

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.05.019

# 南海北部陆坡神狐海域沉积物失稳类型探讨

王一凡<sup>1,2,3</sup>, 苏正<sup>1,2</sup>, 苏明<sup>4</sup>, 王宏斌<sup>5</sup>, 沙志彬<sup>5</sup>, 梁金强<sup>5</sup>, 刘杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;

2. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082;

5. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510710)

**摘要:**利用广州海洋地质调查局采集的 2D 和准 3D 地震资料, 从整体形态、层次性和内部结构等方面对南海北部陆坡神狐海域内广泛发育的沉积物失稳进行了类型划分和特征描述, 并将沉积物失稳的分布特征和陆坡限制型海底峡谷群的分段性进行耦合关联, 进而分析沉积物失稳的空间变化规律。研究结果显示, 沉积物失稳可以划分为两种类型: 第一种类型位于峡谷群的下游段, 几乎不受峡谷群地貌的影响, 表现为多期次、内部连续和自北向南的块体运动方式, 主要以“残留”的形式位于峡谷群脊部; 另一种类型主要表现为沿峡谷群脊部向谷底的块体运动方式, 受到峡谷群地形起伏的影响, 在峡谷群头部, 主要为多期次滑移体, 中游段变形强度最大, 滑塌体是主要的类型, 而在下游段-尾部, 表现为滑移块体。第四纪以来, 源自北部珠江水系充足的沉积物供给和自北向南较陡的海底地形, 是沉积物失稳发育的关键控制因素; 陆坡限制型海底峡谷群可能造成了沉积物的再次变形作用, 使得沉积物失稳的空间变化规律与峡谷群分段性具有对应关系。此外, 神狐海域含气流体的垂向运移以及水合物矿体的存在, 也是研究区内沉积物失稳的重要控制因素。

**关键词:**沉积物失稳; 滑移; 滑塌; 陆坡限制型海底峡谷群; 神狐海域

中图分类号: P736.2 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2017)05-0184-11

由于重力作用引发的未固结沉积物沿着陆坡向盆底方向发生再次运动所形成的海底沉积物失稳(也称海底滑坡或陆坡失稳), 是大陆边缘最常见的深水地貌单元之一, 同时也是沉积物运移最重要的地质过程之一<sup>[1-6]</sup>。开阔环境下, 海底沉积物失稳的延伸将超过 200 km(挪威西北部大陆边缘发育的 Storegga 滑移体总长度超过了 500 km<sup>[7]</sup>), 成为重要的自然灾害类型, 对海洋油气开发钻井平台、海底管线等设施带来无法挽回的经济损失。例如 1982 年墨西哥湾飓风引起的海底滑坡, 导致两个钻井平台倒塌; 2006 年 12 月吕宋海峡的大地震引起的大规模块体流沉积, 冲断了亚太国家之间的通信光缆,

每天给中国大陆、台湾、香港造成的损失高达 70 多亿美元<sup>[8]</sup>。

通常情况下, 深海沉积物如果具有较高的沉积速率、较低的渗透率和较低的颗粒间剪切应力, 其发生变形的概率将会增大<sup>[1,9]</sup>。因此, 快速沉积物供给及欠压实、黏土物质含量、海底地形坡度变化、海平面升降、风暴、地震、气体充注所导致的地层超压、流体渗漏、水合物分解、火山喷发等因素都会导致海底沉积物失稳的形成和演化<sup>[10,11]</sup>。需要注意的是, 在地质历史时期的演化过程中, 海底沉积物失稳往往是多种因素共同作用的结果。

神狐海域位于南海北部陆坡的中部区域, 北部为珠江水系和珠江水下三角洲, 南部为珠江口外海底峡谷和西北次海盆(图 1a)。受沉积物自北向南的输送和搬运, 该区域发育着 17 条近似等间距分布的陆坡限制型海底峡谷群(图 1b)<sup>[12,13]</sup>。前人已经注意到该区域的沉积物失稳现象, 并根据地震反射结构的差异性进行了类型的划分和平面分布范围的勾绘<sup>[14,15]</sup>。但整体上来看, 对于该区域存在的两大地质现象, 即陆坡限制型海底峡谷群和沉积物失稳, 仍需要进一步的研究来分析二者在分布和成因上的关联性。利用广州海洋地质调查局在这一区域采集的大量 2D 和准 3D 地震资料, 本次研究从地震反射

基金项目: 国家自然科学基金项目(41576048); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)开放基金(PLC201407); 广州市珠江科技新星(201710010198); 中国石油-中国科学院科技合作项目(2015A-4813)

作者简介: 王一凡(1992—), 男, 硕士研究生, 目前主要从事南海北部陆坡水合物成藏地质条件方面的学习和科研工作, E-mail: 441636445@qq.com.

通讯作者: 苏明(1983—), 男, 博士, 副教授, 目前主要从事深水沉积体系及资源效应、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的教学科研工作, E-mail: suming3@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2017-04-11; 改回日期: 2017-05-18. 蔡秋蓉编辑

特征的描述入手,基于形态和内部结构识别出了 6 大类 9 小类的沉积物失稳类型,在平面上描述了不同类型的分布特征,并尝试将沉积物失稳的分布特征与海底峡谷群的平面分段性相关联,来描述沉积物失稳的空间变化规律。研究认为,第四纪充足的沉积物供给和较为陡峭的自北向南的坡降,导致了研究区沉积物失稳的广泛存在。在不受峡谷地形影响的区域,波状的、内部块体向下陆坡运动的沉积物失稳类型可能暗示了早期沉积物失稳的存在,它们被峡谷群所侵蚀,“残留”分布在下游段的峡谷脊部位置。更多位于峡谷群脊部的沉积物失稳,将受到陆坡限制型海底峡谷群地形特征的影响,发生沿峡谷脊部向谷底的再次变形作用,其分布特征与峡谷群的分段性具有空间上的耦合关联。此外,神狐海

域含气流体的垂向运移以及水合物矿体的存在,也是研究区内沉积物失稳的重要控制因素。

### 1 区域地质背景

神狐海域位于南海北部陆坡的中部,水深范围 200~1 700 m(图 1a),介于西沙海槽和东沙群岛之间。整个陆坡表现为 NE—SW 的延伸方向,平均坡度为 2°<sup>[16]</sup>。构造上,研究区隶属于珠江口盆地的白云坳陷<sup>[17]</sup>。珠江口盆地的构造演化阶段以 23.8 Ma 为界可以划分为 2 个阶段,始新世-渐新世的裂隙阶段和新近系-第四纪的裂后阶段<sup>[18]</sup>。中中新世以来,珠江口盆地的构造活动趋于稳定,受东沙运动的影响,构造沉降速率表现为异常高值的特

