

海底地质灾害发育特征与监测技术研究现状及展望

申艳军^{1,2}, 彭建兵^{1,2*}, 贾永刚^{3,4}, 马鹏辉^{1,2}, 范文^{1,2}, 沈伟^{1,2}, 田兆阳³, 霍秉尧^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 陕西省黄河科学研究院, 西安 710054; 3. 山东省海洋环境地质工程重点实验室 (中国海洋大学), 山东青岛 266100; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛 266061)

摘要:在建设“海洋强国”背景下,我国海洋资源开发活动逐步延伸至深海,然而海底地质条件恶劣,重大海底地质灾害问题成为海洋资源开发的制约性因素,需要全面了解海底地质灾害典型发育特征与成因规律、总结典型海底地质灾害监测技术及方法。本文概述了海底地质灾害及其监测研究历程,梳理了海底地质灾害常见发育类型及特点、海底地质灾害演化机制研究现状,海底地质灾害监测技术、海底地质灾害监测网研究进展。研究认为,深化环大陆架盆地海底地质灾害评价理论与方法、加强环大陆架盆地海底地质灾害灾变机理及预测预报、开展海底地质灾害探测/监测方法与临兆识别研究,以此深化关键科学问题认知;构建完备的环大陆架盆地海底地质灾害数据库、形成详实的南海环大陆架海域海底资源分布及工程设施信息库、发展海底地质灾害运动演化过程可视化仿真模拟技术、构建多圈层-多灾种海底地质灾害协同监测体系及预警网络,以此突破关键技术瓶颈。

关键词:海底地质灾害;演化规律;成因机制;监测技术

中图分类号: X24 **文献标识码:** A

Research Status and Prospect of Development Characteristics and Monitoring Techniques of Submarine Geological Hazards

Shen Yanjun^{1,2}, Peng Jianbing^{1,2*}, Jia Yonggang^{3,4}, Ma Penghui^{1,2}, Fan Wen^{1,2}, Shen Wei^{1,2}, Tian Zhaoyang³, Huo Bingyao^{1,2}

(1. College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Academy of Yellow River Sciences of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Engineering (Ocean University of China), Qingdao 266100, Shandong, China; 4. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: Against the background of strengthening the marine industry, China's marine resource development activities have gradually extended to the deep sea. However, due to harsh geological conditions, major submarine geological hazards pose constraints on marine resource development and engineering. It is necessary to comprehensively understand the typical characteristics and causal

收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-05-16

通讯作者: *彭建兵, 长安大学地质工程与测绘学院教授, 中国科学院院士, 研究方向为工程地质、地震工程、地质灾害及岩土工程;
E-mail: dicexy_1@chd.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“琼东南盆地海底地质灾害风险应对战略咨询研究”(21-HN-ZD-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

laws of submarine geological hazards and summarize the monitoring techniques and methods for typical submarine geological hazards. This study provides an overview of the research history of submarine geological hazards and their monitoring. It summarizes the common types and characteristics of submarine geological hazards, and reviews the research on the mechanisms of submarine geological hazard evolution as well as the progress in monitoring techniques and networks for submarine geological hazards. The study suggests that it is important to improve the evaluation theory and methods of submarine geological hazards in circumcontinental shelf basins, strengthen the study of disaster mechanisms and prediction for these hazards, and conduct research on detection and monitoring methods and precursory identification of submarine geological hazards to enhance our understanding of key scientific issues. Furthermore, the study emphasizes the need to establish a comprehensive database of submarine geological hazards in the circumcontinental shelf basins, create a detailed information repository of submarine resource distribution and engineering facilities in the South China Sea's circumcontinental shelf area, develop visualization and simulation techniques for the dynamic evolution process of submarine geological hazards, and construct a multi-level and multi-hazard cooperative monitoring system and early warning network for submarine geological hazards, aiming to overcome key technological bottlenecks.

Keywords: submarine geological hazards; evolution law; formation mechanism; monitoring technique

一、前言

当前,全球能源供需形势趋紧,陆域油气资源开发程度逐渐饱和,而海洋油气资源储量丰富、开发潜力极大,是增加能源供应的重要方向。2021年,海洋油气资源约占世界油气资源总量的34%,深水、超深水油气资源在其中的占比超过40%^[1]。随着开发工艺、技术水平的提升,海洋油气资源在世界油气开采中的贡献度将进一步增加。然而,随着海洋工程建设与资源开采活动不断向深水区推进,加之海底复杂的地貌状况、强烈的地质构造活动、多变的海底水动力条件等因素的影响,海底滑坡、浅层气、天然气水合物、气体逃逸坑、海底陡坎引发的海底地质灾害更为突出,甚至造成重大财产损失和人身伤害^[2-5]。因此,掌握海底地质灾害的发育特征、探索针对性的灾害监测技术,是科学认识海底地质灾害的基础性工作,对保障海洋油气资源开采、海洋工程建设安全运营,维护沿海地区经济社会安全发展具有重要意义。

有关海底地质灾害研究已由海洋近岸扩展至深水区,从单一的地球物理调查发展至海底沉积物取样、原位观测等综合技术评估^[6],理论认知深度得到加强。海底地质灾害监测技术同步取得进展,在海底地震、变形、侵蚀淤积、海底沉积物孔隙压力等方向涌现了一批高精度、长时序的监测技术方法及设备,初步形成了“深海-海面-天空”立体监测网络^[7]。在我国,随着海洋油气资源开发工程向深水区推进,海底地质灾害监测技术研究取得了一定进展,但整体而言仍处于初级阶段。海底地质灾害原位监测预警(如海底变形滑动监测、复杂深海工程地质原位长期观测、海底边界层原位观测)技

术装备完成了国产化研发和海试,增强了海底地质灾害监测能力。但相较陆域地质灾害,海底地质灾害系统化研究存在明显不足,未形成完备的海底灾害链理论体系;研发的技术装备大多处于监测单一对象的试验阶段,未能进行产业化推广;灾害预警技术研究不系统,未能在重要深水区域建立大范围、长时序、多圈层、多灾种协同的监测网络。这些问题制约了未来海洋油气资源的规模化和高质量开发。

开展海底地质灾害发育特征与监测技术的研究历程及现状梳理,有助于推动我国海底地质灾害研究以及相应的监测预警技术装备研发。本文在概述进展的基础上,侧重关键科学和技术问题凝练,针对性提出研究与发展建议,以期精准推动海底地质灾害及监测技术研究提供基础支持。

二、海底地质灾害及其监测研究历程

(一) 海底地质灾害研究

海底地质灾害研究是伴随着沿海国家海洋油气资源勘探与开采进程而不断深入的,可按照海洋资源开发进程大致分为近岸、浅海、深海3个发展阶段^[8]。

在20世纪40年代以前,海洋石油开采技术初步形成,主要以近岸区域(水深<10 m)木结构平台、人工岛等工程设施进行采油,并未重视海底地质灾害问题^[9]。1947年美国石油公司在墨西哥湾建造世界首座钢结构平台,将关注点拓展至钻井灾害、工程结构周边的小范围灾害,标志着海底地质灾害研究进入萌芽阶段^[10]。20世纪50—60年代,随着经济快速发展,各国对油气资源的需求持续增

加,带动了海洋油气勘探的迅速发展;移动式钻井装备、声纳等新型勘探装备的研发与应用,将海洋油气资源勘探水深增加至200 m^[11];二维地震勘探、多波束声纳等观测技术的应用,推动了海底地质灾害研究体系的初步形成。20世纪70—80年代,苏联石油公司在北冰洋近海地区通过注热、注入化学剂等方法开发了世界首个天然气水合物矿藏,油气资源的勘探水深增加至500 m,推动了海底地质灾害研究扩展至海洋陆架区域;在同期,得益于数字技术的飞速发展,海底地质灾害观测、数据处理、资料解译等技术进展显著,结合工程地质多元精细化调查来探究海底坡体滑坡、砂土液化等灾害演化机理成为常态。

