

doi:10.3799/dqkx.2014.119

# 南海北部神狐陆坡区灾害地质因素特征

马云<sup>1,2</sup>, 李三忠<sup>1,2\*</sup>, 夏真<sup>3</sup>, 张丙坤<sup>1,2</sup>, 王霄飞<sup>1,2</sup>, 程世秀<sup>1,2</sup>

1. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100

2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

**摘要:** 南海北部神狐陆坡区富含海洋油气资源和天然气水合物, 其海底地质环境对于各项资源开采活动和工程建设尤为重要, 但目前专项研究较少. 在大量二维地震资料解译的基础上, 结合浅地层剖面和多波束测深资料, 对该区海底地质环境进行整体研究, 识别出 20 种灾害地质因素. 按照动力来源, 将该海域地质灾害归纳为构造应力、重力、水动力、气动力和土动力 5 大类灾害地质类型, 每种类型包含多种灾害地质因素. 依据各灾害因素总体平面分布特征, 划分出埋藏三角洲密集区、海底滑坡密集区、火山密集区、软弱层密集区、浅断裂密集区和浅埋基岩面密集区 6 个灾害大区. 还对主要灾害因素的地震反射特征和灾害性进行了研究, 为该区未来工程建设的顺利开展提供科学的参考.

**关键词:** 南海; 神狐陆坡; 灾害; 分类; 反射特征.

**中图分类号:** P694

**文章编号:** 1000-2383(2014)09-1364-09

**收稿日期:** 2014-03-07

## Characteristics of Hazardous Geological Factors on Shenhu Continental Slope in the Northern South China Sea

Ma Yun<sup>1,2</sup>, Li Sanzhong<sup>1,2\*</sup>, Xia Zhen<sup>3</sup>, Zhang Bingkun<sup>1,2</sup>, Wang Xiaofei<sup>1,2</sup>, Cheng Shixiu<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

**Abstract:** Since Shenhu continental slope in the northern South China Sea is rich in oil and gas resources as well as natural gas hydrate, and its seabed stability is important for oil and gas exploitation and engineering projects. But special study on seabed stability here is far from being enough now. Based on interpretation of 2D seismic data, shallow profiles and multi-beam echo sounder data, this paper focuses on the whole geological environment of this area and identifies 20 different kinds of hazardous geological factors. According to the dynamic source, five hazard types are concluded as follows: tectonic stress-related, gravity-related, hydrodynamics-related, gas effusion-related and soil-related hazards. Each type includes multi-hazardous factors. According to the plan-view distribution of the hazardous geological factors, this area can be divided into the following six hazard regions: intensive areas of buried delta, submarine landslides, volcanism, weak layers, shallow fracture zone and shallow bedrock. Major hazardous factors and their seismic reflection characteristics are presented to provide scientific reference for development of future engineering projects in the study area.

**Key words:** the South China Sea; Shenhu continental slope; hazards; classification; reflection characteristics.

随十八大“海洋强国”战略的提出, 中国对海洋资源的开发利用将更加频繁. 近年来, 海底地质条件的不稳定性对人类各种活动造成的灾害影响越来越

明显, 这引起大量学者及相关部门对海底灾害地质研究的密切关注. 目前南海北部灾害地质研究已积累了部分成果, 主要为对南海北部外陆架及部分上

**基金项目:** 中国地质调查局专项项目(No. GZH201100311-03-06); 国家自然科学基金项目(No. 41190072).

**作者简介:** 马云(1986-), 女, 山东临沂人, 博士研究生, 海洋地质专业. E-mail: honeysuckle0539@126.com

\* 通讯作者: 李三忠, E-mail: sanzong@ouc.edu.cn

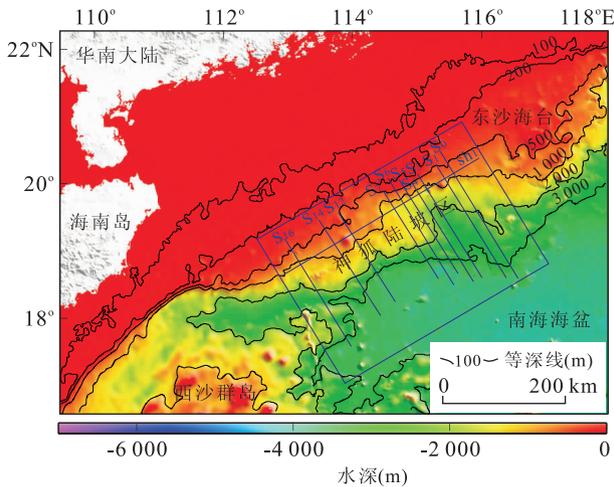


图 1 研究区范围(蓝色框)及本文所用测线

Fig. 1 Study area (blue box) and survey lines used in this paper

陆坡区主要灾害因素的识别、划分及危害分析(陈俊仁和李廷桓, 1993; 冯志强等, 1996; 陈俊仁和杨木壮, 1996; 夏真等, 1999; 刘守全等, 2000, 2002; 吴庐山和鲍才旺, 2000; 刘锡清等, 2002; 李泽文, 2011; 周川等, 2013), 对南海北部灾害地质稳定性的建模评价(杨春霞等, 2006), 及对珠江口海域灾害地质因素的研究(Chen and Pang, 1990; 寇养琦, 1990a; Chen and Xiao, 1991; 陆成斌等, 1991; 鲍才旺, 1995; 陈俊仁, 1996; 马胜中和陈太浩, 2006; 李成钢, 2007; 孙杰等, 2010). 近来, 海底滑坡的空间展布、几何特征、与水合物关系及稳定性的相关研究较为前沿(寇养琦, 1990b; 冯文科等, 1994; 孙运宝等, 2008; 吴时国等, 2008; 刘锋, 2010). 另外, 还有学者对台西南盆地(寇养琦和杜德莉, 1995)、琼东南深水区(杨文达等, 2011)、广东沿岸海域(詹文欢和钟建强, 1995; 刘锡清, 2005)等区域也进行了灾害地质的相关研究.