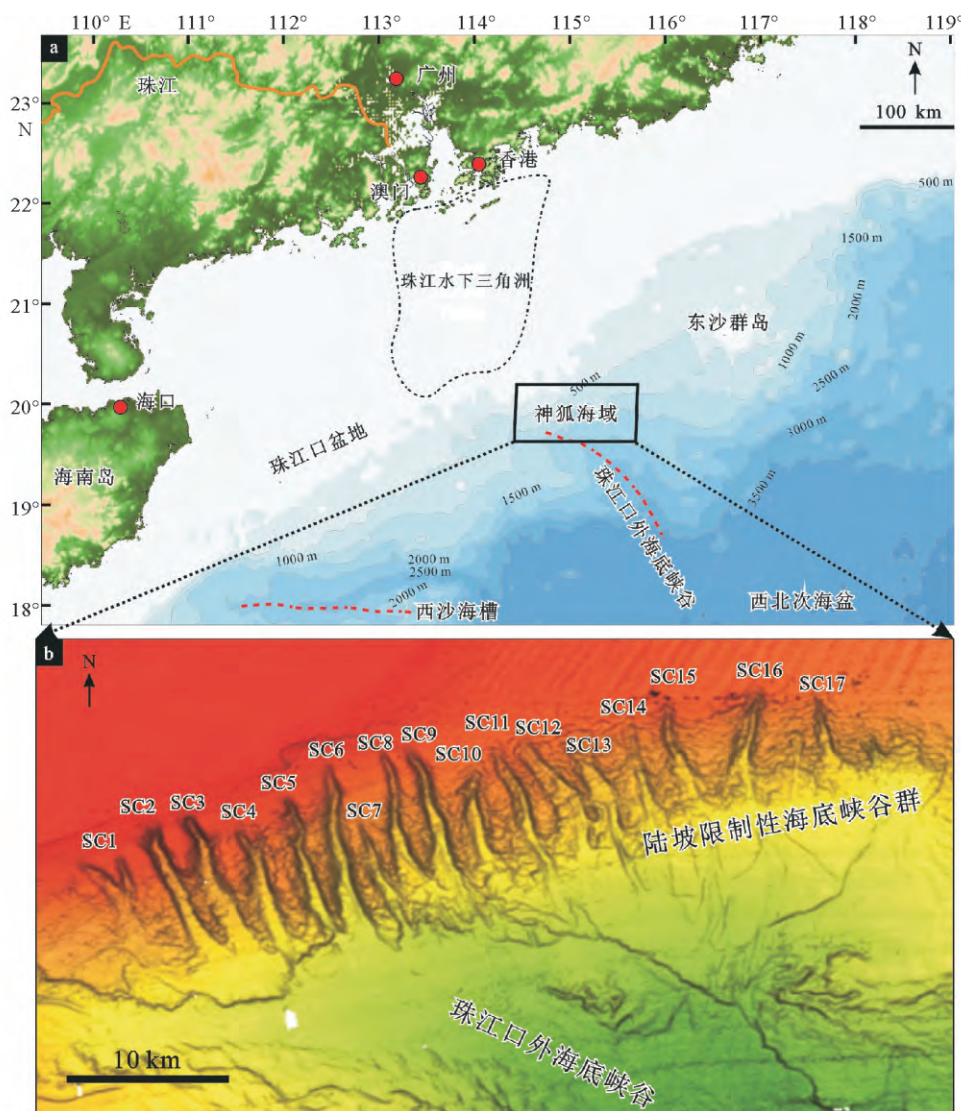


图 1 南海北部陆坡神狐海域的区域位置图(a)及研究区的海底地貌图(b)

Fig. 1 (a) Location map of the Shenhu Area on the northern continental slope of the South China Sea; (b) Seafloor topography of the study area with 17 slope-confined submarine canyons

征<sup>[19]</sup>。同时期的沉积充填序列以海相沉积为主,常见陆架边缘三角洲、深水浊积水道、块体流沉积体等<sup>[20-22]</sup>。在这一地质历史时期,神狐海域的构造-沉积背景与珠江口盆地具有一致性。

从研究区内 2D 地震测线的海底追踪和浅表层地震反射特征来看,神狐海域位于陆架陆坡至盆底的范围。自北向南的剖面中,沉积地貌由较大的坡度、明显的进积特征变化为海底粗糙、海底峡谷大量发育、沉积物失稳频发的区域,再变化为坡度较缓的开阔区域;自西向东的剖面中,陆坡限制型海底峡谷群非常清晰,呈现为“U”型或“V”型的形态特征,并显示出对下伏地层的侵蚀<sup>[23]</sup>。这些海底峡谷位于珠江口峡谷的东北侧(图 1a),垂直于陆坡,峡谷的深泓线弯曲度较小,呈 NNW—SSE 向线状平行展布(图 1b)。

## 2 沉积物失稳的地震反射特征及分布

基于沉积物失稳在地震剖面上的反射特征,如整体形态、期次性和内部结构差异等要素,本次研究将这些沉积物失稳划分为 6 大类 9 小类(图 2),包括单块滑移体、单期次滑塌体、单期次滑移块体、多期次滑塌体、多期次滑移体、滑移滑塌复合体。

类型 a:其整体形态为透镜状,向着失稳方向(峡谷谷底)表现为层状收敛的特征,期次上多为单期次的错断(即单断式)。沉积体内部的地震反射同相轴具有中等反射强度、中等-好连续性的特征,没有发现同相轴的混乱或杂乱特征,局部可以观察到起伏的形态变化(图 2)。该类型被解释为单期次滑移体。

类型 b:整体形态呈现薄层透镜状,期次上为单期次。沉积体内部的地震反射同相轴具有较弱反射强度,弱连续性-杂乱特征,滑动面弧度较大,并没有明显的形态变化(图 2)。该类型被解释为单期次滑塌体。

类型 c:该沉积体整体上呈楔状,期次上为单期次,失稳体内部具有中等强度反射同相轴,较好连续性的特征,没有发现同相轴搅浑或杂乱的特征,局部可观察到较为微小的起伏及形态变化(图 2)。考虑到整体上的连续性,且通常位于下游段较平缓的区域,该类型被解释为单期次滑移块体。

类型 d:沉积体整体形态呈阶梯式,向着峡谷谷底表现为层状收敛的特征,具有多个滑动面,表现为多期次特征。沉积体内部的地震反射同相轴具有中等反射强度、中等-较弱连续性的特征,局部可以观

察到起伏的形态变化(图 2)。该失稳体类型被解释为多期次滑移体。

类型 e:具有与类型 d 相似的层状收敛和多个滑动面,但收敛的方向指向下陆坡方向,而不是峡谷的谷底。地震反射同相轴具有中等-较强反射强度、中等-较好连续性的特征,局部呈现出少量杂乱反射的特征(图 2)。该失稳体类型被解释为多期次滑移体(与类型 d 的差异主要为块体失稳运动的方向)。

