



陆坡重力流沉积地貌单元三维地震表征及其成因

李玲, 李磊, 闫华敏, 彭晨昂, 程琳燕, 高毅凡, 张威, 龚广传

3D seismic characterization and origination of gravity flow geomorphic units on continental slope: A case study of Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin

LI Ling, LI Lei, YAN Huamin, PENG Chenang, CHENG Linyan, GAO Yifan, ZHANG Wei, and GONG Guangchuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022070702>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 91

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

澳大利亚波拿巴盆地N区块岩性圈闭识别探讨

Identification of lithologic traps in block N of Bonaparte Basin, Australia
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 183

构造-沉积耦合过程的数值模拟: 以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李玲, 李磊, 闫华敏, 等. 陆坡重力流沉积地貌单元三维地震表征及其成因——以琼东南盆地陵水凹陷为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 37-48.

LI Ling, LI Lei, YAN Huamin, et al. 3D seismic characterization and origination of gravity flow geomorphic units on continental slope: A case study of Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 37-48.

陆坡重力流沉积地貌单元三维地震表征及其成因 ——以琼东南盆地陵水凹陷为例

李玲^{1,2}, 李磊^{1,2}, 闫华敏^{1,2}, 彭晨昂^{1,2}, 程琳燕^{1,2}, 高毅凡^{1,2}, 张威^{1,2}, 龚广传^{1,2}

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065

摘要:海底地貌一直是国内外学者关注的重点领域。基于琼东南盆地陵水凹陷 1000 km² 高分辨率三维地震资料, 利用 GeoFrame 综合解释平台、Surfer 三维成图等技术, 对琼东南盆地陵水凹陷现今海底地貌进行精细刻画。研究表明: ① 琼东南盆地陆坡带主要发育水道(大型水道 C1 和冲沟-朵体复合体 G1—G3)、周期阶坎以及滑坡体系 3 类典型地貌单元。② 水道 C1 宽深比 31.5~232, 主要由陆坡水道运输的碎屑物质冲刷而成, 冲沟-朵体复合体 G1—G3 末端可见明显朵体发育; 同时, 可在水道和滑坡体系内识别到周期阶坎; 研究区处于陆坡滑塌的体部-趾部区域, 广泛发育挤压脊、舌状体等沉积构造。③ 推测认为研究区海底地貌主要由上陆坡滑坡引起, 在物源与海平面升降的加持下, 形成如今的综合型地貌。

关键词:海底地貌; 水道; 周期阶坎; 滑坡; 琼东南盆地

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022070702

3D seismic characterization and origination of gravity flow geomorphic units on continental slope: A case study of Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin

LI Ling^{1,2}, LI Lei^{1,2}, YAN Huamin^{1,2}, PENG Chenang^{1,2}, CHENG Linyan^{1,2}, GAO Yifan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, GONG Guangchuan^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

Abstract: Seafloor topography has always been the key of scientific study. Based on 1000 km² high-resolution 3D seismic data of Lingshui Sag in Qiongdongnan Basin, South China Sea, the GeoFrame platform, Surfer 3D mapping, and other technologies were applied to characterize the current submarine landform of Lingshui Sag. Results show that the lower slope of Qiongdongnan Basin presented mainly three types of geomorphic units: channels (including large channel C1 and gully-lobe complexes G1-G3), cyclic steps, and submarine landslides. The width-depth ratio of channel C1 that was mainly scoured by debris transported via continental slope channels, is between 31.5 and 232. At the ends of G1-G3 of gully-lobe complex developed obvious lobes. The cyclic steps could be identified in the channel and submarine landslides. Squeeze ridges and underwater tongues were developed widely in the main body and the toes of slumps on continental slope. We speculate that the seafloor topography in the Lingshui Sag was mainly caused by submarine landsliding on the upper continental slope, which was intensified by deposit overload and sea level fluctuation, and finally the modern landform was formed.

