

海底不稳定性研究进展及展望

高伟健^{1,2,3}, 李伟^{1,2,3*}

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 2. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海底不稳定性及次生海底地质灾害广泛存在于海洋之中, 对海岸港口设施、海洋钻井平台、海底管道光缆等海底基础设施建设颇具威胁。但目前对海底不稳定性的成因机制与主控因素仍知之甚少, 为加深对海底不稳定性的认识, 本文回顾了海底不稳定性研究进展, 梳理了海底不稳定性及次生海底地质灾害的主要类别、全球分布情况和地球物理识别特征, 归纳了目前海底不稳定性研究的定量分析方法, 进一步分析了其成因机制、控制因素及工程地质灾害风险, 探讨了海底陆坡失稳演化过程试验模拟技术的适用范畴与技术瓶颈。最后, 从海底不稳定性的致灾机理研究、多源数据智能分析和海底失稳立体监测 3 个维度提出了未来海底不稳定性研究的发展方向与对策建议, 以为海底不稳定性的模拟、预测和预警等工作提供指导性建议。

关键词: 海底不稳定性; 海底地质灾害; 成因机制; 风险评估; 不稳定性分析

中图分类号: P736.22 **文献标识码:** A

Progress and Prospect of Seafloor Instability Research

Gao Weijian^{1,2,3}, Li Wei^{1,2,3*}

(1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Seafloor instability and secondary submarine geohazards are widely present in the ocean, posing a threat to submarine infrastructures such as coastal port facilities, offshore drilling platforms, and submarine pipelines and fiber-optic cables. However, formation mechanisms and controlling factors of seafloor instability are still poorly understood. To improve the understanding, based on the history and development of seafloor instability, this study sorts out the common categories, global distribution, and geophysical characteristics, analyzes the formation mechanisms, controlling factors, and engineering geohazards risks, and summarizes popular quantitative analysis methods for seafloor instability. Subsequently, the application and limitations of experimental simulation technology for the slope instability process are discussed. Focused on the disaster mechanism, intelligent analysis of multi-source data, and three-dimensional monitoring of seabed instability, this study proposed the development direction and countermeasures of future seafloor instability research, aiming to provide guiding suggestions for the simulation, prediction, and warning of seafloor instability.

Keywords: seafloor instability; submarine geohazards; formation mechanisms; risk assessment; instability analysis

收稿日期: 2023-03-28; **修回日期:** 2023-05-06

通讯作者: *李伟, 中国科学院南海海洋研究所研究员, 研究方向为海底地质灾害; E-mail: wli@scsio.ac.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); 广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515020016)

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

一、前言

海洋约占地球表面面积的70%，蕴含了极为丰富的资源^[1]。近年来，我国深入开发和综合利用海洋资源，海洋工程设施建设和油气开采作业日益繁盛，但也面临着因逐年递增的海底不稳定性现象及其次生海底地质灾害所带来的风险和挑战。海底不稳定性指存在于海底及海底以下浅部的各种地貌因素和地质结构，在一定触发因素下具备发生土体位移、海底失稳等破坏性灾害的潜力^[2]。海底不稳定性是海洋环境中普遍存在的现象^[3]，从近岸浅水区、大陆架、大陆坡到深海平原都存在海底不稳定的迹象，会对海洋建筑及海洋设施带来损害和破坏；海底不稳定性是导致各种海底沉积物变形和海床厚度变化的原因，在某些海区是海底沉积物自浅水陆架向深水海盆输运的主导因素^[4]。

1897年，就有研究者记录了1616—1886年由于地震、火山爆发等引发的333次海底陆坡失稳事件^[5]，而针对海底不稳定性的系统性研究可以追溯到1974年，如美国在密西西比河水下三角洲展开的研究^[6,7]。海底不稳定性会引起海床坍塌、地基破坏、海底变形以及海底沉积物失稳，破坏海洋工程设施，并有可能诱发海啸，带来生命财产损失。海底失稳通常会在大陆边缘诱发一系列相关的海底地质灾害，包括浅层气、天然气水合物分解、海底泥火山、海底麻坑、海底蠕变和海底滑坡等。这些海底不稳定性及次生海底地质灾害的存在制约了海洋工程的建设、运行和维护等，使海洋工程设施建设和运营成本显著增加，极大地削减了长周期海洋工程的服务寿命，直接危害海上作业人员的生命安全。为此，关于海底不稳定性的致灾效应分析和灾害风险评估逐渐成为研究焦点^[8]。

海底不稳定性多发育在水下，其成因机制及演化模式与陆上边坡失稳存在显著差异，但碍于调查的困难程度和资金问题，一直以来研究进展缓慢。近年来，得益于地球物理探测技术和海底原位观测等新兴探测技术的涌现^[9]，实现了大范围、高空间分辨率的海底地貌和地质结构的高效获取，推动了海底不稳定性研究的发展。鉴于海底不稳定性隐蔽性较强、次生海底地质灾害破坏力较大、致灾机理与灾害风险仍不明确，正确识别与监测这些海底不稳定性地质现象及其次生海底地质灾害，并预测其

致灾潜力，对确保油气钻探开采、海底管线铺设以及其他海洋工程设施建设安全至关重要。

为建立并丰富海底不稳定性综合研究领域体系，本文就世界范围内的海底不稳定性及其次生海底地质灾害的特征与实例进行综述，分析海底不稳定性的成因机制、控制因素和演化模式，阐明目前海底不稳定性的工程地质风险，总结海底不稳定性的定量分析方法，展望海底不稳定性未来的重点研究方向，以期为后续海底不稳定性研究提供参考和借鉴。

二、海底不稳定性及次生海底地质灾害

海底地质灾害指在自然因素或人为活动作用下导致的，或有可能进一步发育的无法控制的灾害地质现象，对沿海工程环境和人类生命财产构成极大威胁^[10]。海底不稳定性是诱发与海洋工程建设及深水油气开采极为相关的海底浅地层地质灾害的主要因素。由于海底表层土体由强度非常低或不完全固结的各种土层构成，土体中孔隙水和孔隙压力较大，在地震或波浪载荷作用下极易发生海底失稳，进而破坏离岸工程结构。不同海域的海底不稳定性及次生海底地质灾害的表现形式既有相似之处，也存在着诸多差异。一般而言，海底滑坡是大陆边缘最严重的海底失稳现象之一；其余主要的海底失稳现象包括浅层沉积物变形（如泥火山、麻坑和海底蠕变等）、浅层气和天然气水合物分解，这些大多属于灾害地质因素^[11]。鉴于海底不稳定性及次生海底地质灾害在破坏失稳前隐蔽性较强，有必要针对分布范围极广、破坏性极大的海底失稳现象的识别特征、控制因素和工程地质风险展开具体分析（见表1）。

（一）浅层气

浅层气通常指在深度不超过1000 m的海底地层中局部聚集的天然气^[12]，是一种较为常见的地质现象。浅层气在沿海地区分布广泛，如美国墨西哥湾、波罗的海、波斯湾、英国北海、加勒比海、我国东海和我国南海等^[13]。根据浅层气气源的形成机制，可分为生物成因气和热成因气。甲烷是浅层气的主要组成成分^[14,15]。地层内聚集的甲烷气体可以从原生沉积物向上迁移，在海底产生渗漏，进一步发育成海底麻坑或在海水中形成气体羽状流（见图1）。

表1 海底不稳定性及次生海底地质灾害分类

类型	种类
具备活动能力的破坏性海底地质灾害	砂土液化、浅层气、天然气水合物分解、海底坍塌、海底塌陷、海底麻坑、海底蠕变、海底滑坡、浊流、泥底辟、活断层、泥火山、海底沟槽、海底陡坎、活动水下沙波
不具备活动能力的限制性海底地质条件	不规则的埋藏基岩面、埋藏古河道、凹凸地、蚀余地形、洼坑、非移动沙丘、沙波