类型 f:其整体形态为阶梯状或楔状,层状收敛的特征并不明显,期次上表现为多期次的滑塌。沉积体内部的地震反射同相轴具有反射强度较弱、较弱连续性-杂乱的特征(图 2)。该类型被解释为多期次滑塌体。

类型 g、类型 h 和类型 i 具有相似特征,如阶梯状(局部呈楔状)的整体形态、朝向峡谷谷底的收敛、多个滑动面、杂乱反射同相轴与中等强度中等连续性同相轴共存的内部结构。这 3 种类型均被解释为多期次滑移滑塌复合体(图 2)。需要注意的是,不同类型中杂乱所代表的滑塌体所占的比例存在差异,例如,类型 g 中,滑移体所占比例较大,滑塌体所占比例较少;类型 h 中,尽管滑移体所占比例较大,滑塌体所占比例较少,但滑塌体所占比例开始增大;而类型 i 中,滑塌体所占比例较大(图 2)。这种差异性与沉积物失稳所发育的位置具有密切的关联,均属于多期次滑移滑塌复合体在空间上特征的差异,也暗示了不同位置处海底峡谷地貌特征差异对沉积物失稳形成和发育的影响。

基于沉积物失稳形态-结构的特征描述,可以将上述不同类型的失稳体在平面上进行分布特征的勾绘。本次研究中,选择了第 9 到第 11 号海底峡谷发育的区域,通过平面上沉积物失稳的投影(图 3),描述其空间分布上的分布特征和变化规律。

从图 3 中,可以发现:

(1)蓝色区域分布的主要失稳类型为 d、g、h 型,局部区域存在 a 型,该区域为峡谷头部-峡谷上游段,多以滑移体为主,有单块滑移体,阶梯状滑移体,也存在滑移滑塌复合体,但其滑塌体规模较小,多以滑移体为主;

(2)红色区域主要的失稳体为 b、f、i 型,该区域为峡谷中游段,地形起伏较大,沉积物变形程度变大,多以滑塌体为主,存在单期次滑塌体、多期次滑塌体、及滑移滑塌复合体,复合体的滑塌体规模较大;

(3)绿色区域主要类型为 c 型,该区域为峡谷下



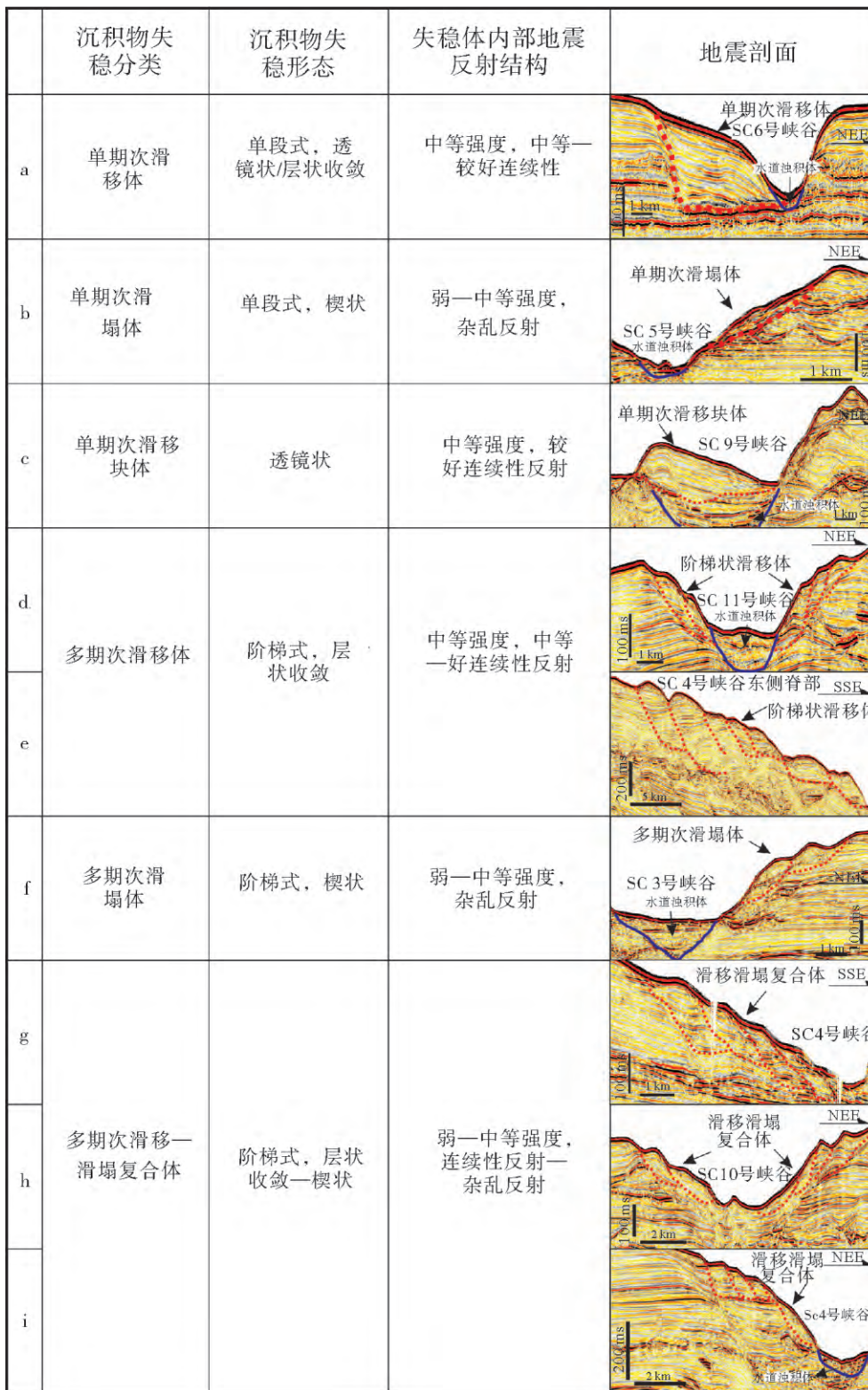


图 2 神狐海域沉积物失稳的类型及典型地震反射特征  
Fig. 2 Seismic reflections of the sediment failures in the Shenhu Area

