



深海滑坡研究进展

宋晓帅, 孙志文, 朱超祁, 范智涵, 朱娜, 贾永刚, 于开宁

A review on deepwater landslide

SONG Xiaoshuai, SUN Zhiwen, ZHU Chaoqi, FAN Zhihan, ZHU Na, JIA Yonggang, and YU Kaining

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021062701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋环境中甲烷好氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67

海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1



关注微信公众号，获得更多资讯信息

宋晓帅, 孙志文, 朱超祁, 等. 深海滑坡研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 222-235.

SONG Xiaoshuai, SUN Zhiwen, ZHU Chaoqi, et al. A review on deepwater landslide[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 222-235.

深海滑坡研究进展

宋晓帅^{1,4}, 孙志文¹, 朱超祁^{1,2,3}, 范智涵¹, 朱娜¹, 贾永刚^{1,2}, 于开宁⁴

1. 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100
2. 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, 青岛 266061
3. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206
4. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 石家庄 050031

摘要: 随着深水油气资源开发、天然气水合物试采和海底管线铺设等人类工程活动的日益增多, 影响资源开采和工程施工的深海地质灾害备受关注。深海滑坡作为主要深海灾害, 其不稳定性研究具有重要的科学意义和实际价值。本文总结了国内外深海滑坡的研究历程, 梳理了深海滑坡的形态结构及类型、深海滑坡研究的方法手段, 讨论了地震与断层活动、天然气水合物分解两个重要因素对深海斜坡不稳定性影响。近十年来, 随着一些新方法的涌现, 研究热点已由深海滑坡的形态结构及分类等转移到深海滑坡的触发机制、滑动过程原位观测等方面。但现场调查技术、物理模拟试验和数值模拟试验仍是深海滑坡研究的主要方法手段, ROV/HOV 等非常规技术也在逐步应用于深海滑坡的研究中。深海滑坡的产生通常是由海床内部地质作用和外部水动力作用共同引起, 多种触发机制对深海滑坡的耦合作用及新触发机制对深海滑坡的影响仍是未来研究的重点。

关键词: 深海滑坡; 形态结构; 滑坡类型; 稳定性分析

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021062701

A review on deepwater landslide

SONG Xiaoshuai^{1,4}, SUN Zhiwen¹, ZHU Chaoqi^{1,2,3}, FAN Zhihan¹, ZHU Na¹, JIA Yonggang^{1,2}, YU Kaining⁴

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environmental Geology Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China
3. Hainan Key Laboratory of Marine Geology Resources and Environment, Haikou 570206, China
4. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: Human engineering activities under the sea, such as the exploitation of deep-water oil and gas, the trial production of marine gas hydrates, and the construction of submarine pipelines, are rapidly increasing with time. They have attracted great attention from the geosociety since deep-sea geohazards often occur with those submarine resource extraction and engineering activities. Landslide is a kind of geohazard often happened in the deep sea, so the instability study of deep-sea landslides has become an important subject of marine scientific research. This paper is devoted to the research status and progress of deep-sea landslides both at home and abroad, and the morphological classification as well as research methods and means. The effects of earthquake, fault activity and gas hydrate decomposition on the instability of deep-sea slopes are discussed. In the past decade, with the emergence of some new research methods, the research focus of deep-sea landslide has shifted from the morphological classification to the trigger mechanisms and in-situ observation of deep-sea landslides. However, field investigation, physical simulation and numerical simulation still remain as the main means for the study of deep-sea landslides, and unconventional techniques, such as ROV/HOV are also gradually applied. Deep-sea landslides are usually caused by joint internal and external geological and hydrodynamic factors. The coupling effect of trigger mechanisms and the impact of new trigger mechanisms are still the focuses for future researches.

Key words: deep-water landslide; morphological structure; landslide types; stability analysis

资助项目: 国家自然科学基金“内孤立波对南海水合物试采区海底面稳定性影响研究”(41831280); 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放研究基金资助项目“南海北部珠江口盆地海底蠕变特征及成因研究”(JSYF-202103); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放基金“黏土质海底滑坡渐进破坏过程与机理研究”(HNHYDZZYHJKF008)

作者简介: 宋晓帅(1991—), 男, 博士生, 主要从事海洋地质灾害研究, E-mail: songxiaoshuai@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 贾永刚(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事海洋地质工程研究, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

于开宁(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事水文地质、环境地质、海洋地质等研究, E-mail: 1211931193@qq.com

收稿日期: 2021-06-27; 改回日期: 2021-09-16. 周立君编辑

近些年来,随着科学技术的不断进步和浅水区油气资源的枯竭,开采活动不断转向深海,而深水区工程活动将面临更多的地质风险和挑战^[1-2]。如海底边坡失稳可导致海底滑坡、浊流和海啸等一系列地质灾害,从而影响油气资源的安全开发和海洋工程的施工^[3](图 1)。因此,总结、归纳近年来关于深海滑坡及其稳定性问题研究进展对未来深水区工程活动和海洋地质灾害发生的可能性具有重要指示意义^[4]。

一般将水深大于 1000 m 的海底滑坡称为深海滑坡。深海滑坡是由携带黏土、砂土的海底沉积物从陆架坡折带向陆坡和深海盆地运移的重要过程^[5-6],包括从蠕变、滑动、滑塌、碎屑流到浊流的转化。与浅海海底滑坡相比,深海滑坡具有低角度(坡度小于 2°)、高速(35 m/s)、长距离(滑移距离可达数百千米)、大体量(滑动体积量可达几亿立方米)的滑移特征,是危害程度巨大的深水地质灾害之一,同时对深海海底峡谷演化起到重要作用^[7-9]。典型的白云海底滑坡位于南海北部陆缘,主要分布于水深 400~3000 m 的深水区,滑坡面积约 13000 km²,体积约 1040 km³,最小坡度仅有 2°。我国的深海滑坡等海洋地质灾害研究始于 20 世纪 80 年代,研究主要针对海底滑坡要素的识别、分类、影响因素及其监测预警等,均取得了重要研究进展。

本文总结了国内外深海滑坡的研究历程,梳理深海滑坡的形态结构及类型、深海滑坡的研究方法,讨论地震与断层活动、天然气水合物分解对深

海斜坡不稳定性的影响,以期海洋资源勘探开发过程中的海底稳定性评价研究提供借鉴指导。

1 研究概况

国内对于深海滑坡的研究仅处于起步阶段,而对于深海滑坡相关的海洋地质灾害在国际上早有研究^[10-11]。进入 20 世纪中后期,随着深海资源的利用和工程建筑的兴起,深海滑坡引发的灾害不断发生,我国开始逐渐重视深海滑坡的研究。然而,由于科学技术的落后,主要集中于对深海滑坡的定性描述和分类,笼统分析其诱因等研究^[12]。直到 1969 年,美国的卡米尔号飓风引发了海底大规模斜坡体失稳,导致 4 座石油开采平台破坏受损,我国相关学者才开始认识到深海滑坡研究的重要性。到 20 世纪 90 年代,伴随海底三维数据获取技术的不断提高,使得深海滑坡进入较深入的研究阶段。

近十年来,伴随着深海油气资源的勘探与开发,一些非常规的研究手段不断涌现,从而也革新了深海滑坡的研究。高分辨率多波束、侧扫声纳和三维地震等地球物理探测技术的发展,提高了对深水区浅层沉积物的识别能力;以深海运载器为代表的高技术装备高效精确探测、取样等已成为研究深海滑坡不可或缺的方法手段,如无人自主潜水器(AUV)和缆控无人遥控潜水器(ROV)可以携带物探设备获取分辨率优于 2 m 的海底数据,可为深海滑坡研究提供翔实可靠的数据。

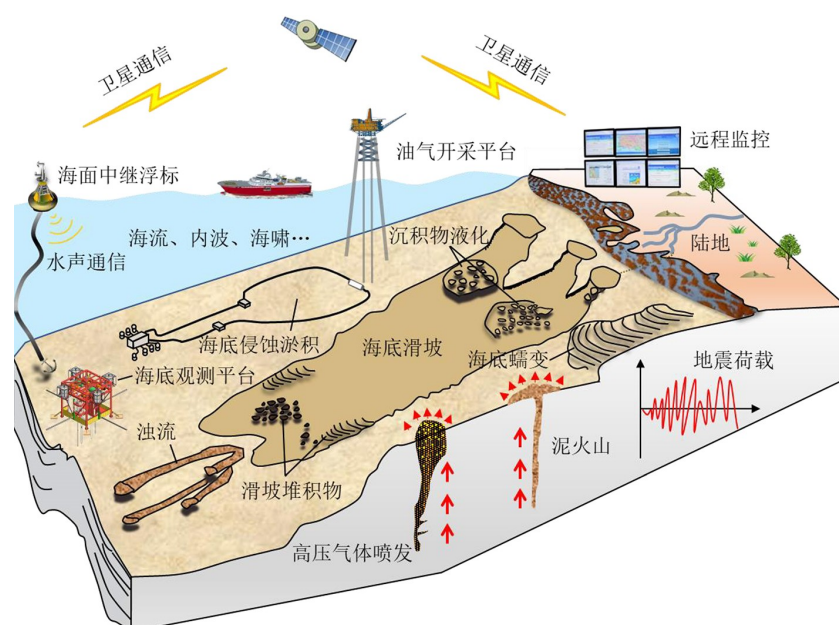


图 1 深海资源开发诱发的地质灾害及监测预警示意图

Fig.1 Schematic diagram of geological disasters and monitoring warnings in deep sea resource development