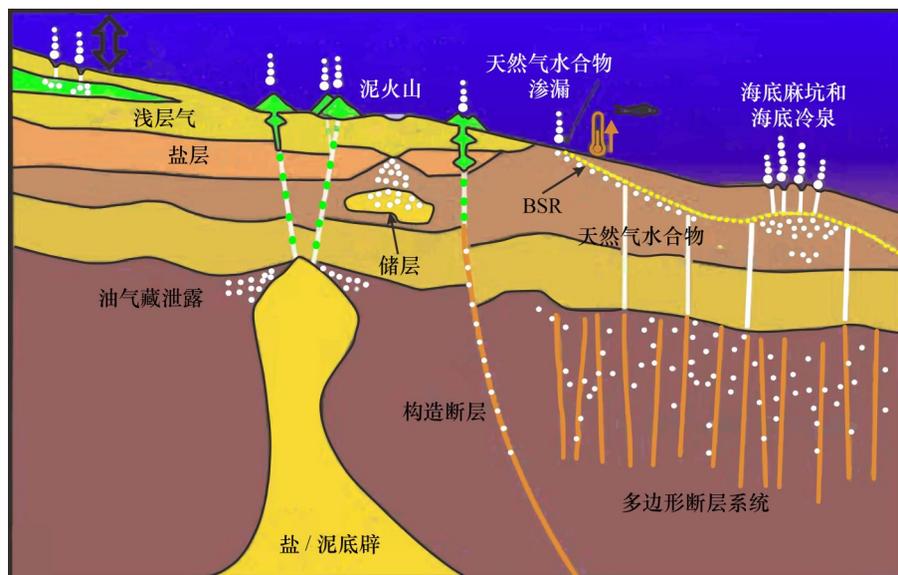


图1 受流体活动影响的海底不稳定性现象示意图

注：BSR表示似海底反射。

地震勘探和声学探测已被广泛用于浅层气调查。由于含气沉积物可有效地吸收和散射声波能量，导致声波振幅在含气沉积物内部沿垂向迅速衰减^[14,16]。因此，地震剖面中的浅层气通常显示为声学异常反射，包括浊反射、空白反射、增强反射、亮点反射和地震反射同相轴速度下拉等，并常常与海底泥火山、麻坑和天然气水合物等伴生。已有研究揭示了全新世地层厚度、地层渗透性和水深在控制浅层气生成和聚集方面起着关键作用，这是由于较厚的细粒全新世沉积物具有较高的有机物丰度，在合适的环境条件下能够提供更多的甲烷气源^[17]。

长期以来，浅层气一直威胁着沿海工程设施与海上钻井平台的安全。沉积物中的气体改变了土体的力学性质，含浅层气的沉积物具有高压缩性、低抗剪切强度等特征^[18]。浅层气的存在使沉积物中孔隙水压力增加，结构变松，破坏了土质原始稳定性，减小了基底支撑力。沉积物液化可能发生在极

端事件中（如台风、地震），此时含气沉积物会发生蠕变，可能导致地层下陷、侧向或旋转滑动。浅层气释放后，将产生相对较大的沉降量，导致地基下沉或失稳，极易出现局部塌陷，造成海上施工平台倾覆。此外，浅层气泄露将显著加速全球变暖，目前在向大气排放的甲烷总量中约有20%来自浅海。

（二）天然气水合物分解

天然气水合物是一种似冰状的固态化合物，由水分子和天然气分子在低温、高压条件下结合而成，俗称“可燃冰”^[19]。由于相平衡条件和地温梯度的限制，自然界的天然气水合物分布区的特点为稳定的高压低温环境、充足的气源供给、良好的气体运移通道和水源^[20]。天然气水合物孕育和赋存的热力学条件一般为：在海洋内，海水深度大于1200 m、海床厚度为300 m以内、地层温度为0~15℃；在陆地冻土带，深度介于200~1100 m、地层温度为

-10~10 °C^[21]。天然气水合物分布广、储量大且能量密度高，被认为是21世纪最重要的非常规能源之一，受到了广泛关注，其最终目标是实现天然气水合物的商业化开采。

天然气水合物填充替代了沉积物孔隙中的流体，使沉积地层的弹性力学性质发生了改变，因此，可基于地震剖面来描述、反演和刻画天然气水合物的分布及特征参数。指示天然气水合物存在的地震特征主要有BSR、空白反射、振幅随偏移距的变化(AVO)和速度异常等^[22]。现有的常规海域天然气水合物地震识别技术包括BSR特征分析与识别技术、地震属性分析与提取技术、速度结构识别和天然气水合物饱和度估算技术等^[23]。天然气水合物结构具有可变性，一旦天然气水合物储层的温压环境发生变化，在地震、火山等构造事件，全球气候变化，海平面下降和陆坡沉积物快速堆积等控制因素作用下，天然气水合物就有可能发生分解和气化，诱发海底不稳定性^[24]。

一般认为，天然气水合物在储层中具备很强的胶结作用，可以提高沉积物的整体强度和刚度。然而，随着天然气水合物逐渐分解，其饱和度逐渐下降，导致储层沉积物强度和有效应力大大降低。有研究指出^[25]，若分解2.9%的天然气水合物，沉积物的硬度将下降25%；若分解15%的天然气水合物，沉积物的硬度将降低80%，同时，天然气水合物的分解会释放大量的水和甲烷气体（见图1）。研究发现，体积为1 cm³的天然气水合物分解后可产生164 cm³的气体，产生高达50 MPa的孔隙水压力，形成孔隙超压，影响地层内应力场分布^[26]，而这将引发诸如井眼不稳定、出砂、海底沉降和滑坡等地质力学问题，破坏海底管道、线缆等设施。天然气水合物分解还会降低陆坡稳定性，引发储层沉降、海底下陷、滑坡等一系列地质灾害，如Storegga海底滑坡、Gisborne海底滑坡、Agadir盆地海底滑坡、Amazon海底滑坡和Cape海底滑坡都不同程度的与天然气水合物分解有关^[27]。

（三）泥火山 / 泥底辟

泥火山最早被定义为流体、气体和固体物质的混合物从沉积盖层深处“周期性”的喷出过程^[28]，近年来科学界对泥火山逐渐形成了新的认识。泥底辟作为一种地层内的侵入结构，其特征是富含黏土

的沉积物和流体缓慢向上迁移，当其携带的地下含流体物质沿泥底辟主体或上覆断层迁移并喷溢至地表或海底时，将逐渐堆积形成具有中央喷口的似火山状地质构造，即为泥火山^[29]。泥火山也被认为是泥底辟作用的最终发育阶段。泥火山和泥底辟通常发育在挤压构造环境为主的增生楔地区，包括但不限于里海、黑海、巴伦支海、地中海及巴巴多斯近海、尼日利亚近海、墨西哥湾、Nankai海槽、我国南海北部（如琼东南盆地）及东海等^[30]。泥火山和泥底辟是一种十分重要的地下流体聚集、流动系统，有助于将流体（泥浆、石油和盐水）、气体（甲烷、其他烷烃、CO₂、H₂S、N₂等）和泥质沉积物从约20 km的深部地层迁移至地球表面^[31]。

海底泥火山及泥底辟中向上喷溢的塑性流体通常和相对致密的围岩存在着显著的声学性质差异，因此，可以通过浅地层剖面或高分辨率地震资料对泥火山与泥底辟进行精准识别^[32]。在地震剖面中，泥火山一般表现为声学模糊或杂乱的空白反射带，且空白反射带大多呈柱状、圆顶状、烟囱状或蘑菇状等似火山状外形，两侧和顶部具有明显的增强振幅反射。泥火山对周围沉积物和地层反射同相轴有拖拽拉升作用，其抬升作用导致两侧沉积地层表现为叠置结构^[30]。泥火山和泥底辟的成因机制与演化模式相近，即地层内密度反转的动力体系将孕育垂向的差异重力，差异重力作用促使地壳深部密度较小的高塑性欠压实泥页岩发生上侵和上拱现象，使得上覆岩层弯曲隆起（泥底辟）或刺穿上覆地层薄弱带（泥火山）而形成的一种正向地质构造^[33]。泥火山一般发育在快速沉积的欠固结沉积物层序中，丰富的含气泥质地层具备较高的生烃潜力，可以提供充足的物源供给，容易在地层内部形成超孔隙流体压力^[34]。挤压的构造应力环境被认为是泥火山发育的另一主要驱动力，其必要的触发机制包括构造运动、断层活动和地震作用等。