游段-峡谷嘴部, 该区域地势相对平缓, 大多存在透镜状滑移块体, 规模较大。

(4) 紫色区域为 e 型, 该区域位于峡谷群脊部,

在 SSE 向地震剖面中, 能够看到该类型内部的滑移块体沿陆坡向下运动, 说明与峡谷脊部到谷底的运动方向相比, 自北向南的运动是主要的趋势。

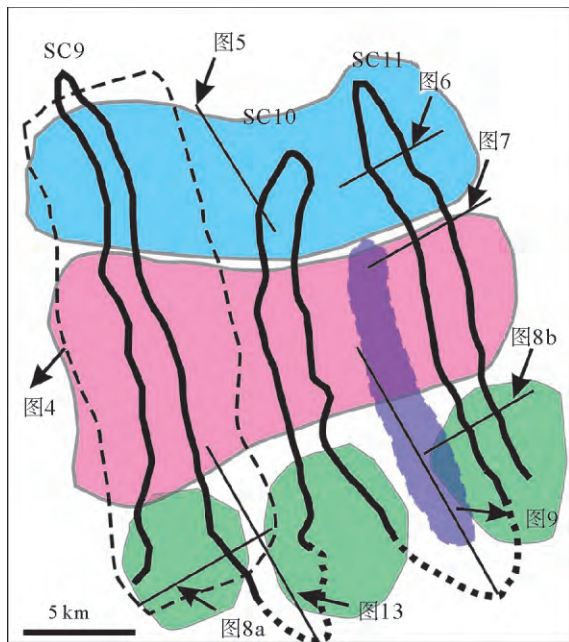


图3 神狐海域第9到第11号陆坡限制型海底峡谷区域的沉积物失稳分布特征

Fig. 3 Distribution of sediment failures located between 9<sup>th</sup> to 11<sup>th</sup> submarine canyons in the Shenhu Area

### 3 沉积物失稳平面分布与海底峡谷分段性的关联

从平面分布特征上来看,沉积物失稳的不同类型在海底峡谷不同位置处的分布存在着明显的差异,为了更好地分析沉积物失稳分布与海底峡谷分段性之间的耦合关联,本次研究选择第9号峡谷,通过峡谷横截面特征的差异以及内部充填沉积物的变化,对其分段性进行了划分(图4)。由北向南峡谷的横切面形态产生由“V”型至“U”型至“碟”型的变化,并且水道浊积体由北向南而逐渐增多,这反映了海底峡谷在不同区段,侵蚀作用与沉积作用分别起着不同的主导因素(图4)。根据峡谷由北至南海底地形的不同形态,可将其分为3个段:峡谷头部-上游段、峡谷中游段、峡谷下游段-嘴部。

#### 3.1 峡谷头部-上游段的沉积物失稳

在该区域,峡谷地势起伏相对较小(图4),峡谷内水道浊积体量较少或不存在,沉积物变形程度普遍较小,多以滑移体为主(图3),如单期次滑移、多期次滑移,同时也存在滑移滑塌复合体,但复合体滑塌体所占部分较少,以滑移体为主要部分。

沿坡降方向的地震剖面显示(图5),沉积物失稳整体呈现为阶梯状,沿坡降方向具有层状收敛的特征,具有多个滑移面,且滑移面的末端均指向峡谷

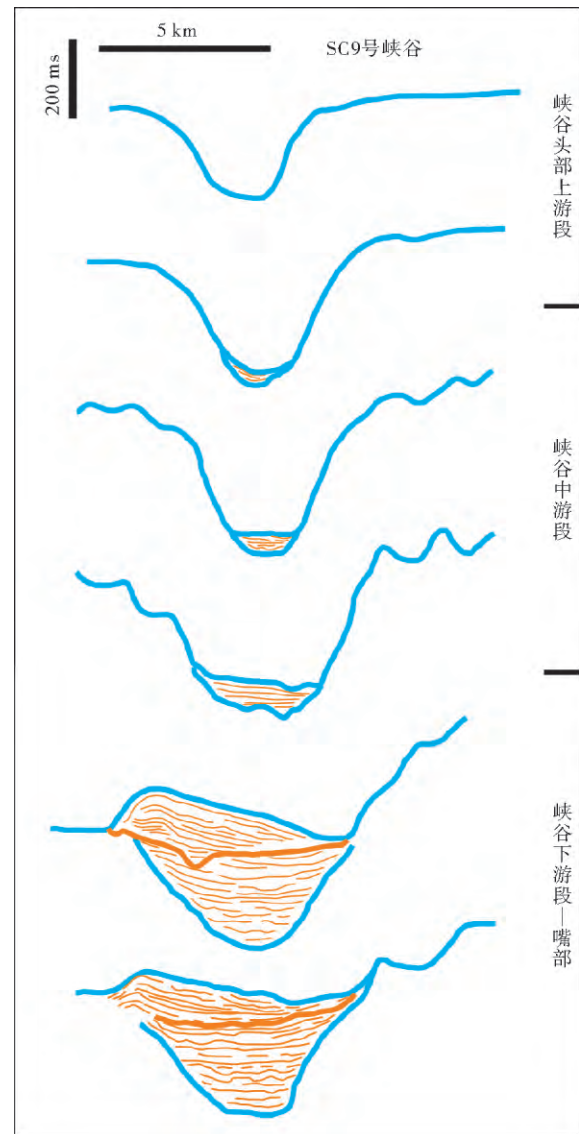


图4 神狐海域第9号陆坡限制型海底峡谷的分段性特征

Fig. 4 Segmentation of the 9<sup>th</sup> submarine canyon in the Shenhu Area

的谷底方向。沉积物失稳的内部同相轴表现为中等-强振幅、连续性较好的特征,局部同相轴仅为波状起伏的特征,并没有发生错断。峡谷头部地形起伏较小,沉积物变形程度较低,主要为滑移体;靠近10号峡谷位置处,同相轴发生明显的“拉伸”,与峡谷谷壁近似平行,且出现了杂乱反射,该部位以滑塌体为主。

横切海底峡谷方向(垂直沉积物供给方向)的地震剖面进一步显示了峡谷的存在对沉积物失稳的影响,沉积物失稳表现为多个滑动面,被解释为阶梯式的滑移体。如图6所示,11号峡谷东侧,沉积物失稳内部同相轴均发生拉伸,近似平行于峡谷谷壁,但同相轴仍具有较为连续的特征,错断的现象不明显;在11号峡谷西侧,同相轴局部存在杂乱的现象。



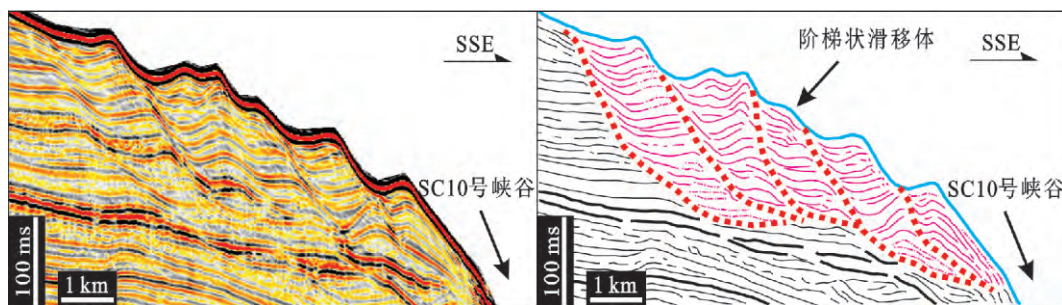


图 5 海底峡谷头部-上游段沉积物失稳的地震反射特征(沿坡降方向)