综上所述, 已有研究主要集中在陆架区, 对南海北部陆坡区灾害因素的系统研究依然欠缺. 而陆坡区是天然气水合物资源富集地带, 且该区开发与试采活动越来越频繁. 为确保各项工程选址和施工的安全实施, 其工程地质条件的确定显得非常重要. 本文选取南海北部神狐陆坡区作为目标区(图 1), 对其灾害地质因素类型、特征、空间展布及灾害性进行了研究, 为今后海洋工程的安全实施提供了有力参考.

### 1 神狐陆坡区灾害地质类型划分

灾害地质学作为较完整独立的地质学分支学科

表 1 神狐陆坡区灾害地质因素划分方案

Table 1 Classification of hazardous geology factors on Shenhu continental slope

| 灾害地质类型 |     | 灾害地质因素                    |
|--------|-----|---------------------------|
| 构造应力   | 重力  | 活动断裂、地震、火山、岩浆底辟、岩浆陡坎、断裂陡坎 |
| 重力     | 水动力 | 海底滑坡、崩塌、浊流、泥石流、滑塌三角洲、滑坡陡坎 |
| 水动力    | 气动力 | 峡谷、侵蚀沟                    |
| 气动力    | 土动力 | 浅层气、高压气囊                  |
| 土动力    |     | 埋藏河道、埋藏三角洲、软弱层、浅埋基岩面      |

始于 20 世纪 80 年代初(欧正东和何儒品, 1989; 周俊, 1992), 海洋灾害地质学的研究起步更晚, 目前积累的成果并不成熟, 对灾害地质因素类型的划分迄今没有统一方案. Carpenter and Mccarthy(1980)最早从对海上工程危害程度的角度提出地质灾害因素和限制性地质因素 2 种类型. 李凡和于建军(1994)早期从危害对象及存在位置角度将南海西部和南黄海灾害地质因素分为“地表”和“地下”2 类, 并依据灾害程度进一步划分为危险和障碍 2 个亚类; 后来, 又依据成因分为侵蚀堆积、新构造运动、火山、生物、冰川和人工成因 6 个类型. 陈俊仁和李廷桓(1993)用力学观点依据成因机制将南海灾害地质因素分为水动力型、气动力型、土力学型、重力型和内动力型 5 类. 刘以宣和詹文欢(1992)依据灾害动力来源圈层划分出岩石圈、大气圈、水圈和生物圈 4 个动力类型. 冯志强等(1996)、刘宗惠(1996)等从灾害因素是否具直接破坏活动性角度划分出具有破坏活动能力和不具破坏活动能力的限制性地质条件 2 类(实质类似 Carpenter 的分类). 刘锡清等(2002)划分出新构造、重力、侵蚀堆积、承压流体和结构不均匀性灾害地质 5 个类型.

本文基于国土资源部广州海洋地质调查局取得的南海北部高分辨率二维地震、浅地层剖面和部分多波束测深资料, 对神狐陆坡区灾害地质因素的外部几何形态和内部反射特征进行解译, 并在研究区识别出多种灾害地质因素. 本文参考前人的分类方法, 从灾害地质因素的触动力角度, 在神狐陆坡区划分出构造应力、重力、水动力、气动力和土动力 5 类灾害地质类型, 每种灾害地质类型又进一步划分了若干灾害地质因素(表 1).

### 2 灾害地质因素的空间展布

依据解译结果, 综合前人研究成果, 南海北部神狐陆坡区各种灾害地质因素的分布在区域上成群或成片或与等深线平行分布. 根据这种密集分布特性,

大致将研究区划分为埋藏三角洲、海底滑坡、火山、浅层断裂、软弱层和浅埋基岩面 6 个灾害地质因素密集区。除海底滑坡之外,其余均为成群或成片分布,分布面积最广的为埋藏三角洲区。

**埋藏三角洲密集区:**其发育具有明显的地区性,集中发育在  $113^{\circ}20' \sim 116^{\circ}00' \text{E}$ 、 $19^{\circ} \sim 20^{\circ}50' \text{N}$ 、水深  $200 \sim 1\,000 \text{ m}$  之间陆坡上,基本平行于等深线条带状分布。这些埋藏三角洲为多次海平面升降所致,在末次冰期后,海平面上升幅度较大,导致其埋藏分布于较深水域。

**海底滑坡密集区:**研究区海底滑坡广泛发育,可归纳为与坡折带相关、与峡谷地形相关、与岩浆作用相关的 3 类滑坡。陆坡坡折带明显的地形坡度,是滑坡发育的有利地带,研究区发育此类滑坡易发带 3 条,分布在  $114^{\circ}20' \sim 116^{\circ}20' \text{E}$ 、 $19^{\circ}40' \sim 20^{\circ}30' \text{N}$ 。往东南方向水深加深,陆壳减薄,出现洋壳,在这个洋—陆转换带,岩浆的侵入作用频繁,其侵入使上部沉积层明显向上拱起抬升,产生明显的陡坡地形,诱使滑坡发生,此类与岩浆作用相关的滑坡易发带有 6 条,分布于  $114^{\circ}52' \sim 116^{\circ}38' \text{E}$ 、 $18^{\circ}45' \sim 19^{\circ}40' \text{N}$  之间,有些沿侵入体两侧几乎呈对称分布。神狐陆坡区发育侵蚀峡谷,谷宽而深、坡陡而高,为地层滑动提供了良好的临空面,两侧地层在沉积后或沉积作用过程中,由于重力作用逐渐失去稳定性,进而发生滑坡,与此相关的滑坡易发带有 4 条,集中分布于神狐陆坡区的西南角  $113^{\circ}20' \sim 114^{\circ}25' \text{E}$ 、 $18^{\circ}05' \sim 19^{\circ}10' \text{N}$  之间。

