



海底滑坡典型特征及石油地质学意义

张云山, 吴南, 贾永刚, 尉建功

Characteristics of submarine landslides and their implications for petroleum geology

ZHANG Yunshan, WU Nan, JIA Yonggang, and WEI Jianguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022052001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义

Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 138

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

海洋地质与第四纪地质的结合

Marine geology and Quaternary geology: A combination

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 1

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张云山, 吴南, 贾永刚, 等. 海底滑坡典型特征及石油地质学意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 94-104.

ZHANG Yunshan, WU Nan, JIA Yonggang, et al. Characteristics of submarine landslides and their implications for petroleum geology[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 94-104.

海底滑坡典型特征及石油地质学意义

张云山^{1,2}, 吴南³, 贾永刚^{1,4}, 尉建功^{5,6}

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. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 三亚 572000
3. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
4. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237
5. 中国地质调查局广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所, 三亚 572000
6. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

摘要: 海底滑坡是一种由于重力失稳导致的广泛发生在外陆架-上陆坡-深海平原的沉积物搬运体, 是海底沉积物重要的搬运过程, 具有较强的侵蚀能力和搬运能力, 可将大量陆架沉积物搬运至深海, 为深海带来丰富的沉积物。再沉积后的滑坡体因其特殊的内部结构, 对海洋油气成藏有重要影响。综合国内外研究, 对海底滑坡空间展布特征和垂向结构特征进行总结, 对滑坡体岩石物理特征进行梳理, 揭示海底滑坡边界特征、内部结构以及岩石物理特征。结合海底滑坡特征, 从提供物源、储层、盖层、改变海底温压等方面分析海底滑坡对海底油气藏的积极意义, 从破坏盖层、改变海底土体温压环境等方面分析海底滑坡对海底油气藏的负面影响。最后结合国内外研究现状, 指出未来应对海底滑坡微尺度特征识别、进一步开展海底滑坡与海底油气藏联系以及加强海洋油气开发致灾风险等方面进行深入研究。

关键词: 海底滑坡; 结构特征; 岩石物理特性; 海洋油气

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022052001

Characteristics of submarine landslides and their implications for petroleum geology

ZHANG Yunshan^{1,2}, WU Nan³, JIA Yonggang^{1,4}, WEI Jianguo^{5,6}

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Sanya Ocean Research Institute, Ocean University of China, Sanya 572000, China
3. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
4. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
5. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Sanya 572000, China
6. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: Submarine landslide is a type of sediment transport body that occurs widely in the regions from outer continental shelf to upper continental slope and to deep-sea plain due to gravity instability. It is an important transport process of seafloor sediments. Its strong power of erosion could transport a huge amount of sediments from continental shelf to deep sea. A landslide event has an important impact on submarine hydrocarbon accumulation and distribution because of its special internal structure. This mini-review summarizes studies on submarine landslide and its role in shaping and re-working marine hydrocarbon resources, specified the characteristics in spatial distribution and vertical structure of submarine landslides, and revealed preliminarily the petrophysical characteristics of landslides. Based on the above-mentioned works, the roles of submarine landslides in both positive and negative manner, on submarine oil and gas reservoirs was analyzed in terms of provenance, reservoir, caprock, and variations in seafloor temperature and pressure. Finally, combined with the current research progresses, we pointed out that the future direction of research shall focus on the microscale characteristics of submarine landslides, on the relationship between submarine

资助项目: 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室(MGQNLN-TD201808); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“大洋钻探科学研究—南海重大基础地质问题与首钻选址”(GML2019ZD0201); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合[2021]58号)

作者简介: 张云山(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质灾害方面的研究, E-mail: zhang894126621@163.com

通讯作者: 贾永刚(1965—), 男, 教授, 主要从事海洋地质工程方面的研究, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

尉建功(1984—), 男, 正高级工程师, 主要从事天然气水合物勘查与开发方面的研究, E-mail: weijiangong007@163.com

收稿日期: 2022-05-20; 改回日期: 2022-06-20. 张现荣编辑

landslides and submarine oil and gas reservoirs, and on the prevention in submarine-landslide-risk regions against possible disaster from triggering during offshore operation of oil and gas development.

Key words: submarine landslide; structural features; petrophysical characteristic; submarine hydrocarbon

海底滑坡是一种广泛发生在外陆架-上陆坡-深海平原, 由于重力失稳而发生的沉积物搬运体, 是海底沉积物经过特定因素触发而发生再沉积的结果, 其搬运过程主要有张裂-直移-滑塌-碎屑流等作用过程^[1-3]。因其致灾效应以及潜在的油气意义, 海底滑坡自发现便迅速成为研究热点。由于海底滑坡发生在水下, 其运动过程、外部特征等与陆上滑坡差异较大, 对其进行直接调查所需资金较大, 因此研究进展一直十分迟缓, 人们对海底滑坡的研究和认知均存在较大的局限性^[4-5]。

随着社会的发展, 人类对资源的需求也日益增加, 而陆地资源日渐衰竭, 已无法满足世界发展的需要。海洋是一个巨大的宝库, 为了缓解资源短缺的问题, 人们开始将探索的目光伸向海洋。中国南海、渤海、北美墨西哥湾、南美巴西海域、欧洲北海、西非海域都进行了大规模的海上石油开采, 海洋资源开发已然成为现在的热点^[6-9]。海底滑坡与海洋能源有密切联系, 海底重力搬运沉积所形成的水道砂体或浊积扇体是重要的油气储集体类型, 海底天然气水合物成藏也与海底滑坡密切相关。

近 20 年来, 随着海洋地球物理调查设备的发展, 海底滑坡特征研究已取得较大进步。现阶段的海底滑坡调查主要依靠地球物理探测技术, 研究对象多为已触发的海底滑坡或深海沉积盆地内的埋藏古滑坡, 研究人员主要利用多波束测深技术和海底地震技术分析海底滑坡特征^[10-11]。此外, 随着海上油气资源勘探开发的进行, 越来越多的海底滑坡在海洋油气田周围被发现, 海底滑坡与海洋油气的联系也越来越密切。本文旨在分析总结海底滑坡典型特征以及海底滑坡的石油地质学意义, 以期海底滑坡特征研究和海上油气勘探提供借鉴。

1 海底滑坡典型特征

近年来, 随着地球物理探测技术的发展, 人们对海底滑坡的空间展布特征识别也越来越精细。高分辨率三维地震技术、侧扫声纳、多波束测深技术等多类型地球物理探测技术的应用为海底滑坡空间展布特征和地质构造特征的研究提供了良好的数据基础^[12-13]。

过去对海底滑坡的研究表明, 海底滑坡整体呈

明显下坡趋势, 滑坡起源地以弓形陡坡为特征, 并随滑坡发展有多级阶地的产生, 与周围未受扰动海底存在明显差异。同时, 海底滑坡在运动过程中也会形成各种具有拉伸、堆积、侵蚀、挤压等特征的沉积单元(图 1、2)^[14-17]。这些特殊的沉积单元不仅会影响海底地形地貌, 其中一些还对海底滑坡运动过程具有指示作用, 也有一些对海底油气成藏存在一定影响。地震和多波束测深等资料表明, 海底滑坡的不同部分具有不同的结构特征。根据这些特征, 国内外学者对滑坡体结构提出了不同的分类方式: 根据海底滑坡横向展布结构可将海底滑坡分为头部拉伸区、体部滑移区以及趾部挤压区(图 2); 根据海底滑坡垂向展布结构可将海底滑坡分为滑坡顶界面、滑坡内部以及滑坡底界面。

