和内摩擦角显著降低。已建立的 1900 年—2025 年全球海底滑坡数据库共收录 124 个案例，分析结果显示，海域地震引发的滑坡范围比陆地环境大 2 个量

级。在南海北部陆坡，地震被认为是触发坡度仅 0.3 至 0.5° 却长达 160 公里大规模滑坡的关键因素。

另外，海平面变化、海床温度变化也会影响边坡稳定性，进而影响水合物稳定范围。冰河期，海平面下降所产生的静水压促使水合物稳定带底界面上移，促使原位水合物分解。数值模拟结果显示，18-14 千年间 Cascadia 陆边缘水体温度升高，导致水合物稳定带底界迅速抬升至 1.18m/ 千年，并最终于 13700 年发生奥卡滑坡。此外，相对海平面变化直接改变了沉积环境，成为陆源物质向陆架运移的通道，并对陆坡稳定性产生重要影响。

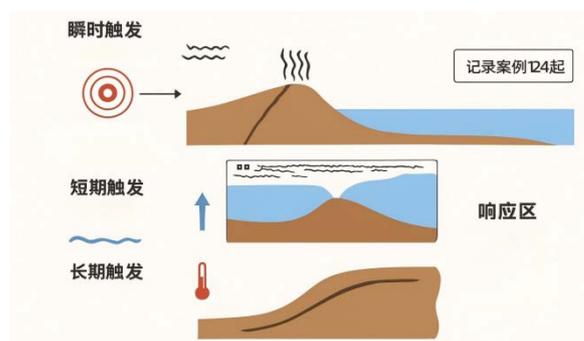


图3 外部触发机制时空效应图

## 3 海底滑坡对深水油气田开发与海底管道工程的影响分析

### 3.1 对钻井平台就位安全的影响

海底滑坡是深水钻井平台施工安全的直接威胁，其主要形式有基础失稳、锚泊系统失效等。南海西部 S1 研究区的高分辨率地形和浅地层剖面资料，位于滑坡影响区的平台选址点普遍存在坡度变化剧烈、浅地层结构紊乱的地质特征。具体而言，滑塌区 B 海底坡度为 5-40°，浅表层沉积物为复杂反射结构，发育大小不等的滑塌体<sup>[2]</sup>。这些松散堆积体的物理力学性质不同于原状地层，可能导致钻井平台插桩作业时出现基础承载力不足或差异沉降。若将平台桩腿安设在不均匀地基上，受到机械振动、风浪等外界荷载的影响，极易发生倾斜、倾覆等事故。

### 3.2 对海底管道与电缆工程的直接影响与机制分析

海底管道与通信电缆作为深水油气田的生命线工程，其结构完整性长期面临海底滑坡多种破坏机制的考验。海底滑移运动对管道的作用首先是直接的冲击和拖曳作用。实验室物理模拟研究揭示，高速滑动滑坡具有底部湍流层、中部碎屑流层和表层冲刷层三种不同的分层结构，使滑坡具有极低的摩擦阻力。这样的滑坡在穿越管道时所产生的动力冲击足以使管道发生弯曲变形、接头漏失或整体破坏<sup>[3]</sup>。

除瞬时冲击外，海底滑坡还可能引起管土耦合效应，显著增加管道运行风险。在滑坡运动过程中，由

于存在脊谷交错等复杂的微地貌,铺设在其上的管道极易产生悬跨现象。在海洋内波和背景流的共同作用下,悬跨管道容易产生涡激振动,加速结构的疲劳破坏。另外,大部分滑坡体为非固结松散体,其土性空间分布极不均匀,底部支护土产生不均匀沉降会引起管道附加应力集中。对于浅埋管道,滑坡活动也会引起覆土压力和侧向约束条件的改变,甚至会使埋地管线成为外露管段,更易遭受第三方破坏。

### 3.3 对水下设施安装与生产系统的影响

海底滑坡对水下生产装备及系统的安全运行构成了极大的威胁。水下井口、集流管道和控制模块等工程设施对地基稳定性要求极高,滑坡区海床的稳定性直接影响其安全。南海北部陆坡荔湾3-1气藏带内发育了大量的古滑坡及潜在失稳斜坡,存在着强烈的强震诱发新一轮失稳因素。当滑坡发生时,产生的侧向推力将直接作用在水下设施上,引起井口倾斜、管汇移位,甚至造成控制模块的损坏。设施基础的微小误差就会造成连接管道及柔性立管应力超限,导致结构或密封失效,造成生产中断及油气泄漏。