**火山密集区:**集中分布在神狐海域西南角和东南角,地震反射剖面在西南角  $S_{16}$  测线发现典型海底火山 3 座,东南角  $S_1$  测线发现 1 座火山。

**浅层断裂密集区:**全区都有分布,但发育最典型的地区在水深  $200 \sim 1\,000 \text{ m}$  北卫滩隆起西南的宽缓陆坡部分,该区浅层断裂及活动断裂密集分布,断裂引起的陡坎也十分发育。

**软弱地层密集区:**集中分布在埋藏三角洲的前缘地区,沿  $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}$  水深线在  $114^{\circ}30' \sim 115^{\circ}40' \text{E}$ 、 $19^{\circ}35' \sim 20^{\circ}05' \text{N}$  之间分布。

**浅埋基岩面密集区:**主要分布在神狐陆坡东南方向,尖峰海山西部地区,发育面积较大,西部发育程度低,零星分布。经纬度范围大致为  $116^{\circ}40' \sim 114^{\circ}45' \text{E}$ 、 $17^{\circ}40' \sim 19^{\circ}45' \text{N}$ 。

## 3 主要灾害地质因素特征

### 3.1 构造应力灾害地质因素

在各种地壳构造作用力影响下,地壳中所产生

的应力(即构造应力)往往会形成重大的灾害地质因素,如地震、活动断裂、火山及底辟等灾害。这些因素常对工程建设造成直接破坏,而且常导致其他灾害因素并发,严重时可产生海啸,因此是最重要也是最危险的一类灾害。

**3.1.1 地震与活动断裂** 地震的灾害性在所有灾害因素中居于首位,它能直接触发一连串的危害因素,如海底滑坡、海啸、浊流、泥石流、坍塌、老断裂重新活动、新断裂产生等灾害链,其震动过程还可导致海底沉积层液化疏松,抗剪切强度和承载力降低,致使海底极具不稳定性,对工程施工具有严重的危害性。

从南海北部地震震中分布来看(图 2),南海北部地震活动频繁,呈现出“两头密(东沙地区东北部和琼东南地区西北部)、中间稀(神狐地区)”的特点,最新的地震活动呈现“两头跳”(陈俊仁和杨木壮, 1996)的规律,而且南海北部地震活动具有周期性(刘锡清等, 2002),现在正处于能量积累的“平静期”。综合考虑,神狐陆坡区直接发生地震的概率较小,但不排除其受周边地震震动的波及。

活动断裂常引发地震,它在研究区广泛发育,既有长期分段活动的基底大断裂,又有新构造运动产生的新断裂,还有沉积不均匀沉降压实引起的断裂,断裂走向总体上以 NWW 或 NW 向为主。这些断裂在高分辨率二维地震剖面上特征十分典型,表现为正常连续的同相轴整齐错断,地层等厚或不等厚的整体错动变形(图 3a),反射波同相轴形态突变、反射杂乱或沿错动出现空白带。剖面上,神狐陆坡区活动断裂以中层分布居多,出露海底的多为与滑坡带

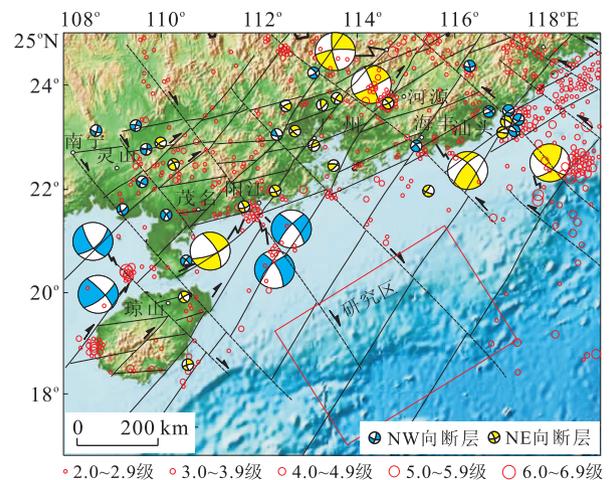


图 2 南海北部及邻区地震震中和活动断裂分布

Fig. 2 Distribution of active faults and earthquakes in northern South China Sea and its neighboring area

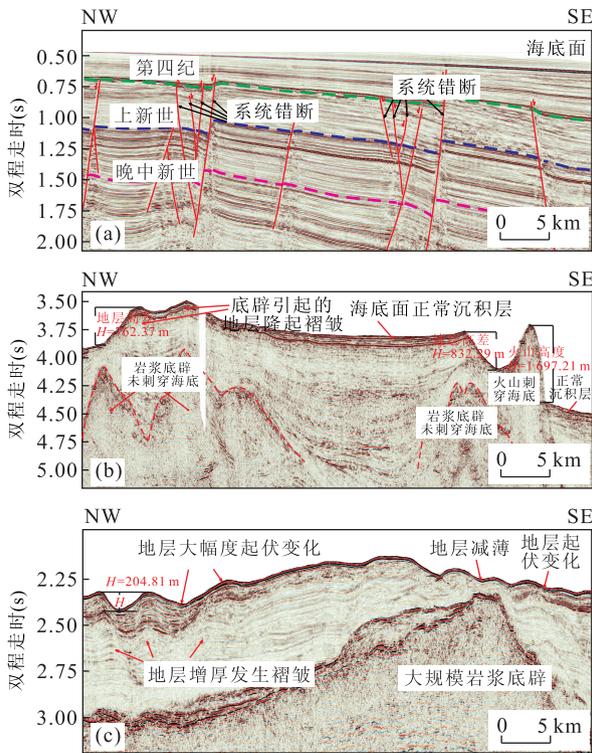


图 3 神狐陆坡区活动断裂典型地震反射特征(测线 S<sub>0</sub>, S<sub>16</sub>, sh<sub>1</sub>)

Fig. 3 Typical characteristics of seismic reflection of active faults on the Shenhu Continental Slope