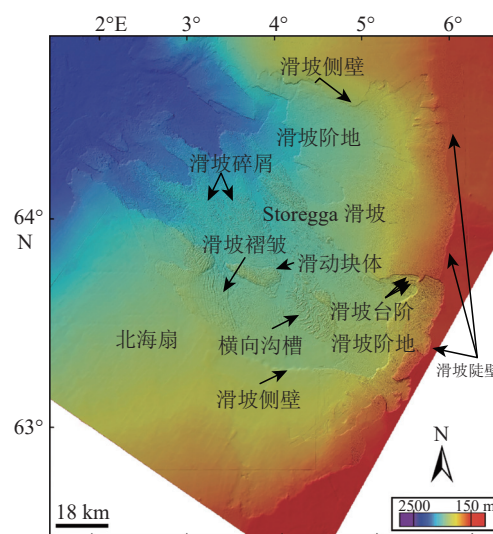


图 1 Storegga 滑坡多波束测深图像^[14]

Fig.1 Multibeam bathymetry image of submarine spreading across the Storegga Slide^[14]

1.1 头部拉伸区

海底滑坡头部拉伸区是滑坡发育的初始区, 包括海底滑坡的上坡区和延伸区, 沉积物在滑坡头部主要受到重力和拉伸作用影响, 从而产生具有典型塌陷、拉伸特征的沉积构造, 包括滑坡陡壁、张裂块体、伸展脊等(图 2、3、4)^[14, 18-19]。

海底滑坡的后退式失稳机制导致了滑坡陡壁的产生, 这也使滑坡陡壁对地层进行垂向切割并在深度连接到海底滑坡底面(图 2、3)^[20]。对全球范围

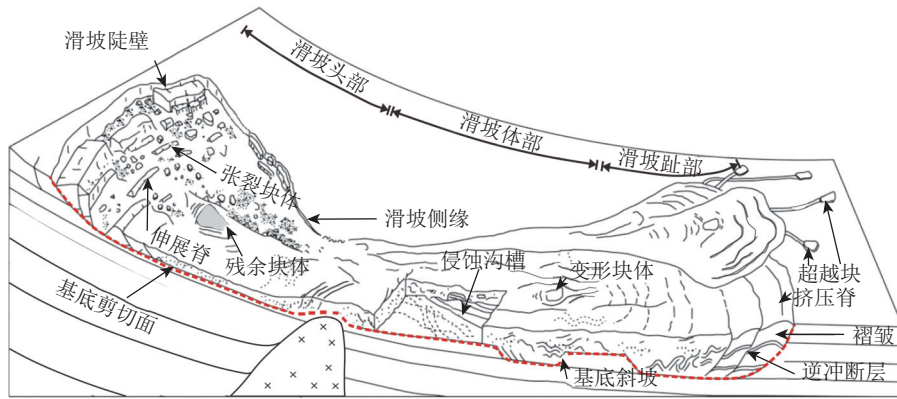


图2 海底滑坡典型展布结构^[15-17]

Fig.2 Anatomy of submarine landslides^[15-17]

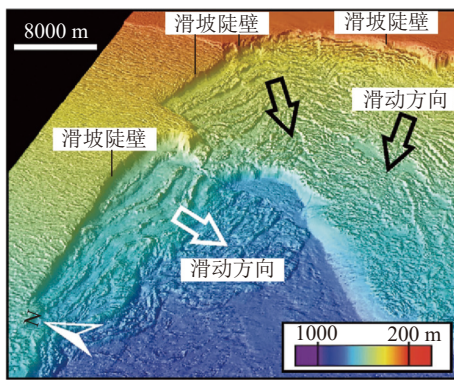


图3 滑坡陡壁及滑坡滑动方向^[14]

Fig.3 Headwall scarps of submarine landslide and sliding direction of a submarine landslide^[14]

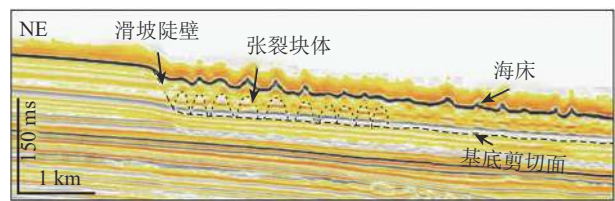


图4 海底滑坡头部地震反射特征^[15]

Fig.4 Characteristics of seismic reflection at the head of submarine landslide^[15]

内多个具有明确数据的海底滑坡陡壁坡度进行统计表明,滑坡陡壁剪切角度一般为 $2^{\circ}\sim 45^{\circ}$ (表1)。同时,滑坡陡壁倾斜方向也为海底滑坡的倒退剪切方向,指示了沉积物的初始滑动方向。

滑坡发生时,滑坡头部土体的解体会导致相对

连贯的、大的、未变形的沉积物张裂块体的形成(图2、4)。Alves^[28]对巴西东南部和日本东南部海底滑坡张裂块体的研究表明,张裂块体虽然从原始土体中离散、分离,但它们仍保留了高度的内部连贯性,而且张裂块体的大小和内部结构也反映了其运输方式,包括旋转、滑行等。此外,Alves^[28]还指出,大滑块的移动也标志着地层上覆压力的突然释放,对现有油气田上方的密封能力有一定影响。

伸展脊则是由张裂块体组成的、横向连续的且

表1 全球海底滑坡陡壁坡度统计

Table 1 Slope of global submarine landslide headwall

滑坡名称	位置	陡壁坡度
中国南海北部陆坡滑坡 ^[16]	中国南海北部陆坡	$5^{\circ}\sim 35^{\circ}$
The Israel Slump Complex ^[18]	以色列近海大陆边缘	$2^{\circ}\sim 15^{\circ}$
The Gorgon Slide ^[19]	澳大利亚西北部边缘	30°
The Gebra Slide ^[21]	南极布兰斯菲尔德盆地	16°
The Storegga Slide ^[22]	挪威近海大陆架	$25^{\circ}\sim 35^{\circ}$
The Hinlopen Slide ^[23]	北冰洋斯瓦尔巴群岛边缘	$20^{\circ}\sim 35^{\circ}$
The Goleta Slope ^[24]	美国圣巴巴拉海峡西部边坡	$40^{\circ}\sim 45^{\circ}$
The 44-North Slide ^[25]	美国俄勒冈州近海边缘	22°
Submarine landslides along the Israeli continental-slope ^[26]	以色列大陆坡	$5^{\circ}\sim 26^{\circ}$
白云滑坡 ^[27]	中国南海珠江口盆地	$6^{\circ}\sim 14.5^{\circ}$