2 深海滑坡的形态结构及类型

2.1 形态结构

深海滑坡体形态结构与陆地滑坡体、近岸浅海滑坡体形态结构基本相似,均分为三大部分,即头部拉张区、体部滑移区、趾部挤压区(图2)。Cruden等^[13]基于美国50个州发生的山体滑坡,总结了滑坡体形态结构的简易模式,将其分为下滑区、滑动面相关区和沉积区。主要结构单元有:滑坡体头部、头部拉张裂缝、滑坡后壁、滑坡主体、侧壁陡崖、滑移面、滑坡体趾部、趾部断裂面、横向裂缝、横向挤压脊、竖向挤压脊、滑坡堆积体等。随后Hampton等^[14]又将Cruden等^[13]提出的下滑区细分为上部滑移区和中部滑移区。Bull等^[15]将滑坡体划分为后壁区、输送区和趾部区,组成滑坡体的形态结构单元与Cruden等^[13]基本一致。

2.2 类型

此前,对深海滑坡的分类主要借鉴陆地山体滑坡和近浅海滑坡的分类方案,按照分类的依据来划分深海滑坡类型。当然,不同的滑坡类型所对应的滑坡体形态结构也不尽相同。

Varnes^[17]和Cruden等^[13]依据滑坡物质的种类和搬运方式将滑坡分为滑动型、崩落型、倾倒型、流动型、横向扩展型和复合体型6类(表1)。其中,滑动型又可分为平移型滑动和旋转型滑动或滑塌;而流动型又包括碎屑流、碎屑崩流、泥流、泥石流和蠕变等5类。

Canals等^[18]考虑到海洋与陆地滑坡所处环境差

表1 滑坡分类^[17]
Table 1 Classification of landslides^[17]

搬运方式	基岩	土壤	
		粗粒为主	细粒为主
滑动	岩石型滑动	碎屑型滑动	土壤型滑动
崩落	岩崩	碎屑岩崩	土崩
倾倒	岩石型倾倒	碎屑型倾倒	土壤型倾倒
流动	岩流	碎屑流	土流
横向扩张	岩石型扩张	碎屑型扩张	土壤型扩张
复合体	上述两种或两种以上的组合		

异,根据海底斜坡变形破坏方式,重新归纳了Cruden等^[13]的分类方案,将滑坡分为蠕变、岩崩/碎屑崩落、平移滑坡/滑动、碎屑流和泥流5种类型。其中海底蠕变是深海软黏土在外动力作用下发生的斜坡体变形现象。蠕变可能演变为大规模斜坡体失稳,是海底滑坡发生的征兆,在我国南海珠江口盆地的发育较为广泛^[19-20]。

国内学者对深海滑坡的研究起步较晚。陈自生^[11]较早对海底滑坡进行了分类,叙述了海底滑坡在分类学上的归属及研究意义,按滑动构造和形态特征将海底滑坡划分为液化型、崩塌型和溜席型。

贾永刚等^[21]把海底滑坡分为3种类型:流动、滑坡和坍塌。根据运动方式及物质组分特征流动可进一步分为蠕流、液化流、颗粒流和浊流;坍塌大多发生在斜坡体倾角较大的区域;而滑坡一般发生在大陆架向大陆坡过渡的陆架坡折带附近,影响因素复杂,通常受内动力及外动力作用的双重影响。

王大伟、吴时国等^[22]学者将深海滑坡称为“块体搬运沉积体系(MTDs)”,是沉积物向深远海运输

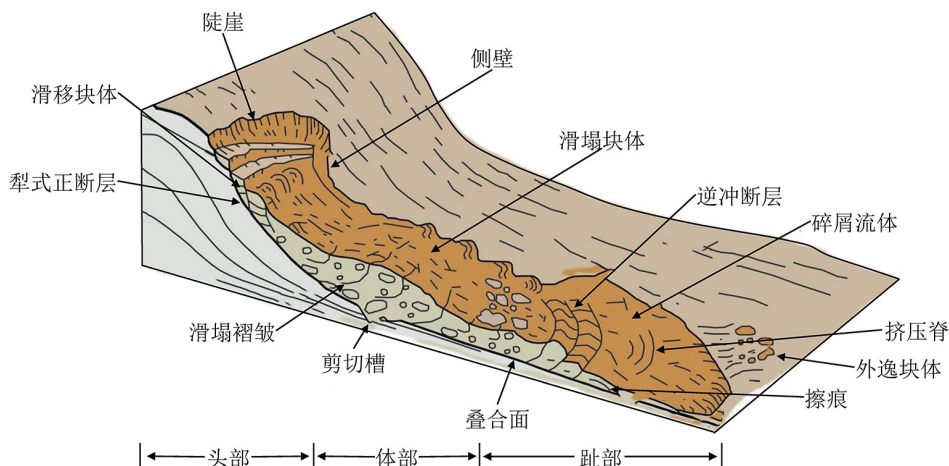


图2 块体搬运体系的结构示意图^[16]

Fig.2 Structure diagram of MTDs^[16]

的重要过程之一(图 2)。他们认为 MTDs 主要包括滑动、滑塌和碎屑流三种类型。这种分类方式与国外的“块体搬运复合体系”(MTCs)和“块体搬运体系”(MTD)分类方式角度不同,但内涵类似^[23-24]。

3 深海滑坡的研究方法

深海滑坡一般发生在海底上千米,其影响因素和运动过程与陆地滑坡和近岸滑坡均有很大的差异,研究方法与技术手段的局限性是一直制约深海滑坡研究进展的重要因素^[25]。目前,国内外对于深海滑坡的研究方法大都采用现场调查、室内模拟及原位长期观测等方法来进行深海滑坡的研究工作。通过这几种方法的结合,可对沉积物强度、变形和流动特性以及孔隙水压力状况等进行全面的分析。本文中,重点讨论几种常用的与深海滑坡研究相关的方法手段。

3.1 现场调查技术

现场调查技术主要包括:①单波束、多波束水深测量技术,②侧扫声纳测量技术,③浅地层剖面测量技术,④地震测量技术(单道地震、多道地震与小多道地震),⑤表层柱状、箱式地质取样技术,⑥海底地质钻探技术等。随着科学技术的不断进步,利用这些现场调查技术来准确获取海底相关信息成为可能^[26]。但是限于环境和技术条件的约束,实际中很难直接获取到深海滑坡体的滑动过程、滑移速率和触发机制等信息,通常是根据海底管线、电缆的断裂时间及损坏程度判断滑坡发生的时间和体量^[27]。因此,应用地质取样和物探技术对于获取深海滑坡的信息显得尤为重要。

3.1.1 海洋地球物理调查技术

海洋地球物理调查技术是通过分析获取的数据,了解海底地形地貌特征、地层结构、地质构造等基本信息,初步探明深海滑坡的规模及展布情况,同时也可获取滑坡区沉积物样品提供精准的取样站位。

水深测量方法主要通过获取海底地形、地貌图像的变化来初步推断是否有新的滑坡。相比单波束而言,多波束测深可准确定位海底变形及失稳区域,可以实现对滑坡区近乎全覆盖测量的需求^[26]。周庆杰^[28]基于多波束地形数据,采用编制海底陡坡自动识别程序,在神狐峡谷区共识别出 145 个海底滑坡。此外,McAdoo 等^[29]、胡光海等^[30]、王磊等^[31]均利用多波束水深数据进行了海底滑坡的精准识别。

侧扫声纳测量技术可辅助多波束测深技术同步使用。对于滑坡体边界、水深变化剧烈以及多波束测深技术效果欠佳的位置,可通过侧扫声纳测量获取地形地貌,由此也常用来证实滑坡的存在。相比于多波束测深技术,其优点是拥有更广的探测范围,但测量精度较低。Harders 等^[32]利用 1300 km 的深拖侧扫声纳图像,发现了中美洲海沟大规模海底滑坡存在的证据(图 3)。近些年,侧扫声纳设备也曾搭载 AUV、ROV 和 HOV 等水下载体,来近距离获取深海滑坡的特殊地貌,使得工作更加精细,测量精度更高。