Key words: seafloor topography; channel; cyclic steps; submarine landslide; Qiongdongnan Basin

海底地貌作为海洋构造运动的直接表征, 对于海底资源调查、沉积过程和构造活动研究具有十分重要的科学意义^[1]。近年来, 国外众多学者围绕海

底地貌特征做了一系列研究调查, Posamentier 等^[2]通过对印度尼西亚近海、尼日利亚和墨西哥湾 3D 地震数据的分析, 识别出浊积水道、水道堤岸复

资助项目: 钻后储层反演和地质建模研究项目(ZX2021ZCGCF7751); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划(YCS22213072); 西安石油大学研究生教育综合改革研究与实践项目“专业学位研究生联合培养基地建设与管理——与石油企业联合培养模式研究”(2021-X-YJG-002)

作者简介: 李玲(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事地震解释及深水沉积研究, E-mail: 1228763757@qq.com

通讯作者: 李磊(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事地震地质综合解释及海洋沉积研究, E-mail: lilei@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-07; 改回日期: 2022-10-05. 周立君编辑

合体、水道-朵体复合体、分流河道复合体和泥石流水道等5种沉积地貌单元。Francis等^[3]通过解释巴布亚湾(GoP)地区多波束测深、地震数据以及测井岩心,识别到陆坡峡谷、滑塌沉积物等地貌单元类型,并对GoP海底地貌进行了广泛的观察、描述和解释。Hogan等^[4]使用高分辨率地球物理资料和岩芯数据研究了巴伦支海西北部海底地貌,在研究区识别出流线型地貌、融水地貌和洞穴、冰山冲刷地貌类型。Seri等^[5]利用宽扎盆地高质量三维地震、海底地球化学和基于卫星的表面浮油数据等综合分析,观察到麻坑、泥坑或沥青火山等海底地貌特征。由此,海底地貌已逐渐形成一个完整全面的体系(表1)。现有资料证明,琼东南盆地现今海底地貌结构分布复杂,国内众多学者利用多样化手段对琼东南海底地貌进行研究,罗进华等^[6]利用自制水下机器人采集资料,对琼东南盆地深水区典型块体流沉积和浊流沉积特征进行描绘,深化了对琼东南盆地深水沉积体系的认识;朱友生^[7]等利用工程调查船和自主式水下潜器调查结合的方式,研究海底表层沉积物类型、分布规律及工程地质特性。

目前,国内大多数研究集中于琼东南盆地陆架区和现今海底构架体系,对陵水凹陷陆坡区海底地貌的精细定量刻画研究还不够完善。因此,本文利用高分辨率三维地震资料,对研究区现今海底地貌进行精细刻画和解释,分析其特征、分布和成因,这对于进一步认识南海北部海底地貌、预防海底地质

灾害以及钻井平台选址都具有十分重要的意义。

1 地质概况

琼东南盆地位于南海西北陆缘,是新生代伸展盆地,具有南北高、中间低的构造格局,地理上介于海南岛与西沙海槽之间,面积约 $8.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[18-19],现今平均水深为500~1300 m^[20],由越南和海南岛双物源供给,普遍发育陆坡滑坡、峡谷和海底扇等沉积体系^[21-22](图1a)。研究区位于琼东南盆地陵水凹陷东南边缘,在中央凹陷与海南岛之间,属于盆地北部下陆坡地带,水域深度为1500~2200 m(图1),由于受多重因素的控制,发育相对复杂的沉积构造。

2 数据和方法

本研究使用中国海洋石油集团有限公司提供的琼东南盆地陵水凹陷1000 km²高分辨率三维地震数据,地震数据面元为12.5 m×12.5 m(Inline×Crossline),时间采样率2 ms,所用地震数据的主频约为50 Hz,目的层平均速度约2000 m/s,垂向分辨率约为12.5 m,解释层位为现代海底层。

利用GeoFrame地震解释平台对研究区现今海底三维地震资料零相位初值拾取,解释完成的层位进行网格化处理,通过时深转换得到深度数据。宽度、坡度等数据的使用,是在地震剖面上读出测量