基本平行于滑坡陡壁的脊, 其性质与张裂块体基本一致。Bull 等^[15]和 Scarselli^[29]研究表明, 伸展脊在滑坡头部沿滑坡运动方向呈阶梯分布, 并且其横向延伸方向与滑坡运动方向垂直, 对海底滑坡的运动方向同样具有指示作用。

1.2 体部滑移区

体部滑移区是海底滑坡的主体部分, 位于海底滑坡的上坡区和下坡区之间, 海底滑坡在此部分的剧烈运动会使周围未扰动土体产生强烈的侵蚀作用, 并使得滑坡内部产生较大形变, 由此便会产生多种特殊构造, 如滑坡侧缘、基底剪切面、平移块体、变形块体等(图 2、5、6)。

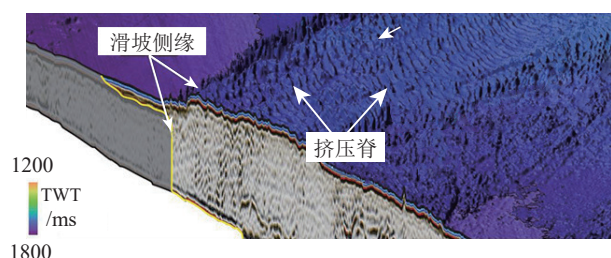


图 5 滑坡侧缘和挤压脊^[31]

Fig.5 The lateral margins and pressure ridges of a submarine landslide^[31]

滑坡侧缘是海底滑坡区与未滑坡区的侧向边界, 它的存在限制了滑坡体的横向展布, 对海底滑坡的总运输方向起约束作用(图 2、5)^[30-31]。但是, 由于滑坡强烈的侵蚀、伸展和收缩作用滑坡侧缘也会具有较陡的坡度, 这也导致滑坡侧缘并不总是稳定的。Goff 等^[32]对大巴哈马台地海底滑坡研究表明, 滑坡侧缘坡度可达 24°, 这甚至也会引发滑坡侧缘的局部滑塌。

基底剪切面是海底滑坡的滑动面和底界面, 也是海底滑坡与下方未滑坡地层的分界线, 在地震剖面上通常表现为强振幅反射界面(图 2、6)^[27, 29, 33]。Scarselli 等^[33]对澳大利亚西北大陆架海底滑坡研究表明, 基底剪切面虽然是连续整合且层理一致的平面, 但它也可能受到基底沉积物性质、滑坡运动形式等因素的影响而发生变化, 海底滑坡携带的沉积物块甚至可以在基底剪切面上造成几十米的侵蚀沟槽。同时, 这些侵蚀沟槽还直接记录了滑坡体在基底剪切面上的滑动过程, 基底剪切面上的侵蚀沟槽基本平行且向下坡方向倾斜, 并随运动距离的增加呈发散趋势, 根据侵蚀沟槽的下倾方向和发散方向可直接判断滑坡的运动方向^[29, 33-34]。

在滑坡体部, 沉积物块也会随滑坡基质被运输而来, 由坡头部平移而来的沉积物块体被称为平移

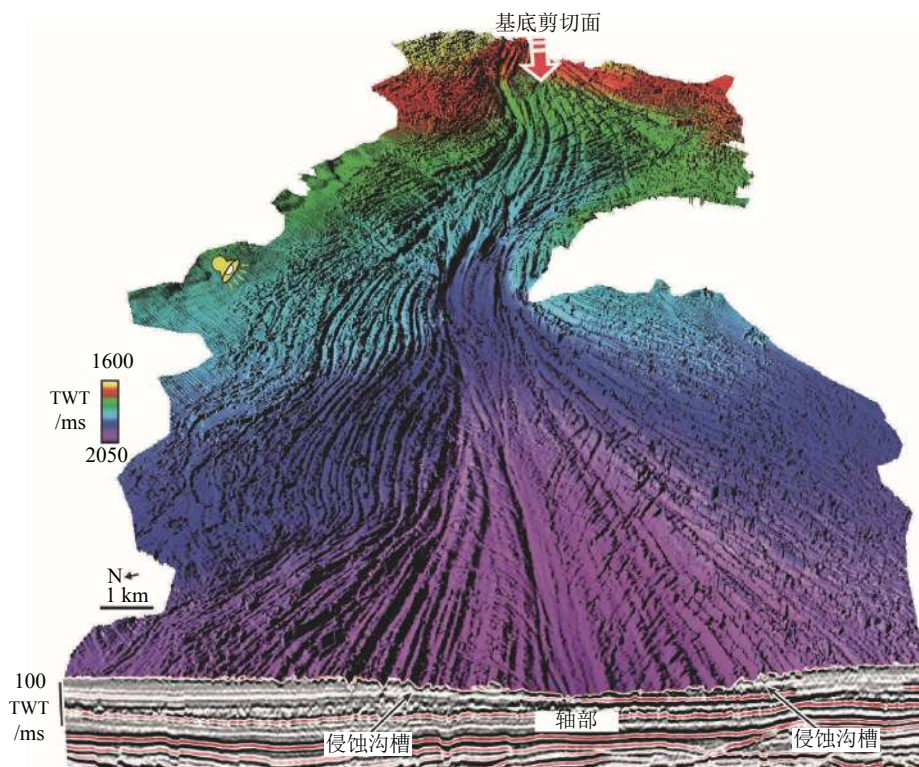


图 6 海底滑坡基底剪切面及其侵蚀特征^[33]

Fig.6 Basal shear surface of submarine landslide and its erosion^[33]

块体,在运输过程中发生剧烈变形的块体则被称为变形块体^[35-36]。研究表明,变形块体对滑坡运动方向同样具有指示作用,在长距离的运动中,变形块体倾向于使其长轴平行于滑坡运动方向^[29]。同时,值得注意的是,变形块体也与海洋油气成藏密切相关。Alves^[28]研究表明,变形块体内部通常会有裂缝、断层等存在,这为海底油气提供了运移通道。此外,Wu等^[37]研究表明,在滑坡过程中未完全破碎的沉积物块具有较低的土壤密度,这表明变形块体会处于欠压实状态,使其有成为海洋油气田潜在储层的可能。

1.3 趾部挤压区

趾部挤压区是海底滑坡向深海推进的部分,是海底滑坡滑动距离最远的部分,同时也是海底滑坡的终止区,在平面上一般呈舌型展布。受挤压作用影响,滑坡趾部呈现典型挤压地貌,包括挤压脊、褶皱和逆冲断层等(图2、5、7)。

滑坡趾部的挤压作用会使得滑坡表面形成直线到弧形的挤压脊(图5)。研究表明,海底滑坡趾部通常包含多条基本平行挤压脊,且通常垂直于滑坡运动方向,对滑坡运动方向具有指示作用^[15,29]。此外,在滑坡侧缘等其他挤压作用较强区也会有挤压脊的存在。与挤压脊相比,褶皱和逆冲断层在滑坡体内部形成,对滑坡影响较大。Gafeira等^[38]对Storegga滑坡研究发现,褶皱对滑坡体的影响范围水平延伸距离可达数百米,影响地层的厚度也可达数百米,逆冲断层也可影响土体垂向数百米范围(图7)。