陆上和海洋的诸多地区都发现过天然气和石油的渗漏现象，它们赋存于不同的地质环境中^[33]，包括活动大陆边缘、被动大陆架和深海，而大规模渗漏系统的分布往往和泥火山紧密相关。泥火山的存在可以表明区域内曾发生过油气的生成、运聚和泄露，泥火山还可以充当深部油气与浅部天然气水合物连接的通道，是深水油气和天然气水合物成藏评价的重要依据^[35]。泥火山导致深海沉积物向海洋和

大气中排放了巨量的甲烷，是全球碳循环的重要组成部分，能加剧温室效应和气候变化。大陆边缘陆坡区的泥火山具备诱发海底失稳的潜力，进而影响深水油气钻井施工和海底管道铺设^[36]。

（四）海底麻坑

海底麻坑是由于海底流体（孔隙流体和地下水等）和烃类气体（主要为甲烷）通过运移通道向海底缓慢渗漏或快速喷发，不断剥蚀海底松散沉积物而形成的近圆形凹陷地貌^[37]。1970年，在加拿大斯科舍（Scotian）大陆架进行海底油气勘查时，借助侧扫声呐首次发现了海底麻坑地貌^[37]。通过同位素示踪法证实了麻坑是由海底甲烷渗漏发育形成的^[38]，可以作为评价过去与现今海底流体活动的指示物。海底麻坑在<10 m的浅水环境和约5000 m的深水环境均有发现，包括但不限于海湾、大陆架、大陆坡和深水平原等。通过运用地震勘探技术、海洋声学探测技术和水下摄影技术等，揭示了海底麻坑大多发育在特殊地质环境区域中，包括油气开采区、河口和沿海地区、地下水流域、海底地震频发区以及存在热液活动的湖泊等^[39]。

由于海底麻坑的发育和地层流体渗漏过程息息相关，因此在地震剖面上，麻坑底部常常与气烟囱相接。海底麻坑之下一般因深部气体充填而在浅地层形成火山口状、丘状、穹窿状、蘑菇状和圆锥状等空白反射区或声浑浊带（见图1），指示声学屏蔽特征，空白反射带两翼多与反映浅层气聚集的增强反射相连，最下部可能发育泥底辟等构造^[40]。麻坑可能是孤立的、成簇状排列的或聚集的，由于底流侵蚀作用，海底麻坑通常呈圆形及不对称的椭圆形、拉长形、新月形，麻坑大小受流体渗漏通量、地层岩性以及近海底沉积物的厚度和结构所影响^[41]。地层内局部异常流体超压是海底麻坑发育的关键，而快速沉积的欠压实沉积物、良好的沉积盖层和流体运移通道（断层、沉积边界、不整合面和地层薄弱面）也是不可或缺的重要条件。地层内流体的热增压作用、活动断层作用以及频繁的地震、潮汐和海平面变化引发的静水压力改变是海底麻坑发育的主要触发因素^[42]。

了解海底麻坑的起源、发育和分布是至关重要的。海底麻坑在油气田上方大量存在，可以被用作油气聚集的指示物。另外，通过麻坑逸散的气体可

能导致海底局部岩化并形成甲烷衍生的碳酸盐建造，碳酸盐建造和凹陷地形可能会阻碍输油管道和海底电缆的铺设。麻坑的存在表明该区域内海床不稳定，因为流体渗漏会导致诸多海底失稳现象。此外，麻坑还可以充当地下水活动、陆坡失稳和海底不稳定性的潜在指示物，为海底滑坡稳定性监测提供重要信息^[43]。墨西哥湾的自升式钻井平台倾倒后形成了一个宽500 m、深12 m的凹坑，事件期间观察到大量气体泄露^[44]，这也表明，麻坑通常预示着浅层气的存在，有助于浅层气井喷风险评估和海上工程设施选址。

（五）海底蠕变

海底蠕变是在重力荷载驱动下发生的缓慢的、持续的、长期不可逆转的下坡沉积物运动与变形，其相间排布的地形隆起、沟槽与海底不稳定性有关，是海底沉积物受到挤压而蠕变形成的^[44,45]。海底蠕变在全球诸多海域大陆坡均有记录，广泛发育在主/被动大陆边缘的富黏性土海底，是陆架-陆坡系统的重要组成部分^[46]。目前主要的研究区大多集中在北半球，如以色列近海、加拿大波弗特海、巴芬岛廷金峡湾、韩国东海、地中海、马尔马拉海、里海、南海北部及东南部等^[45,47,48]。海底蠕变的形成演化与构造作用、重力作用、风暴作用以及区域沉积作用等关系密切，记录了丰富的海洋地质学、海洋沉积学和海盆构造演化方面的信息，对海底地形地貌塑造、沉积物搬运和再沉积研究具有重要意义^[45,48]。

海底蠕变的识别特征不同于沉积物波等海底起伏地貌（见表2）。在多波束测深数据中，海底蠕变一般以隆起和沟槽交替出现的海底起伏为特征，隆起的脊线大多与等深线近平行，连续性较好、延伸较长且少有交叉，形态变化无明显规律^[49]。在地震剖面中显示隆起的两翼沉积物厚度基本相同，无上坡迁移特征、地层内部反射同相轴被断层切断而不连续，随地层深度增加海底起伏尺度和规模无明显减小趋势^[45,49]。海底蠕变多见于峡谷群和陆坡区，发育地层坡度通常位于1~7°，其形成演化受地层岩性与坡度、高沉积速率、深部流体运移、天然气水合物分解、断层活动、相对温和且频繁的地震以及自身重力荷载等诸多因素影响^[45,48]。

海底蠕变产生的海底起伏是浅层沉积物变形与

表2 海底蠕变的全球分布、地形地貌特征与内部地质结构

海域	地形地貌特征与内部地质结构
土耳其马尔马拉海 ^[48]	沟槽近平行于等深线, 隆起侧翼坡度可达40°, 其高度随水深增加而增大
里海 ^[50]	隆起较宽且顶部平坦, 沟槽较窄, 其形态变化无规律
地中海 ^[51]	细长状海底隆起近平行排布, 顶部较为尖锐, 头部无断层
法国阿基坦陆缘 ^[52]	地层内部发育铲式正断层, 表面形态光滑
加拿大波弗特海 ^[53]	地层内部发育同沉积正断层和构造反转, 存在流体活动
韩国东海 ^[54]	地层反射连续, 厚度约为60~90 m, 隆起的幅度沿下坡方向增加, 沟槽与生长断层相关
南海东南部 ^[55]	头部区域可见铲式正断层和泥底辟, 起伏地层和生长断层伴生
南海神狐海域 ^[49,56]	蠕变地层发育在峡谷头部和脊部, 内部见铲式正断层, 起伏地形呈不规则变化, 隆起近平行于等深线
南海东沙海域 ^[45]	隆起近平行于等深线, 两翼等厚, 无上坡迁移特征, 沟槽无交叉, 地层发育铲式正断层与内部断层