表1 常见海底地貌及特征描述

Table 1 Description and features of typical seafloor topography

一级分类	二级分类	特征描述
深水水道	单一型水道	深水水道从形态上有弯曲水道(弯曲度>1.2)和顺直水道(弯曲度<1.2)之分 ^[8-9] ,是沉积物由浅海向深海搬运的重要通道
	分支水道	分支水道常发育于海底水道的头部和趾部,似树枝状展布,总体发育规模较小 ^[10]
	水道堤岸复合体	外部形态呈“海鸥”翼状展布,由“U”型或“V”型水道和楔状堤岸组成 ^[11]
	水道-朵体复合体	头部多为单一水道或者多分支水道,末端常以朵叶状展布
海底滑坡	头部	海底滑坡的头部常可识别出陡崖、滑移块体、侧壁、犁式正断层等沉积构造
	体部	体部常见的特征有:滑塌褶皱、剪切槽、滑塌块体
	趾部	趾部区域常能识别出逆冲断层、挤压脊、侵蚀擦痕以及外逸块体
冲沟		冲沟是常见的小尺度地貌,相当于深水沉积输送体系的“毛细血管” ^[12] ,多由高速冲刷的悬浮颗粒导致
海底峡谷		海底峡谷常呈“V”或“U”型下切,侧壁较陡,主要以侵蚀或沉积为主。深水海底峡谷是良好的油气储层,同时也可以记录完整的海洋地质环境变迁相关信息 ^[13]
海底麻坑	孤立麻坑	孤立麻坑表现为圆形或椭圆形,直径1~300 m ^[14] ,是由超压流体溢出海底时侵蚀海底沉积物所形成的一种负地形 ^[15]
	条带状麻坑	由若干个大小不一的麻坑组成的麻坑带,古水道和浅层气的逸散是形成条带状麻坑的主要因素 ^[8,16]
周期阶坎		周期阶坎多为长波形、不对称展布,似正弦曲线多数向上游迁移,部分向下游迁移的新月形 ^[17]

