

# 南海西北陆坡天然气水合物调查区滑坡带特征及成因探讨

陈泓君<sup>1,2,3</sup>, 黄磊<sup>2</sup>, 彭学超<sup>2</sup>, 吴蛟岐<sup>2</sup>, 李文成<sup>2</sup>, 王英民<sup>4</sup>

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州, 510075; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国石油大学, 北京 102249

**摘要:** 近十几年来, 我国在南海琼东南陆坡区、西沙海槽区和神狐海域陆续开展了多个航次的天然气水合物资源调查工作。调查资料揭示南海西北陆坡海底滑坡带较为发育。其成因复杂, 因地形地貌、底质、沉积作用、构造活动的影响而发育规模不等、形态各异的滑坡带。利用近年来调查获得的高分辨率单道地震及多波束测深资料, 在以往天然气水合物调查区内识别出 3 个滑坡带: 神狐滑坡带、西沙海槽北坡滑坡带和琼东南陆坡滑坡带。神狐滑坡带位于神狐暗沙东南侧陆架坡折带, 水深 400—600m, 长约 100km, 宽约 25km, 呈 NE—SW 向展布, 其形成与天然气水合物分解密切相关, 稳定性较好。西沙海槽北坡滑坡带位于西沙海槽北侧陆坡, 水深约 2000—3100m, 长约 90km, 宽约 15—20km, 呈近 EW 走向, 为巨厚沉积物在重力作用下发生整体性滑移, 稳定性较好, 但局部仍存在不稳定区域, 极易发生滑坡扇。琼东南陆坡滑坡带位于琼东南陆坡陡坡处, 水深约 250—850m, 呈 NE—SW 向展布, 长约 150km, 宽约 5—10km, 其主要受活动断层及底流侵蚀影响, 稳定性较差。本研究成果可为天然气水合物资源调查与勘探提供科学依据。

**关键词:** 南海; 陆坡; 天然气水合物; 滑坡带; 特征

中图分类号: X43: P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)05-0018-08

## Discussion of characteristics and formation of landslide zones in the gas hydrate survey area of northwest continental slope, the South China Sea

CHEN Hong-jun<sup>1,2,3</sup>, HUANG Lei<sup>2</sup>, PENG Xue-chao<sup>2</sup>, WU Jiao-qi<sup>2</sup>, LI Wen-cheng<sup>2</sup>, WANG Ying-min<sup>4</sup>

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract:** Several cruises of gas hydrate resource survey have been carried out at Qiongdongnan continental slope, Xisha trough as well as Shenhu area since 1999. The geological data revealed that sub-marine slides were developed in the northwestern continental slope of the South China Sea. Three landslide zones were identified based on high-resolution single-channel seismic profiles and multi-beam echo sounding data. This paper discusses in detail the characters and formation mechanism of these landslide zones. Shenhu landslide zone is about 100 km long, 25km wide, and is oriented along the NE-SW direction at a water depth of 400–600m. It has close relationship with gas hydrate dissociation and stable geological engineering condition. Xisha trough northern slope landslide zone is about 90 km long, 15–20km wide, and has an EW trending at a water depth of 2000–3100m. It was formed by huge thickness sediment movement under process of gravity. Xisha trough slide has a better geological engineering condition, but its slide fan still can be seen in some unstable segments. Qiongdongnan continental slope landslide zone is about 150 km long, 5–10km wide, and is oriented in a NE-SW direction at a water depth of 250–850m. It was affected by active faults and bottom current erosion, and has an unstable geological condition.

收稿日期: 2010-05-26; 修订日期: 2010-08-17。林强编辑

基金项目: 中国地质调查局项目(项目编号: 1212010611302); 国家自然科学基金项目(40972077)

作者简介: 陈泓君(1973—), 男, 海南省海口市人, 高级工程师, 主要从事海洋区域地质调查与研究。E-mail: chhju@163.com

The results of this study can be a scientific base for gas hydrate survey and exploration.

**Key words:** South China Sea; continental slope; gas hydrate; landslide zones; characteristics

海底滑坡是具有极大危害的海洋地质灾害之一,对海上工程设施危害性巨大。由于海底滑坡不稳定性,往往导致其上的海上构筑物倒塌,对深海油气钻探、输油管道、海底电缆等海底工程设施造成破坏,导致重大人员伤亡和经济损失。据研究,在各种海底地质灾害中,滑坡的权重系数为 20<sup>[1]</sup>,为最高级别,可见滑坡危害性巨大。滑坡主要分布在海岸陡坡地段、三角洲前缘陡坡处、外大陆架边缘<sup>[2-5]</sup>。海底滑坡诱发的因素较多,有断裂活动、沉积物重力作用、火山爆发、地震等<sup>[6-9]</sup>。近年来国内外研究表明,天然气水合物的分解也是导致海底滑坡的因素之一<sup>[10-15]</sup>。

以往对南海北部海底滑坡的研究主要集中在海岸带及陆架浅水区,西北部陆坡深水区的滑坡主要见于与天然气水合物相关研究中。自 1999 年以来,我国科学家在南海琼东南陆坡、西沙海槽区和神狐海域开展了多个航次的天然气水合物资源调查,先后发现了天然气水合物存在的地质、地球物理和生物等证据,表明我国海域赋存丰富的天然气水合物