Fig. 5 Sediment failures at the head of upper reach of the 10<sup>th</sup> submarine canyon (downslopedwards)

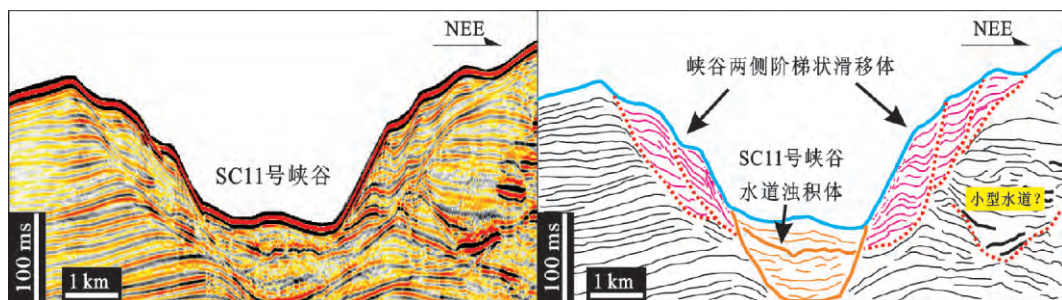


图 6 海底峡谷头部-上游段沉积物失稳的地震反射特征(横切海底峡谷方向)

Fig. 6 Sediment failures at the head of upper reach of the submarine canyon (across the 11<sup>th</sup> canyon)

### 3.2 峡谷中游段的沉积物失稳

在峡谷中游段,峡谷下切作用增强,地势起伏增大(图 4),在该阶段沉积物失稳变形程度开始增大,多以滑塌体为主,存在有单期次滑塌体,多期次滑塌体,以及滑移滑塌复合体,滑移滑塌复合体中滑塌体规模明显增加。

横切海底峡谷方向(垂直沉积物供给方向)的地震剖面显示,峡谷谷壁处的沉积物失稳中杂乱反射的同相轴所占比例很大,即滑塌体是主要的类型,这与该区域峡谷所形成的较为陡峭的地形特征相对应。如图 7 所示,峡谷两侧沉积物失稳表现为中等反射强度、中等-差连续性的同相轴特征,杂乱反射

较为常见,多个滑动面指向峡谷谷底。与图 6 相比,杂乱反射结构更加明显,说明 11 号峡谷中游段的沉积物变形程度较高,滑塌体所占的比例增大。

### 3.3 峡谷下游段-嘴部的沉积物失稳

在峡谷下游段及嘴部,整体地势明显变平缓(图 4),水道浊积体明显增多,在此阶段,多以较为大型的透镜状的滑移块体为主。

横切第 9 号海底峡谷的地震剖面显示(图 8),在峡谷充填沉积物顶部,存在大型的透镜状滑移体,表现为连续性好、中等振幅强度的地震反射同相轴。这些滑移体以“整体滑移”的方式充填到峡谷之中,不具有多期次的特征,被解释为滑移块体。

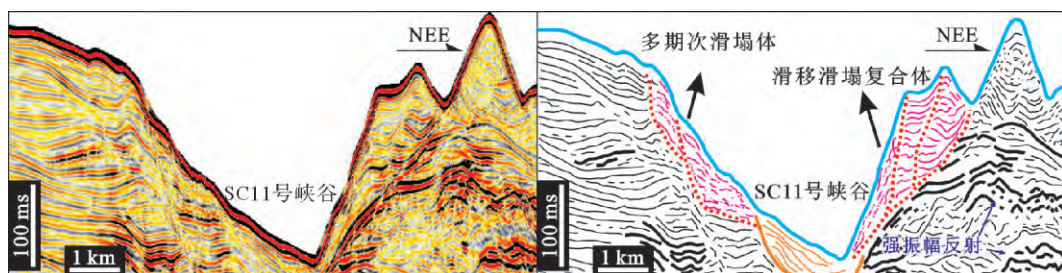


图 7 海底峡谷中游段沉积物失稳的地震反射特征(横切海底峡谷方向)

Fig. 7 Sediment failures at the middle reach of the submarine canyon (across the 11<sup>th</sup> canyon)

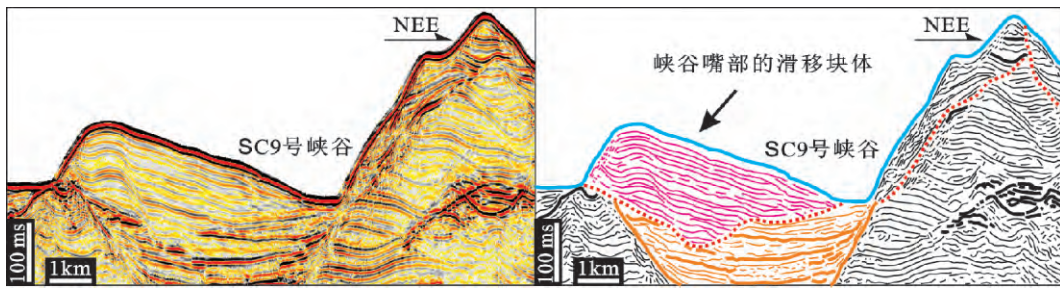


图 8 海底峡谷嘴部-下游段沉积物失稳的地震反射特征(横切第 9 号海底峡谷)

Fig. 8 Sediment failures at the lower reach to the mouth of a submarine canyon (across the 9<sup>th</sup> canyon).

横切第 11 号海底峡谷的地震剖面同样揭示了位于峡谷之中的大型滑移块体(图 9),位于峡谷内部浊流充填沉积物的上部和侧部。图 6、图 7 和图 9 分别展示了沿着 11 号海底峡谷不同分段位置处的沉积物失稳类型和特征,沉积物失稳将从峡谷头-上游段的多期次滑移体,演变为峡谷中游段的多期次滑塌体/滑移滑塌复合体,在峡谷下游段-嘴部表现为滑移块体。

### 3.4 峡谷脊部“残留”的沉积物失稳

在个别海底峡谷脊部靠南的区域中可以明显观察到“似波状”地震反射结构,从沿坡降方向的地震剖面中可以观察到,沉积物的变化受海底峡谷地貌的影响较小,主要表现为阶梯式指向下陆坡和盆底

方向,而不是沿着峡谷的脊部指向谷底(图 10)。这些残留的沉积体在沿坡降方向的地震剖面中表现为等厚状的形态,向下陆坡收敛,内部的同相轴通常为连续性较好、中等振幅强度的特征。此外,同相轴表现出明显的波状起伏特征,并不存在错断的现象(图 10)。