1.4 滑坡顶界面

根据海底滑坡垂向结构,滑坡可分为滑坡底界面、滑坡内部以及滑坡顶界面三部分,滑坡底界面和滑坡内部特殊结构在前文已详细论述,这里不过多赘述。

海底滑坡顶界面是指滑坡搬运沉积体的上表面,在地震剖面中表现为连续的强振幅反射界面^[16]。

滑坡顶界面是一个复杂的表面,其形态与海底滑坡的运动过程和滑坡的内部变形密切相关,海底滑坡的运动信息大都可以通过顶界面进行反应。Ge等^[39]对安哥拉近海巨型海底滑坡研究表明,由于海底滑坡不断变化的运动方式,导致滑坡顶界面连续但并不平整,滑坡顶界面还会因其较为粗糙而更容易被侵蚀。

滑坡顶界面上不同尺度的平行或垂直于滑坡运动方向的沟和脊,被称为纵向剪切带和二级流动带。这些分布在滑坡顶界面的沟和脊增加了滑坡顶界面的粗糙程度,使其可以容纳更多沉积物,这对海底浊流沉积和海洋油气成藏具有一定影响。Kneller等^[40]对海底滑坡顶界面的研究表明,海底浊积岩系统对海底地形十分敏感,而海底滑坡粗糙的顶界面可为浊流砂体以及扇体提供潜在储集空间,在滑坡顶界面沉积的大量海底沉积物也为海底油气提供了潜在的储层。

2 海底滑坡对油气成藏的作用

海底滑坡与海洋油气藏关系密切。海底滑坡的沉积物搬运能力、滑坡沉积后的结构特征以及岩石物理学特性决定了它可以从提供物源、储层、盖层、改变地层温压等多方面对海洋油气田产生影响。

2.1 滑坡有利于石油成藏

在提供物源方面,海底滑坡可将发育在陆架附近的富有机质沉积物长距离搬运至深海环境中,随着埋深增加,这些富有机质沉积物可作为潜在的生烃组被保存在深海环境中^[41]。Zabanbark等^[42]通过对西非几个含油气盆地(几内亚湾、宽扎-喀麦隆和纳米比亚)的油气成藏系统研究发现,这些地区的油气田的形成与构造运动、海底滑坡等导致的富含有机质的沉积物快速沉积有很大关系。

在提供储层方面,海底滑坡主要通过两种方式提供海底油气藏提供储层。一是滑坡可以搬运陆源砂质沉积物至深水,这些陆源砂质沉积物可作为储

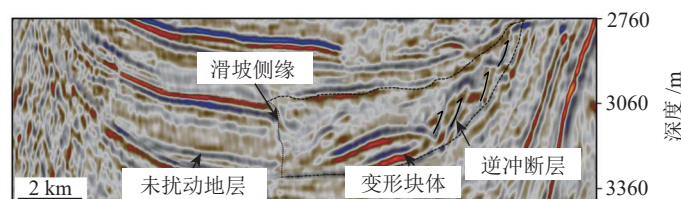


图7 滑坡内部逆冲断层^[38]

Fig.7 Thrust faults inside submarine landslides^[38]

层;二是滑坡顶界面可以为浊流砂体以及扇体提供潜在储集空间,滑坡可以捕捉砂体并为油气藏提供储集层。

海底滑坡在搬运陆源砂质沉积物至深水时,滑坡内部再沉积的未被破碎、形变较小的富砂岩块可能会处于欠压实状态,具有较高孔隙度,这些砂质沉积物可能成为海底油气储层(图 8)^[37,43]。Lisitsyn^[44]通过对河口三角洲、大陆边缘、海底峡谷以及海底火山等地区的沉积环境进行研究,发现海底滑坡会为海底带来大量沉积物,显著提高了海底石油的储集潜力。Allen 等^[45]发现位于德克萨斯州 Delaware 盆地海底滑坡体的石油钻井产油量远远超出位于海底滑坡体外的石油钻井,他们认为在海底滑坡过程中产生的断层和伴生的裂缝可以提高产油率。Bhatnagar 等^[46]通过对米德兰盆地二叠纪时期的一处海底滑坡进行测井分析发现,该滑坡是碳酸盐和硅碎屑的混合物,具有石油储层的潜力。

海底滑坡对海底地形的塑造会影响海底浊流系统,使原有的浊流通道发生改变。而海底滑坡停止运动后的顶界面可为浊流砂体以及扇体提供潜在储集空间,其具有褶皱的顶界面可以捕捉砂体并为油气提供储集层^[40,47]。Henry^[48]利用岩心、地震和测井数据对墨西哥湾雷马油田的储层研究发现,海底滑坡既可以分隔储层又可以聚集储层。海底滑坡的侵蚀和封盖作用对油田的浊积砂岩储层进行了分隔,而滑坡顶界面为后来的碎屑和浊积流提供了沉积通道,又为油气提供了新的储层。Kneller 等^[40]利用地震资料对深水露头的研究表明,几乎所有海底滑坡都会对浊积岩系统产生影响,海底滑坡的侵蚀轨迹会改变海底浊积通道,滑坡粗糙的顶界面会为沉积物提供容纳空间,从而创造地层圈闭潜力。姚根顺等^[49]对琼东南盆地华光凹陷重力搬运沉积进行调查发现,琼东南盆地存在大量由重力搬运沉积形成的复合水道充填,无论是中生代湖相沉积还是新生代海相沉积地层重力搬运沉积所形成的水道砂体或浊积扇体都是重要的油气储集体类型,与深水油气资源成藏关系密切。

在提供封堵层方面,海底滑坡搬运泥质碎屑流沉积时,由于滑坡内部形变程度高,泥质沉积物在强剪应力作用下孔隙流体快速逸散,沉积物压实程度较大,致密性较好,可作为深海油气的良好顶部-侧向封堵层(图 9)^[50-51]。当沉积物经海底滑坡搬运发生破碎时,强大的剪切力会使沉积物内部孔隙流体逸散,再次沉积后的沉积物会变得致密化,孔隙度比减小,土体密度增加,抗剪切强度增大,且越靠

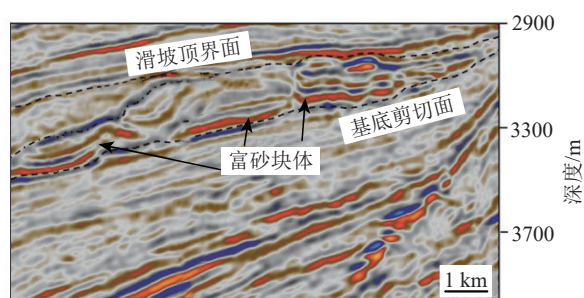


图 8 海底滑坡内部可作为储层的富砂块体^[37]

Fig.8 Sandstone-rich transported blocks that can serve as reservoirs inside submarine landslides^[37]