浅地层剖面测量技术与地震测量技术均采用高能量震源,根据不同地层具有不同的声波反射特征来获取海底地层数据。通过研究沉积物地层的连续性和杂乱反射的结构特性,来确定是否有海底滑坡的发生。浅地层剖面探测深度一般不超过海底面以下 50 m,而地震测量可得到海底约 2000 m

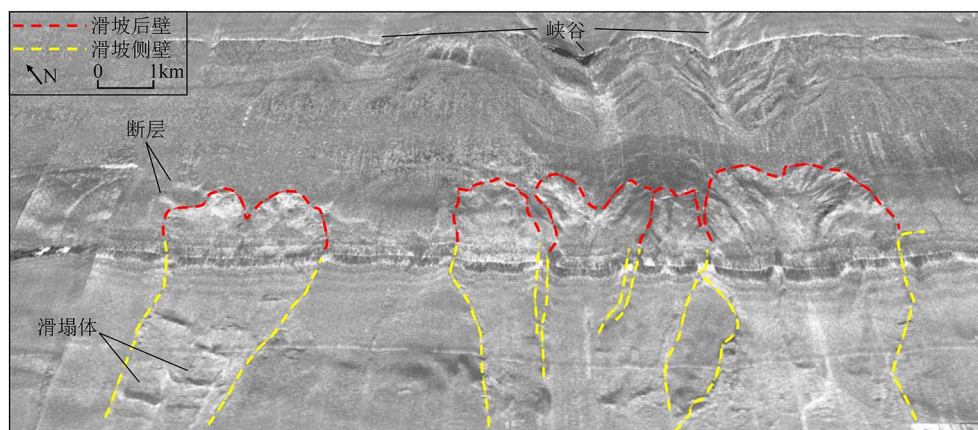


图 3 通过侧扫声纳技术获取的海底滑坡图^[32]

Fig.3 Submarine landslide image obtained by side-scan sonar technique^[32]

范围内的地层结构信息,在深海滑坡研究中广泛应用。同时,通过地震剖面我们可以从中清晰获取到断层、浅层气及其他复杂灾害地质体的信息,为研究深海滑坡体提供详实可靠的依据。Chen等^[33]通过高分辨率三维地震测量技术,分析南海神狐峡谷区海底滑坡的地震特征、分布和成因(图4)。

3.1.2 海洋地质取样分析技术

海洋地质取样主要目的是对所取样品的各项指标进行测量,通过现场试验测试(如十字板剪切、含水率测定、贯入阻力测定等)和室内测试分析(如液塑限、三轴试验、固结试验等),获得海底沉积物土力学性质以及地质现象等信息,为分析研究滑坡体的稳定性提供必要参数^[34]。

常用的深海表层地质取样按取样设备可分为抓斗、箱式和多管等^[35-37](图5)。抓斗式取样器(图5a)可获取水深约5000m的海底表层40cm深度的深海沉积物样品;箱式取样器(图5b)主要用于采取不受扰动的海底表层沉积样品,为滑坡研究提供真实的原状土样,适用于各种复杂底质类型及地形海区的取样工作;多管取样器是一种新型取样设备(图5c),主要用于类似深海蠕变区等海底软黏土沉积物的

取样工作,具有采集样品量大、质量高、原始保持性好、采样稳定性强等优点。

深海滑坡研究的柱状地质取样主要应用重力取样器。重力取样器一般可在4000m水深获取沉积物样品,长度约6~8m,可基本保持表层沉积物的原状地层结构。深海地质钻探(浅钻)也是另外一种获取海底柱状样的方法,但该技术的使用成本较高,消耗的人力物力较大,所获取的柱状样主要用于了解滑坡区底层沉积物类型及分布特征、地层结构和沉积环境等信息。如Yenes等^[38]利用加的斯湾大陆坡获取的表层沉积物样品进行物理成分、力学特性、X射线衍射等试验,研究超固结特性与深海斜坡体稳定性的关系。

3.2 原位观测技术

原位观测方法主要通过贯入海床土体中的孔隙水压力探杆、三轴加速度传感器、测斜仪等观测设备来进行孔隙水压力和海床变形滑动观测。通过分析实时数据变化,反演海床土体动力响应过程,可有效预测、预警深海斜坡体的变形滑动。由于深海滑坡原位观测的难度较大,花费较高,世界

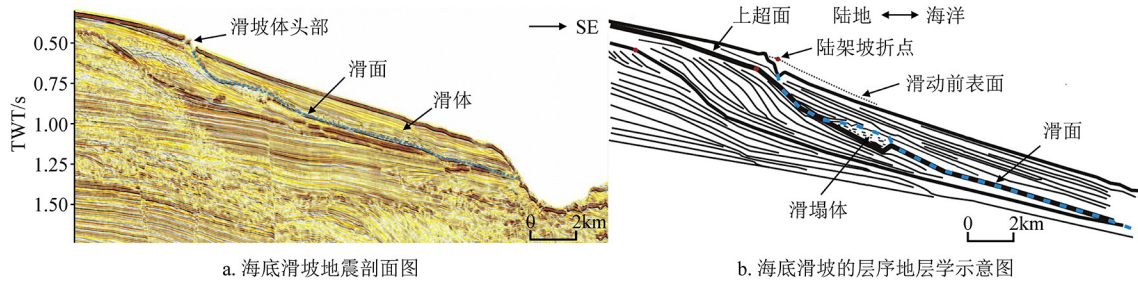
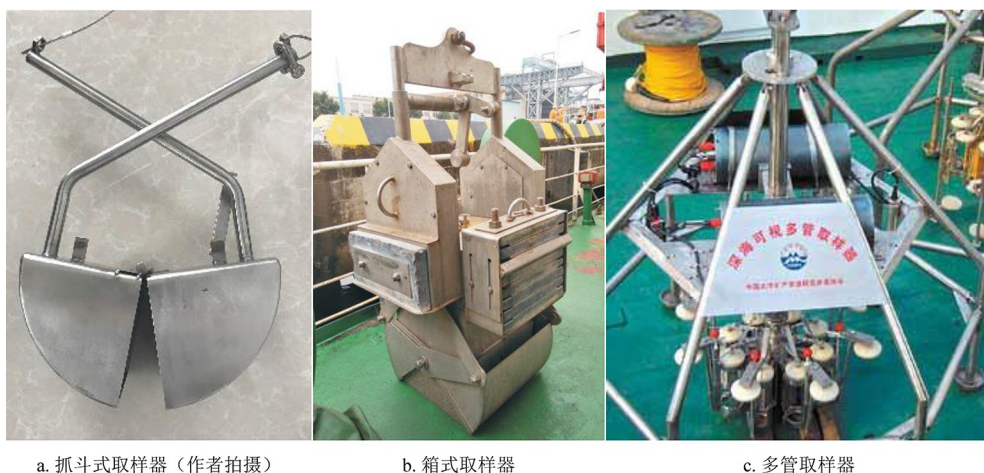


图4 海底滑坡的地震反射特征^[33]

Fig.4 Seismic characteristics of a large slide^[33]



a. 抓斗式取样器 (作者拍摄)

b. 箱式取样器

c. 多管取样器

图5 深海表层地质取样设备

Fig.5 Deepwater surface geological sampling equipment

上很少有成功监测海床失稳的案例,我国对于深海滑坡原位观测技术研究也正处于初级阶段。

3.2.1 孔隙水压力观测

在 20 世纪中后期,国外早已开始有关孔隙水压力监测的研究应用。伊利诺伊大学和挪威岩土工程研究所共同研发的 NGI-UI 传感器,可用于测量 500 m 水深孔压^[39]; Bennett^[40] 在密西西比三角洲地区利用孔压设备进行了风暴期间为期 8 个月的观测,观测参数包括孔隙水压力和静水压力,分析数据发现,风暴潮引起的波浪作用对海床孔压具有显著影响;法国海洋开发研究所研制出 6000 m 深海沉积物孔压观测设备,该设备利用压差式原理的 Hastelloy 压力传感器对超孔压进行观测,精度约 ± 0.5 kPa,是国内外较先进的孔压观测设备,近些年来已取得很多较好的试验成果^[4-5, 41-42]。

国内关于海底孔隙水压力的原位观测技术研究起步较晚。目前,具有代表性的是中国海洋大学贾永刚团队研发的深海沉积物孔压监测设备。孔压测量传感器采用压差式光纤光栅传感器,测量精度 0.1% F.S.,量程 ± 0.5 MPa,可在 2000 m 水深连续观测 7 天。

3.2.2 海床变形滑动观测

海床变形滑动是海底斜坡体失稳最为直接的表现。若能有效获取深海海床变形滑动原位观测数据,无疑是研究深海滑坡启动、滑动过程、致灾机理及预测预警的绝佳证据。但是深海环境复杂,原位观测实施难度大,观测设备各项指标要求较高,海底变形滑动事件随机性强,需要长期观测才可捕捉到海床的微小变形。目前,国内外对于海床变形滑动原位观测仍处于探索阶段,且多数海床变形滑动设备用于近岸浅海的滑坡变形观测。