资源。根据以往调查资料发现,在南海北部天然气水合物调查区内亦发育大量的滑坡地貌。

本文利用近年来广州海洋地质调查局在南海西北陆坡天然气水合物调查区所获得的高分辨率单道地震及测深资料,对研究区海底滑坡带分布范围、外部形态、内部结构等特征及成因进行初步探讨。

研究区位于南海西北部陆坡深水区(图 1),地形变化大,水深从陆架区几十米增至海盆区的 3500m,平均坡度 2°—3°,局部地段可达 10°以上。海底发育有峡谷、陡坎、海山、海丘、斜坡等多种地貌单元。区内分布有琼东南盆地、西沙海槽盆地、珠江口盆地等多个新生代盆地,构造背景复杂,新生代构造活动频繁、强烈。断裂有 NNE、NNW、NEE 向 3 组<sup>[16]</sup>。研究区新生代沉积速率高,沉积厚度大<sup>[17]</sup>,如琼东南盆地海相第四系厚度可逾 2000m<sup>[18-19]</sup>。因此,在强烈的新生代构造活动、充足的物源供应以及复杂的海底地形等因素影响下,研究区易发生海底滑坡,也是研究滑坡形成机制的理想场所。

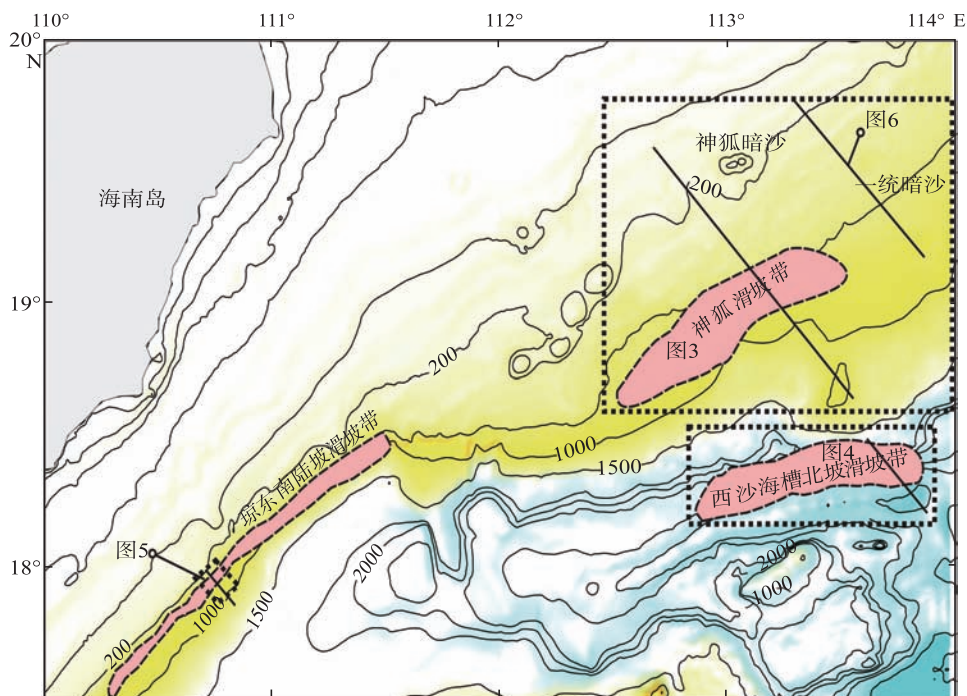


图 1 研究区水深和海底滑坡带位置图(虚线方框中的实直线为地震测线)

Fig. 1 Water depth and landslide zone distribution of the study area

## 1 滑坡体及滑坡带特征

研究区滑坡主要发育于水深 250—3100m 的陆

架坡折带及陆坡区。滑坡具有典型的滑坡面、滑坡谷和滑坡体三大滑坡要素(图 2)。滑坡面是滑坡体沿其上发生滑动的构造面,具双相位、低频、强振幅、高连续的地震反射特征。滑坡谷是滑坡体滑动后在

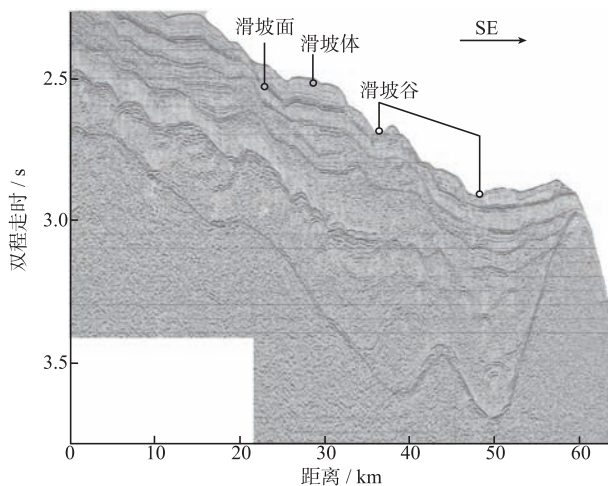


图2 海底典型滑坡地震剖面  
Fig. 2 Typical seismic profile of landslide

海底地貌上形成的负地形, 深度几米至几百米不等, 在滑动方向上滑坡谷可组合形成滑坡阶梯。滑坡体内部通常为中—弱振幅、中—低连续、平行—亚平行及杂乱反射等地震反射特征, 在地貌上通常表现为鼓状或丘状体。