伴生或沉积压实导致的断层,多数为正断层,断距中等,成因与该区构造运动有关。

在工程施工中,如果断裂活动造成上下盘错移距离较大,那么勘探钻杆或铺设的管线轻则扭曲,重则折断,建于其附近的构筑物也会损毁,造成重大的经济损失,因此,活动断裂是海洋工程建设中必须避让的灾害地质因素。

3.1.2 火山与岩浆底辟 深海沉积物样品研究(陈俊仁和李廷桓, 1993)已证实,南海北部晚更新世以来岩浆作用仍然频繁。研究区多条二维地震剖面揭示出岩浆活动的踪迹,这与上新世至晚更新世时期的大规模张性断裂有关,从图 2 可以发现,成片的岩浆活动区分布受该区复杂交错的张性断裂控制。火山与岩浆底辟是岩浆作用不同活动强度的 2 种表现形式。岩浆作用刺穿海底即形成火山,未刺穿即形成底辟(图 3b)。

岩浆底辟与周围地层反射特征明显不同,容易识别。火山在剖面上表现为刺穿海底,外形呈锥状,内部反射空白或杂乱(图 3b),但它使其周边地层强烈拉拽抬升,容易伴生海底滑坡。岩浆底辟按形态及规模大小,可分为点状和片状底辟。点状底辟在剖面

上有明显的侵入通道,通道垂直切穿周围地层,振幅较弱,常为空白反射,而顶端振幅突然变强,为强振幅不连续低频反射,剖面形态多为点状、朵状或饼状。片状底辟发育范围常较大,根部硕大,顶部减小,内部反射杂乱,但振幅较周围地层强,不连续,与周围地层界线明显,顶部振幅最强,剖面形态多像锥子或山峰一样侵入在地层中。

岩浆底辟视其侵入隆起程度判别其对顶部地层造成的影响,一般情况下,若侵入到较浅地层中且规模较大的话,会导致顶部地层顶起减薄,单侧或两侧同时下滑增厚,形成海底滑坡、重大陡坎或地层褶皱,使得海底地形高低起伏加剧(图 3b 和 3c),对海洋工程建设十分不利。

3.2 重力灾害地质因素

陆坡地区是重力灾害地质因素的高发区,神狐陆坡主要发育海底滑坡、崩塌、浊流、泥流和滑塌沉积等灾害地质因素,这些因素在重力作用或其他动力间接触动下会骤然活动,缓慢的造成钻井平台、海底管线的断裂,快速的则引发大规模海啸,造成重大人员伤亡和财产损失,因此在工程建设中,必须密切关注此类灾害因素。

3.2.1 海底滑坡 神狐陆坡区分别发育与坡折带、峡谷地形和岩浆作用相关的 3 类滑坡。与坡折带相关海底滑坡与当地地形坡度直接相关,高分辨率二维地震反射剖面揭示出其具有滑坡壁、坍塌谷、反向台坎和滑坡前缘鼓丘等典型的海底滑坡地貌特征(图 4)。与峡谷相关滑坡在地震反射剖面上一般位于峡谷两

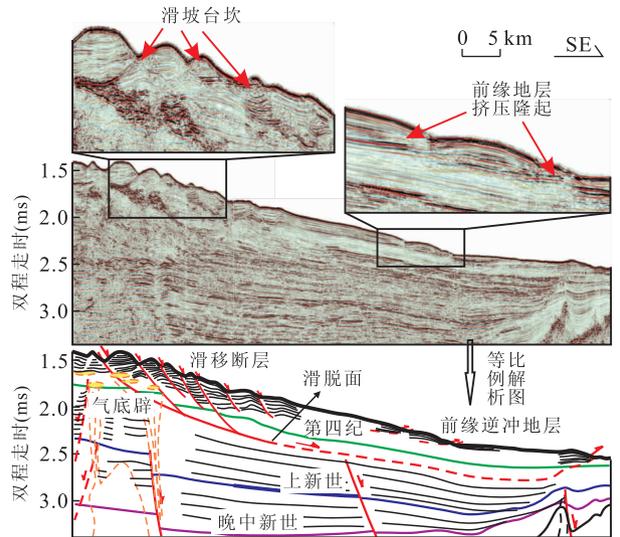


图 4 神狐陆坡区海底滑坡典型地震反射特征(测线 S<sub>3</sub>)  
Fig. 4 Typical characteristics of seismic reflection of marine landslides on the Shenhu Continental Slope

侧谷坡或单侧谷坡,滑坡体部分已滑落到谷内,谷坡上有残存的滑坡体,还有新孕育的滑坡体分布在谷肩处.谷坡提供的临空面会使两侧地层在重力作用下不断发生滑坡,因此在峡谷附近不宜开展工程施工.与岩浆作用相关滑坡在地震反射剖面上有 2 种形态,一种为火山两侧滑坡,这类滑坡不具有典型的坍塌谷、滑坡台坎,但滑坡前缘一般会出现地层增厚褶皱隆起,发育膝状褶皱;另一种为岩浆底辟滑坡,这类滑坡发育典型滑移断层、滑坡台坎,有时滑移面十分清晰,围绕底辟可出现单侧滑移或双侧滑移.海底滑坡具有极大的破坏能力,它容易造成平台滑移倾毁、管线折断等灾难性灾害,海上施工最好避让.

**3.2.2 埋藏滑塌三角洲** 大量地震剖面揭示,研究区埋藏三角洲十分发育,东部地区与西部地区三角洲的发育特征明显不同.自测线  $S_7$  以东为浅层埋藏正常三角洲沉积;自  $S_8$  测线以西为重力作用导致的前缘具有滑塌前积结构的埋藏三角洲区,具有单期深埋的特点,内部反射相对杂乱,频率低且连续性差,振幅相对较强,最前缘具典型的帚状前积结构(图 5),本文为了与正常沉积三角洲相区别,称之为埋藏滑塌三角洲.滑塌沉积为原有正常沉积基础上进行的二次沉积,相对于周围正常沉积层具有较低的力学特性,会造成工程施工过程中受力不均,形成灾害.在研究区内,滑塌区通常也是断裂的发育区(图 5),断裂活动会使上陆坡区的沉积物进一步垮塌,在坡脚形成更复杂的混杂堆积,沉积物物性特征进一步发生改变,因此埋藏的滑塌沉积也是一种重要的灾害地质因素,在该区附近钻探施工时,钻杆可能自动下陷或倾斜,应引起高度注意.