Fabian 等^[43] 利用 ROV 将装有三轴加速度传感器和倾斜仪(OBT)布放在大西洋海脊的 Logatchev

热液喷口的岩石堆顶部(图 6),进行 384 天的长期观测,记录海底沉积物变形和地震活动。Yokoyama 等^[44] 在 2013 年研发了一套海底变形观测系统,成功应用于日本南海海槽监测水合物开采引起的海底变形。该系统通过测量海床面处海水压力变化来监测海底沉降,采用液体电解质倾角计监测海床坡度变化,测量范围为 $\pm 30^\circ$,分辨率 0.001° ,精度 0.02° 。在北海海域,Stenvold^[45] 采用高精度水压测量技术进行海床沉降变形的监测。该方法在构造运动、海床隆起中也曾多次使用。Wallace 等^[46] 也使用该方法在 2014 年 9 月和 10 月的一次近海慢滑事件(SSE)期间进行了海底形变观测,数据显示了 SSE 期间海底垂直形变的分布,并提供了 SSE 发生在海沟附近(海底 2 km 以内)的直接证据。

国内对于深海海床变形滑动的原位监测相对较少。目前,中国海洋大学贾永刚团队对相关设备探索研发了应用^[47],该设备可搭载位移传感器阵列 SAA(shape accel array)(图 7),通过实时观测海底沉积物侧向及垂向的动态变化,实现对海底滑坡灾害孕育发生过程的原位观测^[26]。该系统主要由阵列式位移传感器、数据采集系统、无线传输系统和供电系统构成,具有整机功耗低、观测周期长、传感器精度高且稳定、数据实时传输控制等特点,既可监测海床横向滑动变形,又可监测海底面纵向塌陷或隆起变形,但该设备的最大工作水深仅 100 m,还不能应用于深海滑坡的变形滑动原位观测。

近些年,虽然在该方面做了部分工作,但我国起步相对较晚,经验不足。再者,相关技术落后,工作量较大,但是获取的数据质量整体不高。想要突破深海原位观测技术领域的瓶颈,我们还需研制耐高压、耐腐蚀、低耗能的原位观测仪器,发展适用于深海观测环境(如高压、高温、高盐等)的传感器和仪器;发展适于深海原位观测的固定和移动平

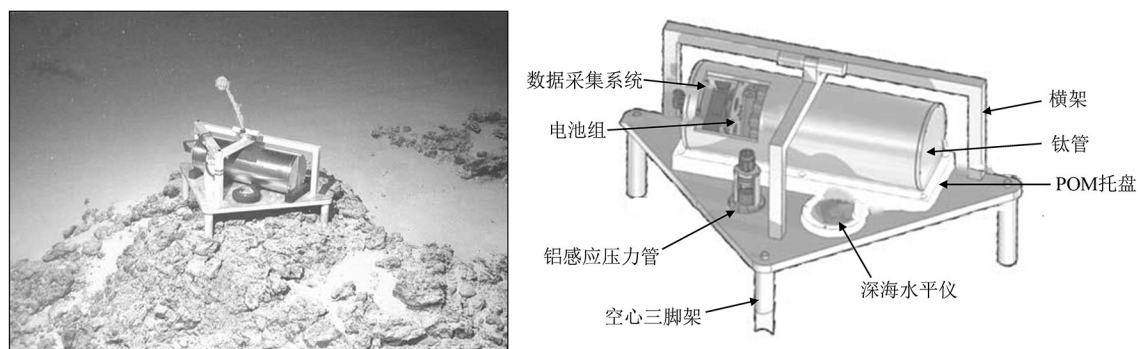


图 6 观测海底沉积物变形和地震活动的 OBT 设备及模型^[43]

Fig.6 OBT equipment and models for observing sediment deformation and seismic activity on the seafloor^[43]

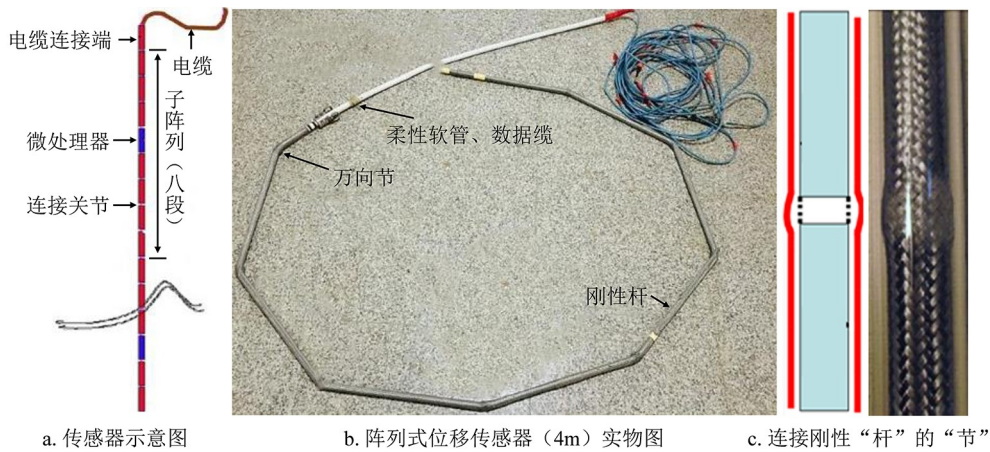


图7 海底变形滑动观测系统及组成部分^[47]

Fig.7 The components of the seabed deformation observation system^[47]

台,提高原位观测系统的供电时间、数据传输能力,建立长期、稳定的海底原位观测网,是深海滑坡原位观测技术发展的基本趋势。

3.3 物理模拟试验

深海滑坡发生于复杂地质环境中,通过现场调查和原位观测几乎不可能捕捉到斜坡体蠕变-滑移-滑塌-碎屑流-浊流的全过程及伴随的再沉积作用。因此,通过室内物理模型试验来发现特征物理现象,同时也为数值模拟提供有价值的实验数据。深海滑坡研究的物理模型实验主要包括常规水槽实验和离心实验两种。常规实验主要在自身重力条件下开展研究,而离心实验则通过离心机补偿损失的自重应力,使模型与原型具有相同的应力水平^[48]。

Wang等^[49]利用巧妙设计的一套试验装置,模拟海底滑坡与海底通信电缆之间的相对运动,研究海底滑坡对海底电缆的冲击特性。该试验装置主要部分是钢铁材料制成的环形水槽,水槽的外径0.9 m,内径0.6 m,宽度0.4 m。通过正面透明的有

机玻璃观察水槽内沉积物和水的混合物在水槽旋转过程中对缆绳的冲击(图8)。Liu等^[50]利用坡度可调的水槽、气体加压系统、数据和图像采集系统构成物理模拟试验系统,对低渗透粉砂层施加气体,模拟水合物分解产生的超孔压对上覆海床破坏的物理过程。Fan等^[51]通过精心设计的水槽试验系统,研究深海滑坡运动过程中的水土交换作用。试验采用不同含水量(112%和157%)的高岭土作为土样,对不同流速(1.16~2.05 m/s)下海底滑动土的土-水界面平均传质通量进行了研究。

目前,对深海滑坡离心实验模拟的相关研究相对较少。胡光海等^[30]利用土工离心模型试验机,进行了海底斜坡含气土体的稳定性研究,揭示了海底滑坡破坏模式和失稳机制。Gue等^[52]利用迷你滚筒离心机试验,模拟了坡度较小的海底滑坡发生后的沉积物流动问题。斜坡上安装了微型传感器,用来测量水流下的孔隙压力,还包括一系列数码相机用来捕捉沉积物的流动状态。孙柏涛^[53]利用土工鼓式离心机以及自主开发的滑坡装置、注浆装置、

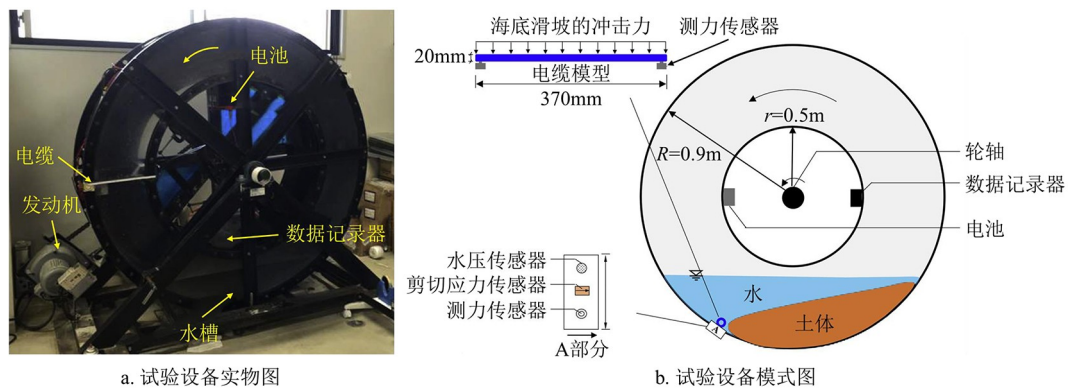


图8 模拟海底滑坡的试验设备^[49]