重力荷载差异分布的表征, 也是海底陆坡倾于发生破坏失稳的前奏和指示。尽管海底蠕变滑移速率很慢 (约 10 cm/a), 但受地震、构造抬升和火山活动等因素的影响将持续发育, 最终可能演变为大规模的海底滑坡^[53]。南海北部东沙群岛西南陆坡海底蠕变区紧邻天然气水合物试采区、荔湾 3-1 深水气田等重大海洋工程活动区, 海底蠕变导致的海底不稳定性 (如海底滑坡) 给附近海域的海洋石油钻井平台带来了潜在的安全风险, 如利用地球物理数据和数值模拟方法, 对南海北部蠕变区海底陆坡失稳破坏后具备诱发大规模海啸的潜力进行了分析^[57]。因此, 准确圈定海底蠕变区可为大规模油气资源开采、海洋工程设施选址、海底管线电缆铺设、军事工程活动及沿海海啸预警等提供参考依据, 对提升海洋地质灾害防控水平、促进海洋经济发展具有重要意义。

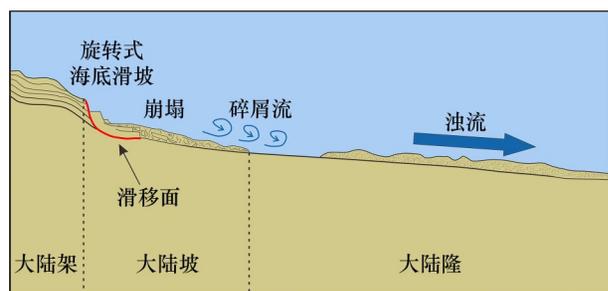
(六) 海底滑坡

海底滑坡指海底未固结的松软沉积物在重力作用下, 沿软弱层向下坡方向发生垮塌、滑塌和碎屑流的过程及其产物^[58-60]。海底滑坡几乎发生在全球所有的外陆架、大陆坡至深海平原区域, 包括挪威海、地中海、日本海、墨西哥湾和南海等^[61]。海底滑坡覆盖了各种地质构造环境, 如被动和主动大陆边缘、河流供给的前三角洲、火山岛及侧翼区域、冰川、沉积物匮乏的大陆边缘和海峡等^[62]。海底滑坡一般比陆地滑坡大几个数量级, 且可能发育在坡度极低的大陆坡上 (<2°)。目前, 已发现的最大海底滑坡波及范围超过 10 000 km² 的海底, 搬运了约 1000 km³ 的沉积物。一些众所周知的巨型海底滑坡

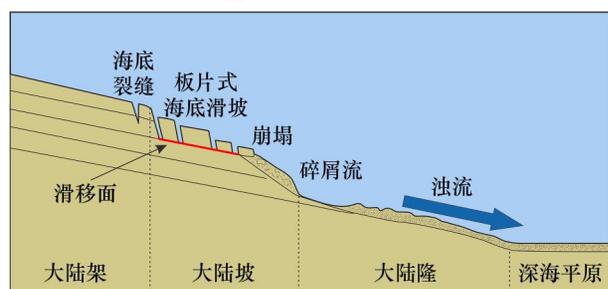
包括 Storegga 滑坡、Trænjuppt 滑坡、Hinlopen 滑坡、白云滑坡以及 Sahara 滑坡^[63-65]。在重力驱动下, 海底滑坡与其演化成的浊流可以流经很远的距离, 能够来自大陆架和大陆坡地区的大量 (>100 km³) 沉积物输送到深海^[64], 重新塑造海床并影响后续的沉积过程, 发育广泛的漂积体沉积, 可见明显侵蚀特征, 进而控制深水环境中砂粒的分布。因此, 海底滑坡及其诱发的密度流是将泥沙从陆坡运往深海的重要过程。

高分辨率的地球物理数据是识别海底滑坡的主要手段。海底滑坡在地震剖面上一般表现为杂乱至透明的地震相, 表明滑塌沉积物混合均匀, 具有典型的碎屑流地震反射特征^[66,67]。一般将海底滑坡划分为头部物源区、体部滑移区和趾部挤压区, 在不同部位表现出拉张或挤压的构造特征。由于海洋环境错综复杂, 海底滑坡的成因机制与陆上滑坡存在众多差异, 海底滑坡发育的内在条件有沉积物的类型、沉积物的饱和度、地形条件 (坡度) 和软弱层等^[68]。除此之外, 还有一些触发因素可能会降低海底陆坡的稳定性, 如地震活动、高沉积速率、火山喷发、削峭作用、侵蚀、差异压实、泥底辟、火山隆升、人类活动、流体活动、超孔隙压力、天然气水合物分解、气体泄露和海平面变化等^[69]。

海底滑坡主要存在两种滑移形式, 即旋转式滑坡和板片式滑坡 (见图 2), 前者通常伴随海底陆坡的滑塌过程, 后者则与地层内部的沿层滑动面息息相关^[70,71]。世界上最大的 Storegga 海底滑坡的发育坡度约为 0.7°, 但滑坡体波及范围超过 95 000 km²。已有研究^[64,71]在西非的 Agadir 和 Sahara 大型海底滑坡中均识别出了多期次的沿层滑动面, 并表现出阶



(a) 旋转式海底滑坡



(b) 板片式海底滑坡

图2 海底滑坡模式图

梯状发育特征，即每一级滑动面上的沉积物能够独自发生滑动，但又可以相互叠加、互相影响。沿层滑动面一般发育在地层内部的软弱层上，软弱层的抗剪切强度显著低于围岩的沉积层，在滑坡发育过程中最先破裂，能够促使板片式滑坡的发育与演化。软弱层主要由硅藻软泥层、高含量蒙脱石和快速沉积的火山灰等组成。此外，流体的沿层横向运移能够降低软弱层的抗剪切强度，有助于其在滑坡过程中优先破裂^[72]。

随着海洋油气资源的深入开发利用以及大洋光缆通信需求的日益增加，作业场区和工程建设逐渐向深水区发展。由于海底滑坡（特别是板片式滑坡）规模巨大、覆盖范围广、滑移速度高（高达20 m/s），一旦发生，可能会破坏重要的海洋基础工程设施，如通信电缆和油气钻井平台，并可能产生破坏性海啸，对沿海人民安全和社会经济发展造成巨大危害^[73]。例如，在加拿大海域 Grand Banks 的海底滑坡（1929年）^[74]、印度尼西亚苏门答腊岛沿海由于海底地震和海底滑坡共同作用带来的巨大海啸（2004年）^[75]、吕宋海峡的海底电缆因海底滑坡带来多次通信中断（2006年、2009年和2010年）^[76]。因此，关于海底滑坡等海底不稳定性的致灾效应和灾害评价研究逐渐引发广泛关注。

三、海底不稳定性的分析方法

有关海底不稳定性的定量研究主要聚焦于海底陆坡稳定性分析，这是由于倾斜陆坡的变形监测是反映海底失稳的最直接指标，且海底陆坡稳定性对于海上平台和海底管线等重大工程的选址和建设至关重要。目前被广泛应用的海底陆坡稳定性评价方法主要包括：极限平衡法、数值分析法、概率法和物理模拟。

（一）极限平衡法

极限平衡法是应用时间最长、应用面最广泛的监测海底陆坡稳定性的定量分析方法之一，其理论基础为：当满足摩尔-库伦准则的陆坡沉积物抗剪强度降低到一定程度时，陆坡处于临界失稳状态，地层内将发育潜在滑移面，而沿潜在滑移面的抗剪强度和实际剪应力之间的比值即为极限平衡状态下陆坡的安全系数，当安全系数大于1时，可认为海底陆坡是稳定的^[77]。极限平衡法始于1915年提出的黏性土土坡的整体圆弧滑动法^[77]，存在多种改进的极限平衡法分析方法，包括Janbu法、Bishop法、Morgenstern-Price法、Sarma法和基于塑性力学的上限分析法等^[78]。已有研究运用极限平衡法对美国密西西比河三角洲研究区^[79]的无限长海底陆坡模型的稳定性进行了分析，发现其触发因素为一阶波浪荷载；基于极限分析上限方法分析了海底陆坡在地震荷载下的稳定性^[80]。