### 3.3 水动力灾害地质因素

南海海域存在沿岸流、潮流、内波、陆架底流及

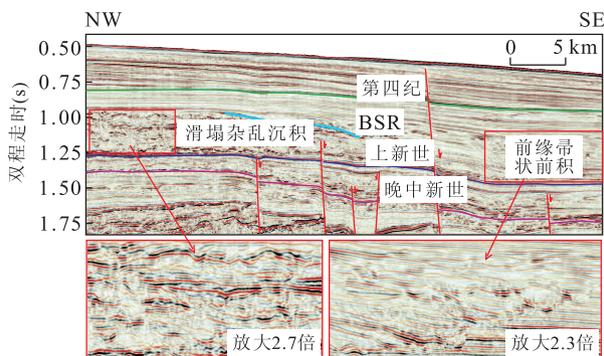


图 5 神狐陆坡区滑塌三角洲典型地震反射特征(测线  $S_{14}$ )  
Fig. 5 Typical characteristics of seismic reflection of slumping delta on the Shenhu Continental Slope

南海暖流等(陈俊仁和李廷桓, 1993),如此复杂的水动力作用下可发生沉积物快速堆积或海底的强烈冲蚀,形成峡谷或侵蚀沟等,这些沉积体或地形与周围环境的不和谐,在一定条件下对工程建设的开展具有不利影响,在施工过程应当谨慎对待.

**3.3.1 埋藏河道及埋藏谷** 研究区地震反射剖面显示埋藏河道与埋藏谷十分发育.埋藏河道有的出于同期地层中(图 6a),有的分布在各个时期的沉积层中(图 6b),多期河道有的自成体系,有的互相叠置长期发育,河床多次迁徙,埋藏较浅(图 6b).埋藏河道底界呈连续的波状起伏的强反射,其内部的杂乱相为辫状河道沉积;也有的底界面反射波下凹但连续,其内部反射有些杂乱,有些为弱反射,前者为砂砾充填物,后者为泥质充填.一般可见河道底界面下凹、连续强反射特征,其内部充填物结构清晰.埋藏谷规模巨大,其底界呈开阔“V”型或半圆型,内部为双向平行上超结构,反射较为连续,振幅强弱相间(图 6c).

埋藏河道与埋藏谷内部沉积与围岩岩性差异较大,容易造成工程设施的承载力不均匀,造成平台倾覆等,对工程建设影响很大.

**3.3.2 侵蚀沟与峡谷** 侵蚀沟为一般的侵蚀作用在沉积物表面形成的沟状地形,它的规模可大可小,有多股水流作用时常常成群出现.若在施工区发育,持续的作用往往会使平台桩腿陷落或倾斜、管线悬空折断,造成重大损失.

峡谷区地形变化复杂,两侧谷坡、谷肩处沉积物不稳定,工程施工应当考虑适当的措施避开.研究区地震剖面中识别出典型的海底峡谷,该峡谷总体上宽而深,两侧谷坡不对称,均较陡,发育滑坡沉积,谷底充填部分连续平行于弱振幅反射同相轴,说明该峡谷的下切作用已经停止,并开始逐渐接受沉积(图 7).从地震剖面来看,两侧谷坡均由断层控制,底部发育岩浆侵入体,说明该峡谷的形成演化最早由断裂、岩浆活动控制,后期可能由于低海面时期强烈冲刷—侵蚀发育而成.

### 3.4 气动力灾害地质因素

地层含气会增加海底沉积物层的孔隙压力,降低其抗剪切强度,使海底的不稳定性增加,它会引起施工过程中井喷、孔壁塌陷、平台倒塌或火灾等,对工程建设来说是一种典型的重大灾害因素.

研究区发育的浅层气有 2 种情况,一种分布相对较浅,分布面积广,在地震反射剖面上含气地层总体呈空白或半空白反射(图 8b),内部为弱振幅不连

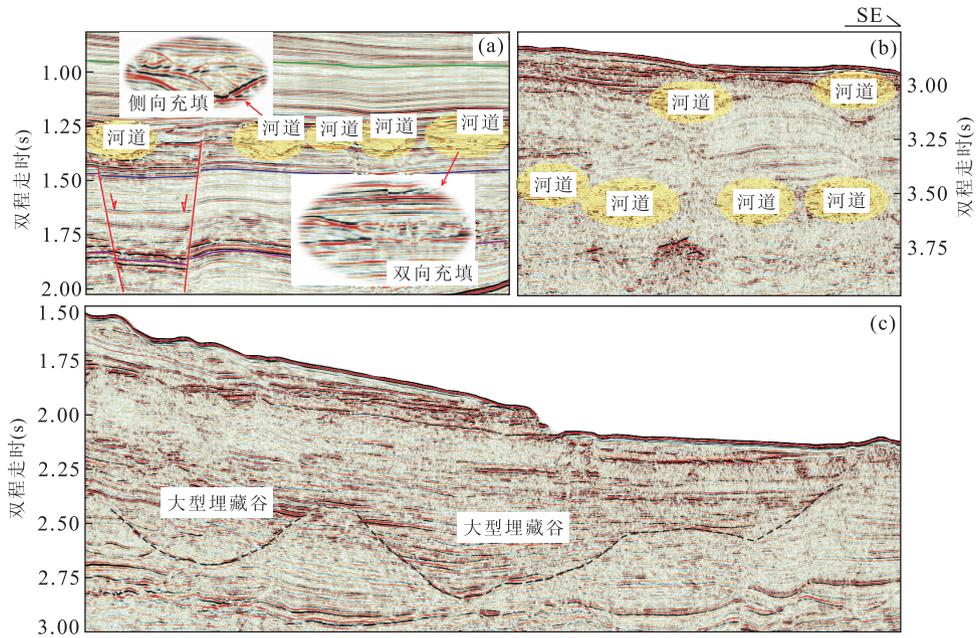


图6 神狐陆坡区多期埋藏河道与埋藏谷典型地震反射特征

Fig. 6 Typical characteristics of seismic reflection of multi-stage buried channel and buried valley on the Shenhu Continental Slope  
a. 测线 S<sub>12</sub>; b. 测线 S<sub>1</sub>; c. 测线 S<sub>6</sub>