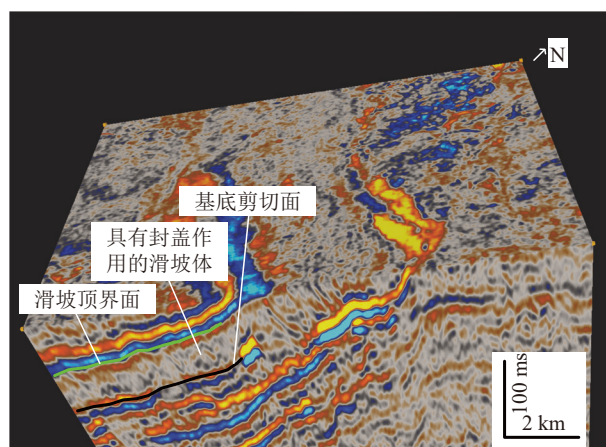


图 9 海底滑坡的盖层作用^[54]

Fig.9 Submarine landslide can be used as oilfield top-seal^[54]

近基底剪切面这种现象越明显^[52]。Cardona 等^[53]利用地震和测井数据对墨西哥湾东部 Jubilee 气田盖层研究发现, Jubilee 油田的顶部盖层被识别为海底滑坡,其孔喉半径小于 100 nm,并具有非常高的黏土组构。他们认为,海底滑坡的长距离运输带来的剪切和重塑过程可以增强黏土颗粒的排列,并会对孔喉造成破坏,从而导致沉积物渗透率和孔隙度的下降,使得海底滑坡具备油气封盖能力,黏土的对齐程度也可反映海底滑坡的密封质量。Cardona^[54]利用地震资料对墨西哥湾近海 Jubilee 天然气田进行研究发现,该气田的海底滑坡对气田产生了两种影响,一种是滑坡蚕食了部分储层,另一种是滑坡充当了气田的盖层。他们还指出,海底滑坡对气田储层的侵蚀会将气田划分为不同的区域。此外,由于海底滑坡的头部和趾部存在断层,滑坡体部的巨型区块会形成流体通道,这些因素会影响滑坡的封盖作用。因此,海底滑坡作为有效顶部密封的部分一般为在滑坡体和滑坡趾部之间的过渡区。

海底滑坡所携带的沉积物还可显著增加海底地层厚度,进而影响海底油气田生油层埋藏深度以

及生油层地温,可有效促进烃源岩的成熟,加快油气生成时间。赵芳^[55]对我国南海北部陆坡珠江口盆地的多期海底滑坡事件进行研究,发现海底滑坡发育地区的海底地层厚度增加了310~640 m,同时她还利用数值模拟的方法模拟了不同沉积环境下的地层温度,结果表明,滑坡沉积物聚集地区的地层温度比正常沉积地区高,有利用油气田的形成。因此,海底滑坡引发的沉积物厚度变化以及沉积物性质变化对海洋油气田的形成和演化意义重大。

2.2 海底滑坡有利于天然气水合物成藏

除了海洋油气田外,海底滑坡与天然气水合物形成的关系也十分密切(图10)^[56]。同样的,海底滑坡所携带的富含有机质的沉积物,可为天然气水合物的形成提供大量物源^[57]。海底滑坡体内部的断层以及裂隙可为海底地层中的流体提供运移通道,有助于天然气水合物的富集,有成为天然气水合物储层潜力^[58]。此外,海底滑坡产生的快速堆积,形成沉积体低渗透,分选较差,可造成压力屏蔽,为海底滑坡区天然气水合物的形成提供了良好的温压条件^[59]。

Bunz等^[60]对挪威Storegga海底滑坡北侧的天然气水合物赋存区进行了研究,他指出该区域天然气水合物与滑坡体内部的垂向流体运移通道密切相关。吴时国等^[61]对南海北部陆坡天然气水合物成藏系统的研究发现,海底滑坡的突然发生可能会

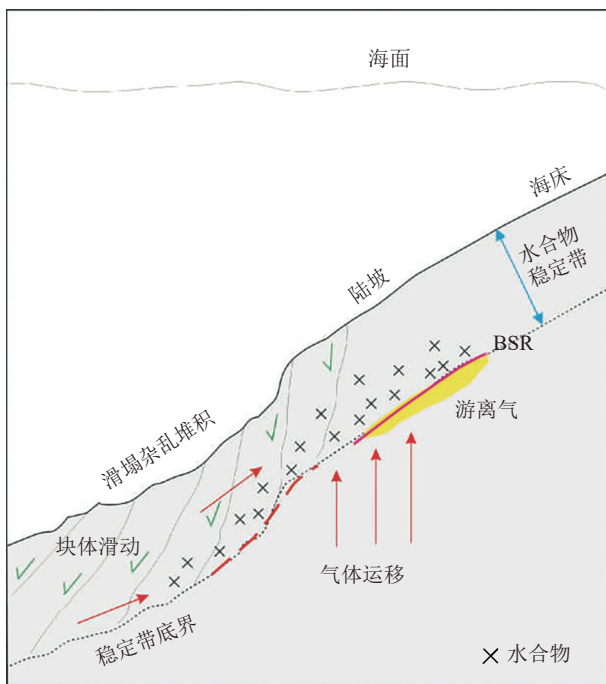


图10 海底滑坡构造天然气水合物成藏模式^[56]

Fig.10 Hydrate accumulation model of submarine landslide structure^[56]

覆盖海底地层中大量的流体通道,导致海底地层中超压流体活动和构造裂缝的发育,可为天然气水合物的形成提供流体通道,从而促进了水合物富集。张丙坤等^[62]通过对海底滑坡与天然气水合物形成的时序性研究指出,受滑坡体内部断裂破碎而形成的流体运移优势通道影响,天然气水合物成藏规模会比较大,具备开采价值。杜浩等^[63]利用岩芯、钻测井、地震及区域地质资料对南海琼东南地块体搬运沉积体系与天然气水合物成藏关系进行研究,他们指出海底滑坡的覆盖使得天然气水合物难以从海底地层中溢出,使其在适宜的温压条件下形成天然气水合物藏。

3 海底滑坡对油气田的扰动

3.1 海底滑坡导致石油泄漏

海底石油埋藏较深,一般来说,海底滑坡并不会对其产生影响。但仍有研究表明,海底滑坡的发生会对海底油气田产生不利影响。Alves^[64]通过对日本南开海槽、地中海克里特岛南部和巴西Espírito Santo盆地的海底滑坡进行的模拟研究发现,在巴西Golfinho油田附近发生的海底滑坡对海底的侵蚀作用会使海底地层压力发生变化,使得油田储层垂向围压突然释放,进而导致油田盖层发生破裂,发生石油泄漏事件。