20世纪90年代以来,海域油气开采相关的钻井、开采、输送、存储等关键技术难题先后获得攻克,海洋油气资源开发进程加速,海洋开采作业区逐渐向深海发展。相应地,海底地质灾害的研究区域扩展至陆坡、深水海域,陆坡土体失稳、天然气水合物及水动力等致灾因素逐渐成为海底地质灾害的研究重点(见图1);海底灾害探测方法从单一的地球物理勘探逐步发展为岩土工程综合勘探及原位观测网络。2000年以来,随着高性能计算技术的发展,数值模拟尤其是三维仿真技术在海底地质灾害识别、演化过程、触发机制的研究应用上成果突出,深化了海底地质灾害认知^[12]。

与国际同步,我国海底地质灾害研究取得一系列进展^[13-15]。自20世纪50年代起,陆续对海洋滑

坡、海岸侵蚀、天然气水合物、泥火山、底辟、气烟囱等地质灾害因素进行特性、机制、监测研究。20世纪80年代启动了一批国际联合项目、国家自然科学基金项目,对黄河三角洲区滑坡、沉积物重力流等地质灾害进行了研究。20世纪90年代以来,相继在南海、东海、辽东湾等区域进行了1:200 000比例尺的海洋工程地质调查,全面核查了有关海洋地质灾害的情况。2000年以来,编制了1:2 000 000比例尺的南海、黄海、东海地质灾害图和1:1 000 000比例尺的油气资源开发区海底地质灾害分布图,全面梳理了我国海洋地质灾害的分布特征及类型,形成了海底地质灾害综合评价方法。近10年来,在“海洋强国”建设背景下,海洋油气资源开发及利用由浅海转向深海,相关的海洋地质灾害研究迅速铺开,利用自主研发的一系列监测仪器及设备建立了海洋地质灾害监测网络^[7,8,14]。尽管如此,我国海洋地质灾害研究因起步偏晚、基础薄弱,在综合规划、创新研发等方面相比国际先进水平仍存在一定差距。

(二) 海底地质灾害监测概况

海底地质灾害发育需具备特定的地形地貌、水动力、人类活动等孕灾条件,这些条件与相关监测技术发展关系密切。通过遥感监测、水波监测、地磁监测、地形测量等手段,可实时掌握孕灾条件变化情况,更好认识并揭示海洋地质灾害的发育特征及演化机制,为预测海底地质灾害发展趋势提供科

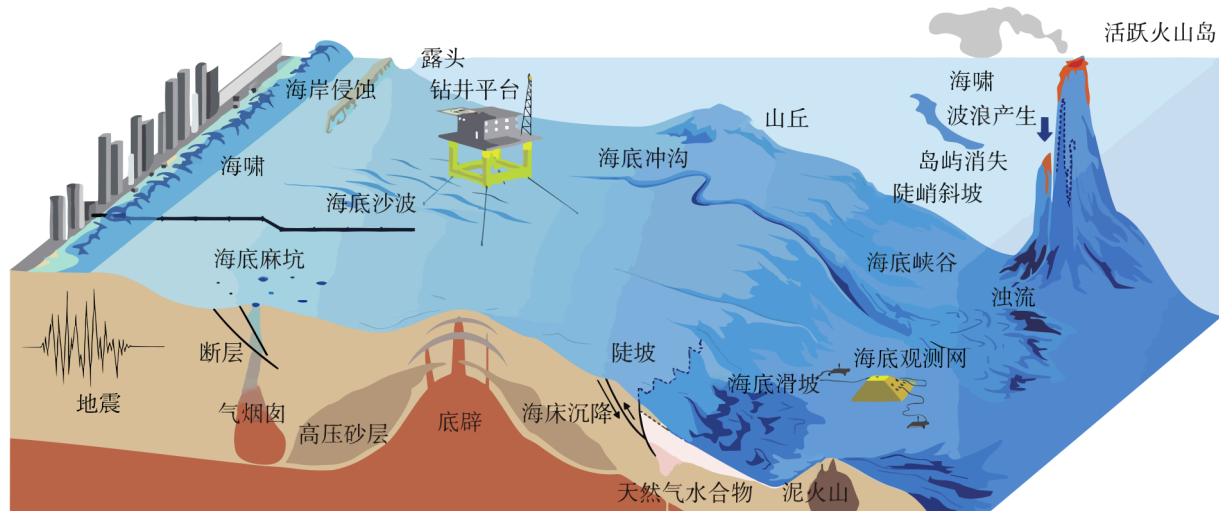


图1 典型海底地质灾害及致灾因素

学依据,也有利于提高海底灾害预警及防范能力。海底地质灾害监测技术是开展海底地质灾害研究的重要组成部分,其革新发展将深化对海底地质灾害孕灾条件、形成机理等的直观认识。

海底地质灾害演化过程是内动力地质作用(如日地震、构造运动、岩浆)与外动力作用(如日流体动力、大气动力、沉积动力)耦合的产物,相关要素的异常可由海底地震、海水温度、流速、流向、波浪、潮汐等直接体现,涉及的监测设备有海底地震仪(OBS)、海底热流探针、流速仪、波潮仪、气象卫星等。对于探明的海底地质灾害点,部署应力传感器来监测海底岩土体自身或其与海洋工程结构物之间的应力;若应力达到临界值,相应灾害可表现为一系列的变形破坏。利用光纤传感技术、声学传感技术等可实现上述变形破坏的定量化监测。直到灾害发生前,通常出现孔隙压力不断累积、外部变形急剧增大的现象,可作为灾前征兆、灾害预警及防控的重要依据。有关海底地质灾害监测要素、技术、指标等的梳理可见文献[7]。

海底地质灾害监测能力提升依赖相关技术与装备的进步。20世纪60年代,世界首台海底地震仪面市,揭开了海底地质灾害监测研究的序幕。在随后的30多年里,孔隙压力监测探针、海底大地测量技术、海底基观测平台等先后出现,支持了海底地质灾害相关的水压力、变形、地貌演化过程等研究;海底井控观测装置(海底长期钻孔监测技术装备)的应用,进一步实现对洋壳深处温度、压力、地震、变形滑塌等要素的监测。2000年前后,传统海洋强国提出了海洋观测网络建设计划,将各类灾害监测仪器与其他多学科监测仪器进行统筹应用,以开展长期、立体、实时的海水层和海底岩土体观测,增强海洋全方位观测能力;在相关建设过程中,自主式无缆无人潜航器、远程遥控运载器(ROV)因在能源供给、设备布放、数据传输方面具有优势而得到长足发展。

我国在海底地质灾害监测方面的研究起步较晚。20世纪80年代初至90年代末,海底地质灾害研究多停留在特定区域的工程地质调查与海洋表面观测层面。2000年以来,我国的海底探测装备率先取得突破,如“蛟龙”号载人潜水器进入试验性应用阶段,“深海勇士”号深海载人潜水器完成深海地质原位观测与国产化装备海试任务,为后续海底

地质灾害监测技术发展、观测网络建设打下了坚实基础。近10年来,在南海深水油气资源勘探开发的推动下,海底地质灾害监测技术快速发展,包括海底变形滑动监测系统、深海工程地质原位长期观测设备、海底边界层原位观测系统在内的原位监测装备成功研制和应用,标志着海底地质灾害监测网络初步成型。但客观来看,我国海底地质灾害监测研究相较于传统海洋强国仍存在一定差距,未来需在监测精度、范围、尺度等方面继续提升。

三、海底地质灾害发育类型及演化机制研究进展

(一)海底地质灾害常见发育类型及特点

近10年,随着海洋工程建设、海洋油气勘探及开发技术的不断发展,海底地质灾害严重影响海洋工程建设、海底设施安全,成为海洋工程研究热点^[16-18]。为体现针对性,本文以作为我国油气能源主产区之一的南海琼东南盆地海域为例,“以点带面”分析海底地质灾害的发育类型及特点(研究区域具有陆架-陆坡分布广、海底地质灾害发育显著等特征,具有代表性)。