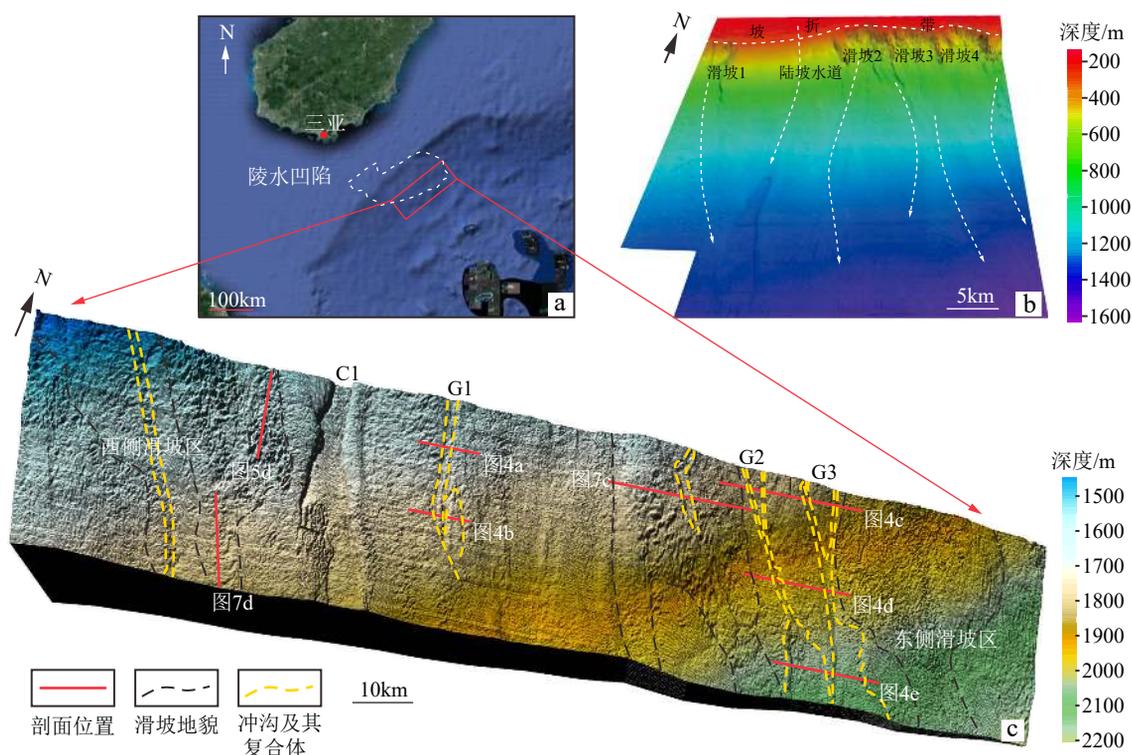


图 1 研究区地理位置 (a) 及地貌图 (b、c) [7]

Fig.1 Location (a) and geomorphic map (b, c) of the study area [7]

对象的坐标,统计后计算得出。坡度数据需要在剖面上读取测量值的两处坐标,利用一定的数学公式计算出具体数值。尽管这种直接将地震剖面的测量数据转换为形态参数存在一定的不确定性,但目前这种方法在地震资料解释和浅层沉积体系研究中被广泛采用^[14]。结合地震剖面、均方根振幅属性、倾角方位角属性以及 Surfer 软件绘制出现今海底地貌图(图 1c),对研究区海底沉积地貌进行精细刻画和表征。

前人多使用侧扫声呐或多波束测深的方式对琼东南盆地陵水区域开展地貌分析^[6-7,23],本文在前人的基础上结合三维地震技术对研究区开展研究。相较于多波束测深,三维地震能更好地将区域海底地貌与地震剖面振幅属性结合在一起,“由面入点”地分析各处地貌单元特征。根据 Mosher 使用两种方法对中央斯科舍陆坡海底地貌渲染的案例来看^[24],相同工区环境下,多波束测深可以展示更大范围海底地貌特征,而三维地震数据具有更高的清晰度和分辨率,尤其是对单一微小的地貌。本研究虽然地震资料覆盖面积广,但除研究区内大型水道外,其余地貌特征均以微小形态展布,需要整合地震资料加以识别。因此,本文更适合使用三维地震数据研究区域海底地貌。

3 地貌特征

琼东南盆地陆架边缘物源供给充足,沉积物受重力流沉积作用沿陆坡向下不断推进,沉积的过程中会发育复杂的海底地貌。综合研究区各类数据,识别出 3 种地貌单元:水道地貌单元、周期阶坎地貌单元和滑坡地貌单元。

3.1 水道地貌单元

3.1.1 水道

陆坡水道是在重力流作用下,将来自大陆架和上坡地区的大量沉积物输送至深海平原的重要通道^[9]。研究区水道位于水深 1200~1500 m,为长条状负地形,整体较为顺直(顺直型水道弯度一般小于 1.2^[8]),呈 NE 走向(图 2),从水深 1200 m 处到水深 1400 m 处延伸超过 14 km,发育面积为 33.73 km²,宽度约 0.75~3.62 km,往深海平原方向逐渐加宽,深度值分布于 12.75~28.88 m(图 3a)。水道发育区总体坡度为 2°,随着水道深度的减小,两侧水道壁也在不断变化,西侧谷壁坡度为 0.9°~11°,东侧谷壁较陡,坡度为 1.6°~7.6°,整体而言,西侧谷壁比东侧谷壁坡度变化差异大(图 3a-b)。水道根据其