当前，极限平衡法一般用于衡量海底陆坡的不稳定性，但是在工程实践中应用极限平衡法时一般人为假定海底陆坡处于极限平衡状态，而忽略了海底陆坡在受力和发育过程中的内部形变，将其视为二维问题分析；加之假设的滑移面与实际地质条件中三维的、不规则的滑移面存在显著差异，不易复现海底陆坡失稳滑移的真实状况。因此，该方法对于海底陆坡的稳定性评价与实际仍存在一定差距。

（二）数值分析法

数值分析法以描述陆坡不稳定性导致的海底滑坡的内部应力场、应变特征本构模型为基础，对其变形过程和稳定性进行定量解释，并能够获取海底失稳时的临界滑动面与安全系数等。较常用的数值分析法包括有限元法（DFE）、有限差分法（FDM）、

离散元法 (DEM)、计算流体动力学 (CFD)、耦合欧拉-拉格朗日法 (CEL) 以及不连续变形分析法 (DDA) 等^[81]。

大变形有限元法 (LDFE) 可以模拟海底滑坡前期的土体变形运动情况, 或者重现海底滑坡软弱层中滑移面的产生、扩展、滑动破坏以及停止过程, 并确定滑坡边界范围。例如, 基于不排水抗剪强度和应变软化模型, 使用 LDFE 方法模拟具有软弱黏土层的海底陆坡失稳过程^[82]。采用宾汉 (Bingham) 流变模型的 CFD 法可以很好地预测海底滑坡滑动距离、滑坡体厚度和滑动速度^[83]。DEM 法可以反映真实土颗粒之间的相互作用, 从颗粒尺度认识土体发生非连续变形与流动的微观机理, 弥补了 DFE、边界元法的介质连续和小变形的限制^[84]。CFD-DEM 耦合模型能够较好地模拟海底黏性滑坡体的中小尺度运动演化行为, 实现海底陆坡滑移失稳过程的模拟^[85]。目前, 尽管海底陆坡稳定性评价技术得到进一步发展, 但针对其运动演化过程的数值分析仍以模拟滑坡运动过程中的某一演化阶段为主。构建海底陆坡失稳演化的全过程数值模拟技术, 是未来研究工作的重点。

(三) 概率法

影响海底陆坡不稳定性的因素众多, 如超孔隙水压力、天然气水合物的分解、长期波浪荷载和地震活动等, 而潜在的失稳破坏机制仍未得到充分揭示。已有研究表明, 基于极限平衡法的安全系数并不能充当衡量陆坡失稳风险的适宜指标, 主要是由于土体性质差异, 因为具有相同安全系数值的两个陆坡可能具有不同的失稳概率。土体性质评估主要存在 3 个不确定性, 即地质过程引发的空间变异性、仪器的测量误差以及测量数据与设计参数耦合的不确定性^[86]。考虑到海底陆坡和陆上边坡在坡度大小、失稳规模、地貌类型和岩土工程性质 (海洋陆坡沉积物一般为高含水量、高压缩性、高孔隙率和低抗剪强度) 等方面差异明显^[87], 加之海底沉积物物性参数获取困难, 特别是深水区域的地质取样、地球物理勘察等技术难度较大, 成本较高, 因此, 一些研究提出了考虑沉积物岩土力学参数随机分布的概率法, 又称可靠度分析法, 以代替极限平衡法和数值分析法等确定性方法来更准确地评价海底陆坡的稳定性。

可靠度分析法来自结构工程领域, 在 20 世纪 70 年代用于边坡稳定性分析^[88]。可靠度分析法以概率统计法为理论基础, 将海底陆坡的稳定性问题视为一个随机过程, 综合考虑陆坡稳定性分析中的土体性质、载荷及分布、沉积物界面、边界条件与计算模型等不确定因素, 以土体抗剪强度的均值和标准差来表示土体性质的离散性^[89]。可靠度分析法包括一次二阶矩法 (FOSM)、一阶可靠度法 (FORM)、蒙特卡罗法、响应面方法 (RSM) 等^[90]。采用上述方法的研究有: 采用 FOSM 法、点估计方法和 RSM 法并结合 DFE 法对海底陆坡进行的可靠性分析^[91]; 使用包含 FORM 方法、蒙特卡罗法和贝叶斯概率框架对地震荷载下海底陆坡的破坏概率进行估算^[92]; 利用 RSM 法和改进的自由面元方法, 对南海北部典型海底陆坡断面进行的稳定性分析^[87]。由于传统的可靠度分析法在海底不稳定评价中大多只将沉积物物理力学参数视为随机变量, 对于复杂荷载作用下 (如浅层气逸散、天然气水合物分解和泥火山作用等) 的海底失稳机理、破坏过程、滑动特性及其对海洋设施的致灾效应等问题未作讨论, 有必要结合概率分析框架作进一步研究。此外, 可靠度分析法中超大尺寸和高分辨率的多维随机场计算时的效能优化问题仍亟待解决。

(四) 物理模拟

物理模拟是通过将海底实际地质现象的缩小模型置于实验室内, 在满足基本相似条件 (包括几何、质量、运动、动力和边界条件) 的基础上, 模拟海底真实地质过程的方法, 并使用多类型传感器和测量设备来记录其应力场分布及破坏失稳细节。由于海底失稳现象发生于复杂的海洋地质环境中, 发生频率极不确定, 难以通过地球物理探测手段和原位监测方法捕捉到失稳全过程, 物理模拟容易控制、便于重复、应用广泛且形象直观, 可进行较全面和规律性的实验, 因此物理模拟方法逐渐成为研究海底失稳过程的重要手段之一^[93]。鉴于相似条件无法完全满足, 选取恰当的相似参数是提高物理模拟实验准确性, 并深入揭示海底陆坡失稳机理的关键。而物理模拟得来的实验数据可以用来创建计算机数值模型, 并用于预测地质过程的未来演变规律^[94]。水槽试验和离心模拟试验是当下针对海底不稳定性研究的两类主要的物理实验方法。水槽试验

是在沉积物和地质体自身重力荷载下进行的模拟研究；离心模拟试验则依托于土工离心机来补偿模型尺寸变化所带来的自重应力损失，让实验室模型的应力水平尽可能与实际地质模型相近。

关于物理模拟的相关研究有，通过水槽模型试验，分析海底滑坡运动过程中水体密度的变化，反映海底滑坡质量运移的过程^[95]；Zakeri研究了富黏土海底陆坡失稳对海底管道的冲击力和破坏性^[96]；Nian等阐明了由水合物分解引起的海底陆坡失稳，讨论了黏土层厚度、砂层厚度、黏土不排水强度和注水速率对海底滑坡破坏模式的影响，并建立了水合物分解条件下海底陆坡安全系数的计算方法^[94]。相较于上述基于实验室水槽的物理模拟，离心模拟实验能更好地展现陆坡土体的重力效应。例如，胡光海利用土工离心机建立地质模型，厘清了海底陆坡含气土体失稳的破坏模式和失稳机制^[97]，Acosta等研究了海底沉积物类型和含水量对海底不稳定性的影响^[98]，Zhang等发现了高孔隙压力、黏土局部剪切破坏和陆坡坡度是诱发海底滑坡的关键因素^[99]。综上，物理模拟实验在剖析海底不稳定性（如海底蠕变和海底滑坡等）的影响因素和失稳机理方面发挥着关键作用，进一步开展超大型精细物理模拟实验是十分必要的。

四、海底不稳定性的未来展望

目前，国内外针对海底不稳定性的研究取得了较大进步，实现了从定性描述到定量分析的转变，但仍然面临诸多挑战与难点，如数据缺乏与质量低下、模型精度与适用性有限、影响因素复杂多变、次生海底地质灾害致灾因子不明确等。为了充分揭示海底不稳定性的成因机制、控制因素与致灾效应，建立和健全海底不稳定性预警减灾系统，保障海洋工程设施安稳建设与永续应用，服务新时期海洋经济社会体系构建。面向未来，今后的重点研究方向如下。