目前,已在琼东南盆地识别出150余期海底滑坡,覆盖面积范围为10~300 km²,滑坡厚度范围为10~200 m,运移距离大多小于30 km,主要发育在盆地陆架-陆坡区域。识别琼东南盆地的似海底反射(BSR)分布及地貌特征可知,南部深水区分布有大量的天然气水合物赋存以及气烟囱、泥底辟等地质构造,集中在乐东、陵水、松南、宝岛凹陷。区内泥底辟平均直径为1~4 km,局部偶有直径5 km、垂直延伸大于2000 m的大型泥底辟。气烟囱平均直径为数百米至4 km,垂直延伸范围为900~2700 m,多延伸至第四纪地层,少量延伸至海床。

值得注意的是,大型气烟囱上部往往发育一系列小型气烟囱,初步分析可能与天然气水合物赋存的运移疏导系统有关。泥底辟、气烟囱上部增强地震反射以及气烟囱内部地震剖面异常现象表明,BSR区域内发育浅层气、游离气,相应空间分布与天然气水合物具有重叠关系。以陵水研究区为例,麻坑、丘状体、流体管道大量分布于陆架边缘和缓坡区,流体管道与丘状体、麻坑等灾害体存在明显的伴生关系。

从南海琼东南盆地海域分析结果来看,海底地质灾害常见发育类型有海底滑坡、断层/陡坎、麻坑、暗礁、天然气水合物、浅层气等;海底地质灾害普遍具有分布广、预测难、破坏力强、联动关系紧密等特点,研究不同灾害之间的协同演化机制与共生耦合关系尤为关键。

(二) 海底地质灾害演化机制

海底地质灾害形成条件多元、影响因素众多、演化过程复杂,导致全面揭示相应演化机制难度较大。主要梳理了海底地质灾害影响因素、演化过程、触发机制方面的代表性研究进展。

1. 影响因素

海底地质灾害的发生往往是单因素或多因素耦合作用引发的,主要有4个方面。

一是地震与断层活动。地震在海底灾害因素中居于首位,会显著影响海底边坡的稳定性,导致海底滑坡发生并冲击海底管线设施,可能引发海啸损毁近岸设施并触发一系列海底链式灾害反应^[17,18]。断层活动是构造运动的表现形式之一,引发的地面变形及破裂会触发滑坡,超压流体也会以断层面作为通道释放并形成丘状体、麻坑等地质构造^[18,19]。

二是天然气水合物。天然气水合物是一种由水和天然气在低温、高压的条件下生成的笼型化合物^[18],通常与浅层气具有共生关系,其成藏和聚集过程往往伴生底辟、气烟囱等地质构造并作为烃源供应、运移疏导系统。天然气水合物赋存会降低地层渗透性,下层游离气体在上层地层孔隙不均匀时缓慢运移,容易产生超压地层,是水合物底层钻井

工程风险的主要影响因素^[17-22]。赋存温压条件变化可能导致天然气水合物分解,改变海底沉积物的应力状态与力学强度,进而触发海底滑坡、海底塌陷等灾害^[23]。

三是陆架坡折。海底地质灾害体的形成通常与盆地的沉积及构造过程、海平面变化、古环境气候变化等密切相关。例如,琼东南盆地约在10.5 Ma—5 Ma时期加速沉降,坡折角度不断增大,坡折形貌逐渐成熟,为海底滑坡的产生提供长期劣化作用后的灾害地质条件^[24]。

四是人类工程活动。近海工程建设、海洋油气钻探及开采、海底管线铺设等人类工程活动,都可能触发天然气水合物分解或海底高压地层流体释放导致斜坡海床土体失稳,造成海底滑坡等地质灾害。

2. 演化过程

海底滑坡、天然气水合物演化是海底地质灾害最常见的类型,各自的演化过程存在差异性^[25,26],主要以以上两类海底地质灾害为例进行论述。

海底滑坡是海洋工程建设面临的极具破坏力的地质灾害,相应演化过程大致分为3个阶段(见图2):①坡体失稳阶段,作为初始阶段分为海底斜坡的失稳、海底崩塌、坡体的滑动及滑塌;②运移阶段,在海底滑坡的中期阶段,经过复杂的水土耦合作用和长距离运移,坡体由塑性体逐渐演化为非牛顿流体状态均匀的碎屑流或泥流^[24];③沉积阶段,在演化过程的后期,呈非牛顿流体状态的滑体含水量继续增加,演变为浊流、重水流并最终沉积。第二阶段的碎屑流或泥流滑体具有速度快、规模大、距离远、破坏力强的显著特征,成为海洋工程建设运营

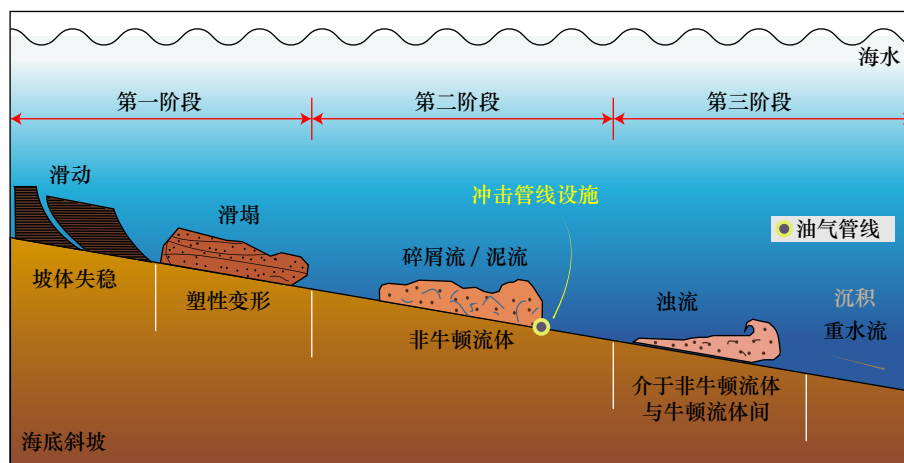


图2 海底滑坡运动演化过程示意图

的重大影响因素。

天然气水合物演化是典型的伴生型海底地质灾害，演化过程中往往伴生泥火山、底辟、气烟囱等海底地质灾害的发育；多种地质灾害相互作用，与天然气水合物的形成及分解构成动态平衡关系，相应演化过程可分为3个阶段（见图3）：①成气阶段，包括近源生物成因天然气水合物自生自储、远源热成因天然气由深层气源岩热解气提供气源供给系统；②运移成藏阶段，大量断层和底层内普遍发育泥火山、泥底辟、气烟囱等地质体，天然气水合物提供以此为运移疏导系统并在温压条件适宜的地质层赋存；③分解阶段，由于自身物理性质极不稳定，赋存于海底地层中的天然气水合物受到外界扰动导致温压条件变化，将发生分解并释放大量游离气体进入上层坡体内部，导致海底稳定性下降^[27,28]。第三阶段天然气水合物分解过程可导致海底沉积层发生破坏，进而影响海底电缆、海底管道等设施的安全运行。常压条件下的海底水合物分解诱发地质灾害三维可视化物理模型试验方法，有助于系统揭示流体迁移规律、形成水合物分解致灾预测模式^[26]。

3. 触发机制

海底地质灾害的触发机制可粗分为两大类：内部劣化触发因素（如沉积作用、天然气水合物分解），外部扰动触发因素（如地震、水动力作用、海平面波动）；也可进一步细分为5类。

一是构造应力触发机制。构造活动是影响海底地质灾害的重要因素，以活动断层、地震为具体表现形式。活动断层在南海北部广泛分布，引起的垂直、水平位移可引发严重的地质灾害。例如，断层活动引起的地震地面运动，可增加坡体的驱动应力，导致土壤抗剪强度降低、土壤液化、断层陡坎甚至引发海啸。

二是重力沉积触发机制。重力作用下的快速沉积过程被视为造成海底滑坡的主要原因之一。沉积物的快速搬运可能直接使海床总应力急剧增加，造成内部压力累积而影响坡体稳定性。沉积物的长期堆积可能有利于形成底辟、更大坡度的斜坡等地质结构。