研究区内滑坡具有带状分布特征。依据滑坡体分布位置、外部形态、内部结构等特点, 划分出 3 个滑坡带: 神狐滑坡带、西沙海槽北坡滑坡带以及琼东南陆坡滑坡带(图 1)。各滑坡带在地形地貌、外部形态、内部结构上具有明显的差异。

### 1.1 神狐滑坡带

位于神狐暗沙东南侧陆架坡折带, 水深约 400—600m, 坡度较为平缓, 仅  $0.5^{\circ}$ — $2^{\circ}$ , 呈 NE—SW 向展布, 长约 100km, 宽约 25km。滑坡带海底地貌上发育高差 20—40m 不等的鼓状海丘(图 1, 图 3)。该滑坡带具双层结构, 下层滑坡体厚 75—85m, 由 NW 向 SE 呈楔状减薄, 地震反射特征为杂乱反射。上层滑坡体较厚, 厚度约 150—250m, 具中低频、中弱振幅, 中—低连续波状反射特征, 层间发育犁式断层。断层上部呈近平行分布, 间距约 500m, 往下逐渐收敛至下层滑塌体顶面, 断层使上部地层层理发生扭曲, 并顺断层面滑动。该滑坡带双层结构表明下层滑坡带形成较早, 随后导致上部沉积物结构发生变化, 地层呈拉张应力状态并产生犁式断层, 并在重力作用下沿断层面发生蠕动, 滑脱, 在海底形成鼓状海丘。

### 1.2 西沙海槽北坡滑坡带

位于西沙海槽北侧陆坡, 水深约 2000—3100m, 呈近 EW 走向, 长约 90km, 宽约 15—20km, 坡度较陡, 约  $2^{\circ}$ — $5^{\circ}$ , 局部地段大于  $10^{\circ}$ (图 1)。海底分

布有滑塌谷、滑坡陡崖、滑坡扇。滑坡带沿海槽北侧斜坡顺坡形成并一直延伸到海槽底部。该滑坡带上发育两个大型的滑坡扇。滑坡扇具有典型的扇根、扇中、扇端结构, 图 4e 揭示其右侧一滑坡扇呈长椭圆形, EW 向长约 8km, SN 向宽约 6km, 高差约 750m。

地震剖面显示该滑坡带由后端缓慢堆积滑坡体和前端快速堆积滑坡体两部分组成(图 4)。后端缓慢堆积滑坡体沉积物厚达 350m。为中频、中弱振幅、中连续, 平行—亚平行及局部波状或杂乱反射特征。反射同相轴连续性较好, 反映其运动方式为缓慢移动, 地层形变小的特点。内部发育多个滑坡面, 表明该滑坡具有多阶段, 多期次发育特征。海底滑坡谷未被沉积物充填, 说明在第四纪仍有活动。前端快速滑坡体内部具杂乱反射地震相, 反映大量沉积物快速堆积形成, 其在海底地貌上为一典型滑坡扇。

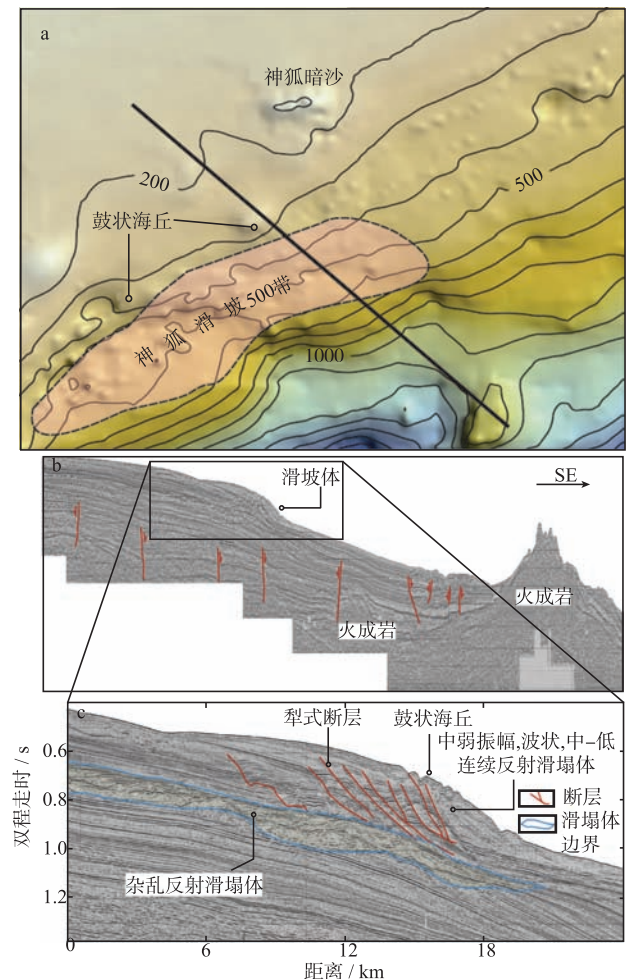


图3 神狐滑坡带地貌及地震反射特征

a. 神狐滑坡带地貌; b. 滑坡带地震剖面; c. 滑塌体局部特征

Fig. 3 Morphology and seismic reflection characters in Shenhu landslide zone. a. morphology of Shenhu landslide zone; b. seismic profile of slide; c. detailed characters of landslide