## 4 深水油气田开发与海底管道工程对策与风险管控

### 4.1 基于海底滑坡风险评估的井场选址优化

海底滑坡严重威胁着钻井平台的作业安全,亟需在工程选址阶段对其风险进行精确评估与优化。在获取高分辨率地形及浅地层剖面数据的基础上,在确定井场位置时,需综合考虑边坡稳定性、潜在滑移面分布及流体活动性等多种因素。研究人员在南海松涛深水钻井现场,采用有限差分强度折减方法对海底边坡安全系数进行量化,并识别出潜在滑移面多集中于坡度大于 $15^\circ$ 的陡坡地带。该方法通过构建三维地质模型与土质参数空间分布,能够精确计算斜坡稳定性,其安全系数可通过公式计算得出:

$$F_s = \frac{\sum (c + \sigma_n \tan \phi)}{\sum \tau}$$

其中 $c$ 为土体黏聚力, $\sigma_n$ 为法向应力, $\phi$ 为内摩擦角, $\tau$ 为剪应力。钻井过程中井眼返出岩屑形成的附加载荷会显著降低海底斜坡安全系数,而钻井振动扰动虽影响较小,但仍需在选址中规避敏感地质单元。

在具体选址方案优选时,应建立层次清晰的评价指标体系。首先,利用三维地震资料识别断层带、基底结构及已知滑坡界面。在南海北部陆坡地区,井位应选坡降不超过 $5^\circ$ 且地层连续的剖面。其次,评价地质灾害的级联效应,特别是水合物分解区、流体逸出通道等对边坡长期稳定性的影响。基于随机场理论和极限分析方法,有效地处理土体参数的空间变异性,

精确地定量描述各种失效模式的发生概率与后果。最后结合风险评价结果,将施工区域划分为“禁采区”“限制采区”和“安全采区”三个分区,确保重点井场处于稳定的地质单元中,系统性降低滑坡对钻探作业的危害<sup>[4]</sup>。

### 4.2 工程适应性设计与监测预警

由于海底滑坡对海底管道、电缆以及水下生产系统产生了复杂的影响,亟需从工程适应性设计、全生命周期监测与预警的角度进行风险控制策略研究。从工程设计角度看,对于不能完全避开滑坡危险区域的海底管道,需要使用高性能钢管和防腐涂层,并设计合理的跨距和配重方案,以应对滑坡运动导致的悬跨和弯矩变化。针对滑坡区海底管线的防护问题,需结合地形演化预测及动力响应分析,制定动态养护方案,如在滑坡活跃地段设置可调支座或柔性连接段等,以减缓滑坡对结构的破坏。

在水下生产设施的基础设计中,应充分考虑滑坡的冲击荷载效应,采取加大桩基埋深、设置群桩结构等措施来改善滑坡抗滑性能。针对水合物发育区,借鉴非连续柱开采思路,在保留部分水合物层支撑结构的前提下,有效控制地层变形,保持边坡整体稳定<sup>[5]</sup>。

综上所述,本文基于高分辨率水深水貌数据,系统剖析了海底滑坡的多尺度地貌特征、地质构造控制因素进行深入研究,揭示其对海底管道、钻井平台和海底开采等的综合影响。研究结果将阐明海底环境下滑坡与深水施工的交互作用机制,形成从管道保护、场地优化、自适应性设计到全生命周期监控与预警的一体化风险控制策略。

### 参考文献:

- [1] 韩政豪,吴南,任金锋,李攀,李文婧,王毕文,陈万里.海底滑坡沉积的反射地震特征、物性与石油地质意义[J].古地学报,1-18.
- [2] 颜鹏,戴自立.基于Comsol多相流模型的海底滑坡运动演化过程模拟应用[J].海洋学报,2025,47(04):43-52.
- [3] 冯爱国,吴炜.基于IFS分形插值的高分辨率海底三维地形构建[J].海洋测绘,2025,45(02):73-77.
- [4] 戴自立,蓝柏森,李小锋.基于SPH方法的海底滑坡运动演化过程模拟[J].工程地质学报,2025,33(01):213-223.
- [5] 齐晓迪.基于水深数据约束下的声呐图像海底地形恢复方法分析[J].工程技术研究,2020,5(21):238-240.

### 作者简介:

刘磊(1991-),男,蒙古族,内蒙古赤峰人,大学本科,工程师,研究方向:海洋工程勘察作业现场管理、数据处理及项目管理。