三是气动力触发机制。天然气水合物在一定的赋存条件下是稳定的，若压力或温度条件发生变化则脱离水合物稳定区^[29]而分解为天然气，进而引发海底地质灾害（见图4）。在分解过程中，因大多数

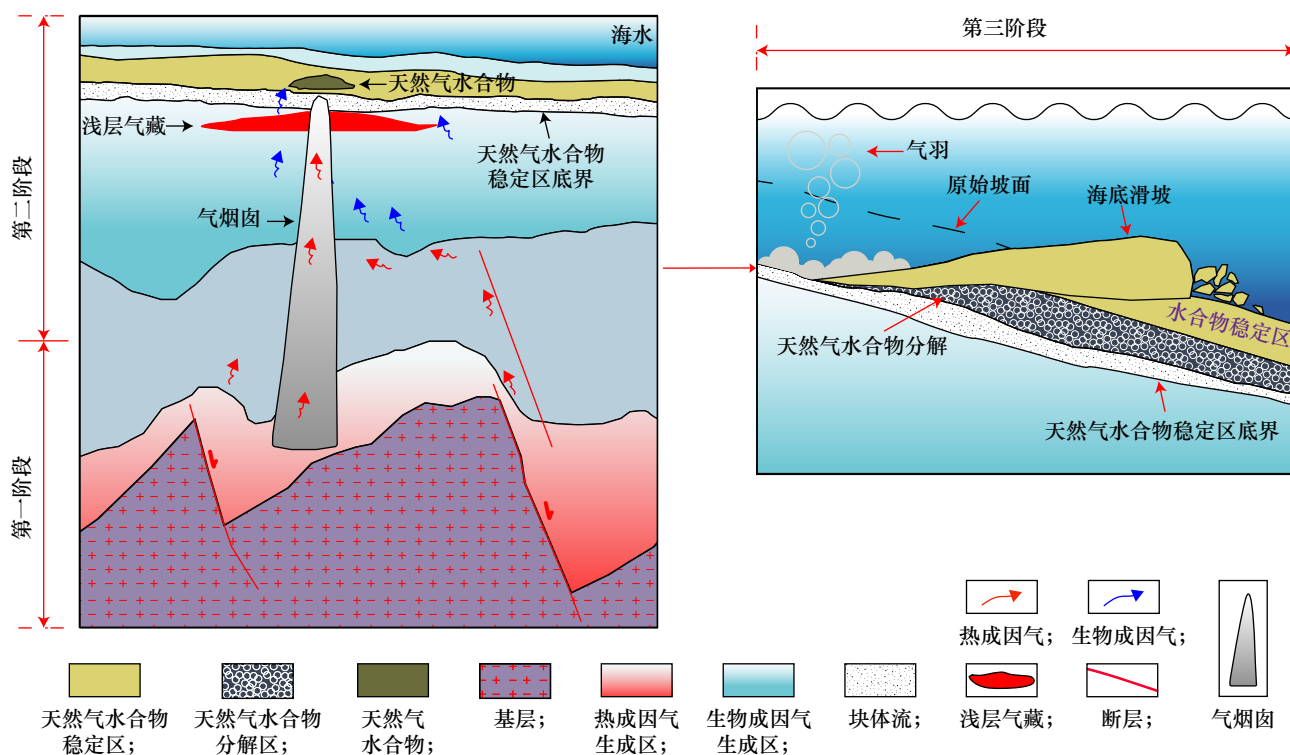


图3 天然气水合物形成及分解演化过程示意图

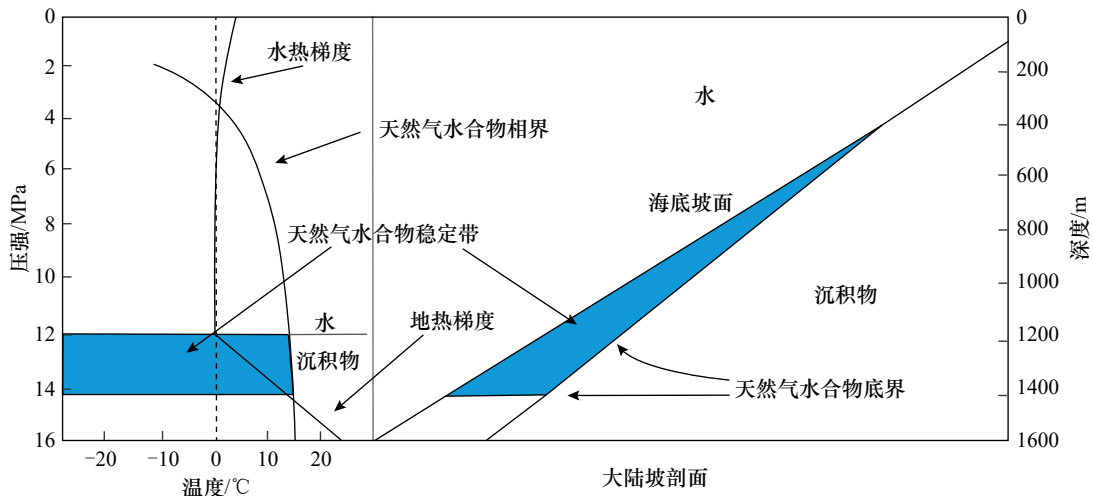


图4 天然气水合物温压稳定区

海相土壤渗透性低，以气泡形式释放的天然气将降低土壤沉积物中的有效应力以及坡体抗剪强度，在外界扰动下易引发边坡破坏。海底存在的浅层气在沉积物中以气态赋存，改变沉积物力学性质，减小土体稳定性，受到外荷载作用时易发生结构破坏。对于海洋钻井勘探工程，浅层气聚集形成的高压气囊若被钻杆穿透会引发井喷、平台倾覆等严重事故。

四是水动力触发机制，相关成因包括波浪、潮汐、洪水、内波等。①波浪是因风暴等海洋气候自然因素产生的，在进行过程中不断对海底坡体施加正应力和剪切应力，导致沉积物塑性变形、超孔隙水压力积累，最终使土体结构破坏并产生滑坡。②潮汐可导致海底滑坡，主要原因有：潮汐导致海底温压环境变化，使得坡体稳定性劣化；潮汐导致海平面突变，改变近岸海床上的覆压力，缓慢排水过程使坡体抗滑力大幅降低，引发邻近区域沉积物的失稳并发生滑坡。③内波常出现在海水与深层海水之间，在不同密度的海水界面上传播，极易引起水体的差异流动，加速海底沉积物的侵蚀和搬运，加剧海底滑坡、水合物分解等地质灾害风险。

五是海平面波动触发机制。海平面波动主要由全球气候变化引起，如冰期导致全球海平面经历多次升降^[30]。海平面下降会增加沉积速度，从而引发滑坡；海平面上升会产生超压沉积环境，利于天然气水合物赋存；海平面下降会缓解施加在海床上的整体压力，导致天然气水合物分解而引发坡体失稳。

四、海底地质灾害监测技术研究进展

(一) 海底地质灾害监测技术

依据海底地质灾害发展模式，相应监测技术可分为突发性、缓发性两类：前者主要是海底地震监测技术，后者则包括海底孔隙压力监测、海底侵蚀淤积监测、海底长期钻孔监测等技术。此外，海底变形滑动监测技术对突发性或缓发性海底地质灾害均能发挥监测作用。

1. 海底地震监测技术

海底地震会引发海底滑坡、海啸以及一系列次生灾害，对海底地震监测的设想即起源于海洋地震灾害预警^[7]。然而，海底地貌条件复杂且覆盖了广袤水体，陆上地震监测设备在深水高压、能源供应难以保障的条件下并不适用，需要针对海底特殊环境研发各式监测设备。

OBS是一种投放海底，使用水听器、地震检波器来监测并记录地震事件的监测仪器^[31]，可由船只灵活进行定点大量投放，具有探测范围广阔的优点，在海底地震灾害监测、石油勘探等方面得到了广泛应用。OBS的不足主要表现在：大多采用电池供电设计方案，导致长时间的持续监测应用受限，需在电量耗尽前进行回收，复杂的投放-回收过程难免导致一定比例的设备损耗；内置时钟精度有限、不够精准的投放方式，对校正信号处理技术提出了很高要求。