前人对于这些波状沉积体有两种解释,一种观点认为在重力作用下导致未固结沉积物发生沿路破向下的块体运动所形成的沉积物变形<sup>[14]</sup>,另一种则认为是沉积物波<sup>[24]</sup>。考虑到研究区在第四纪具有强烈的沉积物输入、较陡的海底地貌(陆坡平均坡度大约为 2 度<sup>[16]</sup>、主要分布于陆坡限制型海底峡谷的嘴部-下游段,因此这种波状沉积体可能更多代表了受沉积物供给和自北向南坡降而形成的沉积物失

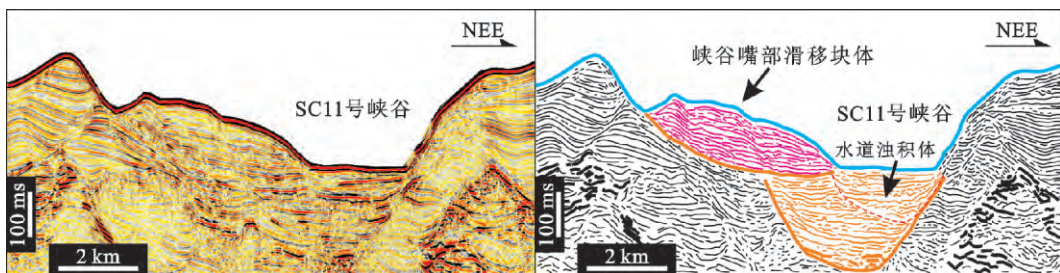


图 9 海底峡谷嘴部-下游段沉积物失稳的地震反射特征(横切第 11 号海底峡谷)

Fig. 9 Sediment failures at the lower reach to the mouth of the submarine canyon (across the 11<sup>th</sup> canyon)

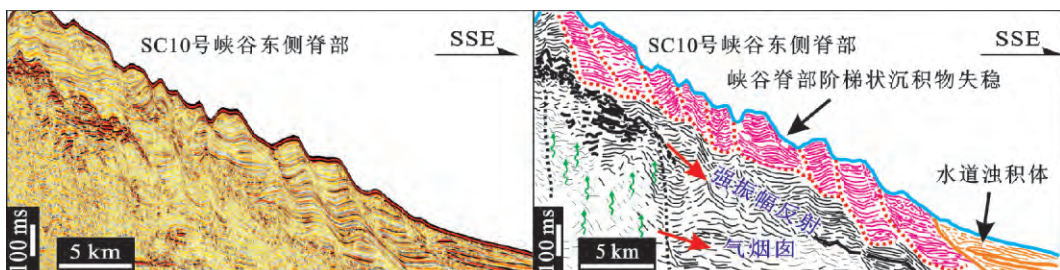


图 10 海底峡谷脊部“残留”的沉积物失稳的地震反射特征(沿坡降方向)

Fig. 10 Sediment failures at the ridge of the 10<sup>th</sup> submarine canyon (downslopeswards)



稳。受海底峡谷群强烈的侵蚀以及峡谷地形引起的再次运动,这些失稳沉积物仅仅以“残留”的形式分布在下游段的峡谷脊部之上。另一方面,在峡谷嘴部位置,内部连续的地震反射同相轴,以及南部水道浊积体的存在,也说明在峡谷嘴部位置处,受峡谷输送能力的影响,可能存在着与浊流相关的沉积物波。

## 4 沉积物失稳形成和演化的控制因素分析

### 4.1 沉积物供给

位于研究区北部的珠江水系,是南海北部主要的水系之一,能够将大量的陆源沉积物输送至陆架陆坡甚至到深海盆地之中。2~4 Ma 以来,受全球气候变化的影响<sup>[25]</sup>,第四纪的珠江水系在陆架区域形成了大规模的水下三角洲,大量的沉积物进入到陆架陆坡区域。利用地震剖面、油气钻井和岩心柱状样,南海北部在第四纪的沉积速率可达 10~20 cm/ka<sup>[26,27]</sup>。这种强烈的沉积物输入导致了进积型陆架边缘三角洲和斜坡沉积体的形成,如研究区北部 SSE 向地震剖面所示,随着陆架边缘三角洲和斜坡沉积体不断向下陆坡推进,S 型前积结构将逐渐变化为斜列式,暗示了在较为充足的沉积供给背景下,随着沉积物的不断堆积,易于发生大规模的沉积

物失稳事件从而达到再次平衡的状态(图 11)。

### 4.2 自北向南的地形坡降

利用广州海洋地质调查局提供的多波束资料,本次研究尝试对研究区内自北向南的地形坡度进行计算。考虑到区域内广泛存在的海底峡谷群,因此,选择了过峡谷脊部的 3 条 SSE 向剖面,这些剖面与海底峡谷的延伸方向近似平行(图 12),因此,可以代表研究区自北向南的坡度变化。如图 12 所示,平均坡度计算的结果分别为 1.81°、1.80°和 1.59°,均显示出了较为陡峭的海底地形特征。自北向南的坡度变化将会与充足的沉积物供给一起,导致研究区内沉积物失稳的广泛存在。

图 10 中所展示的沉积物失稳,位于 10 号峡谷和 11 号峡谷之间,峡谷所形成的地形变化并没有对沉积物失稳造成明显的影响。此外,内部自北向南的变化趋势说明,这些沉积物失稳可能是在自北向南充足的沉积物供给以及自北向南的地形坡降共同控制下的产物。它们原先在研究区内是广泛存在的,但由于后期发育了大量的陆坡限制型海底峡谷群,这些沉积物失稳一方面遭受了严重的侵蚀,另一方方面也发生了再次变形。因此,仅仅在下游段的峡谷脊部(尤其是范围较宽的脊部),这种代表自北向南运动方向的沉积物失稳才能够被保存下来。

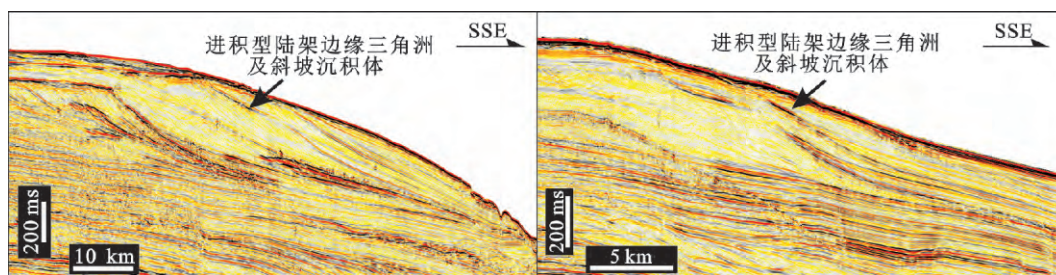


图 11 神狐海域北部进积特征明显的陆架边缘三角洲和斜坡沉积体

Fig. 11 Prograding shelf-edge deltas and associated clinoforms in the northern part of the Shenhu Area