### 1.3 琼东南陆坡滑坡带

位于琼东南陆坡陡坡处, 水深约 250—850m, 呈 NE-SW 向展布, 滑坡带长约 150km, 宽约 5—10km, 高差 450m, 坡度较陡, 约  $5^{\circ}$ — $10^{\circ}$ , 局部地段  $10^{\circ}$ — $15^{\circ}$ (图 1)。由于该部位陆坡向深海平原方向水深急剧变化, 水道纵横, 峡谷发育, 其上分布大量的冲刷峡(槽)谷, 呈 NW—SE 向延伸, 与等深线走向垂直, 强烈切割海底。峡谷长约 8—10km, 宽

2.5—3km, 峰与谷锯齿状排列, 相对高差可达 150—200m, 峡谷规模由 SE 向 NW 方向逐渐减小(图 5d)。

地震剖面揭示滑坡体主要发育在冲刷峡(槽)谷两侧, 其发育规模受冲刷峡(槽)谷影响。冲刷峡(槽)谷切割深、规模大, 则发育其两侧的滑坡体规模也大; 反之, 冲刷峡(槽)谷规模小, 则滑坡体规模亦小。钻井发现琼东南陆坡滑坡体多为泥岩<sup>[20]</sup>。滑坡体地震反射特征为杂乱反射, 具有快速堆积的特点。

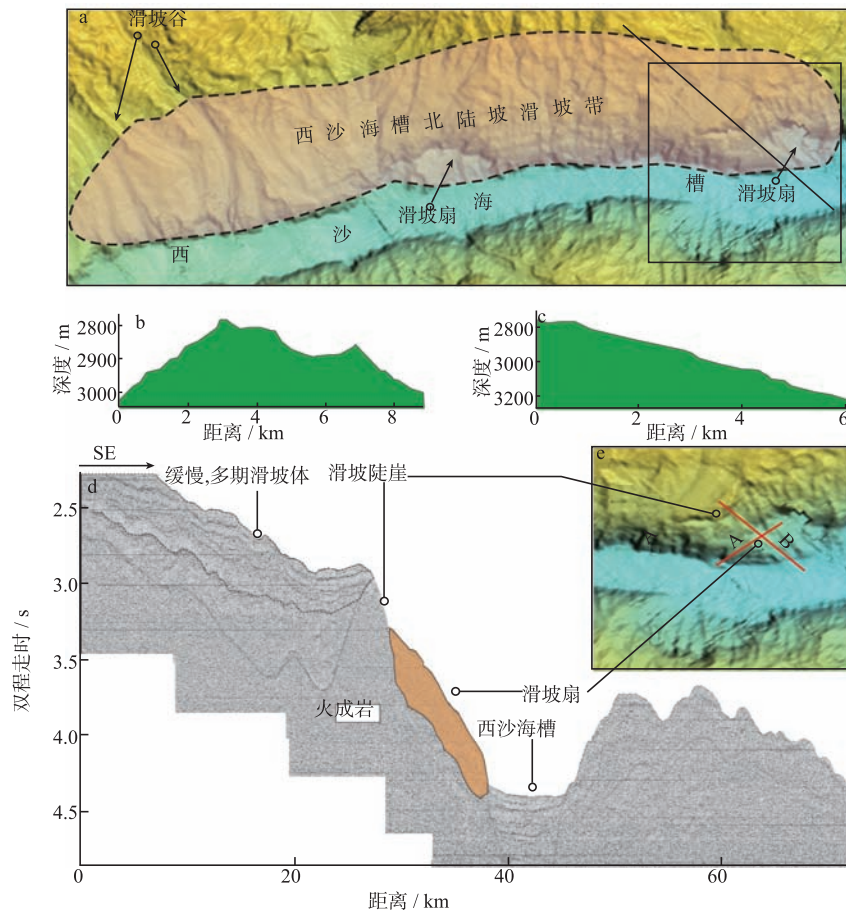


图 4 西沙海槽北陆坡滑坡带地貌及地震反射特征

a. 西沙海槽北陆坡滑坡带地貌; b. 滑坡扇地貌剖面 A; c. 滑坡扇地貌剖面 B; d. 滑塌体地震剖面; e. 滑坡扇地貌及横切剖面位置

Fig. 4 Morphology and seismic reflection characters in Xisha northern slope landslide zone. a) morphology of Xisha northern slope landslide zone; b) morphology cross section A of slide fan; c) morphology cross section B of slide fan; d) seismic profile of landslide; e) morphology of slide fan and position of cross section

## 2 滑坡带成因探讨及稳定性初步分析

引起海底滑坡的因素较多, 底质调查发现研究区表层沉积物主要为粉砂及粉砂质黏土, 这类沉积物具有很高的亲水性、胀缩性和崩解性, 抗剪强度差, 孔隙率高, 固结程度低, 最易形成滑坡。坡度也是影响滑坡发育的影响因素之一, 当沉积物处于足够的坡度时, 在重力的作用下极易与周围土体发生