3.2 海底滑坡导致天然气水合物分解

相较于石油,海底天然气水合物的埋藏较浅,海底滑坡会对天然气水合物稳定带产生影响^[65]。其影响主要体现在改变海底温压和盖层等方面。

海底天然气水合物的形成和分解受静水压力、海底温度、气源组分和孔隙水盐度等条件的直接影响,天然气水合物会随这些因素的变化而发生分解和释放^[66-68]。海底滑坡的发生往往会改变海底的温压环境,有可能导致天然气水合物分解。Maslin等^[69]指出当海底滑坡导致海底天然气水合物藏上覆沉积物塌陷或沉积物剥离时,海底天然气水合物藏垂向压力减小,可能会导致天然气水合物的分解。随着大量天然气水合物转化为气体,沉积物塌陷规模也会扩大。Eldholm^[70]指出海底地层压力的任何变化都会影响甲烷渗流的稳定性,滑坡完全有能力改变海底甲烷渗流状态。

目前,关于海底滑坡导致天然气水合物盖层破坏的报道较少。Paull等^[71]利用在俄勒冈州水合物

脊进行现场调查以及实验模拟, 他们利用 ROV 扰动天然气水合物上覆沉积物, 结果表明, 天然气水合物上覆沉积物的扰动会使天然气水合物分解加剧, 也会使固体天然气水合物从沉积物中逃逸出来。出现这一现象是由于固体天然气水合物的密度小于大部分沉积物, 甚至小于海水, 在水动力分选作用下, 天然气水合物晶体可能会从沉积物中释放出来, 在海水中向上漂浮并逐渐分解。Maslin 等^[72]整理了北大西洋地区海底滑坡的数据, 并将它们与过去 45 ka 的气候变化相关联。他们指出古新世晚期北太平洋西边缘的滑坡可能破坏了天然气水合物盖层, 使天然气水合物大范围分解, 从而导致了气候的变化。Brothers 等^[73]通过对海底滑坡与海平面变化以及全球气候变化研究发现, 海底滑坡可能会破坏天然气水合物藏, 使其失去封盖层, 从而导致大陆斜坡沉积物中封存的天然气水合物的释放。Yelisetti 等^[74]利用地球物理数据和数值模拟对卡斯卡迪亚北缘前脊天然气水合物与海底滑坡关系进行模拟研究发现, 该地区有的海底滑坡滑动面深度可达海底模拟反射层, 但并未发现有海底滑坡侵蚀海底模拟反射层的直接证据。

4 结论

海底滑坡是海底沉积物十分重要的搬运方式, 对海底地形地貌塑造、海底沉积物运输、海底油气成藏等有重要意义。近年来, 多波束测深数据和 2D、3D 地震数据在海底滑坡研究中的应用使得对海底滑坡有了更进一步的认识。

从空间上看, 海底滑坡可按照沉积物沉积特征分为滑坡头部、滑坡体部和滑坡趾部。其中, 滑坡头部呈现明显拉张特征, 滑坡体部以平移运动为主, 滑坡趾部多呈现挤压特征。海底滑坡各部分沉积物运动特征的不同也使得滑坡各部分呈现不同的地貌特征, 如张裂块体、伸展脊、平移块体、变形块体、褶皱、挤压脊等。

从垂向上看, 海底滑坡可分为滑坡顶界面、滑坡体和基底剪切面。滑坡顶界面和基底剪切面是海底滑坡的上下边界, 在地震剖面中较易识别。由于滑坡所携带沉积物的差异、滑坡运动状态的变化和滑动面土体性质的差异, 滑坡顶界面和基底剪切面会在运动中产生特殊构造, 如纵向剪切带、二级流动带、基底剪切面斜坡、侵蚀沟槽等。

对于海底油气来说, 海底滑坡对其影响具有两面性。一方面, 海底滑坡可以为海底油气藏提供物

源、储层、侧向封堵层、盖层以及适宜油气成藏的温压, 有利于海底油气成藏。另一方面, 海底滑坡还可能侵蚀海底油气田储层, 破坏侧向封堵层, 扰动天然气水合物盖层, 改变海底温压, 不利于海底油气成藏。

5 展望

目前, 有关海底滑坡地形地貌特征的研究已取得较大进步。人们对海底滑坡体的空间展布特征以及垂向结构特征等较大尺度的海底滑坡特征的认识已取得较大进步。随物探技术的发展, 人们对海底滑坡岩石物理学特性的认识也取得一定进步, 对海底滑坡与海洋油气关系研究取得一定进展, 但仍有较大进步空间。未来海底滑坡特征以及海底滑坡石油地质学意义研究应向以下方向发展:

(1) 海底滑坡微尺度特征识别

现阶段的海底滑坡地形地貌以及内部地质结构特征研究多是利用多波束测深技术和海底地震技术, 因其分辨率限制, 这些方法只能识别海底滑坡宏观结构特征, 难以对海底滑坡微尺度特征进行识别。因此, 未来应加强海洋地球物理探测设备研发, 识别海底滑坡微尺度特征, 精细刻画海底滑坡内部地质结构。

(2) 海底滑坡与海底油气藏联系

现阶段的海底滑坡与海洋油气藏研究处于早期阶段, 海底滑坡对海洋油气成藏的贡献大小仍未可知, 海底滑坡对海洋油气田的破坏研究仍较为薄弱。因此, 未来应加强海底滑坡与海底油气藏联系研究, 加强海底滑坡与天然气水合物的相互作用关系研究, 这对于海洋油气资源勘探开发具有重要意义。

(3) 海洋油气开发防灾研究

海底滑坡与海洋油气联系密切, 因此也迫切地开展海洋油气开发致灾风险研究。对于海洋油气钻探而言, 钻遇滑坡会加速钻头损耗并延长钻时, 甚至可能因为地层压力的突然变化发生事故。此外, 在进行海洋能源开发时对海底沉积物的扰动也可能诱发海底滑坡。因此, 如何安全的进行海洋油气资源开发是亟待解决的问题。