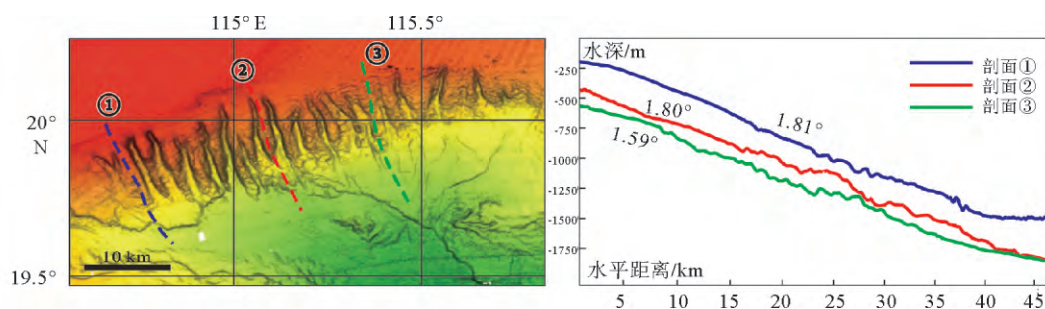


图 12 神狐海域陆架陆坡坡度特征

Fig. 12 The slope gradients of the seafloor in the Shenhu Area



### 4.3 海底峡谷群

神狐海域内地形坡度的另一个主要变化是受到陆坡限制型海底峡谷群的影响:

(1)在峡谷头部位置,海底峡谷会导致峡谷周缘向峡谷谷底的地形变化,但由于峡谷本身侵蚀能力有限,地形变化幅度较小,因此,在该区域主要表现为多期次滑移体,局部能够见到规模较小的滑塌体(图5和图6)。

(2)到了峡谷群的中游段,侵蚀能力逐渐增强,峡谷群所导致的地形变化幅度增加,两侧具有陡峭的侧壁,在重力势的诱发下,块体的运动方向为峡谷脊部向谷底,杂乱反射的滑塌体逐渐成为沉积物失稳的主体(图7)。在峡谷中游段,在沿着陆坡迫降方向的剖面中尽管也能观察到自北向南的块体运动,但主要的类型多表现为与峡谷相关的沉积物失稳,如滑塌体和滑移滑塌复合体,这是前人研究中重点关注的沉积物失稳类型<sup>[14,15]</sup>。

(3)进入到峡谷群下游段-嘴部,峡谷的侵蚀能力降低,主要表现为沉积的特征,峡谷内部的沉积充填导致峡谷起伏地形逐渐变为平缓的特征,这个区域内与峡谷相关的沉积物失稳位于谷底,表现为整体的滑移块体(这也说明了变形强度的降低),下部为峡谷内部的充填沉积物(图8和图9)。

### 4.4 流体渗漏

甲烷或烃类气体的逃逸和渗漏也会诱发沉积物失稳,从而导致海底峡谷、滑坡和麻坑的发育<sup>[28]</sup>。神狐海域是我国海域水合物勘探的重点区域,2007年、2015年和2016年在这一区域进行了多次水合物的实际钻探<sup>[29-32]</sup>。研究区内断层、气烟囱和泥底辟大量发育,为烃类气体向上运移提供了条件<sup>[33]</sup>,区域内实际获取的水合物样品也说明了垂向上流体运移的存在。在图13剖面以北的位置,存在采集到

水合物样品的钻井站位。在研究区的2D和准3D地震剖面上,可以发现许多疑似流体渗漏所导致的沉积物失稳(图13),且沉积物失稳区域范围与游离气聚集所引起的强振幅反射、含气流体运移通道(如气烟囱等)在平面上具有较好的匹配关系。

## 5 结论

利用广州海洋地质调查局在研究区采集的大量2D和准3D地震资料,基于地震反射特征的描述,通过对整体形态、期次性和内部结构等要素的分析,将研究区的沉积物失稳划分为6大类9小类,在平面上对不同类型的沉积物失稳进行了分布特征的描述;将沉积物失稳的分布特征与陆坡限制型海底峡谷群的分段性特征进行耦合关联,刻画了峡谷不同区段沉积物失稳在类型和特征上的空间变化规律,取得的结论如下:

(1)峡谷群脊部残留的、内部块体自北向南运动的多期次滑移滑塌复合体说明,神狐海域内广泛发育的沉积物失稳主要受到自北向南充足的沉积物供给和自北向南陆架陆坡地形变化的共同控制,沉积物失稳表现为阶梯状-波状的整体形态、中等连续性的内部结构。

(2)海底峡谷群的形成和演化会对早期的沉积物失稳造成强烈的侵蚀和破坏,自峡谷脊部到峡谷谷底陡峭的地形坡降导致沉积物可能发生再次变形,沉积物失稳的分布与峡谷存在较为密切的关联,即峡谷群头部-上游段,沉积物失稳多表现为多期次的滑移体;进入到峡谷群中游段,随着峡谷群地形起伏的增加,沉积物失稳的变形强度增大,多期次滑塌体和滑移滑塌复合体发育;至峡谷群下游段-嘴部,表现为滑移块体。沿着峡谷延伸方向,滑塌的含量先增大后减小,与峡谷群的演化存在良好的吻合程度。

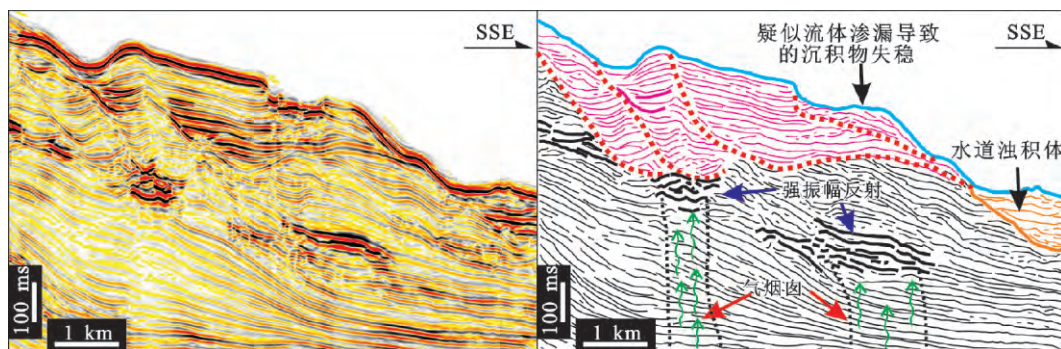


图13 神狐海域疑似流体渗漏所导致的沉积物失稳

Fig. 13 Linkage between fluids escape and sediment failures in the Shenhu Area

(3) 神狐海域丰富的水合物资源说明该区域内具有较好的含气流体垂向运移条件,从沉积物失稳期次与强振幅反射、气烟囱等的空间匹配上,不难发现,该区域内的含气流体渗漏可能也是沉积物失稳的关键控制因素。