分离, 并沿着滑动面向下滑动至缓坡位置。地震、断裂活动及风浪也是滑坡体发生的诱发因素, 地震直接破坏上部沉积体结构, 减少黏聚力, 特别是滑动力和抗滑动力大致相等, 处于极限平衡状态的海底, 容易受到地震的作用, 形成滑坡。调查表明, 陆架外缘发育许多切割至海底的浅断层, 这些断裂同样对土体产生破坏作用, 在适当的条件下可诱发滑坡。底层海水的冲刷侵蚀同样会使沉积物结构

受到破坏, 尤其南海是热带风暴和台风多发区, 风暴潮会使海底表层的孔隙水压力升高, 从而导致沉积物运移、崩解和流动。天然气水合物赋存于低温高压环境下的沉积物中, 当外界条件导致天然

气水合物矿区温度升高或者压力减小, 天然气水合物分解, 释放出气体在地层中形成超压, 从而使使得沉积物固结程度大大降低, 并引起海底滑塌或滑坡。

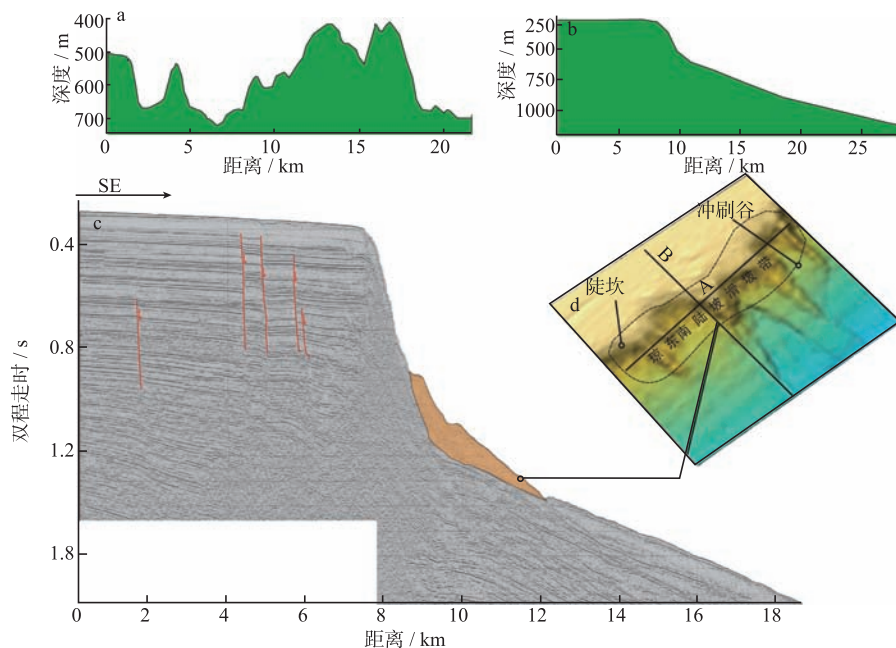


图5 琼东南陆坡滑坡带地貌及地震反射特征

a. 滑坡地貌剖面 A; b. 滑坡地貌剖面 B; c. 滑坡带地震剖面; d. 滑坡地貌及地形剖面位置

Fig. 5 Morphology and seismic reflection characters in Qiongdongnan continental slope landslide zone. a) morphology cross section A of slide; b) morphology cross section B of slide; c) seismic profile of slide; d) morphology of slide and position of cross section

## 2.1 神狐滑坡带

2007年我国在神狐海域成功钻取了天然气水合物实物样品, 钻取的岩心样品显示在天然气水合物稳定带及之上的地层岩性为松散的粉砂质泥岩<sup>[21]</sup>。此外, 地震调查发现该海域存在与天然气水合物有关的滑坡体, 滑塌作用非常强烈, 分析认为可能与天然气水合物的形成和分解有关<sup>[22]</sup>。

研究区神狐滑坡带海底坡度平缓, 距天然气水合物钻孔位置仅 200km 左右。滑坡体往深水方向过渡为正常海相沉积地层, 这表明滑坡带的形成并非单纯重力作用引起(图 3)。地震剖面显示下伏地层中断裂较为发育, 且滑坡带处于神狐低隆起, 地层轻微褶皱, 构造上形成褶皱-断裂组合。据研究, 被动大陆边缘天然气水合物形成与断裂-断褶构造带密切相关, 断裂构造及褶皱地层构成了褶皱-构造矿体系, 为天然气向浅部天然气水合物稳定带运移创造了有利条件<sup>[23]</sup>。神狐滑坡带又恰好位于构造坡折带, 研究表明构造坡折带与天然气水合物的成藏关系极为密切<sup>[22]</sup>。神狐海域的地质构造条件、沉积特征、气源条件、温压条件等都非常有利于天然气

水合物发育<sup>[24]</sup>。南海北部陆坡区坡折带陡峭的陆坡上常发育滑塌型天然气水合物矿藏<sup>[23]</sup>。

位于滑坡带 NE 侧的一统暗沙海域, 地震调查未发现与天然气水合物有关的滑坡现象(图 6)。地层地震反射特征为正常海相沉积, 总体上以中振幅、中-高频、中-高连续、平行-亚平行结构、席状披覆外形为主。在一统暗沙 NW 侧附近局部地层见滑塌现象, 可能为深部岩浆喷出导致附近地层发生变形滑动所致。调查显示该部位缺少有利于天然气水合物运移及富集的褶皱-断裂构造体系, 未见地层圈闭, 断层不甚发育, 部分断层几乎切至海底, 由深部运移至上部地层的天然气极易通过直达海底的断层逃逸出来, 不利于天然气水合物的富集。