针对海洋能源开采、在各种复杂地质条件下进行海底地震监测等需求，海底电缆、海底节点地震

技术近年来发展迅速：前者指通过数传电缆将检波器捕捉的海底地震波传输至海面监测船只，再对海底地震进行监测的技术；后者通过 ROV 或钢缆将检波器布放至接收点，据此记录多方位角、多偏移距的海底地震信号。相关技术的应用，使海底地震监测仪器突破了电缆的束缚，将监测范围延伸到常规监测手段盲区，在海域适用性、灵活性、准确性等方面均具有突出优势，代表了海底地震监测的发展趋势^[32]。

针对 OBS 的应用不足，具有漂浮在海上进行地震监测能力的海域潜标地震仪（MERMAID）成为研究热点；配备有高灵敏度宽频带听水器、卫星定位系统接收器、卫星通信天线，可以 1~3 km/d 的速度在水面下漂浮^[33]，通过卫星通信方式与地面接收端进行联络，具有远程操控与数据传输能力^[34]。MERMAID 的缺陷有：海水与大气的界面处是地震波天然反射界面，会对监测信号产生干扰；MERMAID 随海水的漂移会干扰坐标的准确度。

近年来，光纤技术被应用到海底地震监测。布设分布式光纤声学传感器，开展高空间分辨率的高频（1 kHz）应变测量，对地震信号高度敏感，可实现大范围、长时序的海底地震监测^[35]。

2. 海底孔隙压力监测技术

海底孔隙压力对诱发海底地质灾害的初始应力的变化极为敏感，可作为海底岩土体稳定性监测的重要参量^[36]。目前，海底孔隙压力监测主要通过孔隙压力监测探针来实现，代表性的孔隙压力监测探针有：海底岩土探测器^[37]、压差式孔隙压力观测探针^[33]、便携式水下摄影剖面仪、法国海洋研究院研制的压力计^[38]等。其中，法国海洋研究院研制的压力计最大工作水深为 6000 m，连续工作时间为 2 年^[39,40]，技术基本成熟并进入商业推广阶段。

我国海底孔隙压力监测技术研究起步较晚，但技术进展良好，代表性的工作有：自然资源部第一海洋研究所研发的浅海海底沉积物孔隙压力观测探针^[41]，中国海洋大学开发的复杂深海工程地质原位长期观测设备。相关监测设备完成了测试并得到初步推广应用^[42]。未来，海底孔隙压力监测研究将融入多学科知识和技术，继续提高数据监测的精确度，降低设备功耗、改善供能条件、提高贯入能力，以期在更深海底进行更加精确稳定的长周期监测。

3. 海底变形滑动监测技术

近 30 年来，基于海底监测技术手段逐步实现了世界范围内的海底变形与滑动监测，如使用高精度压力传感器测量水压力变化以反推海床沉降量，利用倾角计监测海床倾角变化^[43]，采用倾斜仪、三轴加速度计^[39,44,45]、声学测距技术分析海底斜坡稳定性^[46]，应用光纤传感器监测海床变形量^[47]。然而，这些监测手段大多需要提前定点投放监测仪器，监测范围通常较小，不适应大范围、长周期的海底变形监测。20 世纪 90 年代以来，海底大地测量技术被广泛应用于大范围的海底变形滑动监测^[48]，通过计算（投放在海底的）应答器接收声波的旅行时间来推导相对声距离，实现了毫米精度、高时间分辨率的海底岩土体变形监测^[49]。

中国海洋大学研发的海底变形滑动监测系统，搭载了加拿大 Measurand 公司制造的位移传感器阵列，将测量精度提高至 0.5 mm，应用于黄河三角洲埕岛海域的原位监测工作^[50]。

4. 海底侵蚀淤积监测技术

海底侵蚀淤积是海洋动力作用下底层海水与浅层沉积物相互作用的结果，海底边界层结构变化和海底地形地貌塑造的重要物理过程，对海洋工程建设影响重大^[7]。海底侵蚀淤积监测分为确定悬浮物浓度测定、海床界面监测，两方面的同步监测可基于海底边界层原位观测系统展开。早在 1965 年即实现了基于海底基观测平台的普捷湾底部边界层观测^[51]，此后对这一海底基观测平台进行改进而衍生了一系列装置，如海洋数据模型 635-9RS^[52,53]；在改进过程中融入新技术、增加新设备，不断改善观测精度和监测时序，加深了对海底侵蚀淤积过程的理解。

目前，我国学者在海底侵蚀淤积监测方向开展了初步研究，同类型的观测系统水平相较国外仍处于滞后状态。2006 年，中国科学院海洋研究所研发的海洋沉积动力过程原位监测系统，在北部湾南部浅海陆架底部的地貌演变监测上获得应用^[54]。中国海洋大学先后研发了针对冷泉的深海海底边界层原位观测系统、深海海底边界层原位观测系统（见图 5），分别在南海北部陆坡、南海神狐海域完成原位监测海试^[55,56]，填补了我国海底侵蚀淤积监测技术空白。

5. 海底长期钻孔监测技术

海底长期钻孔不仅为各类海洋环境下高质量取



图5 中国海洋大学深海海底边界层原位观测系统

样深部沉积物提供了条件，也为海底深层地质过程、海底地质灾害的长期监测提供了直观数据。通过海底井控观测装置（CORK），可在封闭洋壳中开展深层海底地震、滑塌等灾害的原位监测^[57]。

目前，世界上已有数十个CORK被投放到不同海域，同时在初始CORK方案的基础上不断改进得到了新型CORK：可在单一钻孔内将洋壳岩土分隔成不同层位的改进型CORK、增加地震与地层变形监测功能的CORK II、加强密封性与套管强度的天才井塞以及海底长期钻孔监测装备^[58]。未来，CORK在独立开展工作以外，可作为海底观测网络的一部分，综合监测海底地质、水文、生物、化学等要素，提供从数秒到数十年时间尺度、从海平面到洋壳深处空间尺度的全域观测能力。

（二）海底地质灾害监测网络

海底地质灾害监测网络指，将各种原位监测仪器安装在海底，通过电缆或光纤等信号传输媒介进行连接并与陆地基站协同，对海水、海底岩土体乃至洋壳深处进行长期、动态、实时监测，构建海底地质灾害识别与预警综合信息平台。

2000年前后，海底观测网络在传统海洋强国得到了广泛发展，如美国海底观测网（OOI）、加拿大海底观测网（ONC）、日本高密度地震-海啸实

时观测网（DONET）、中国南海海底观测网。通过海底电缆，将各个海底观测节点的观测装备与陆地基站连接并形成网络；融合了物理、化学、生物、环境、地球科学，实现了从海面到洋壳深处的综合性立体观测，被视为“地球观测的第三个平台”^[59]。

采用海底观测网络（见表2）对海底地质灾害进行监测与预警成为重要发展趋势^[60]，但监测对象多为海上气候变化、生物地球化学活动、洋流、海啸、火山活动等，而对于海底地质灾害的监测限于地震、天然气水合物，仅在个别区域开展了海底斜坡稳定性监测^[61,62]。鉴于海底地质灾害的多样性、链式结构、放大效应，建立海底地质灾害预警网络的复杂程度远高于陆地网络，监测手段也难以全面反应海底地质灾害的演化过程。未来需将多种监测手段进行组网，建立大范围、长时序、多圈层、多灾种协同的监测网络，为海底地质灾害评价体系建设提供扎实支撑。

五、海底地质灾害研究与技术发展建议

（一）关键科学问题研究思路

海底地质灾害孕育演化主要分布于环大陆架盆地区域，在海岛陆架区也有一定分布。以环大陆架盆地的海底地质灾害为主要对象，探讨海底地质灾害及监测技术亟待解决的关键科学问题。