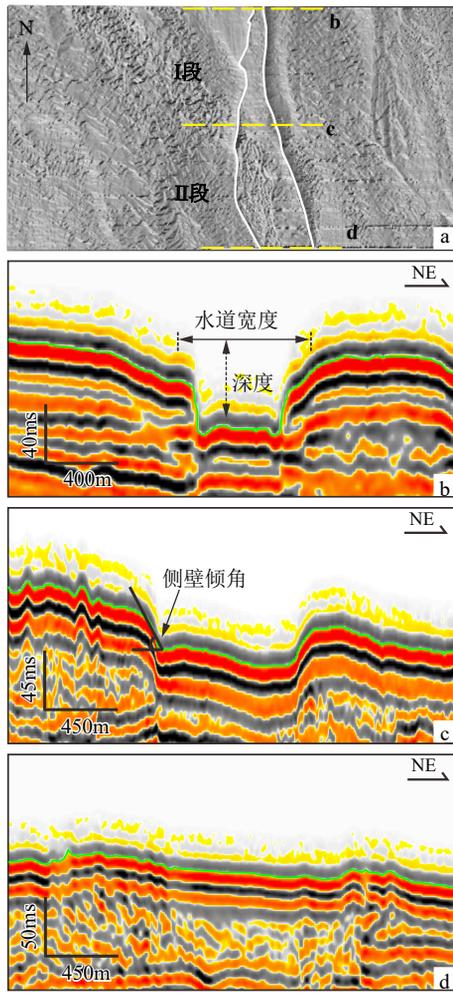


图2 水道C1形态变化

a: 倾角属性平面图(黄色测线是地震剖面所在位置), b-d: 为典型地震剖面图。

Fig.2 Morphological changes of Channel C1

a: Image of the dip attribute of Channel C1, b-d: typical seismic profiles.

反射特性分为“U”型和“V”型水道,从剖面上看,C1是典型的“U”型水道,代表水道受低速浊流冲刷和物源缓慢沉积^[25],水道内部呈强振幅、高连续的地震反射特征。随着坡度的减小,水道的类型由侵蚀型为主逐渐过渡到沉积型为主(图2)。

本研究选取3条典型测线(图2a),统计29条数据参数(宽度、深度、水道壁倾角和水道总体坡度),结合倾角属性平面图,计算和分析其几何构型,对水道的形态变化展开定量分析(图3a-b):

I段水道整体宽深比较小,水道壁两侧坡度较陡,外形呈陡窄U形,两侧堤岸发育明显,表明此处重力流流速大,水动力作用较强,具有一定的侵蚀能力^[26]。此段水道形成于限制性条件下,主要以侵蚀型水道为主(图2b-c)。