神狐滑坡带下部发育火成岩及正断层, 侵入岩使得地层上隆形成背斜构造, 断层组合则形成构造型地垒地堑, 为深部天然气向浅部地层运移提供了有利通道。火成岩、正断层、地垒地堑及背斜构造的发育及组合非常有利于深部天然气向上运移至地层圈闭中, 并在温压条件相对理想的稳定带富集成天然气水合物, 而后随着天然气水合物的分解, 其上覆地层受影响而发育相应的滑坡带, 该滑坡带下



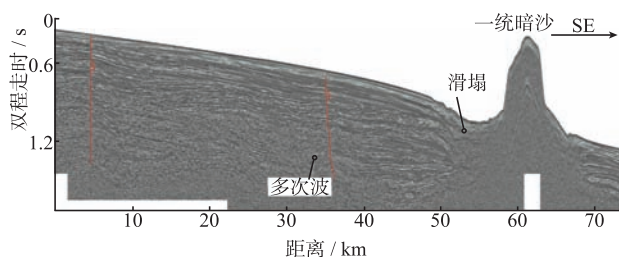


图6 一统暗沙海域地震剖面

Fig. 6 Seismic profile in Yitong Reef

部地层中未发现 BSR 的存在, 可能后期天然气水合物分解导致 BSR 消失(图 7)。

综合以上因素分析, 神狐滑坡带可能与天然气水合物的分解密切相关。天然气水合物在该区形成后, 由于后期构造运动或海平面下降, 导致区域地质条件改变, 天然气水合物快速分解并释放大量的水和气体, 形成下层杂乱反射滑坡体, 而后造成上覆流体静水压力增大, 上部地层发育犁式断层, 使含天然气水合物沉积层沿断层面发生滑动或滑塌, 并在海底形成鼓状丘体。

## 2.2 西沙海槽北坡滑坡带

西沙海槽属新生代张裂盆地, 呈弧形近 EW 向展布, 其形成早于 30Ma<sup>[25]</sup>, 同时具有多期构造活动特点<sup>[26]</sup>, 海槽新生代沉积厚度约 2.5—8km<sup>[27]</sup>。该滑坡带地形陡峭, 部分地段坡度可达 10°。海槽底和陆坡转折带明显, 槽底平坦, 宽度在 6—8km 左右。从槽坡到槽底, 随水深的增加, 沉积物细粒级组分也相应增加<sup>[28]</sup>。陆坡处堆积了大量的粉砂质黏土等细粒沉积物。其上发育陡坎、冲刷沟谷、浊积扇等与滑塌有关的地貌单元<sup>[29]</sup>。新生代构造较为强烈, 西沙海槽自晚渐新世形成以来, 有多次构造活动发生, 部分断层切割至海底, 表明第四纪仍有构造活动。北侧陆坡处沉积物厚度达 350m, 受构造活动影响, 巨厚细粒沉积物在重力作用下发生整体性滑移, 在滑坡体前缘因受火成岩基底阻挡, 地层产状发生褶曲、变形。部分未受阻挡区域则在海底形成滑坡谷、滑坡陡坎、滑坡扇等地貌单元。由于构造活动具有多期性, 导致滑坡多次发生, 并形成上下互相叠置, 具多个滑坡面的滑坡体, 这表明该滑坡带具有持续性、继承性, 局部具有突发性, 突发性的构造运动可形成大规模、快速搬运的滑坡扇。由于陆架搬运来的沉积物主要堆积在北侧陆坡以及槽底平原, 而海槽南侧距离沉积物源相对较远, 沉积速率较低, 沉积厚度较薄, 难以形成大规模的滑坡带(图 8)。

## 2.3 琼东南陆坡滑坡带

被动大陆边缘陆坡环境常发育侵蚀能力强的浊

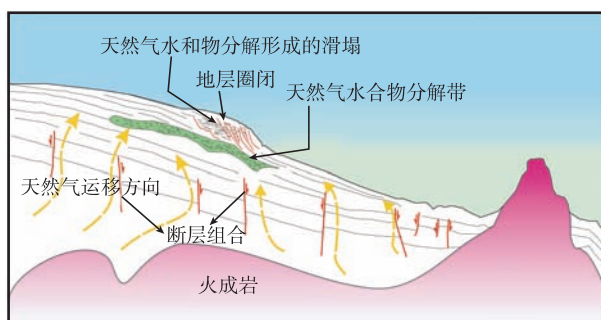


图7 神狐滑坡带与天然气水合物分解示意图

Fig. 7 Schematic diagram of submarine slide and gas hydrate decomposition in Shenhu landslide zone