Fig.8 Test equipment to simulate submarine landslide^[49]

摄像装置和灯光布置, 在改变离心加速度和土体含水率的条件下进行了一系列的海底滑坡离心模型实验。

3.4 数值模拟试验

随着计算机科学的迅速发展和岩土力学理论的不提高, 数值模拟作为一种快速有效的方法技术, 近年来已被广泛采用。数值模拟试验主要用来研究斜坡的变形及不稳定性, 分析斜坡体的内部应力、应变特征, 主要包括有限差分法、离散元法、边界元法、有限元法等^[54-56]。

Gue^[52] 采用 DAMPM 方法模拟了海底滑坡过程等大变形问题, 并进行了离心机试验, 结果有很好的 consistency。马林伟等^[57] 根据物态变化和搬运机制将滑坡划分为 3 个不同阶段进行模拟: 结构稳定性分析阶段、双向流固耦合的碎屑流滑动分析阶段、浊流的流体分析阶段。Mi 等^[58] 基于循环弹塑性本构模型和改进的拉格朗日技术, 提出了一种研究地震荷载作用下海底软黏土边坡动态滑动过程的数值模拟方法。通过与前人研究结果的对比, 验证了所提数值模拟方法的适用性。

利用物理模型试验和数值模拟方法来研究深海滑坡的滑动过程和发展趋势, 极大提高了对深海滑坡的启动、滑动和结束整个过程的 understanding。

4 深海斜坡体稳定性分析

海底斜坡失稳的机理相对复杂, 一般来说, 海

底滑坡的产生通常是由海床内部作用(地震与断层、天然气水合物分解、岩浆火山、泥火山等)和外部作用(风暴浪、潮汐、人类活动、海啸、海平面波动等)共同耦合所引起^[59-60]。

Prior^[61] 梳理了海底滑坡多种触发因素之间的关系, 并建立了海底斜坡失稳过程框架图(图 9)。Hance^[60] 统计分析了 534 个海底滑坡, 有 366 个海底滑坡涉及到多个触发因素, 而不是特定的单个因素触发(图 10)。其中触发因素中排前三的分别是地震和断层活动、快速沉积作用和天然气水合物分解作用, 所占比例分别为 42%、25% 和 11%; 海洋风暴浪、潮汐、洪水和人类活动所占比例均不足 5%。然而, 深海滑坡一般都发生在上千米水深, 可以判断, 地震和断层活动、天然气水合物分解作用是触发深海海底滑坡发生的两个最重要因素。

4.1 地震与断层活动

断层活动可引起下伏地壳板块的活动, 板块之间的活动可直接促使海底斜坡体倾角增大, 也可将能量由下伏基岩传递给海床表层沉积物, 不但增加了斜坡体的剪切力, 而且振动液化使得土体强度降低, 最终导致斜坡体失稳。同时, 断层也是重要的气体通道, 深层气体可沿断面向浅部运移, 促使潜在滑移面的形成^[62-63]。南海北部白云海底滑坡底部发育有大量的大型活动断层, 垂向延伸数千米。地层地震反射特征呈现极性反转和高振幅异常, 并分布于断层面两侧或断层顶部, 这可能是断层内存在流体或气体运移(图 11)。

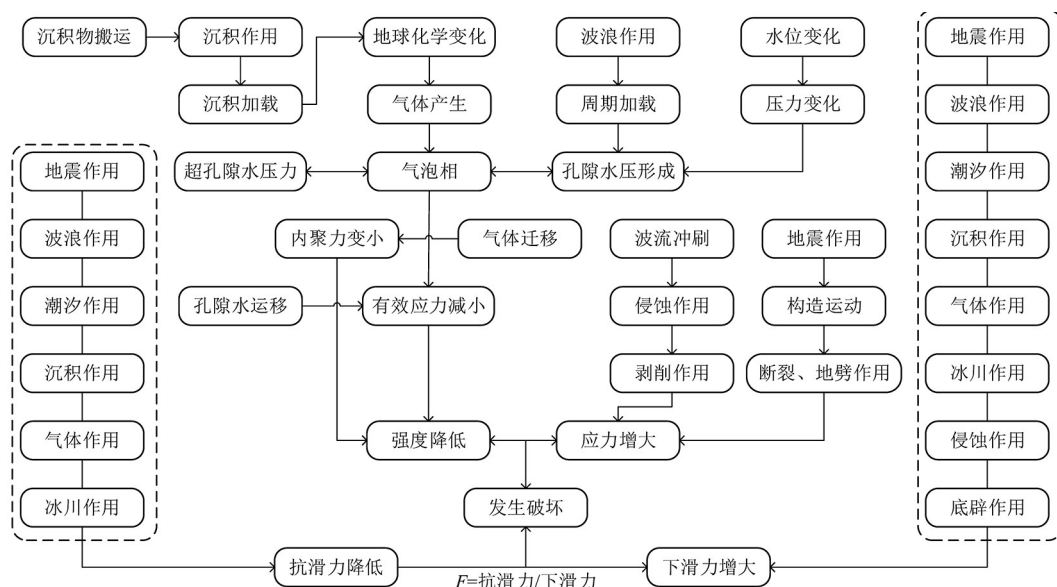
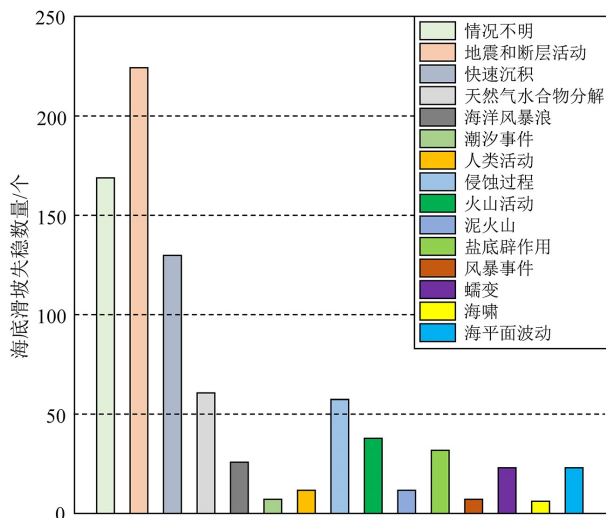


图 9 海底滑坡诱因及其相互关系^[61]
Fig.9 The causes of submarine landslides^[61]

图 10 海底滑坡触发因素^[61]Fig.10 Triggering factors of submarine landslides^[61]

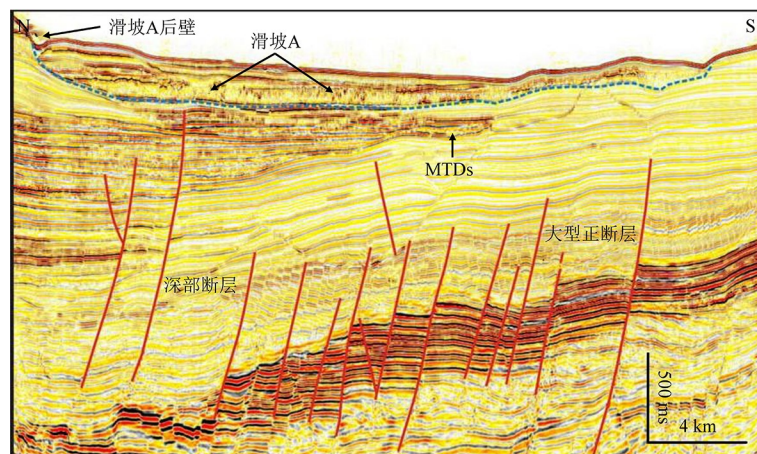
地震作用既可直接导致斜坡体失稳,还可引发海啸,巨大的海啸波浪作用可再次引起斜坡体失稳。1929年的 Grand Banks 地震,是产生海底滑坡的主要因素^[10]。1946年4月1日发生了里氏7.1级的 Aleutian 地震,在 Alaskan 近岸引发巨大海啸,造成167人死亡。Fryer等^[65]研究表明,这次大地震造成 Ugamak 海底滑坡的发生,从而引发海啸。2011年3月11日,由于北美板块和太平洋板块边界的挤压造成日本海沟发生震级 Mw 9.0 的地震^[66],地震期间逆冲断层的滑动错位为 60~80 m^[67]。Nian等^[68]提出了地震荷载作用下海底边坡失稳的区域评价方法,建立了多土层边坡稳定性评价公式,对南海东北部深海滑坡进行了区域地震不稳定性评价,并对影响海底滑坡的各种因素进行了简要讨论。但是也有学者研究表明,地震作用一定程度上可以增加斜坡体的稳定性。Chigira^[69]的研究工