(1) 加强物理-数值模拟相结合的耦合研究。当前有关海底不稳定性的研究大多局限于物理模拟或数值模拟某一方面，考虑到物理模拟的尺度效应难以避免，数值模型的参数选取与真值存在较大差异，可以考虑将物理模拟和数值模拟的结果进行双向耦合和对比分析，提高模拟工作的可靠性和准确

性，进一步揭示海底地质灾害的发生机制和特征。充分阐明海底不稳定性成因机制便于揭示其致灾因素与灾害链生效应，进而采取更加科学有效的灾害预警和防灾减灾措施，为海洋工程统筹建设保驾护航。

(2) 开发大数据与人工智能融合的综合数据分析方法。综合分析沉积物采样资料、地球物理探测资料与海底钻探资料可以显著提高工程地质评价的准确性。在理想条件下，地球物理探测资料可以圈定海底不稳定区域的范围和地层厚度，沉积物采样和钻孔资料可以提供失稳区沉积物的物理力学性质。为此，今后需充分利用机器学习、人工智能和大数据融合技术对获取的多源、多场数据进行深入分析，为海底不稳定性的地形地貌监测、运动学特征分析以及次生海底地质灾害预警提供关键技术支撑，确保海洋工程平台和关键海洋设施的长期服役，强化战略性矿产、油气资源的规划与开发。

(3) 搭建基于“空天地海”技术的海底不稳定性长周期立体监测云平台（见图3）。由于海底不稳定性发生时间的不确定性和水下原位监测的高成本，目前针对海底不稳定性演化过程的实时监测案例较少。因此，迫切需要开发一套长期服务、多参数协同观测的海底不稳定性原位监测系统，实现对海底沉积物各项指标的长期观测。目前，已经利用“空天地海”技术建立了完备的陆上山体滑坡监测预警网络，今后需要完成由陆地向海洋的技术跨越，建立海底不稳定性长周期立体监测云平台，推

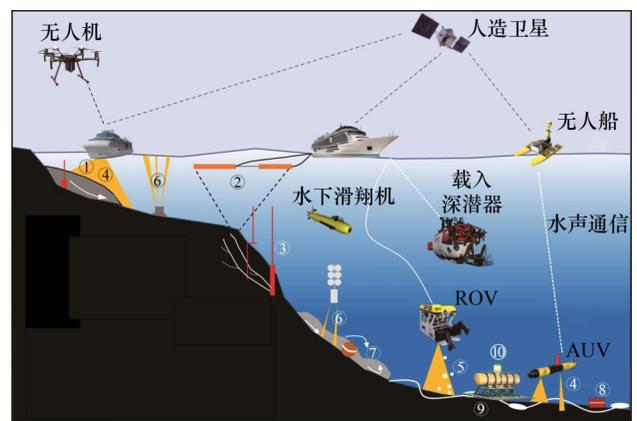


图3 海底不稳定性的地球物理探测和原位监测设备

注：①表示单波束水深测量；②表示浅地层探测；③表示孔隙压力原位监测；④表示多波束水深测量；⑤表示多波束水柱成像与岩土取样；⑥表示声学多普勒海流断面仪；⑦表示移动式海底探测设备；⑧表示海底地震仪；⑨表示分布式应变探测器；⑩表示深海原位实验室。

动海洋资源的深入开发和海洋工程设施综合保护, 助力于培育海洋新兴产业, 服务于国家产业结构调整, 支持海洋经济发展。

五、结语

海底不稳定性现象在世界范围内广泛分布, 本文详细列举了海底不稳定性现象所导致的海底地质灾害类型, 包括浅层气、天然气水合物分解、泥火山/泥底辟、麻坑、海底蠕变和海底滑坡等, 并针对这些海底不稳定性及次生海底地质灾害给出了其明确的学术定义, 归纳了全球分布规律, 总结了基于地球物理探测资料的关键识别特征, 分析了主要的成因机制、控制因素与演化模式, 揭示了潜在的致灾效应与工程地质风险, 并对海底不稳定性定量分析方法的应用特点与适用场景进行了综合探讨。

海底不稳定性具备强隐蔽性、高危害性和长周期性等多种特征, 其形成、发育和演化过程往往受到多种内在地质条件与外部触发因素的共同影响, 涉及岩石圈、水圈、大气圈和生物圈之间的相互作用关系, 成因机制异常复杂。不同的海底不稳定性现象之间既存在着多样化识别特征和差异化致灾机理, 又具备着共通的触发因素和演化机制。海底不稳定性现象往往容易导致一系列链式灾害问题, 诱发灾变级联效应(如管道破坏油气泄漏, 造成海洋污染)。因此, 有必要加强对海底不稳定性灾害链的监测与评估, 关注不同失稳类型的个性问题和潜在灾害链的共性问题, 提升对海底不稳定性的发育规模、发生频率、时空尺度和动力学过程的科学认知, 以扎实有效地降低海底不稳定性对海洋工程设施建设与深水油气开采所带来的危害性。因此, 针对海底不稳定性开展基于物理-数值模拟相结合的致灾机理融合研究, 利用大数据与人工智能进行多源数据智能分析, 建设海底不稳定性长周期立体监测云平台, 保障我国“21世纪海上丝绸之路”建设。

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: March 28, 2023; **Revised date:** May 6, 2023

Corresponding author: Li Wei is a research fellow from the South China Sea Institute of Oceanology of Chinese Academy of Sciences. His major research field is submarine geological hazards. E-mail: wli@scsio.ac.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); Guangdong Provincial Foundation for Basic and Applied Basic Research (2020B151502016)

参考文献

- [1] 周守为, 李清平, 朱海山, 等. 海洋能源勘探开发技术现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 19–31.
Zhou S W, Li Q P, Zhu H S, et al. The current state and future of offshore energy exploration and development technology [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2): 19–31.
- [2] Zhang Y L, Zhao Y, Yuan Z X. Effect of seabed instability on pile soil pressure [J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1624(4): 042071.
- [3] Barends F, Spierenburg S. Interaction between ocean waves and sea-bed [C]. Yokohama: The International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development: Theory and Practice on Soft Ground, 1991.
- [4] Rahman A, De Vernal A. Surface oceanographic changes in the eastern Labrador Sea: Nannofossil record of the last 31, 000 years [J]. Marine Geology, 1994, 121(3–4): 247–263.
- [5] Saxov S. Marine slides—Some introductory remarks [J]. Marine Slides and Other Mass Movements, 1982, 6: 1–7.
- [6] Prior D B, Coleman J M. Active slides and flows in underconsolidated marine sediments on the slopes of the Mississippi Delta [J]. Marine Slides and Other Mass Movements, 1982, 6: 21–49.
- [7] 胡光海, 刘忠臣, 孙永福, 等. 海底斜坡土体失稳的研究进展 [J]. 海岸工程, 2004, 23(1): 63–72.
Hu G H, Liu Z C, Sun Y F, et al. Advances in the research on sediment failure on submarine slope [J]. Coastal Engineering, 2004, 23(1): 63–72.
- [8] Guo X S, Nian T K, Wang Z T, et al. Low-temperature rheological behavior of submarine mudflows [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2020, 146(2): 04019043.
- [9] 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 landslide [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 61–72.
- [10] Vanneste M, Madshus C, Socco V L, et al. On the use of the Norwegian Geotechnical Institute’s prototype seabed-coupled shear wave vibrator for shallow soil characterization-I. Acquisition and processing of multimodal surface waves [J]. Geophysical Journal International, 2011, 185(1): 221–236.
- [11] Carpenter G B, Mccarthy J C. Hazards analysis on the Atlantic outer continental shelf [C]. Houston: The Offshore Technology Conference, 1980.
- [12] Fleischer P, Orsi T, Richardson M, et al. Distribution of free gas in marine sediments: A global overview [J]. Geo-Marine Letters, 2001, 21: 103–122.
- [13] Chen Y, Deng B, Zhang J. Shallow gas in the Holocene mud wedge along the inner East China Sea shelf [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 114: 104233.