致谢: 感谢孙志文博士、薛凉博士、宋晓帅博士、李正辉博士以及海底滑坡组、海洋地质灾害预警组和南海深部地质研究室全体人员给予的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides [J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34 (1): 33-59.
- [2] Locat J, Lee H, Ten Brink U S, et al. Geomorphology, stability and mobility of the Currituck slide [J]. *Marine Geology*, 2009, 264 (1-2): 28-40.
- [3] 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.]
- [4] 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.]
- [5] 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.]
- [6] 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, 15 (11): 1-4. [PAN Jiping, ZHANG Dawei, YUE Laiqun, et al. Status quo of global offshore oil and gas exploration and development and its trends [J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15 (11): 1-4.]
- [7] 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.
- [8] 苏丕波, 梁金强, 张伟, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏系统[J]. *天然气工业*, 2020, 40 (8): 77-89. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, ZHANG Wei, et al. Natural gas hydrate accumulation system in the Shenhu sea area of the northern South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40 (8): 77-89.]
- [9] 宁伏龙, 梁金强, 吴能友, 等. 中国天然气水合物赋存特征[J]. *天然气工业*, 2020, 40 (8): 1-24. [NING Fulong, LIANG Jinqiang, WU Nengyou, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40 (8): 1-24.]
- [10] Gee M J R, Masson D G, Watts A B, et al. The Saharan debris flow: an insight into the mechanics of long runout submarine debris flows [J]. *Sedimentology*, 1999, 46 (2): 317-335.
- [11] Solheim A, Berg K, Forsberg C F, et al. The Storegga Slide complex: repetitive large scale sliding with similar cause and development [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22 (1-2): 97-107.
- [12] 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 Tingkai, SHEN Yueqiang, ZHENG Defeng, et al. Research advances on the chain disasters of submarine landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29 (6): 1657-1675.]
- [13] 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 Yonggang, CHEN Tian, LI Peiying, et al. Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33 (3): 1-14.]
- [14] Micallef A, Masson D G, Berndt C, et al. Submarine spreading in the Storegga Slide, Norwegian Sea [J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2016, 46 (1): 411-412.
- [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] Wang W W, Wang D W, Wu S G, et al. Submarine landslides on the north continental slope of the South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17 (1): 83-100.
- [17] Wu N. Multi-scale, multidisciplinary analysis of mass-transport complex (MTC) emplacement and structure [D]. Doctor Dissertation of Imperial College London, 2020.
- [18] Frey Martinez J, Cartwright J, Hall B. 3D seismic interpretation of slump complexes: examples from the continental margin of Israel [J]. *Basin Research*, 2005, 17 (1): 83-108.
- [19] Nugraha H D, Jackson C A L, Johnson H D, et al. How erosive are submarine landslides [J]. *Geology*, 2019.
- [20] 何叶, 钟广法. 海底滑坡及其反射地震识别综述[J]. *海洋科学*, 2015, 39 (1): 116-125. [HE Ye, ZHONG Guangfa. Current status of submarine landslides and their seismic recognition [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39 (1): 116-125.]
- [21] Imbo Y, De Batist M, Canals M, et al. The Gegra Slide; a submarine slide on the Trinity Peninsula margin, Antarctica [J]. *Marine geology*, 2003, 193(3-4): 235-252.
- [22] Bryn P, Berg K, Forsberg C F, et al. Explaining the Storegga slide [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22 (1-2): 11-19.
- [23] Vanneste M, Mienert J, Bunz S. The Hinlopen Slide; a giant, submarine slope failure on the northern Svalbard margin, Arctic Ocean [J]. *Earth and planetary science letters*, 2006, 245(1-2): 373-388.
- [24] Jared W Kluesner D S B A. Structural controls on slope failure within the western Santa Barbara Channel based on 2D and 3D seismic imaging [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 8(21):1-34.
- [25] Lenz B L, Sawyer D E, Phrampus B, et al. Seismic imaging of seafloor deformation induced by impact from large submarine landslide blocks, offshore Oregon [J]. *Geosciences (Basel)*, 2019, 9(1): 10.
- [26] Katz O, Reuven E, Aharonov E. Submarine landslides and fault scarps along the eastern Mediterranean Israeli continental slope [J]. *Marine geology*, 2015, 369: 100-115.
- [27] 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.]
- [28] Alves T M, Kurtev K, Moore G F, et al. Assessing the internal character, reservoir potential, and seal competence of mass-transport deposits using seismic texture: A geophysical and petrophysical approach [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98 (4): 793-824.
- [29] Scarselli N. Submarine landslides: architecture, controlling factors and environments. A summary [M]//Scarselli N, Adam J, Chiarella D, et al.

- Regional Geology and Tectonics. Volume 1: Principles of Geologic Analysis. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2020: 417-439.
- [30] 吴时国, 马林伟, 孙金, 等. 海上丝绸之路大型地质灾害: 特点与现状 [J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(1): 401-411. [WU Shiguo, MA Linwei, SUN Jin, et al. Characteristic and current status of some large-scale geological disasters along the Maritime Silk Road [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 401-411.]
- [31] Nugraha H D, Jackson C A L, Johnson H D, et al. Evolution of flow cells within a mass-transport complex: Insights from the Gorgon Slide, offshore NW Australia [Z]. *EarthArXiv*, 2020.
- [32] Le Goff J, Slooman A, Mulder T, et al. On the architecture of intraformational mass-transport deposits; insights from the carbonate slopes of Great Bahama Bank and the Apulian carbonate platform [J]. *Marine geology*, 2020, 427: 106205.
- [33] Scarselli N, McClay K, Elders C. Submarine slide and slump complexes, Exmouth Plateau, NW Shelf of Australia [C]//Western Australian Basins Symposium 2013. Perth: Petroleum Exploration Society of Australia, 2013.
- [34] Gee M J R, Gawthorpe R L, Friedmann J S. Giant striations at the base of a submarine landslide [J]. *Marine Geology*, 2005, 214(1-3): 287-294.
- [35] Lastras G, De Blasio F V, Canals M, et al. Conceptual and numerical modeling of the BIG'95 debris flow, Western Mediterranean Sea [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(5): 784-797.
- [36] Wu N, Jackson C A L, Johnson H D, et al. The formation and implications of giant blocks and fluid escape structures in submarine lateral spreads [J]. *Basin Research*, 2021, 33(3): 1711-1730.
- [37] Wu N, Jackson C A L, Johnson H D, et al. Lithological, petrophysical, and seal properties of mass-transport complexes, northern Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(7): 1461-1489.
- [38] Gafeira J, Bulat J, Evans D. The southern flank of the Storegga Slide: imaging and geomorphological analyses using 3D seismic [M]//Lykousis V, Sakellariou D, Locat J. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Dordrecht: Springer, 2007, 27: 57-65.
- [39] Gee M J R, Gawthorpe R L, Friedmann S J. Triggering and evolution of a giant submarine landslide, offshore Angola, revealed by 3D seismic stratigraphy and geomorphology [J]. *Journal of sedimentary research*, 2006, 76(1): 9-19.
- [40] Kneller B, Dykstra M, Fairweather L, et al. Mass-transport and slope accommodation: Implications for turbidite sandstone reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(2): 213-235.
- [41] 姚哲, 朱继田, 左倩媚, 等. 琼东南盆地深水重力流沉积体系及油气勘探前景 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 21-30. [YAO Zhe, ZHU Jitian, ZUO Qianmei, et al. Gravity flow sedimentary system and petroleum exploration prospect of deep water area in the Qiongdongnan Basin South, China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 21-30.]
- [42] Zabanbark A, Lobkovsky L I. Continental slopes of the West Africa Region: A unique treasure of hydrocarbons [J]. *Oceanology*, 2018, 58(5): 727-736.
- [43] Le A N. Mass-transport deposit in deep water setting, offshore Cameroon, West Africa [J]. *Indonesian Journal on Geoscience*, 2021, 8(2): 213-219.
- [44] Lisitsyn A P. Patterns of rapid and extremely rapid (avalanche) sedimentation: implications for marine oil and gas generation [J]. *Russian Geology & Geophysics*, 2009, 50(4): 278-298.
- [45] Allen J, Schwartz K, Desantis J, et al. Integration of structure and stratigraphy in bone spring tight oil sandstones using 3D seismic in the Delaware Basin, TX [C]//Unconventional Resources Technology Conference. Denver, Colorado: SEG, 2013: 2521-2527.
- [46] Bhatnagar P, Verma S, Bianco R. Characterization of mass transport deposits using seismic attributes: Upper Leonard Formation, Permian Basin [J]. *Interpretation*, 2019, 7(4): SK19-SK32.
- [47] Qin Y P, Alves T M, Constantine J, et al. The role of mass wasting in the progressive development of submarine channels (Espírito Santo Basin, Se Brazil) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(5): 500-516.
- [48] Henry L C, Wadsworth J A, Hansen B, et al. Erosion and ponding of Thunder Horse deepwater turbidites by mass transport complexes in Mississippi Canyon based on image log sedimentology [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 97: 639-658.
- [49] 姚根顺, 袁圣强, 马玉波, 等. 琼东南华光凹陷深水重力搬运沉积体系及其油气勘探 [J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2009, 34(3): 471-476. [YAO Genshun, YUAN Shengqiang, MA Yubo, et al. Deep-water mass transport deposition system of Huaguang depression, Qiongdongnan Basin and its significance for hydrocarbon exploration [J]. *Earth Science:Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(3): 471-476.]
- [50] 陈珊珊, 孙运宝, 吴时国. 南海北部神狐海域海底滑坡在地震剖面上的识别及形成机制 [J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(6): 40-45. [CHEN Shanshan, SUN Yunbao, WU Shiguo. Sea bottom landslide in the Shenhu area on the north margin of South China Sea and triggering mechanisms [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(6): 40-45.]
- [51] Posamentier H W, Martinsen O J, Shipp R C, et al. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data [M]//Mass-Transport Deposits in Deepwater Settings. Special Publication, Society for Sedimentary Geology, 2011, 96: 7-38.
- [52] Alves T M, Kurtev K, Moore G F, et al. Assessing the internal character, reservoir potential, and seal competence of mass-transport deposits using seismic texture: A geophysical and petrophysical approach [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(4): 793-824.
- [53] Cardona S, Wood L J, Day-Stürat R J, et al. Fabric development and pore-throat reduction in a mass-transport deposit in the Jubilee Gas Field, eastern Gulf of Mexico: consequences for the sealing capacity of MTDs [M]//Lamarche G, Mountjoy J, Bull S, et al. *Submarine Mass Movements and their Consequences*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, 41: 27-37.
- [54] Cardona S, Wood L, Moscardelli L, et al. Cannibalization and sealing of deepwater reservoirs by mass-transport complexes: The Jubilee field, Gulf of Mexico [J]. *Interpretation*, 2020, 8(4): SV17-SV30.
- [55] 赵芳. 南海北部陆缘裂后期岩浆活动及海底滑坡事件研究 [D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2016. [ZHAO Fang. Post-rift