作表明地震作用可能会增大海底沉积物的强度。在地震过程中,沉积物颗粒之间的孔隙水能够及时排出,孔隙水压力随之降低,土体颗粒之间的有效应力增加,沉积物强度增大。持此种观点的学者较少,确凿证据还待进一步研究。

4.2 天然气水合物分解

天然气水合物(natural gas hydrate,简称 NGH)是低温高压条件下形成的笼型化合物^[70]。在自然条件下,一些外部因素(海平面变化、潮汐和地震)的干扰,会诱发天然气水合物的分解,并导致水合物储层流体上升,从而打破沉积物的原始状态^[71]。天然气水合物是沉积物颗粒之间的有效胶结剂,水合物的分解可导致局部剪切应力的变化和海底边坡失稳^[72]。另外,在标准的温压条件下,1 m³的水合物分解会释放出约 164 m³的甲烷气(远远高于气体在水中的溶解度)和 0.8 m³的水^[73]。这可能会导致低渗透层的体积膨胀,多余的水和气体来不及排出,产生超压流体^[74]。超压将降低海相沉积物有效应力,进而导致海底滑坡的发生^[75]。

大量的深海滑坡被证实是水合物分解、气体迁移至浅层导致。Elger等^[76]通过分析北冰洋地区获取的地震剖面数据和数值模拟结果,发现水合物赋存可有效降低沉积物的渗透率,并在天然气水合物稳定带底部形成超压。水力压裂形成管道结构成为超压流体向上流动的通道。当这些管道结构到达上覆弱透水层时,超压便会横向发展,从而破坏斜坡的稳定性(图 12)。Nian等^[77]对天然气水合物分解过程中超压流体释放诱发的海底边坡失稳机制进行了室内试验研究,对不同条件下土体的孔压、土体表层位移和内部变形进行了测量和比较,

图 11 白云滑坡体部滑移区断层作为流体运移通道的地震特征^[64]Fig.11 Seismological characteristics of slip zone faults in Baiyun landslide body as fluid migration channels^[64]

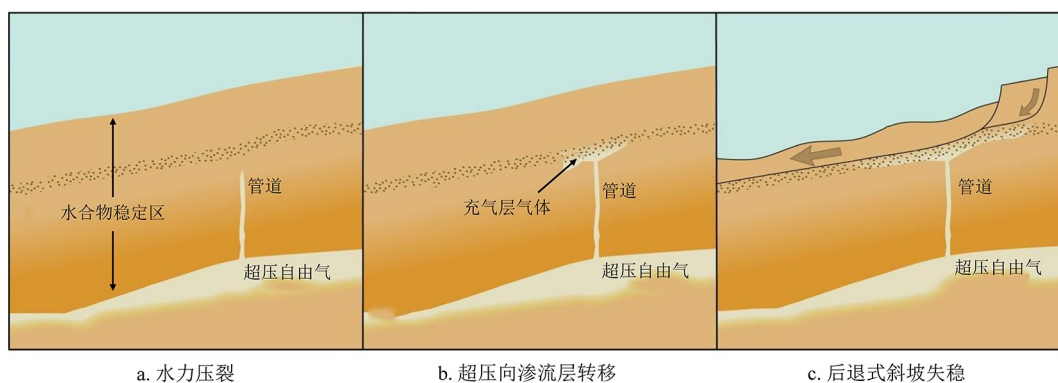


图 12 水合物分解导致海底滑坡模式图^[76]

Fig.12 Model diagram of submarine landslide caused by hydrate decomposition^[76]

分析了不同参数值对土体的孔压、地表位移和内部变形的影响。

最为著名的挪威北海 Storegga 滑坡, 滑坡面积约为 35000 km², 体积高达 3500 km³, 滑移距离约 500 km, 引发海啸涌入苏格兰岛 80 km, 爬高 80 m (图 13)。滑坡区地震剖面资料显示, 存在有明显的 BSR(似海底反射面), 可说明天然气水合物分解作用是该滑坡发生的重要原因。该滑坡共分为 3 个滑动阶段: 第一阶段发生于约 40 ka 前, 滑坡体积量约为 3900 km³; 第二、第三阶段发生于距今 6~8 ka, 滑坡体积量约为 1700 km³。后经多位学者

的证实, 其中至少第二阶段滑坡体失稳是由天然气水合物的长期分解所导致^[78-79]。

随着我国南海珠江口盆地天然气水合物资源勘探工作的开展, 水合物试采区海底面稳定性研究取得了长足进步。从 20 世纪 90 年代至今, 在该区域识别出了大量的海底滑坡。冯文科等^[81]通过对南海北部约 7×10⁴ km² 的海洋工程地质调查资料研究, 发现珠江口盆地有大量海底滑坡分布, 面积达 1000 km²。孙运宝等^[82]发现了大型白云海底滑坡, 初步估算滑坡面积约为 13000 km²。吴时国等^[83]分析了白云海底滑坡的结构特征、地震响应与成因机

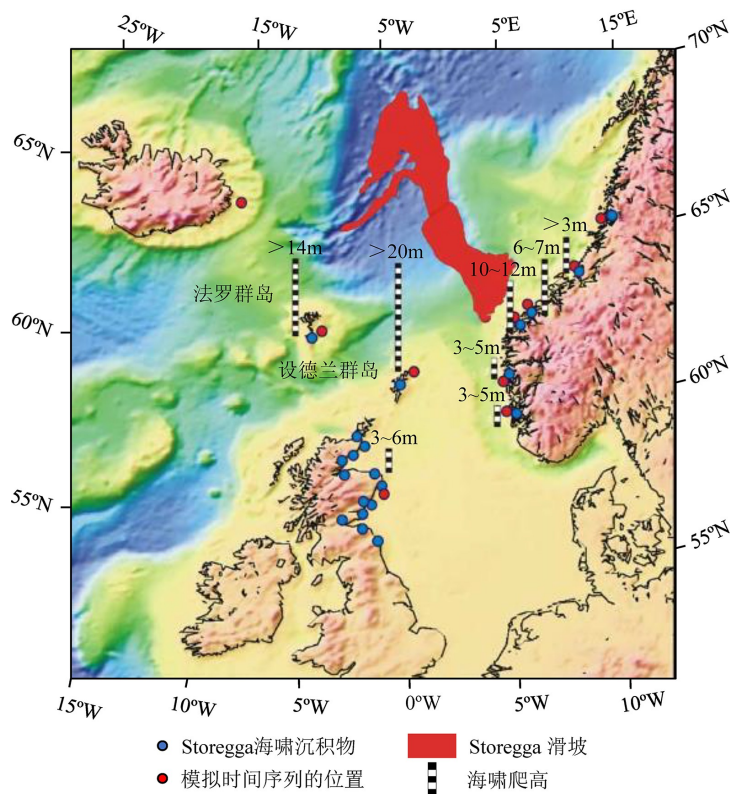


图 13 Storegga 滑坡位置及诱发海啸图^[80]

Fig.13 Storegga landslide location and run-up of tsunami deposits^[80]

制。王磊等^[84]通过对珠江口盆地陆架坡折带位置一处海底滑坡(图14黄色虚线)地震资料分析,认为相对海平面变化和流体活动综合作用是导致该区海底不稳定的主要因素。Zhu等^[85]圈定了南海

北部陆坡珠江口盆地海底巨型滑坡的区域范围(图14白色虚线)。虽然,我国南海水合物试采区的海底面稳定性调查已经取得了显著成果,但对海底失稳的机制揭示还有待深入研究。

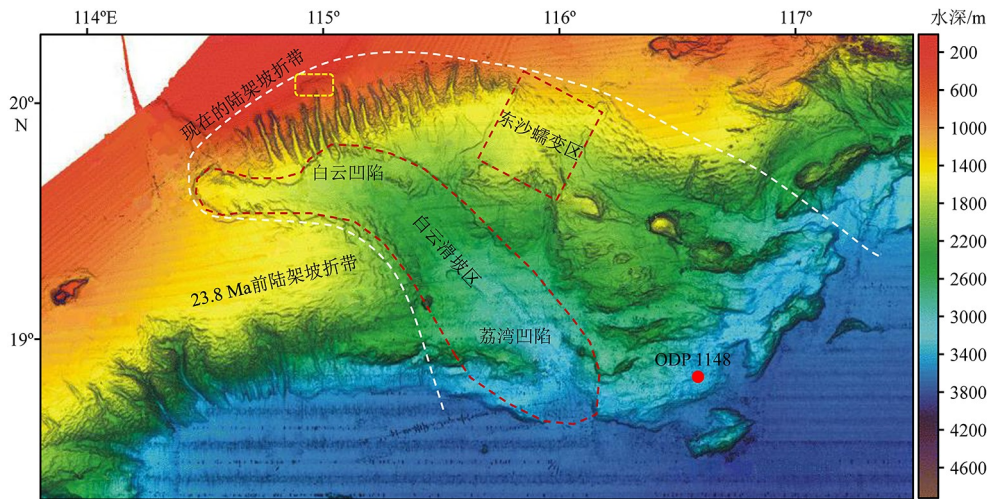


图14 南海北部陆坡滑坡^[85]