1. 环大陆架盆地海底地质灾害评价理论与方法

海底地质灾害评价理论与方法是后续构建监测能力的基础工作。现阶段，南海环大陆架盆地区域的海底地质灾害诱发因素、不同因素触发海底地质灾害的影响程度等仍不明确，亟需加强海底地质灾害的诱发因素定量分析，深化对不同灾害或灾害链危险性的认识，建立海底地质灾害风险评价体系；基于风险评价体系并引入数学模型，定量分析灾害发生概率、灾害规模、灾害破坏性及潜在损失，形成环大陆架盆地海底地质灾害的危险性划分与控制标准。

环大陆架盆地油气资源丰富，海洋工程设施数量较多，而海底地质灾害具有不可避免性与极强破坏性。需对相关区域海底地质灾害的种类、规模、频率开展识别与监测，进而制定海底灾害识别、危害量化、风险评价准则，探索海底地质灾害风险防控与精细管理手段。最终针对环大陆架盆地海洋工

表2 各国海底观测网现状简况表

代表性国家	观测网名称	研究主题
美国	OOI	气候、洋流、海洋生态系统、海洋动力过程、流体-岩石相互作用、海底生物板、块尺度地球动力学
加拿大	ONC	板块构造、海洋生态系统、气候、海底侵蚀淤积
德国	北冰洋网	气候、天然气水合物分解
罗马尼亚	黑海网	地质灾害、海底天然气水合物
希腊	希腊网	地震、海啸、气候、生物地球化学活动、天然气水合物、油田开采长期观测
意大利	东西西里网	地震、海啸、气候
葡萄牙、西班牙、意大利	伊比利亚网	地震、海啸
法国	利古利亚海网	海底边坡稳定性、生物地球化学活动、海洋生态环境
土耳其、法国	马尔马拉海网	气体喷发与地震
法国、葡萄牙	亚速尔网	洋中脊热液活动口生物地球化学活动
瑞典等	北欧海网	洋流
挪威、德国、法国	挪威大陆边缘网	泥火山、海底天然气水合物
英国	豪猪盆地网	生物地球化学活动
瑞典、德国	科斯特峡湾网	传感器测试
西班牙	加那利群岛网	物理海洋与生物地球化学作用
日本	DONET	地震、海啸
	DONET2	
	S-net	
澳大利亚	集成海洋观测系统	盐度、海洋生态系统、海洋环境
中国	中国南海海底观测网试验系统	海水温度、盐度、洋流、地磁、生物

程，形成海底地质灾害危险性与工程设施的风险评估方法。

2. 环大陆架盆地海底地质灾害灾变机理及预测/预报

海底地质灾害受控于岩石圈、水圈、大气圈、生物圈乃至人类工程活动之间的相互作用，灾变机理复杂，影响因素繁多，易形成灾害链；现阶段研究多局限于特定监测区域的海底地质灾害，难以全面查明环大陆架盆地不同海底地质灾害的灾变机理。后续研究需打破传统监测思路，创新海底地质灾害预测及预报理论方法、评价指标与判据，从围绕“某种灾害”转向聚焦“某一区域”；明晰南海环大陆架盆地海流-陆架-工程耦合状态下海底地质灾害的灾变规律及机理，揭示相应地质灾害的灾变链生组合关系、衍生致灾影响范围。

当前的海底地质灾害机理与监测研究集中于缓发性灾害，但对突发性、频发性、群发性的海底地

质灾害研究存在不足。后续需重点关注南海环大陆架区域海底地质灾害的形成机理，深化海底地质灾害的识别与量化研究，提升监测网络覆盖范围、预警网络可靠性及时效性，以期实现覆盖海洋油气平台全寿命周期的精准化预测及预报。

3. 海底地质灾害探测/监测方法与临兆识别

国内海底地质灾害探测/监测方法研究起步较晚，科研进展多处于测试阶段，在海底地质灾害探测时效性方面有较大提升空间。合理加强多学科专业联动，协同开展海底地质灾害现场探测装备基础理论方法研究，保障装备研制与应用需求；在缓发性海底地质灾害监测的基础上，尽快开展突发性海底地质灾害原位监测理论及方法研究。

在海底地质灾害的灾前征兆方面，现有方法大多局限于变形、应力、孔隙压力等参数变化，缺乏更为精细化的识别与判定依据。需要加强不同海底地质灾害爆发征兆的监测识别研究，控制提前量、

提高预见性；引入人工智能等新兴技术，健全多圈层、多维度、多灾种协同监测的海洋地质灾害网络建设；最终着眼海洋工程建设及运营安全问题，形成海底地质灾害对工程设施影响的监测方法。

（二）关键技术问题攻关建议

海底资源及地质灾害监测研究因涉及多个学科领域、多类数据信息处理方法而显复杂，南海环大陆架区域相关研究面临着诸如信息库缺失、核心关键技术有待突破等难题。

1. 环大陆架盆地海底地质灾害数据库

南海环大陆架盆地是油气资源开发极具潜力的地区，发育的海底地质灾害类型多样、致灾地质因素复杂，对未来海洋工程设施的建设构成潜在风险。当前较多采用的海底地质灾害特征识别及原位监测数据分析方法，仅可从宏观尺度分析海底地质灾害的外部特征、内部结构；在南海环大陆架盆地油气资源成藏条件优良、海洋工程设施发展较快的背景下，该区域海底地质灾害研究面临着调查/收集资料数据量大、来源渠道多样、各类数据关系模糊的问题。

亟需构建完备的区域尺度海底地质灾害数据库，对数量庞大、关系复杂的数据资料进行分析与管理，高效处理识别和监测数据；深挖海底地质灾害科技信息、国际数据库信息，与自建数据库的分析结果协同，判明目标区域海底地质灾害的基本特征、监测要素、潜在风险等核心信息。

2. 南海环大陆架海域海底资源分布及工程设施信息库

海底资源分布信息库是海洋资源开发中的必要一环，用于存储、查询、检索目标海域油气资源赋存的石油地质要素和钻井勘探资料信息。系统梳理、科学分类目标海域的多源信息，衔接海底资源分布数据库信息、海洋工程设施信息库、海底地质灾害数据库，支持以多数据库协同的形式“一站式”完成风险评估、规划开采、设施管理。

海底资源分布及人类工程设施信息库主要包括烃源岩等油气地质要素信息、典型矿藏区域勘探信息、多种油气资源分布特征信息、区域气田群位置及开采装备信息。通过多源数据信息分析，为目标海域油气资源勘探方向、开采装备选型、海底地质灾害风险防控策略等提供可靠支持，增强未来南海

北部油气资源潜力评价、资源预测的精准度。

3. 海底地质灾害运动演化过程可视化仿真模拟技术

海底地质灾害演化过程的仿真模拟仍是国际性的研究热点与难题，现阶段主流的数值模拟方法受制于高性能计算、水-土参数动态变化耦合作用模型等的发展水平，导致代表性的工程应用（如海底滑坡运动全程演变过程）数值模拟技术尚不成熟。基于深海工程长期原位监测技术突破^[61]，应用区域尺度长期观测数据并与人工智能算法结合的方式来分析海底地貌特征；引入并行计算架构、图形处理器加速技术，增强大规模数值模拟、海底灾害人工智能仿真等的应用水平。

物理模型试验是研究海底灾害演变过程、验证数值模拟结果的有效手段，在考虑适当相似比的前提下，物理模型试验可有效反映实际灾害的发展过程与演化模式。基于人工智能方法分析观测数据、提取关键参数，形成更为精细的物理模型，以更准确地模拟海底灾害演化过程。

4. 多圈层、多灾种海底地质灾害协同监测体系及预警网络

海洋区域的暴露度和脆弱性是受灾害影响程度的决定性因素。建立具有区域针对性的监测及预警体系，是提高灾害影响区域应对能力、减少灾害受损程度的重要举措。海底地质灾害的发生是多因素耦合作用的结果，且演化过程往往伴随次生灾害，形成具有链式结构的放大效应^[62]。亟需发展相应的监测链-预警网络以防控海底地质灾害，构建多圈层、多灾种、多监测要素协同的海底地质灾害监测体系。