- [14] Hovland M, Judd A G. Seabed pockmarks and seepages: Impact on geology, biology and the marine environment [M]. London: Graham & Trotman London, 1988.
- [15] Hu Y, Li H D, Xu J. Shallow gas accumulation in a small estuary and its implications: A case history from in and around Xiamen Bay [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(24): 1–6.
- [16] Coughlan M, Roy S, O'sullivan C, et al. Geological settings and controls of fluid migration and associated seafloor seepage features in the north Irish Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104762.
- [17] Flury S, Røy H, Dale A W, et al. Controls on subsurface methane fluxes and shallow gas formation in Baltic Sea sediment (Aarhus Bay, Denmark) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 188: 297–309.
- [18] Zhou Q K, Sun Y F, Song Y P, et al. Distribution of shallow gas at an offshore platform site in Bohai Bay and its genetic mechanism [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2–3): 298–304.
- [19] Sloan Jr E D, Koh C A. Clathrate hydrates of natural gases [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [20] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(4): 12–19.
Yao B C. Preliminary study on gas hydrate in northern continental margin of South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(4): 12–19.
- [21] 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1641–1650.
Wu N Y, Yang S X, Wang H B, et al. Gas-bearing fluid influx system for gas hydrate geological system in Shenhu Area, Northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1641–1650.
- [22] 景鹏飞, 胡高伟, 卜庆涛, 等. 天然气水合物地球物理勘探技术的应用及发展 [J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(5): 2046–2064.
Jing P F, Hu G W, Bu Q T, et al. Application and development of geophysical technology in gas hydrate exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(5): 2046–2064.
- [23] 宋海斌, 耿建华, Wang H K, 等. 南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究 [J]. *地球物理学报*, 2001, 44(5): 687–695.
Song H B, Geng J H, Wang H K, et al. A preliminary study of gas hydrates in Dongsha region north of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 687–695.
- [24] 吴时国, 姚根顺, 董冬冬, 等. 南海北部陆坡大型气田区天然气水合物的成藏地质构造特征 [J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 324–328.
Wu S G, Yao G S, Dong D D, et al. Geological structures for forming gas hydrate reservoir in the huge deepwater gas field of the northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 324–328.
- [25] Priest J, Sultaniya A, Clayton C. Impact of hydrate formation and dissociation on the stiffness of a sand [C]. Edinburgh: The 7th International Conference on Gas Hydrates, 2011.
- [26] Briaud J L, Chaouch A. Hydrate melting in soil around hot conductor [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(7): 645–653.
- [27] Hunt J E. Determining the provenance, recurrence, magnitudes and failure mechanisms of submarine landslides from the Moroccan Margin and Canary Islands using distal turbidite records [D]. Southampton: University of Southampton (Doctoral dissertation), 2012.
- [28] Planke S, Svensen H, Hovland M, et al. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan [J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23: 258–268.
- [29] Kopf A J. Significance of mud volcanism [J]. *Reviews of geophysics*, 2002, 40(2): 1–52.
- [30] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, 35(1): 75–86.
He J X, Zhu Y H, Weng R N, et al. Characters of north-west mud diapirs volcanoes in South China Sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas [J]. *Earth Science*, 2010, 35(1): 75–86.
- [31] Judd A, Hovland M. Seabed fluid flow: The impact of geology, biology and the marine environment [M]. Oxford: Great Britain at the Alden Press, 2007.
- [32] Chen S C, Hsu S K, Wang Y, et al. Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92: 201–214.
- [33] Dimitrov L I. Mud volcanoes—The most important pathway for degassing deeply buried sediments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59(1–4): 49–76.
- [34] Talukder A R, Bialas J, Klaeschen D, et al. High-resolution, deep tow, multichannel seismic and sidescan sonar survey of the submarine mounds and associated BSR off Nicaragua pacific margin [J]. *Marine Geology*, 2007, 241(1–4): 33–43.
- [35] Franek P, Mienert J, Buenz S, et al. Character of seismic motion at a location of a gas hydrate-bearing mud volcano on the SW Barents Sea margin [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(8): 6159–6177.
- [36] Wan Z, Luo J, Yang X, et al. The thermal effect of submarine mud volcano fluid and its influence on the occurrence of gas hydrates [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(6): 832.
- [37] King L H, Maclean B. Pockmarks on the Scotian shelf [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, 81(10): 3141–3148.
- [38] Hovland M, Talbot M R, Qvale H, et al. Methane-related carbonate cements in pockmarks of the North Sea [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(5): 881–892.
- [39] Hovland M, Gardner J V, Judd A. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards [J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 127–136.
- [40] Ercilla G. Gas-charged sediments and large pockmark-like features on the Gulf of Cadiz slope (SW Spain) [J]. *Marine and Petroleum geology*, 1996, 13(2): 253–261.
- [41] Baltzer A, Ehrhold A, Rigolet C, et al. Geophysical exploration of an active pockmark field in the Bay of Concarneau, southern Brittany, and implications for resident suspension feeders [J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34: 215–230.
- [42] Riboulot V, Imbert P, Cattaneo A, et al. Fluid escape features as relevant players in the enhancement of seafloor stability? [J]. *Terra Nova*, 2019, 31(6): 540–548.