Fig.14 Landslide in the northern part of the South China Sea^[85]

5 结论

(1)从20世纪80年代至今,我国关于深海滑坡的研究一直处于初步上升阶段,近十年来,一些新方法的不断涌现,革新了深海滑坡的研究。目前,研究热点已由深海滑坡的形态结构及分类等转移到深海滑坡的触发机制、滑动过程原位观测等方面。

(2)现场调查技术、物理模拟试验和数值模拟试验仍是深海滑坡研究的主要方法手段,ROV/HOV等非常规技术也在逐步应用于深海滑坡的研究中。原位观测技术主要集中于浅海的孔隙水压力观测和海床变形滑动观测,对于深海滑坡观测成功的案例还较少。

(3)深海滑坡的产生通常是由海床内部地质作用和外部水动力作用共同引起,多种触发机制对深海滑坡的耦合作用及新触发机制对深海滑坡的影响仍是未来研究的重点。

参考文献 (References)

- [1] Randolph M F, Gaudin C, Gourvenec S M, et al. Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38 (7): 818-834.
- [2] Thibodeaux L J, Valsaraj K T, John V T, et al. Marine oil fate: Knowledge gaps, basic research, and development needs; A perspective based on the deepwater horizon spill [J]. *Environmental Engineering Science*, 2011, 28 (2): 87-93.
- [3] 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.
- [4] Yuan F, Li L L, Guo Z, et al. Landslide impact on submarine pipelines: Analytical and numerical analysis [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015, 141 (2): 04014109.
- [5] Sultan N, Voisset M, Marsset B, et al. Potential role of compressional structures in generating submarine slope failures in the Niger Delta [J]. *Marine Geology*, 2007, 237 (3-4): 169-190.
- [6] 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 Chaoqi, JIA Yonggang, LIU Xiaolei, et al. Classification and genetic mechanism of submarine landslide: a review [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35 (6): 153-163.]
- [7] Jeong S W, Leroueil S, Locat J. Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46 (9): 1011-1023.
- [8] 董友扣, 马家杰, 王栋, 等. 深海滑坡灾害的物质点法模拟 [J]. *海洋工程*, 2019, 37 (5): 141-147. [DONG Youkou, MA Jiajie, WANG Dong, et al. Investigation of landslide in deep sea using material point method [J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37 (5): 141-147.]
- [9] 汪发武. 地震诱发的高速远程滑坡过程中土结构破坏和土粒子破碎引起的两种不同的液化机理 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27 (1): 98-107. [WANG Fawu. Liquefactions caused by structure collapse and grain crushing of soils in rapid and long runout landslides triggered by earthquakes [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27 (1): 98-

- 107.]
- [10] Heezen B C, Ewing W M. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks [Newfoundland] earthquake [J]. *American Journal of Science*, 1952, 250(12): 849-873.
- [11] 陈自生. 海底滑坡问题的初义[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 154-160 [CHEN Zisheng. A preliminary discussion of the research on submarine landslides[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988: 154-160.]
- [12] PRIOR D B, 金波. 海底滑坡: 形态和命名[J]. 海洋石油, 1983, 3(6): 1-5. [PRIOR D B, JIN Bo. Submarine landslides: morphology and naming [J]. *Offshore Oil*, 1983, 3(6): 1-5.]
- [13] Cruden D M, Varnes D J. Landslide Types and Processes[Z]. Washington: US National Research Council, 1996, 247: 36-75.
- [14] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides [J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34(1): 33-59.
- [15] Bull S, Cartwright J, Huuse M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1132-1151.
- [16] 秦磊, 毛金昕, 倪凤玲, 等. 浅谈深水块体搬运复合体的结构、成因分类以及识别方法[J]. 地球科学进展, 2020, 35(6): 632-642. [QIN Lei, MAO Jinxin, NI Fengling, et al. A brief introduction to deep-water mass-transport complexes: Structures, genetic classifications and identification methods [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(6): 632-642.]
- [17] Varnes D J. Slope movement Types and Processes[Z]. Washington: Transportation Research Board, 1978: 11-33.
- [18] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 9-72.
- [19] Li J, Li W, Alves T M, et al. Different origins of seafloor undulations in a submarine canyon system, northern South China Sea, based on their seismic character and relative location [J]. *Marine Geology*, 2019, 413: 99-111.
- [20] Li W, Alves T M, Wu S G, et al. A giant, submarine creep zone as a precursor of large-scale slope instability offshore the Dongsha Islands (South China Sea) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 272-284.
- [21] 贾永刚, 单红仙. 黄河口海底斜坡不稳定性调查研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(1): 1-5. [JIA Yonggang, SHAN Hongxian. Investigation and study of slope instability of subaqueous delta of modern Yellow River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(1): 1-5.]
- [22] 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 65-72. [WANG Dawei, WU Shiguo, QIN Zhiliang, et al. Architecture and identification of large quaternary mass transport depositions in the slope of South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 65-72.]
- [23] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the petroleum geology of deep-water settings[C]//AAPG Studies in Geology 57. Tulsa: SEPM Special Publication, 2007.
- [24] Shanmugam G, Wang Y. The landslide problem [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 4(2): 109-166.
- [25] 殷坤龙, 韩再生, 李志中. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(5): 1-4. [YIN Kunlong, HAN Zaisheng, LI Zhizhong. Progress of landslide researches in the world [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(5): 1-4.]
- [26] 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, 2017, 47(10): 61-72. [JIA Yonggang, WANG Zhenhao, LIU Xiaolei, et al. The research progress of field investigation and in-situ observation methods for submarine landslide [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 61-72.]
- [27] De Blasio F V, Elverhøi A, Issler D, et al. On the dynamics of subaqueous clay rich gravity mass flows—the giant Storegga slide, Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(1-2): 179-186.
- [28] 周庆杰. 南海北部陆坡白云凹陷区海底滑坡的识别与特征分析[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2015 [ZHOU Qingjie. Identification of submarine landslides and characteristics analysis in the Baiyun Sag of the South China Sea Northern slope[D]. Master Dissertation of the First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2015.]
- [29] McAdoo B G, Pratson L F, Orange D L. Submarine landslide geomorphology, US continental slope [J]. *Marine Geology*, 2000, 169(1-2): 103-136.
- [30] 胡光海. 东海陆坡海底滑坡识别及致滑因素影响研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2010 [HU Guanghai. Identification of submarine landslides along the continental slope of the East China Sea and analysis of factors causing submarine landslides[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2010.]
- [31] 王磊, 吴时国, 李伟. 人机交互地貌解释技术在海底滑坡研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3299-3306. [WANG Lei, WU Shiguo, LI Wei. The application for interactive geomorphologic interpretation technique in research on submarine landslides [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(6): 3299-3306.]
- [32] Harders R, Ranero C R, Weinrebe W, et al. Submarine slope failures along the convergent continental margin of the Middle America Trench [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(6): Q05S32.
- [33] Chen D X, Wang X J, Völker D, et al. Three dimensional seismic studies of deep-water hazard-related features on the northern slope of South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 1125-1139.
- [34] 蓝先洪, 温珍河, 李日辉, 等. 海底地质取样的技术标准[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(2): 50-55. [LAN Xianhong, WEN Zhenhe, LI Rihui, et al. Study on technological standard for submarine geological sampling [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(2): 50-55.]
- [35] 杨慧良, 陆凯, 褚宏亮. 海洋地质地球物理调查技术方法发展趋势探讨[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 1-5. [YANG Huiliang, LU Kai, CHU Hongxian. Future development trend of marine geological and geophysical survey techniques and methods [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(9): 1-5.]
- [36] 朱俊江, 李三忠, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域地质环境综合调查