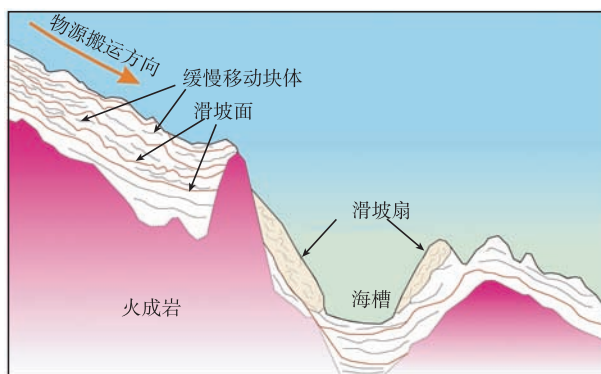


图8 西沙海槽北坡滑坡带示意图

Fig. 8 Schematic diagram of Xisha northern slope landslide zone

流, 且在陆坡上形成侵蚀峡谷或水道<sup>[30]</sup>。琼东南陆坡海底冲刷峡(槽)谷发育, 具有高差明显的谷形地貌, 主要是由底流或浊流冲刷而成<sup>[2]</sup>。滑坡带处于陆架与陆坡转折带, 坡度较陡, 大量沉积物通过海底冲刷峡(槽)谷被搬运到深海平原沉积。底流或浊流的长期冲刷导致谷侧壁沉积物变得松散, 边坡处于不稳定状态, 底流或浊流流速越强, 冲刷越明显, 形成的槽谷规模越大。地震剖面揭示琼东南陆坡部位浅活动断层发育, 此类断层主要形成于第四纪, 尤其第四纪晚期, 与现代地质灾害, 特别是地震活动等有着密切的联系<sup>[31-32]</sup>。因此, 后期形成的浅断层对峡(槽)谷两侧沉积物的结构造成破坏, 甚至使沉积块体发生重力移动。在底流、风暴、地震等因素作用下, 在槽谷两侧陡坡处极易诱发滑坡现象。滑坡体的规模受峡(槽)谷规模的影响, 槽谷规模越大, 其两侧壁坡越陡, 更易诱发滑塌, 其上所发育的滑坡规模也越大(图 9)。

## 2.4 稳定性初步分析

由于滑坡带位于深水区, 受限于地形、技术条件等原因, 对滑坡带的稳定性评价工作目前还未开

展,只能对其稳定性作定性分析。琼东南陆坡滑坡带具有坡度陡、地形高差大、现代海底峡谷纵横交错、浅活动断层发育等特点,其复杂的地质条件决定了该滑坡带的稳定性最差,极易发生滑坡。

西沙海槽北陆坡滑坡带以缓慢、多期层间滑动为主,由于距离物源较远,沉积速率相对较低,沉积物的大量堆积需要较长的时间,其稳定性相对较好,但不容忽视的是该滑坡带外缘发育有若干个大规模的滑坡扇,这表明该滑坡带整体稳定性虽较好,但在其外缘仍存在不稳定区域,极易发生规模较大的滑坡体。

神狐滑坡带与天然气水合物的分解密切相关,以层间蠕动为主,主要发育在陆架坡折带或外陆架区,其延伸范围有限,规模较小,稳定性较好。

### 3 结论

研究区位于南海西北部陆坡深水区,发育神狐滑坡带、西沙海槽北陆坡滑坡带和琼东南陆坡滑坡带。神狐滑坡带位于神狐低隆起,陆架坡折带具有双层结构。下部为杂乱反射,上部为具中低频、中弱振幅,中-低连续波状反射特征,并发育犁式断层。该滑坡带具有典型的断裂-褶皱构造,其形成与该区域发育的天然气水合物的形成及分解密切相关。该滑坡带稳定性较好。

西沙海槽北陆坡滑坡带地震反射特征为中频、中弱振幅、中-低连续,平行-亚平行,局部杂乱反射,滑坡扇则为杂乱反射特征。该滑坡带是巨厚细粒沉积物在重力作用下发生整体性滑移所形成,并具有多期活动的特点,稳定性较好,但局部仍存在不稳定区域,极易发生滑坡扇。

琼东南陆坡滑坡带具杂乱反射特征。因底流的冲刷以及后期浅活动断层对冲刷峡(槽)谷两侧沉积物结

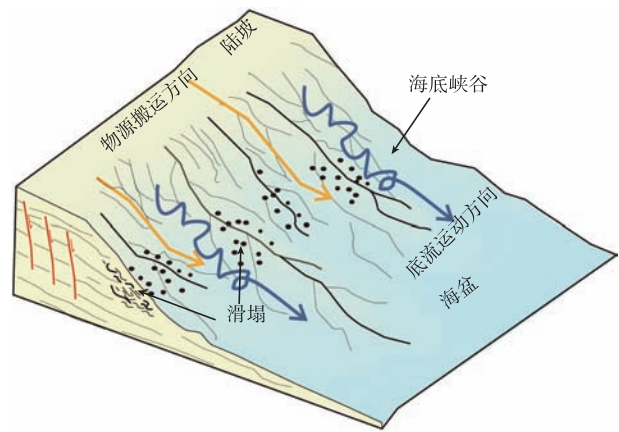


图9 琼东南陆坡滑坡带示意图

Fig. 9 Schematic diagram of Qiongdongnan continental slope landslide zone

构的破坏而发育大量的滑坡体,滑坡体的规模随着峡(槽)谷规模的减小而变小。该滑坡带稳定性较差。

南海西北部陆坡地形变化大,水动力强,断层、岩浆活动强烈,是发育多个滑坡带的主要因素。研究区发育红河断裂,北部陆坡断裂、西沙海槽断裂,导致该区构造上处于地震多发带,具备了滑坡形成的诱发机制,加上沉积物供应充足,沉积速率高,形成较厚的第四纪地层,这是形成滑坡的物质基础。底流(浊流)冲刷、活动断层、天然气水合物分解等是滑坡带形成的诱发因素。总体而言,南海西北部深水区滑坡现象明显,类型众多,其成因复杂,不同构造部位受底质、地形地貌、沉积作用、构造作用的影响,可形成规模不等、形态各异的滑塌体。