- magmatism and submarine landslides on the northern South China Sea continental margin [D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [56] 杨木壮, 潘安定, 沙志彬. 陆缘地区天然气水合物成藏地质模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 85-90. [YANG Muzhuang, PANG Anding, SHA Zhibin. Geological models of gas hydrates deposits along the continental margin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(6): 85-90.]
- [57] 郭依群, 梁金强, 王宏斌, 等. 南海北部海底滑坡与天然气水合物的关系[C]//海洋地质、矿产资源与环境学术研讨会论文集摘要集. 广州, 2006. [GUO Yiqun, LIANG Jinqiang, WANG Hongbin, et al. Relationship between submarine landslides and gas hydrate in the northern South China Sea [C]//Abstracts of Seminar on Marine Geology, Mineral Resources & Environment. Guangzhou, 2006.]
- [58] 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 Shiguo, YAO Genshun, DONG Dongdong, 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.]
- [59] 蔡峰, 闫桂京, 梁杰, 等. 大陆边缘特殊地质体与水合物形成的关系[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 11-15. [CAI Feng, YAN Guijing, LIANG Jie, et al. The relationship between special geological bodies and hydrate formation at continental margin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(6): 11-15.]
- [60] Bünz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209(3-4): 291-307.
- [61] 吴时国, 董冬冬, 杨胜雄, 等. 南海北部陆坡细粒沉积物天然气水合物系统的形成模式初探[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1849-1857. [WU Shiguo, DONG Dongdong, YANG Shengxiong, et al. Genetic model of the hydrate system in the fine grain sediments in the northern continental slope of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(7): 1849-1857.]
- [62] 张丙坤, 李三忠, 夏真, 等. 南海北部海底滑坡与天然气水合物形成与分解的时序性[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(2): 434-440. [ZHANG Bingkun, LI Sanzhong, XIA Zhen, et al. Time sequence of submarine landslides and gas hydrates in the northern South China Sea [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(2): 434-440.]
- [63] 杜浩, 石万忠, 梁金强, 等. 琼东南盆地块体搬运沉积体系成因及其对水合物成藏的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(4): 869-881. [DU Hao, SHI Wanzhong, LIANG Jinqiang, et al. Genesis of mass transport deposits and their effect on gas hydrate accumulation in the Qiongdongnan Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(4): 869-881.]
- [64] Alves T M. Megablocks and the stratigraphic record of continental margins: how large an event do they materialise?[C]//STRATI 2013. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 775-780.
- [65] Talling P, Clare M, Urlaub M, et al. Large submarine landslides on continental slopes: Geohazards, methane release, and climate change [J]. *Oceanography*, 2014, 27(2): 32-45.
- [66] 刘杰, 杨睿, 鄂黛黛, 等. 琼东南盆地华光凹陷天然气水合物稳定带厚度的影响因素[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 13-25. [LIU Jie, YANG Rui, WU Daidai, et al. Factors affecting the thickness of gas hydrate stability zones in the Huaguang Sag, Qiongdongnan Basin [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(8): 13-25.]
- [67] 刘杰, 刘丽华, 吴能友, 等. 南海东沙海域深水末次冰期以来天然气水合物稳定带演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(2): 146-155. [LIU Jie, LIU Lihua, WU Nengyou, et al. Evolution of gas hydrate stability zone in the deep water of Dongsha sea area since the Last Glaciation Maximum [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(2): 146-155.]
- [68] Riboulot V, Ker S, Sultan N, et al. Freshwater lake to salt-water sea causing widespread hydrate dissociation in the Black Sea [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 117.
- [69] Maslin M, Owen M, Betts R, et al. Gas hydrates: past and future geohazard? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, 368(1919): 2369-2393.
- [70] Eldholm O, Bungum H. Potential secondary events caused by early Holocene paleoearthquakes in Fennoscandia: a climate-related review [J]. *Norwegian Journal of Geology*, 2021, 101: 202108.
- [71] Paull C K, Brewer P G, Ussler W, et al. An experiment demonstrating that marine slumping is a mechanism to transfer methane from sea-floor gas-hydrate deposits into the upper ocean and atmosphere [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22(4): 198-203.
- [72] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: testing the clathrate gun hypothesis [J]. *Geology*, 2004, 32(1): 53-56.
- [73] Brothers D S, Luttrell K M, Chaytor J D. Sea-level-induced seismicity and submarine landslide occurrence [J]. *Geology*, 2013, 41(9): 979-982.
- [74] Yelissetti S, Spence G D, Riedel M. Role of gas hydrates in slope failure on frontal ridge of northern Cascadia margin [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(1): 441-458.