- 及科学意义[J]. 地球科学, 2020, 45(4): 1416-1426. [ZHU Junjiang, LI Sanzhong, LU Jing'an, et al. Scientific implications and preliminary surveying results of geological and physical oceanography environment in the Shenhu area of the Northern South China Sea [J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1416-1426.]
- [37] 耿雪樵, 徐行, 刘方兰, 等. 我国海底取样设备的现状与发展趋势[J]. 地质装备, 2009, 10(4): 11-16. [GENG Xueqiao, XU Xing, LIU Fanglan, et al. The current status and development trends of marine sampling equipment [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2009, 10(4): 11-16.]
- [38] Yenes M, Monterrubio S, Nespereira J, et al. Apparent overconsolidation and its implications for submarine landslides [J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105375.
- [39] Richards A F, Øten K, Keller G H, et al. Differential piezometer probe for an in situ measurement of sea-floor [J]. Géotechnique, 1975, 25(2): 229-238.
- [40] Bennett R H. Pore-water pressure measurements: Mississippi delta submarine sediments [J]. Marine Geotechnology, 1977, 2(1-4): 177-189.
- [41] Sultan N, Cattaneo A, Sibuet J C, et al. Deep sea in situ excess pore pressure and sediment deformation off NW Sumatra and its relation with the December 26, 2004 Great Sumatra-Andaman Earthquake [J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(4): 823-837.
- [42] Sultan N, Marsset B, Ker S, et al. Hydrate dissolution as a potential mechanism for pockmark formation in the Niger delta [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115(B8): B08101.
- [43] 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.
- [44] Yokoyama T, Shimoyama M, Matsuda S, et al. Monitoring system for seafloor deformation during methane hydrate production test[C]//Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium. Szczecin, Poland: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013: 132-135.
- [45] Stenvold T, Eiken O, Zumberge M, et al. High-precision relative depth and subsidence mapping from seafloor water-pressure measurements [J]. SPE Journal, 2006, 11(3): 380-389.
- [46] Wallace L M, Webb S C, Ito Y, et al. Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand [J]. Science, 2016, 352(6286): 701-704.
- [47] 贾永刚, 王振豪, 刘晓磊, 等. 海床侧向变形与滑动观测装置及方法: 中国, 201510717982.0[P]. 2016-02-03 [JIA Yonggang, WANG Zhenhao, LIU Xiaolei, et al. Seabed deformation observation device and method: CN, 201510717982.0[P]. 2016-02-03.]
- [48] 邓检良, 张向霞. 基于旋转水槽试验的水下泥石流底部水压研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1000-1006. [DENG Jianliang, ZHANG Xiangxia. Study on water pressure at bottom of subaqueous debris flow in rotating flume test [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1000-1006.]
- [49] Wang F W, Dai Z L, Nakahara Y, et al. Experimental study on impact behavior of submarine landslides on undersea communication cables [J]. Ocean Engineering, 2018, 148: 530-537.
- [50] Liu T, Lu Y Y, Zhou L, et al. Experiment and analysis of submarine landslide model caused by elevated pore pressure [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(5): 146.
- [51] Fan N, Nian T K, Jiao H B, et al. Evaluation of the mass transfer flux at interfaces between submarine sliding soils and ambient water [J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 108069.
- [52] Gue C S. Submarine landslide flows simulation through centrifuge modelling[D]. Doctor Dissertation of University of Cambridge, 2012.
- [53] 孙柏涛. 海底滑坡的离心模型试验研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2014 [SUN Baitao. Centrifuge modeling test on submarine landslides[D]. Master Dissertation of Dalian University of Technology, 2014.]
- [54] 霍沿东, 年廷凯, 焦厚滨, 等. 基于极限分析上限方法的海底斜坡地震稳定性[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 408-414. [HUO Yandong, NIAN Tingkai, JIAO Houbin, et al. Seismic stability of submarine clay slopes based on upper bound approach [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 408-414.]
- [55] 施家杰, 张巍, 厉成阳, 等. 水合物分解诱发能源土滑坡的物质点法模拟[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1164-1171. [SHI Jiajie, ZHANG Wei, LI Chengyang, et al. Simulation of energy soil landslide induced by hydrate dissociation using material point method [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1164-1171.]
- [56] 朱晨光, 刘春, 许强, 等. 滑坡滑带摩擦热离散元数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 651-658. [ZHU Chenguang, LIU Chun, XU Qiang, et al. Discrete element numerical simulation research on friction heat in sliding zone of the landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 651-658.]
- [57] 马林伟, 吴时国. 海底滑坡过程的分段模拟研究[C]//第十五届全国安全地球物理专题研讨会论文集. 张掖, 2019: 57-61 [MA Linwei, WU Shiguo. Subsection simulation of submarine landslide process[C]// Proceedings of the 15th National Security Geophysics Symposium. Zhangye, 2019: 57-61.]
- [58] Mi Y, Wang J H. Finite-element modeling of submarine landslide triggered by seismic loading in saturated cohesive soil deposits [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(2): 951-965.
- [59] Locat J, Lee H J. Submarine landslides: advances and challenges [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 193-212.
- [60] Hance J J. Development of a database and assessment of seafloor slope stability based on published literature[D]. Master Dissertation of the University of Texas at Austin, 2003.
- [61] Prior D B, Coleman J M. Active slides and flows in underconsolidated marine sediments on the slopes of the Mississippi Delta[M]//Saxov S, Nieuwenhuis J K. Marine Slides and Other Mass Movements. NATO Conference Series, vol. 6. Boston, MA: Springer, 1982: 21-49.
- [62] Cartwright J, Huuse M, Aplin A. Seal bypass systems [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(8): 1141-1166.
- [63] Sun Q L, Wu S G, Cartwright J, et al. Shallow gas and focused fluid flow systems in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Marine Geology, 2012, 315-318: 1-14.
- [64] 李伟. 南海北部海底滑坡的地震特征及成因分析[D]. 中国科学院

- 研究生院(海洋研究所)硕士学位论文, 2013 [LI Wei. Seismic characteristics and trigger mechanisms of submarine landslides in northern South China Sea[D]. Master Dissertation of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2013.]
- [65] Fryer G J, Watts P, Pratson L F. Source of the great tsunami of 1 April 1946: a landslide in the upper Aleutian forearc [J]. *Marine Geology*, 2004, 203 (3-4): 201-218.
- [66] Ide S, Baltay A, Beroza G C. Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Science*, 2011, 332 (6036): 1426-1429.
- [67] Fujiwara T, Kodaira S, No T, et al. The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis [J]. *Science*, 2011, 334 (6060): 1240.
- [68] Nian T K, Guo X S, Zheng D F, et al. Susceptibility assessment of regional submarine landslides triggered by seismic actions [J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 93: 101964.
- [69] Chigira M, Yagi H. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan [J]. *Engineering Geology*, 2006, 82 (4): 202-221.
- [70] Ripmeester J A, Tse J S, Ratcliffe C I, et al. A new clathrate hydrate structure [J]. *Nature*, 1987, 325 (6100): 135-136.
- [71] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges [J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1633-1652.
- [72] Xu W Y, Germanovich L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2006, 111 (B1): B01104.
- [73] Max M D, Clifford S M. The state, potential distribution, and biological implications of methane in the Martian crust [J]. *Journal of Geophysical Research:Planets*, 2000, 105 (E2): 4165-4171.
- [74] Handwerger A L, Rempel A W, Skarbek R M. Submarine landslides triggered by destabilization of high-saturation hydrate anomalies [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18 (7): 2429-2445.
- [75] Li X P, He S M. Progress in stability analysis of submarine slopes considering dissociation of gas hydrates [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66 (3): 741-747.
- [76] Elger J, Berndt C, Rüpke L, et al. Submarine slope failures due to pipe structure formation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 715.
- [77] Nian T K, Song X L, Zhao W, et al. Submarine slope failure due to overpressure fluid associated with gas hydrate dissociation [J]. *Environmental Geotechnics*, 2020: 1-16.(
- [78] Bouriaik S, Vanneste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway [J]. *Marine Geology*, 2000, 163 (1-4): 125-148.
- [79] Glasby G P. Potential impact on climate of the exploitation of methane hydrate deposits offshore [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20 (2): 163-175.
- [80] Bondevik S, Løvholt F, Harbitz C, et al. The Storegga Slide tsunami—comparing field observations with numerical simulations [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22 (1-2): 195-208.
- [81] 冯文科, 石要红, 陈玲辉. 南海北部大陆架和上陆坡海底滑坡稳定性研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14 (2): 81-94. [FENG Wenke, SHI Yaohong, CHEN Linghui. Research for seafloor landslide stability on the outer continental shelf and the upper continental slope in the northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14 (2): 81-94.]
- [82] 孙运宝, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28 (6): 69-77. [SUN Yunbao, WU Shiguo, WANG Zhijun, et al. The geometry and deformation characteristics of Baiyun submarine landslide [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28 (6): 69-77.]
- [83] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54 (12): 3184-3195. [WU Shiguo, QIN Zhiliang, WANG Dawei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the northern continental slope of the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54 (12): 3184-3195.]
- [84] 王磊, 吴时国, 李清平, 等. 珠江口盆地陆架坡折带海底滑坡及其影响因素 [J]. *海洋科学*, 2016, 40 (5): 131-141. [WANG Lei, WU Shiguo, LI Qingping, et al. Submarine slides and influencing factors in the continental shelf break area of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Sciences*, 2016, 40 (5): 131-141.]
- [85] Zhu C Q, Cheng S, Li Q P, et al. Giant submarine landslide in the South China Sea: Evidence, causes, and implications [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7 (5): 152.