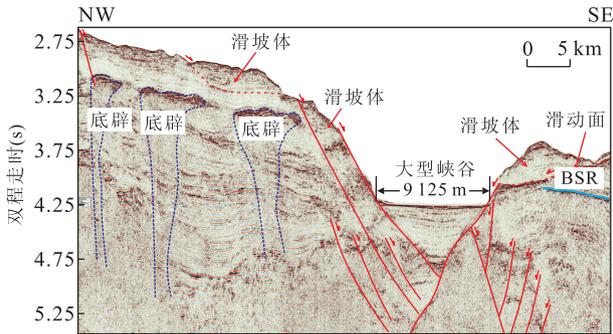


图7 神狐陆坡区大型峡谷典型地震反射特征(测线 S<sub>16</sub>)

Fig. 7 Typical characteristics of seismic reflection of large-scale valley on the Shenhu Continental Slope

续反射,边界模糊,这种气体极可能来自浅部埋藏河道或三角洲沉积体内有机质分解,平面上片状分布居多;另一种为孤立的高压气囊,地震反射特征十分典型,剖面形态呈层状分布或囊状透镜体,前者顶部反射同相轴呈板状,后者顶部反射呈透镜状,顶部均呈强振幅低频反射,两侧边界清晰近直立,两侧边界处地层较周边正常地层同相轴出现下拉现象(图8a),这是由于气体的存在会使地震波传播速度降低导致含气层及下部地层的双程反射时间增加(李西双等,2002),这种浅层气可能源自深部。

### 3.5 土动力灾害地质因素

不规则基岩面的起伏急剧变化对近海工程设计

将有直接影响,研究区基岩面与陡坎、滑坡或断层等伴生,具有较大的潜在危害性. 在浅地层剖面、地震剖面中均有反映. 基岩顶面通常呈连续性很好的强反射,有时与陡坎、滑坡或断层伴生,起伏有时特别明显,其内部反射杂乱,无层次. 研究区部分地区,基岩面埋藏深度很浅,有的基岩直接出露海底(图9),有的距海底近几米或几十米,起伏较大,主要分布在陆坡深水区和台地周围。

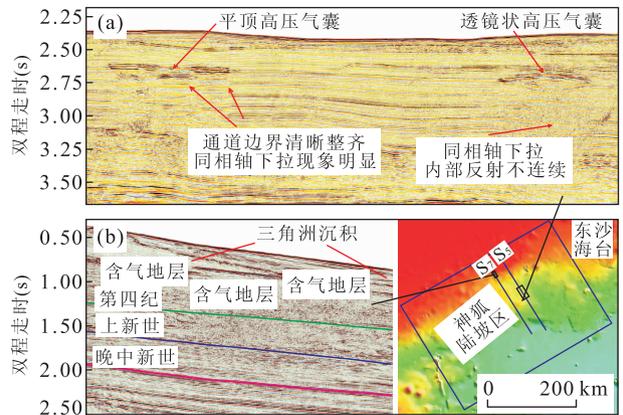


图8 神狐陆坡区高压气囊(a)及含浅层气地层(b)典型地震反射特征

Fig. 8 Typical characteristics of seismic reflection of high-pressure gasbag (a) and Formation containing gas (b) on the Shenhu continental slope

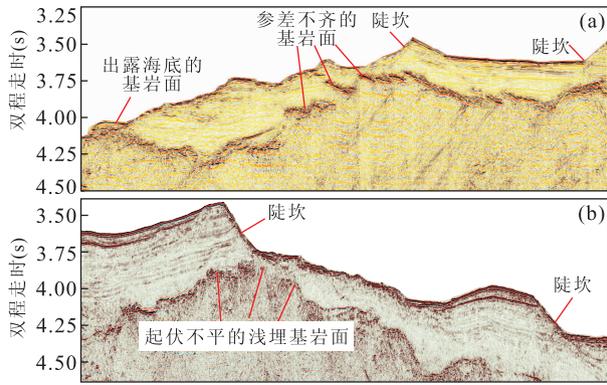


图 9 浅层埋藏基岩面与多级陡坎共生

Fig. 9 Multiple sharp steps and shallowly buried basement rocks

a. 测线 S<sub>5</sub>; b. 测线 S<sub>4</sub>

## 4 结论

基于以上大量地震资料的解译分析,针对神狐陆坡区的灾害地质环境,本文得出以下几点认识:

(1)南海北部神狐陆坡区海底灾害地质因素复杂,进一步细分出 20 个灾害地质因素,各具不同的地震反射特征.本文从灾害地质因素的触发动力角度,划分出构造应力、重力、水动力、气动力和土动力五大类灾害地质类型.

(2)神狐陆坡区灾害地质因素的分布呈现出一定的规律性,可划分为海底滑坡、埋藏三角洲、火山、浅层断裂、软弱层和浅埋基岩面 6 个灾害类型密集区.除海底滑坡之外,其余均为成群或成片分布.

(3)今后的工程建设中应当重点避让的灾害因素为:活动断裂、海底滑坡、浅层气及高压气囊、埋藏河道与埋藏谷、岩浆底辟、陡坎及峡谷;应该引起注意的因素有:火山、地震、埋藏三角洲、软弱层及浅埋基岩面.