上述协同监测体系需以现状各类监测因素的耦合关系为基础，各类监测因素的长周期数据为支撑，应用原位实时观测、大数据智能分析等方法，开展海底地质灾害预报/预警与风险评估。针对突发性海洋地质灾害，发展预警网络信息快速传递技术，提前预警时间、提高预报准确性，以增加海洋工程应对缓冲空间、保障海洋资源开发与工程建设安全。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 5, 2023; Revised date: May 16, 2023

Corresponding author: Peng Jianbing is a professor from the College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University and a member of Chinese Academy of Sciences. His major research fields include engineering geology, earthquake engineering, geological hazards and geotechnical engineering. E-mail: dicexy_1@chd.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project "Strategic Consultation for Risk Response of Submarine Geological Hazards in the Qiongdongnan Basin" (21-HN-ZD-02)

参考文献

- [1] 刘朝全, 姜学峰, 吴谋远. 2021年国内外油气行业发展报告 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
Liu C Q, Jiang X F, Wu M Y. Development report of oil and gas industry at home and abroad in 2021 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [2] Sahal A, Lemahieu A. The 1979 nice airport tsunami: Mapping of the flood in Antibes [J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(3): 833–840.
- [3] Tripsanas E K, Piper D J W, Campbell D C. Evolution and depositional structure of earthquake-induced mass movements and gravity flows: Southwest Orphan Basin, Labrador Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(7): 645–662.
- [4] Cheng C, Jiang T, Kuang Z G, et al. Seismic characteristics and distributions of quaternary mass transport deposits in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 129: 105118.
- [5] Grilli S T, Zhang C, Kirby J T, et al. Modeling of the Dec. 22nd 2018 Anak Krakatau volcano lateral collapse and tsunami based on recent field surveys: Comparison with observed tsunami impact [J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106566.
- [6] 周杨锐, 吴秋云, 董明明, 等. 深水工程勘察技术研究现状及展望 [J]. *中国海上油气*, 2017, 29(6): 158–166.
Zhou Y R, Wu Q Y, Dong M M, et al. Current status and development outlook of deep water geotechnical investigation and survey technology [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(6): 158–166.
- [7] 贾永刚, 陈天, 李培英, 等. 海洋地质灾害原位监测技术研究进展 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 1–14.
Jia Y G, Chen T, Li P Y, et al. Research progress on the in-situ monitoring technology of marine geohazards [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 1–14.
- [8] 李海东, 许江, 郑江龙, 等. 广西近海灾害地质因素及声学反射特征 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(2): 275–283.
Li H D, Xu J, Zheng J L, et al. Neritic hazardous geology and its characteristic acoustic reflection in offshore of Guangxi [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(2): 275–283.
- [9] 俞学礼. 海洋石油开发百年回顾 [J]. *科学*, 1999, 51(4): 30–33.
Yuu X L. Review of 100 years of offshore oil development [J]. *Science*, 1999, 51(4): 30–33.
- [10] 钱寿易, 杜金声, 楼志刚, 等. 海洋土力学现状及发展 [J]. *力学进展*, 1980 (4): 1–14.
Qian S Y, Du J S, Lou Z G, et al. Current status and development of marine soil mechanics [J]. *Advances in Mechanics*, 1980 (4): 1–14.
- [11] 潘继平, 张大伟, 岳来群, 等. 全球海洋油气勘探开发状况与发展趋势 [J]. *中国矿业*, 2006 (11): 1–4.
Pan J P, Zhang D W, Yue L Q, et al. Status quo of global offshore oil and gas exploration and development and its trends [J]. *China Mining Magazine*, 2006 (11): 1–4.
- [12] 郭兴森. 海底地震滑坡易发性与滑坡—管线相互作用研究 [D]. 大连: 大连理工大学 (博士学位论文), 2021.
Guo X S. Study on the susceptibility of submarine seismic landslide and landslide-pipeline interaction [D]. Dalian: Dalian University of Technology (Doctoral dissertation), 2021.
- [13] 叶银灿. 海洋灾害地质学发展的历史回顾及前景展望 [J]. *海洋学研究*, 2011, 29(4): 1–7.
Ye Y C. Review of the development of marine hazard geology and its future prospect [J]. *Journal of Marine Science*, 2011, 29 (4): 1–7.
- [14] 赵广涛, 谭肖杰, 李德平. 海洋地质灾害研究进展 [J]. *海洋湖沼通报*, 2011 (1): 159–164.
Zhao G T, Tan X J, Li D P. Research and advances in marine geohazards [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011 (1): 159–164.
- [15] 刘守全, 张明书. 海洋地质灾害研究与减灾 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998 (S1): 163–167.
Liu S Q, Zhang M S. Research and reduction of China marine geologic hazards [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998 (S1): 163–167.
- [16] 孙启良, 解习农, 吴时国. 南海北部海底滑坡的特征、灾害评估和研究展望 [J]. *地学前缘*, 2021, 28(2): 258–270.
Sun Q L, Xie X N, Wu S G. Submarine landslides in the northern South China Sea: Characteristics, geohazard evaluation and perspectives [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 258–270.
- [17] Zhang W, Liang J Q, Su P B, et al. Distribution and characteristics of mud diapirs, gas chimneys, and bottom simulating reflectors associated with hydrocarbon migration and gas hydrate accumulation in the Qiongdongnan Basin, northern slope of the South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6): 3556–3573.
- [18] 王俊勤, 张广旭, 陈端新, 等. 琼东南盆地陵水研究区海底地质灾害类型、分布和成因机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 87–95.
Wang J Q, Zhang G X, Chen D X, et al. Geological hazards in Lingshui region of Qiongdongnan Basin: Type, distribution and origin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(4): 87–95.
- [19] 年廷凯, 沈月强, 郑德凤, 等. 海底滑坡链式灾害研究进展 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(6): 1657–1675.
Nian T K, Shen Y Q, Zheng D F, et al. Research advance on the chain disasters of submarine landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(6): 1657–1675.
- [20] 贾永刚, 王振豪, 刘晓磊, 等. 海底滑坡现场调查及原位观测方法研究进展 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2017, 47 (10): 61–72.
Jia Y G, Wang Z H, Liu X L, et al. The research progress of field investigation and in-situ observation methods for submarine