II段宽深比明显大于I段,外形呈宽缓U形,

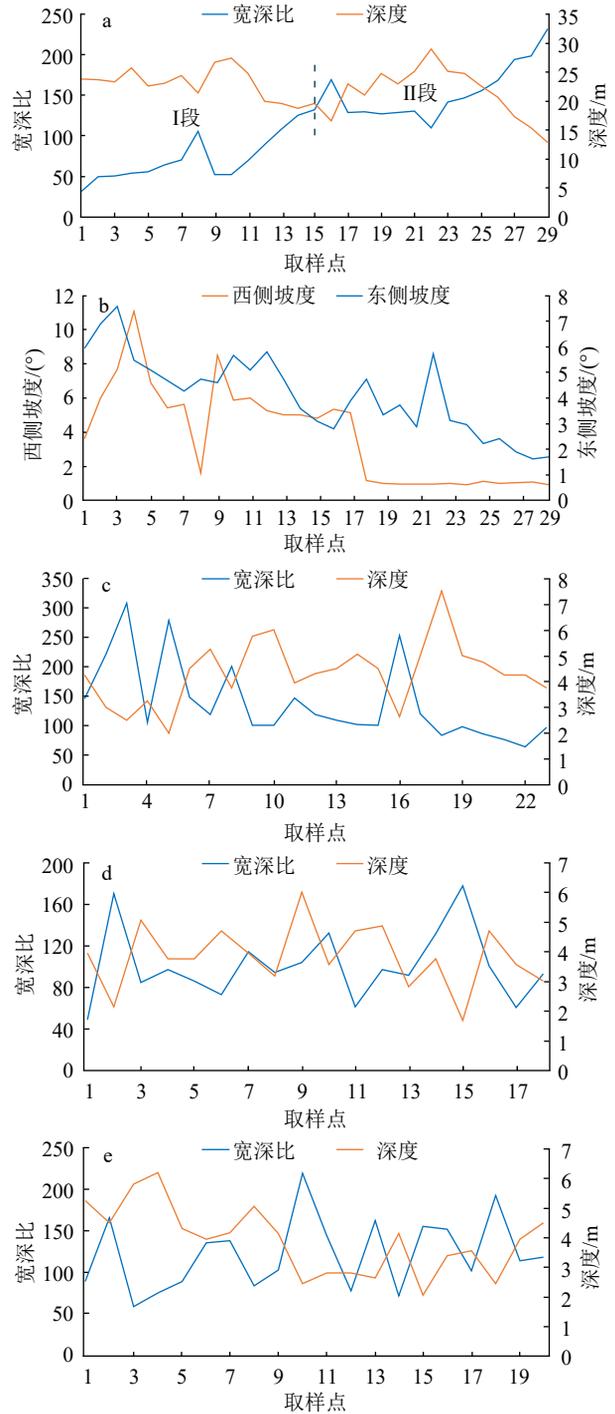


图3 水道体系构型参数

a、b: 水道C1构型参数, c-e: 冲沟-朵体复合体G1—G3构型参数。

Fig.3 Channel system measurements

a-b: Measurements of Channel C1, c-e: Measurements of the gully-lobe complexes G1-G3.

两侧堤岸逐渐变低,沉积作用明显,表明水道在此限制力减弱。当重力流流经II段时,水动力作用较弱,水道逐渐向水平方向拓展,使此段以沉积型水道为主(图2c-d)。由于上陆坡长期的物源供给,加之水道末端滑塌物致使重力流改道,在研究区末

端,水道有消亡的趋势。

水道 C1 发育位置靠近上陆坡区,由三维地震资料和多波束测深(图 1b-c)可以看出,C1 上部东北方向发育大型陆坡水道系统,此陆坡水道的形成改变了原有坡折地形,使陆架区大量碎屑物质通过陆坡水道搬运至区域内,同时在海平面波动、构造运动等外部因素的共同控制下,粗粒沉积物往下陆坡运移的过程中,会逐渐在此冲刷出水道 C1。

3.1.2 冲沟-朵体复合体

研究区陆坡发育大型滑塌体系,其滑塌物往下坡滑移的过程中,在研究区发育 3 个典型冲沟-朵体复合体系,由西向东依次命名为 G1、G2、G3。

冲沟 G1 位于水道 C1 东侧约 6 km 处,相对延伸较短,整体形态呈“U-W-U”变化,中部发育明显朵体,末端又汇聚成单一沟槽,表示可能受多期侵蚀的特征^[27]。G1 在研究区内宽深比平均值为 138,最大宽度为 0.77 km(位于水道前端)(图 3c),末端出现轻度弯曲,弯曲度为 0.66,剖面呈强振幅、高连续反射地震相,且 G1 附近观察到几个小型侵蚀洼地,但其侵蚀程度不明显(图 4a-b)。

G2 延伸长度覆盖整个工区,头部呈树枝状形态,发育多个规模大小相当的支谷(图 4c),这些支谷在中间位置最终汇集到一条主谷。随着冲沟槽

的生长发育,受断裂引导以及块体搬运、海流侵蚀等因素的影响,其逐渐与周围沟谷连通并合,规模逐渐增大,形成以单个具有天然堤的水道(图 4d)。G2 宽深比平均值为 100,最大宽度处为 0.62 km(图 3d),末段主要表现为叶状朵体形态,朵体面积达 11.11 km²,呈凹槽状展布。G2 整体表现出强振幅、高连续的地震反射特征(图 4e)。