### 参考文献 (References)

- [1] Mills P C. Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures-A review [J]. *Sedimentary Geology*, 1983, 35(2): 83-104.
- [2] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides[J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34(1): 33-59.
- [3] McAadoo B G, Pratson L F, Orange D L. Submarine landslide geomorphology, US continental slope[J]. *Marine Geology*, 2000, 169(1-2): 103-136.
- [4] 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.
- [5] Moscardelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. *Basin Research*, 2008, 20(1): 73-98.
- [6] 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.
- [7] Bryn P, Berg K, Forsberg C F, et al. Explaining the storegga slide[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(1-2): 11-19.
- [8] Hsu S K, Tsai C H, Ku C Y, et al. Flow of turbidity currents as evidenced by failure of submarine telecommunication cables [M]//Chiocci F L, Ridenti D, Casalbore D, et al. Extended Abstracts of the International Conference on Seafloor Mapping for Geohazard Assessment. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 2009: 167-171.
- [9] Van Loon A J, Brodzikowski K. Problems and progress in the research on soft-sediment deformations[J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 50(1-3): 167-193.
- [10] Locat J, Lee H J. Submarine landslides: advances and challenges[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 193-212.
- [11] Sultan N, Cochonat P, Canals M, et al. Triggering mechanisms of slope instability processes and sediment failures on continental margins: a geotechnical approach[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 291-321.
- [12] Li X S, Zhou Q J, Su T Y, et al. Slope-confined submarine canyons in the Baiyun deep-water area, northern South China Sea: variation in their modern morphology[J]. *Marine Geophysical Research*, 2016, 37(2): 95-112.
- [13] 刘杰, 苏明, 乔少华, 等. 珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群成因机制探讨[J]. *沉积学报*, 2016, 34(5): 940-950. [LIU Jie, SU Ming, QIAO Shaohua, et al. Forming mechanism of the slope-confined submarine canyons in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 940-950.]
- [14] He Y, Zhong G F, Wang L L, et al. Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 546-560.
- [15] 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.
- [16] Qiao S H, Su M, Kuang Z G, et al. Canyon-related undulation structures in the Shenhu area, northern South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2015, 36(2-3): 243-252.
- [17] Wu N Y, Zhang H Q, Yang S X, et al. Gas hydrate system of Shenhu Area, northern South China Sea: geochemical results [J]. *Journal of Geological Research*, 2011, 2011: 370298.
- [18] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [19] 于兴河, 梁金强, 方竟男, 等. 珠江口盆地深水区晚中新世以来构造沉降与似海底反射 (BSR) 分布的关系 [J]. *古地理学报*, 2012, 14(6): 787-800. [YU Xinghe, LIANG Jinqiang, FANG Jingnan, et al. Tectonic subsidence characteristics and its relationship to BSR distribution in deep water area of Pearl River Mouth Basin since the Late Miocene[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(6): 787-800.]
- [20] 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.]
- [21] Lüdmann T, Wong H K, Wang P X. Plio-Quaternary sedimentation processes and neotectonics of the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2001, 172(3-4): 331-358.
- [22] Pang X, Chen C M, Peng D J, et al. Sequence stratigraphy of deep-water fan system of Pearl River, South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 220-229.
- [23] 苏明, 沙志彬, 乔少华, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物钻探区第四纪以来的沉积演化特征 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2975-2985. [SU Ming, SHA Zhibin, QIAO Shaohua, et al. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area, northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2975-2985.]
- [24] Wang X J, Collett T S, Lee M W, et al. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core, downhole log, and seismic data in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 272-292.



- [25] Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. *Nature*, 2001, 410(6831): 891-897.
- [26] Huang W, Wang P X. Sediment mass and distribution in the South China Sea since the Oligocene[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(11): 1147-1155.
- [27] Huang W, Wang P X. Statistics of sediment mass in the South China Sea: method and result[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2007, 1(1): 88-96.
- [28] Nakajima T, Kakuwa Y, Yasudomi Y, et al. Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 90: 228-242.
- [29] Wu N Y, Zhang H Q, Yang S X, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate reservoir system of Shenhu area, north slope of south china sea[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008). Vancouver, British Columbia; CANADA, 2008.
- [30] Yang S X, Zhang H Q, Wu N Y, et al. High concentration hydrate in disseminated forms obtained in Shenhu area, North Slope of South China Sea[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008). Vancouver, British Columbia; CANADA, 2008.
- [31] Yang S X, Zhang M, Liang J Q, et al. Preliminary results of China's third Gas hydrate drilling expedition: a Critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. *Fire in the Ice*, 2015, 15(2): 1-21.
- [32] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 24-31. [GUO Yiqun, YANG Shengxiong, LIANG Jinqiang, et al. Characteristics of high gas hydrate distribution in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 24-31.]
- [33] Su M, Sha Z B, Zhang C M, et al. Types, Characteristics and significances of migrating pathways of gas-bearing fluids in the Shenhu Area, northern continental slope of the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(1): 219-231.

## SEDIMENT FAILURES IN THE SHENHU AREA, NORTHERN CONTINENTAL SLOPE OF THE SOUTH CHINA SEA

WANG Yifan<sup>1, 2, 3</sup>, SU Zheng<sup>1, 2</sup>, SU Ming<sup>4</sup>,

WANG Hongbin<sup>5</sup>, SHA Zhibin<sup>5</sup>, LIANG Jinqiang<sup>5</sup>, LIU Jie<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Natural Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

5. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** With the seismic data acquired by the Guangzhou Marine Geological Survey, we studied the types and characteristics of the frequently developed sediments failures in the Shenhu area of the northern South China Sea. The distribution pattern of sediment failures is adopted to reveal the relationship between slope-confined submarine canyons and sediment failures. The sediments failures in the study area can be grouped to two types. The first type, which is mainly located at the ridges in the lower reach of a canyon and hardly affected by seafloor geomorphology, is characterized by multiple continuous wavy reflectors in a pattern of southwards mass movement. The second type is mainly the products of the mass movement from the ridge to the bottom of a canyon, and is obviously affected by the topography of the canyons. At the head of a canyon, sediment failures always occur as slides with continuous reflectors. And in the middle reach there is intensive deformation and dominated by slumps. From the lower reach to the canyon mouth, however sliding/slumping blocks dominate. Since Quaternary, Great amount of sediment charges come from the Pearl River system towards the north. With the help of steep seafloor topography, the activity of sediment failures is accelerated. Sediment re-deformation may widely occur in submarine canyons. In addition, the vertical migration of gas-bearing fluids coming from gas hydrate is also an important factor for sediment instabilities in the study area.

**Key words:** sediment instability; slide; slump; slope-confined submarine canyons; Shenhu Area