- landslides [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 61–72.
- [21] Ripmeester J A, Tse J S, Ratcliffe C I, et al. A new clathrate hydrate structure [J]. *Nature*, 1987, 325(6100): 135–136.
- [22] 淳明浩, 刘振纹, 杨肖迪, 等. 深水三浅地质灾害的监测与预防技术研究 [C]. 舟山: 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 2017.
Chun M H, Liu Z W, Yang X D, et al. Research on monitoring and prevention technology of deep-water three-shallow geological disasters [C]. *Zhoushan: The 18th China Marine (Offshore) Engineering Symposium*, 2017.
- [23] Phrampus B J, Hornbach M J. Recent changes to the gulf stream causing widespread gas hydrate destabilization [J]. *Nature*, 2012, 490(7421): 527–530.
- [24] 马云, 李三忠, 梁金强, 等. 南海北部琼东南盆地海底滑坡特征及其成因机制 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(S3): 196–205.
Ma Y, Li S Z, Liang J Q, et al. Characteristics and mechanism of submarine landslides in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(S3): 196–205.
- [25] 彭晓彤, 周怀阳, 陈光谦, 等. 论天然气水合物与海底地质灾害、气象灾害和生物灾害的关系 [J]. *自然灾害学报*, 2002(4): 18–22.
Peng X T, Zhou H Y, Chen G Q, et al. Environmental disaster of gas hydrate: Its relationship with submarine geology hazard, climate hazard and biology hazard [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002(4): 18–22.
- [26] 朱超祁, 张民生, 刘晓磊, 等. 海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术 [J]. *灾害学*, 2017, 32(3): 51–56.
Zhu C Q, Zhang M S, Liu X L, et al. Gas hydrate: Production geohazards and monitoring [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 51–56.
- [27] Vanneste M, Sultan N, Garziglia S, et al. Seafloor instabilities and sediment deformation processes: The need for integrated, multi-disciplinary investigations [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 183–214.
- [28] 陈子归, 姜涛, 匡增桂, 等. 琼东南盆地天然气水合物与浅层气共生体系成藏特征 [J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1619–1634.
Chen Z G, Jiang T, Kuang Z G, et al. Accumulation characteristics of gas hydrate-shallow gas symbiotic system in Qiongdongnan Basin [J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1619–1634.
- [29] 朱超祁, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底滑坡分类及成因机制研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 153–163.
Zhu C Q, Jia Y G, Liu X L, et al. Classification and genetic mechanism of submarine landslide: A review [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 153–163.
- [30] 谢金有, 祝幼华, 李绪深, 等. 南海北部大陆架莺琼盆地新生代海平面变化 [J]. *海相油气地质*, 2012, 17(1): 49–58.
Xie J Y, Zhu Y H, Li X S, et al. The Cenozoic sea-level changes in Yinggehai–Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2012, 17(1): 49–58.
- [31] Kopp H, Weinzierl W, Becel A, et al. Deep structure of the central Lesser Antilles Island Arc: Relevance for the formation of continental crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(1): 121–134.
- [32] 吴志强, 张训华, 赵维娜, 等. 海底节点(OBN)地震勘探: 进展与成果 [J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(1): 412–424.
Wu Z Q, Zhang X H, Zhao W N, et al. Ocean bottom station nodes (OBN) : Progress and achievement [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 412–424.
- [33] Hello Y, Ogé A, Sukhovich A, et al. Modern mermaids: New floats image the deep Earth [J]. *Eos*, 2011, 92(40): 337–338.
- [34] Sukhovich A, Bonnieux S, Hello Y, et al. Seismic monitoring in the oceans by autonomous floats [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8027.
- [35] Marra G, Clivati C, Luckett R, et al. Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables [J]. *Science*, 2018, 361(6401): 486–490.
- [36] 陈天, 贾永刚, 刘涛, 等. 海底沉积物孔隙压力原位长期观测技术回顾和展望 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 229–245.
Chen T, Jia Y G, Liu T, et al. Long-term in situ observation technology of pore pressure in marine sediments: Review of technology development and future outlook [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 229–245.
- [37] Prindle R W, Lopez A A. Pore pressures in marine sediments—1981 test of the geotechnically instrumented seafloor probe (GISP) [C]. *Houston: Offshore Technology Conference*, 1983.
- [38] Schultheiss P J, McPhail S D, Packwood A R, et al. An instrument to measure differential pore pressures in deep ocean sediments: Pop-up-pore pressure instrument (PUPPI) [R]. *Wormley: Institute of Oceanographic Sciences*, 1985.
- [39] Stegmann S, Sultan N, Garziglia S, et al. A long-term monitoring array for landslide precursors: A case study at the ligurian slope (Western Mediterranean Sea) [C]. *Houston: Offshore Technology Conference*, 2012.
- [40] Marine geohazards: Safeguarding society and the blue economy from a hidden threat [EB/OL]. (2021-11-15)[2023-04-15]. https://www.marineboard.eu/sites/marineboard.eu/files/public/publication/EMB_PP26_Marine_Geo_Hazards_v5_web.pdf.
- [41] 杜星. 黄河口海底粉土波致孔压精细观测及液化评判方法 [D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所(硕士学位论文), 2016.
Du X. Fine observation of wave-induced pore water pressure and liquefaction evaluation method of seabed silt in Yellow River Estuary [D]. *Qingdao: First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources (Master's thesis)*, 2016.
- [42] Liu T, Li S P, Kou H L, et al. Excess pore pressure observation in marine sediment based on fiber bragg grating pressure sensor [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(7): 775–782.
- [43] Stenvold T, Eiken O, Zumberge M A, et al. High-precision relative depth and subsidence mapping from seafloor water-pressure measurements [J]. *SPE Journal*, 2006, 11(3): 380–389.
- [44] Prior D B, Suhayda J N, Lu N Z, et al. Storm wave reactivation of a submarine landslide [J]. *Nature*, 1989, 341(6237): 47–50.
- [45] Fabian M, Villinger H. Long-term tilt and acceleration data from the logatchev hydrothermal vent field, Mid-Atlantic Ridge, measured by the Bremen ocean bottom tiltmeter [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(7): Q07016.
- [46] Blum J A, Chadwell C D, Driscoll N, et al. Assessing slope stability in the Santa Barbara Basin, California, using seafloor geodesy

- and CHIRP seismic data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13): L13308.
- [47] Zumberge M A. Precise optical path length measurement through an optical fiber: Application to seafloor strain monitoring [J]. *Ocean Engineering*, 1997, 24(6): 531–542.
- [48] Morton J L. Sea-floor horizontal deformation measurements using dual-frequency intelligent transponders [C]. Dordrecht: Proceedings International Symposium on Marine Positioning, 1994.
- [49] Petersen F, Kopp H, Lange D, et al. Measuring tectonic seafloor deformation and strain-build up with acoustic direct-path ranging [J]. *Journal of Geodynamics*, 2019, 124: 14–24.
- [50] Wang Z H, Sun Y F, Jia Y G, et al. Wave-induced seafloor instabilities in the subaqueous Yellow River Delta—Initiation and process of sediment failure [J]. *Landslides*, 2020, 17(8): 1849–1862.
- [51] Sternberg R W, Creager J S. An instrument system to measure boundary-layer conditions at the sea floor [J]. *Marine Geology*, 1965, 3(6): 475–482.
- [52] Cacchione D A, Drake D E. A new instrument system to investigate sediment dynamics on continental shelves [J]. *Marine Geology*, 1979, 30(3–4): 299–312.
- [53] Wright L D, Boon J D, Green M O, et al. Response of the mid shoreface of the southern mid-Atlantic Bight to a “northeaster” [J]. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6(3): 153–160.
- [54] 马小川, 阎军, 范奉鑫, 等. 北部湾南部海域近底悬沙运输及地貌演变 [J]. *海洋学报*, 2012, 34(4): 109–120.
- Ma X C, Yan J, Fan F X, et al. Redform dynamics and suspended sediment transport near sea bottom in the south of Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(4): 109–120.
- [55] 赵广涛, 于新生, 李欣, 等. Benvir: 一个深海海底边界层原位监测装置 [J]. *高技术通讯*, 2015, 25(1): 54–60.
- Zhao G T, Yu X S, Li X, et al. Benvir: A in situ deep-sea observation system for benthic environmental monitoring [J]. *High Technology Letters*, 2015, 25(1): 54–60.
- [56] 季春生, 贾永刚, 朱俊江, 等. 深海海底边界层原位观测系统研发与应用 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 265–274.
- Ji C S, Jia Y G, Zhu J J, et al. R & D and application of the abyssal bottom boundary layer observation system (ABBLOS) [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 265–274.
- [57] Cacchione D A, Sternberg R W, Ogston A S. Bottom instrumented tripods: History, applications, and impacts [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17–18): 2319–2334.
- [58] Solomon E A, Becker K, Kopf A J, et al. Listening down the pipe [J]. *Oceanography*, 2019, 32(1): 98–101.
- [59] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台 [J]. *自然杂志*, 2007 (3): 125–130.
- Wang P X. Seafloor observation: The third platform for the Earth observation [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007 (3): 125–130.
- [60] 孙志文, 贾永刚, 权永崢, 等. 复杂深海工程地质原位长期监测系统研发与应用 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 216–228.
- Sun Z W, Jia Y G, Quan Y Z, et al. Development and application of long-term in situ monitoring system for complex deep-sea engineering geology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 216–228.
- [61] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 321–330.
- Li F H, Lu Y G, Wang H B, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 321–330.
- [62] 李三忠, 赵淑娟, 刘鑫, 等. 洋–陆转换与耦合过程 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(10): 113–133.
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Processes of ocean-continent transition and coupling [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(10): 113–133.