南海北部神狐陆坡区海底灾害地质因素的特征、分布规律及灾害性对海洋资源的开发和海底工程施工选址至关重要,避免灾害因素的危害或减小危害程度是海洋灾害地质研究的重点.本文仅为灾害地质因素的普查,今后应该结合更多新技术手段,提高调查精度,尝试对灾害的作用过程、产生机理等进行细致研究,以提高海底稳定性预测,为海洋工程建设提供更可靠精确的科学依据.

致谢:感谢审稿人提出的宝贵修改意见!感谢广州海洋地质调查局给予的大力支持和珍贵的研究机会!

## References

- Bao, C. W., 1995. Buried Ancient Channels and Deltas in the Zhujiang River Mouth Shelf Area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(2): 25–36 (in Chinese with English abstract).
- Carpenter, G. B., McCarthy, J. C., 1980. Hazards Analysis on the Atlantic Outer Continental Shelf. *12th Annual O. T. C Proceedings*, 419–424.
- Chen, J. R., 1996. An Analysis on Geohazardous Factors in the Zhujiang River Mouth Basin of South China Sea. *Tropic Oceanology*, 15(1): 9–16 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. R., Li, T. H., 1993. Types and Distribution of Geological Hazards in the South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 67(1): 76–85 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. R., Pang, G. C., 1990. Engineering Geological Mapping in the Northern Shelf of South China Sea. *Rotterdam. AABP*, 55–56.
- Chen, J. R., Xiao, J. C., 1991. Types of Geohazards and Their Distribution in the Northern South China Sea. *Geological Hazards, Proceedings of Beijing International Symposium*, 535–540.
- Chen, J. R., Yang, M. Z., 1996. Research on the Potential Factors for Geologic Hazards in South China Sea. *Journal of Engineering Geology*, 4(3): 34–39 (in Chinese with English abstract).
- Feng, W. K., Shi, Y. H., Chen, L. H., 1994. Research for Seafloor Landslide Stability on the Outer Continental Shelf and the Upper Continental Slope in the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 14(2): 81–94 (in Chinese).
- Feng, Z. Q., Feng, W. K., Xue, W. J., et al., 1996. Geological Hazards and Submarine Engineering Geological Conditions in the Northern South China Sea. Hohai University Press, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Kou, Y. Q., 1990a. Ancient River Channels in the Northern South China Sea Shelf and Engineering Geologic Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 9(1): 37–45 (in Chinese with English abstract).
- Kou, Y. Q., 1990b. Submarine Landslides in the Northern South China Sea. *Ocean and Coastal Development*, 7(3): 48–51 (in Chinese).
- Kou, Y. Q., Du, D. L., 1995. Discussion on Potential Geohazards in Southwest Taiwan Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 9(1): 41–47 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. G., 2007. Inshore Geological Hazard of Pearl River Es-

- tuary in the North of South China Sea (Dissertation). The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 7—64 (in Chinese with English abstract).
- Li, F., Yu, J. J., 1994. Classification of Geohazards Factors on Continental Shelf. *Marine Sciences*, (4): 50—53 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Liu, B. H., Zheng, Y. P., et al., 2002. Types and Acoustic Reflection Characteristics of Geological Hazards in Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 32(1): 107—114 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. W., 2011. Research on Hazardous Geological Factors in the Outer Shelf of Northern South China Sea and Influence on the Submarine Pipelines. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., 2010. A Safety Evaluation for Submarine Slope Instability of the Northern South China Sea due to Gas Hydrate (Dissertation). Ocean Institute, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 5—69 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. Q., Liu, X. Q., Wang, S. J., et al., 2000. Kinds of Hazardous Geology and Division in South China Sea. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 11(4): 39—44 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. Q., Liu, X. Q., Wang, S. J., et al., 2002. Discussion on Some Problems in Compilation of Hazardous Geological Map (1 : 2 000 000) of South China Sea. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(1): 17—20 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. Q., Liu, S. Q., Wang, S. J., et al., 2002. Preliminary Study on the Distribution of Hazardous Geology in South China Sea and Its Formation Regulations. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(1): 12—16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. Q., 2005. Main Geological Hazardous Factors and Influences on China Coastal Zone. *Marine Geology Letters*, 21(5): 23—42 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. X., Zhan, W. H., 1992. Types of Geologic Disaster, Developmental Regularity and Preventive Countermeasures. *Tropic Oceanology*, 11(2): 46—53 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., 1996. Potential Types and Characteristics of Geological Hazards. In: Feng Z. Q., ed., *Geological Hazards and Submarine Engineering Geological Conditions in the Northern South China Sea*. Hohai University Press, Nanjing, 82—119 (in Chinese with English abstract).
- Lu, C. B., Zhan, W. H., Liu, Y. X., 1991. Analyses on Fault Activity and Regional Stability in the Pearl River Mouth. *Tropic Oceanology*, 10(1): 7—14 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S. Z., Chen, T. H., 2006. Type of Marine Geological Hazards Offshore the Mouth of the Pearl River. *Guangdong Geology*, 21(4): 13—21 (in Chinese).
- Ou, Z. D., He, R. P., 1989. The Concept of Hazard Geology and Research Direction. *Journal of Catastrophology*, (2): 94—95 (in Chinese).
- Sun, J., Zhan, W. H., Jia, J. Y., et al., 2010. Hazardous Geology and Its Relationship with Environmental Evolution in the Pearl River Estuary. *Journal of Tropical Oceanography*, 29(1): 104—110 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. B., Wu, S. G., Wang, Z. J., et al., 2008. The Geometry and Deformation Characteristics of Baiyun Submarine Landslide. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(6): 69—77 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. S., Bao, C. W., 2000. Types and Characteristics of Potential Subbottom Geological Hazards in the East-northern South China Sea. *Geological South China Sea*, (12): 87—101 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. G., Chen, S. S., Wang, Z. J., et al., 2008. Submarine Landslide and Risk Evaluation on Its Instability in the Deepwater Continental Margin. *Geoscience*, 22(3): 430—437 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Z., Zheng, T., Pang, G. C., 1999. Features of Submarine Geological Hazards in Northern South China Sea. *Tropic Oceanology*, 18(4): 91—95 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. X., Wang, C. M., Wang, S. J., 2006. Stability Evaluation Model of Hazardous Geology in the North Region of South China Sea. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 17(1): 77—79 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. D., Zhang, Y. B., Li, B., 2011. Types and Characteristics of Deepwater Geologic Hazard in Qiongdongnan of the South China Sea. *Offshore Oil*, 31(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, W. H., Zhong, J. Q., 1995. *Geological Hazards in South China Coast*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, C., Fan, F. X., Luan, Z. D., et al., 2013. Geomorphology and Hazardous Geological Factors on the Continental Shelf of the Northern South China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 29(1): 51—60 (in Chinese with English abstract).