- [43] Cox D R, Knutz P C, Campbell D C, et al. Geohazard detection using 3D seismic data to enhance offshore scientific drilling site selection [J]. *Scientific Drilling*, 2020, 28: 1–27.
- [44] Faugères J C, Gonthier E, Mulder T, et al. Multi-process generated sediment waves on the Landes Plateau (Bay of Biscay, North Atlantic) [J]. *Marine Geology*, 2002, 182(3–4): 279–302.
- [45] Li W, Alves T M, Wu S, 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.
- [46] Cattaneo A, Correggiari A, Marsset T, et al. Seafloor undulation pattern on the Adriatic shelf and comparison to deep-water sediment waves [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1–4): 121–148.
- [47] Hill P, Moran K, Blasco S. Creep deformation of slope sediments in the Canadian Beaufort Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 1982, 2: 163–170.
- [48] Shillington D J, Seeber L, Sorlien C C, et al. Evidence for wide-spread creep on the flanks of the Sea of Marmara transform basin from marine geophysical data [J]. *Geology*, 2012, 40(5): 439–442.
- [49] Putans V A, Merklin L R, Levchenko O V. Sediment waves and other forms as evidence of geohazards in Caspian Sea [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2010, 20(4): 1–4.
- [50] Fernández-Salas L, Lobo F, Sanz J, et al. Morphometric analysis and genetic implications of pro-deltaic sea-floor undulations in the northern Alboran Sea margin, western Mediterranean Basin [J]. *Marine Geology*, 2007, 243(1–4): 31–56.
- [51] Gonthier E, Cirac P, Faugeres J, et al. Instabilities and deformation in the sedimentary cover on the upper slope of the southern Aquitaine continental margin, north of the Capbreton canyon (Bay of Biscay) [J]. *Scientia Marina*, 2006, 70(1): 89–100.
- [52] Saint-Ange F, Kuus P, Blasco S, et al. Multiple failure styles related to shallow gas and fluid venting, upper slope Canadian Beaufort Sea, northern Canada [J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 136–149.
- [53] Lee S, Chough S, Back G, et al. Chirp (2–7 kHz) echo characters of the South Korea Plateau, East Sea: Styles of mass movement and sediment gravity flow [J]. *Marine Geology*, 2002, 184(3–4): 227–247.
- [54] 王龙樟, 姚永坚, 林卫兵, 等. 南海南部沉积物波: 软变形及其触发机制 [J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3462–3470.
Wang L Z, Yao Y J, Lin W B, et al. Sediment waves in the south of South China Sea: Soft sediment deformation and its triggering mechanism [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3462–3470.
- [55] Qiao S, Su M, Kuang Z, et al. Canyon-related undulation structures in the Shenhu area, northern South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2015, 36: 243–252.
- [56] 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.
- [57] Sun Q, Leslie S. Tsunamigenic potential of an incipient submarine slope failure in the northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112: 104111.
- [58] Li W, Alves T M, Rebesco M, et al. The Baiyun Slide Complex, South China Sea: A modern example of slope instability controlling submarine-channel incision on continental slopes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104231.
- [59] 王大伟, 吴时国, 李春峰, 等. 晚中新世红河断裂走滑反转事件的海底滑坡证据 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(10): 1349–1357.
Wang D W, Wu S G, Li C F, et al. Submarine slide evidence for late Miocene strike-slip reversal of the Red River Fault [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(10): 1349–1357.
- [60] Wu S, Wang D, Völker D. Deep-sea geohazards in the South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17: 1–7.
- [61] Mosher D C, Campbell D, Gardner J, et al. The role of deep-water sedimentary processes in shaping a continental margin: The Northwest Atlantic [J]. *Marine Geology*, 2017, 393: 245–259.
- [62] 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.
- [63] Huhn K, Arroyo M, Cattaneo A, et al. Modern submarine landslide complexes: A short review [J]. *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles*, 2019, 246: 181–200.
- [64] Li W, Alves T M, Urlaub M, et al. Morphology, age and sediment dynamics of the upper headwall of the Sahara Slide Complex, Northwest Africa: Evidence for a large Late Holocene failure [J]. *Marine Geology*, 2017, 393: 109–123.
- [65] 王大伟, 吴时国, 吕福亮, 等. 南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(5): 14–19.
Wang D W, Wu S G, Lyu F L, et al. Mass transport deposits and its significance for oil & gas exploration in deep-water regions of South China Sea [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(5): 14–19.
- [66] Li W, Wu S, Völker D, et al. Morphology, seismic characterization and sediment dynamics of the Baiyun Slide Complex on the northern South China Sea margin [J]. *Journal of the Geological Society*, 2014, 171(6): 865–877.
- [67] 吴时国, 陈珊珊, 王志君, 等. 大陆边缘深水海底滑坡及其不稳定性风险评估 [J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 430–437.
Wu S G, Chen S S, Wang Z J, et al. Submarine landslide and risk evaluation on its instability in the deepwater continental margin [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 430–437.
- [68] Locat J, Leroueil S, Locat A, et al. Weak layers: Their definition and classification from a geotechnical perspective [J]. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 2014, 37: 3–12.
- [69] Urgeles R, Camerlenghi A. Submarine landslides of the Mediterranean Sea: Trigger mechanisms, dynamics, and frequency-magnitude distribution [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(4): 2600–2618.
- [70] Smith D E, Harrison S, Jordan J T. Sea level rise and submarine mass failures on open continental margins [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 82: 93–103.
- [71] Li W, Krastel S, Alves T M, et al. The Agadir Slide offshore NW Africa: Morphology, emplacement dynamics, and potential contribution to the Moroccan Turbidite System [J]. *Earth and Planetary*

- Science Letters, 2018, 498: 436–449.
- [72] Song J, Alves T, Omosanya K, et al. Tectonic evolution of strike-slip zones on continental margins and their impact on the development of submarine landslides (Storegga Slide, northeast Atlantic) [J]. Geological Society of America Bulletin, 2020, 132(11–12): 2397–2414.
- [73] 朱彬. 基于可靠度理论的海床稳定性分析及评价方法 [D]. 大连: 大连理工大学(博士学位论文), 2021.
Zhu B. Analysis and evaluation method of seabed stability based on reliability theory [D]. Dalian: University of Technology (Doctoral dissertation), 2021.
- [74] Mosher D C, Piper D J. Analysis of multibeam seafloor imagery of the Laurentian Fan and the 1929 Grand Banks landslide area [J]. Submarine Mass Movements and Their Consequences, 2007, 27: 77–88.
- [75] Harbitz C B, Løvholt F, Pedersen G, et al. Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides: A short review [J]. Norwegian Journal of Geology / Norsk Geologisk Forening, 2006, 86(3): 255–264.
- [76] Hsu S K, Kuo J, Lo C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2008, 19(6): 767–772.
- [77] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577–596.
- [78] Fellenius W. Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen [M]. California: W. Ernst & Sohn, 1927.
- [79] Henkel D. The role of waves in causing submarine landslides [J]. Géotechnique, 1970, 20(1): 75–80.
- [80] 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 Y D, Nian T K, Jiao H B, et al. Seismic stability of submarine clay slopes based on upper bound approach [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 408–414.
- [81] Shan Z, Wu H, Ni W, et al. Recent technological and methodological advances for the investigation of submarine landslides [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(11): 1–16.
- [82] Dey R, Hawlader B, Phillips R, et al. Numerical modelling of submarine landslides with sensitive clay layers [J]. Géotechnique, 2016, 66(6): 454–468.
- [83] Gauer P, Kvalstad T J, Forsberg C F, et al. The last phase of the Storegga Slide: Simulation of retrogressive slide dynamics and comparison with slide-scar morphology [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(1–2): 171–178.
- [84] Shire T, O’Sullivan C. Micromechanical assessment of an internal stability criterion [J]. Acta Geotechnica, 2013, 8: 81–90.
- [85] Jiang M, Sun C, Crosta G B, et al. A study of submarine steep slope failures triggered by thermal dissociation of methane hydrates using a coupled CFD-DEM approach [J]. Engineering Geology, 2015, 190: 1–16.
- [86] Phoon K K, Retief J V. Reliability of geotechnical structures in ISO 2394 [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [87] Zhu B, Pei H, Yang Q. An intelligent response surface method for analyzing slope reliability based on Gaussian process regression [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(15): 2431–2448.
- [88] Wu T H, Kraft Jr L M. Safety analysis of slopes [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(2): 609–630.
- [89] 马云. 南海北部陆坡区海底滑坡特征及触发机制研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学(博士学位论文), 2014.
Ma Y. Study of submarine landslides and trigger mechanism along the continental slope of the northern South China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China (Doctoral dissertation), 2014.
- [90] Zhang J, Huang H, Juang C, et al. Extension of Hassan and Wolff method for system reliability analysis of soil slopes [J]. Engineering Geology, 2013, 160: 81–88.
- [91] Yang S, Nadim F, Forsberg C F. Probability study on submarine slope stability [J]. Submarine Mass Movements and Their Consequences, 2007, 27: 161–170.
- [92] Rodríguez-Ochoa R, Nadim F, Hicks M A. Influence of weak layers on seismic stability of submarine slopes [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 247–268.
- [93] 王星星, 王英民, 高胜美, 等. 深水重力流模拟研究进展及对海洋油气开发的启示 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 588–602.
Wang X X, Wang Y M, Gao S M, et al. Advancements of the deep-water gravity flow simulations and their implications for exploitation of marine petroleum [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 588–602.
- [94] Nian T K, Wu H, Li D Y, et al. Experimental investigation on the formation process of landslide dams and a criterion of river blockage [J]. Landslides, 2020, 17: 2547–2562.
- [95] Mohrig D, Ellis C, Parker G, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows [J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(3): 387–394.
- [96] Zakeri A, Høeg K, Nadim F. Submarine debris flow impact on pipelines—Part I: Experimental investigation [J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1209–1218.
- [97] 胡光海. 东海陆坡海底滑坡识别及致滑因素影响研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学(博士学位论文), 2010.
Hu G H. Identification of submarine landslides along the continental slope of the East China Sea and analysis of factors causing submarine landslides [D]. Qingdao: Ocean University of China (Doctoral dissertation), 2010.
- [98] Acosta E A, Tibana S, De Almeida M D S S, et al. Centrifuge modeling of hydroplaning in submarine slopes [J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 451–458.
- [99] Zhang J H, Wang Z B, Zhao H, et al. Multi-scale CFD simulation of hydrodynamics and cracking reactions in fixed fluidized bed reactors [J]. Applied Petrochemical Research, 2015, 5: 255–261.