目前对于天然气水合物调查区的潜在地质灾害研究还未深入,今后应加强基础性的海洋区域地质调查,进一步了解和研究海底地质灾害的分布状况和形成机制,为天然气水合物资源的调查与勘探开发、海洋工程施工提供科学依据。

### 参考文献

- [1] 杨春霞,王春民,王圣洁. 南海北部灾害地质稳定度评价模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 77-79.
- [2] 鲍才旺,姜玉坤. 中国近海海底潜在地质灾害类型及其特征[J]. 热带海洋, 1999, 18(3): 24-31.
- [3] 冯志强,冯文科,薛万俊. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996: 1-178.
- [4] CANALS M, LASTRAS G, URGELES R, et al. Slope failure dynamic sand impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project [J]. Marine Geology, 2004, 213(1-4): 9-72.
- [5] MASLIN M, NAJA M, BILAL H, et al. Sea level and gas hydrate controlled catastrophic sediment failures of the Amazon Fan [J]. Geology, 1998, 26(12): 1107-1110.
- [6] 夏真,郑涛,庞高存. 南海北部海底地质灾害因素[J]. 热带海洋, 1999, 18(4): 91-95.
- [7] WILSON C K, LONG D, BULAT J. The morphology, setting and processes of the Afen Slide[J]. Marine Geology, 2004, 213: 149-167.
- [8] URGELES R, LEYNAUD D, LASTRAS G, et al. Back-analysis and failure mechanisms of a large submarine slide on the Ebro slope, NW Mediterranean [J]. Marine Geology, 2006, 226: 185-206.
- [9] SULTAN N, VOISSET M, MARSET B, et al. Potential role of compressional structures in generating submarine slope

- failures in the Niger Delta[J]. *Marine Geology*, 2007, 237: 169–190.
- [10] THIEM R, BERNT SEN J, ELDEVIK T, et al. Gas exploration beyond the shelf break: An oceanographic challenge [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21: 136–141.
- [11] BROWN H E, HOLBROOK W S, HORNBACH M J, et al. Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga Slide, off shore Norway [J]. *Marine Geology*, 2006, 229: 179–186.
- [12] 张树林. 珠江口盆地白云凹陷天然气水合物成藏条件及资源量前景[J]. *中国石油勘探*, 2007(6): 23–27.
- [13] 沙志彬, 杨木壮, 梁劲, 等. 南海北部陆坡海底异常地貌特征与天然气水合物的关系[J]. *南海地质研究*, 2003(14): 29–34.
- [14] 吴时国, 姚根顺, 董冬冬, 等. 南海北部陆坡大型气田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.
- [15] 吴时国, 姚伯初. 天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 16–20.
- [16] 万玲, 姚伯初, 吴能友, 等. 南海西部海域新生代地质构造[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 45–52.
- [17] 黄维, 汪品先. 南海沉积物总量的统计方法与结果[J]. *地球科学进展*, 2006(5): 465–473.
- [18] 夏伦煜, 麦文, 赖霞红, 等. 莺歌海–琼东南盆地第四纪初步研究[J]. *中国海上油气* 1989, 2(3): 21–28.
- [19] 汪品先, 夏伦煜, 王律江, 等. 南海西北陆架的海相更新统下界[J]. *地质学报*, 1991(2): 176–168.
- [20] 吕明. 莺–琼盆地低位沉积模式的新探讨[J]. *中国海上油气: 地质*, 2002, 16 (4): 221–230.
- [21] 陆敬安, 杨胜雄, 吴能友, 等. 南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 447–451.
- [22] 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(1): 81–86.
- [23] 张光学, 祝有海, 梁金强, 等. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. *现代地质*, 2006, 20(4): 605–612.
- [24] 雷新民, 张光学, 郑艳. 南海北部神狐海域天然气水合物形成及分布的地质因素[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(5): 1–9.
- [25] 施小斌, 周蒂, 张毅祥, 等. 南海西沙海槽岩石圈的密度结构与热流变结构[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(2): 23–31.
- [26] 何廉声, 王光宇, 石效超. 西沙海槽–新生代裂谷[J]. *地质论评*, 1980, 26(6): 486–489.
- [27] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海西沙海槽, 一条古缝合线[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(1): 1–10.
- [28] 陈道华, 蒋少涌, 刘坚. 西沙海槽表层沉积物地球化学特征及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 37–44.
- [29] 刘方兰, 吴庐山. 西沙海槽海域地形地貌特征及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 7–14.
- [30] 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 深水沉积研究前缘问题[J]. *地质论评*, 2007, 55(1): 36–44.
- [31] 李西双, 刘保华, 赵月霞, 等. 海底活动断裂研究方法及其我国近海活动断裂研究[J]. *海洋地质动态*, 24(3): 9–13.
- [32] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(5): 845–852.