Zhou, J., 1992. Hazard Geology and Geological Hazards. *Adv-  
vance in Earth Sciences*, 7(2): 84—85 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 鲍才旺, 1995. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲. 海洋地质与第四纪地质, 15(2): 25—36.
- 陈俊仁, 1996. 南海珠江口盆地地质灾害因素分析. 热带海洋, 15(1): 9—16.
- 陈俊仁, 李廷桓, 1993. 南海地质灾害类型与分布规律. 地质学报, 67(1): 76—85.
- 陈俊仁, 杨木壮, 1996. 南海潜在地质灾害因素研究. 工程地质学报, 4(3): 34—39.
- 冯文科, 石要红, 陈玲辉, 1994. 南海北部外陆架和上陆坡海底滑坡稳定性研究. 海洋地质与第四纪地质, 14(2): 81—94.
- 冯志强, 冯文科, 薛万俊, 等, 1996. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件. 南京: 河海大学出版社.
- 寇养琦, 1990a. 南海北部大陆架的古河道及其工程地质评价. 海洋地质与第四纪地质, 9(1): 37—45.
- 寇养琦, 1990b. 南海北部的海底滑坡. 海洋与海岸带开发, 7(3): 48—51.
- 寇养琦, 杜德莉, 1995. 台西南盆地潜在的地质灾害初探. 中国海上油气(地质), 9(1): 41—47.
- 李成钢, 2007. 南海北部珠江口近海地质风险(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 李凡, 于建军, 1994. 陆架海灾害地质因素分类. 海洋科学, (4): 50—53.
- 李西双, 刘保华, 郑彦鹏, 等, 2002. 黄东海灾害地质类型及声学反射特征. 青岛海洋大学学报, 32(1): 107—114.
- 李泽文, 2011. 南海北部外陆架灾害地质因素及其对海底管道的影响研究(硕士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 刘峰, 2010. 南海北部陆坡天然气水合物分解引起的海底滑坡与环境风险评价(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 刘守全, 刘锡清, 王圣洁, 等, 2000. 南海灾害地质类型及分区. 中国地质灾害与防治学报, 11(4): 39—44.
- 刘守全, 刘锡清, 王圣洁, 等, 2002. 编制 1: 200 万南海灾害地质图的若干问题. 中国地质灾害与防治学报, 13(1):

17—20.

- 刘锡清, 2005. 我国海岸带主要灾害地质因素及其影响. 海洋地质动态, 21(5): 23—42.
- 刘锡清, 刘守全, 王圣洁, 等, 2002. 南海灾害地质发育规律初探. 中国地质灾害与防治学报, 13(1): 12—16.
- 刘以宣, 詹文欢, 1992. 华南沿海地质灾害类型、发育规律和防治对策. 热带海洋, 11(2): 46—53.
- 刘宗惠, 1996. 潜在地质灾害类型及特征. 见: 冯志强编, 南海北部地质灾害及海底工程地质条件. 南京: 河海大学出版社, 82—119.
- 陆成斌, 詹文欢, 刘以宣, 1991. 珠江口断裂的活动性与区域稳定性分析. 热带海洋学报, 10(1): 7—14.
- 马胜中, 陈太浩, 2006. 珠江口近岸海洋地质灾害类型. 广东地质, 21(4): 13—21.
- 欧正东, 何儒品, 1989. 灾害地质学的概念和研究方向. 灾害学, (2): 94—95.
- 孙杰, 詹文欢, 贾建业, 等, 2010. 珠江口海域灾害地质因素及其与环境变化的关系. 热带海洋学报, 29(1): 104—110.
- 孙运宝, 吴时国, 王志君, 等, 2008. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征. 海洋地质与第四纪地质, 28(6): 69—77.
- 吴庐山, 鲍才旺, 2000. 南海东北部海底潜在地质灾害类型及其特征. 南海地质研究, (12): 87—101.
- 吴时国, 陈珊珊, 王志君, 等, 2008. 大陆边缘深水区海底滑坡及其不稳定性风险评估. 现代地质, 22(3): 430—437.
- 夏真, 郑涛, 庞高存, 1999. 南海北部海底地质灾害因素. 热带海洋, 18(4): 91—95.
- 杨春霞, 王春民, 王圣洁, 2006. 南海北部灾害地质稳定度评价模型. 中国地质灾害与防治学报, 17(1): 77—79.
- 杨文达, 张异彪, 李斌, 2011. 南海琼东南深水海区地质灾害类型与特征. 海洋石油, 31(1): 1—7.
- 詹文欢, 钟建强, 1995. 华南沿海地质灾害. 北京: 科学出版社.
- 周川, 范奉鑫, 栾振东, 等, 2013. 南海北部陆架主要地貌特征及灾害地质因素. 海洋地质前沿, 29(1): 51—60.
- 周俊, 1992. 灾害地质学与地质灾害学. 地球科学进展, 7(2): 84—85.