G3 在研究区内宽深比达 123,由树枝状头部组成,头部发育众多支流和沟壑(图 4c)(这些初期沟壑的发育是后期冲沟形成的重要机制),支流在中游汇聚成单一的冲沟(图 4d)。G3 的变化幅度最大,其最大宽度达 0.75 km,最窄的地方不足 0.25 km(图 3e),主要表现为“U”型。冲沟下倾方向发育相对平缓的朵体沉积,可能含有相对较高的砂质含量(图 4e)。

研究区冲沟末端朵叶是在重力流侵蚀能力变弱、加积作用变强之时,在地势相对平坦的环境下形成的薄而广的砂体,朵体边界一般呈逐渐过渡关系,这类朵叶形成于非限制条件下,分布范围受浊积体的含砂量和地形等因素控制。

结合图 1b、1c 可以看出,冲沟-朵体复合体 G1—G3 的形成主要由陆坡区滑坡 2—4 控制,从左到右依次发育且规模量庞大,由于滑坡发生后地形

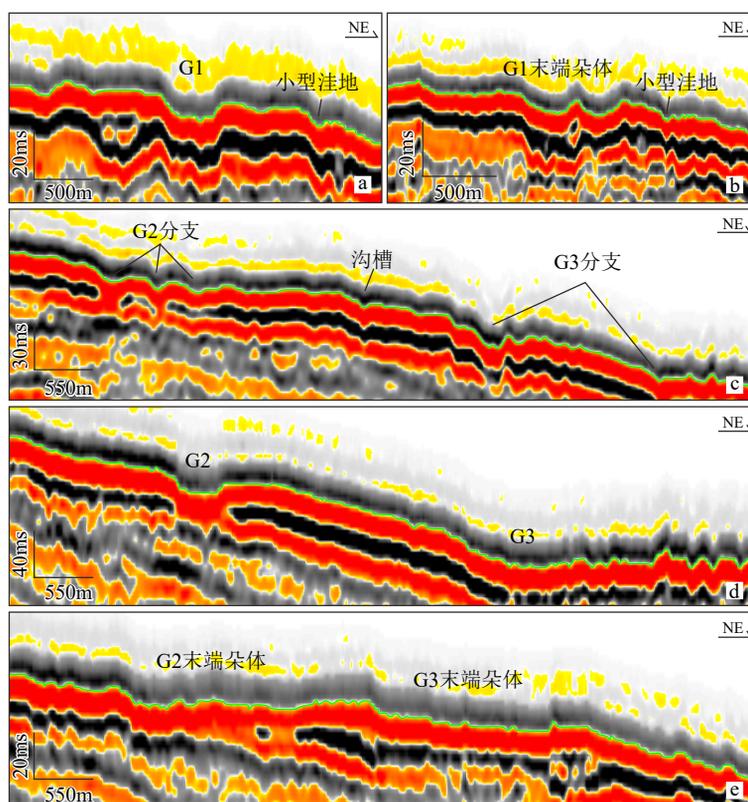


图 4 冲沟-朵体复合体 G1、G2、G3 典型剖面

Fig.4 Typical seismic profiles of the G1, G2, and G3 gully-lobe complexes

坡度陡峭,在满足滑坡发生的条件下,沉积物滑移过程中高速侵蚀海底形成大小不等的冲沟,即复合体 G2、G3 头部树枝状形态,而后不断侵蚀加深形成中段 U 形地貌,随着地形坡度的减缓,经过长距离搬运的上坡物源缓慢沉积在其末端,形成叶状朵体。

3.2 周期阶坎地貌

周期阶坎是超临界浊流转变为亚临界浊流过程中形成的一系列向上游迁移的、长波状(波长/波高 $\gg 1$)的台阶地貌^[28],其波长范围一般从几十米至几千米不等^[29],广泛分布于琼东南盆地其他地区^[17]。根据研究区周期阶坎发育位置的不同,可将其分为水道体系周期阶坎和滑坡体系周期阶坎两类。

水道体系周期阶坎分布在水道 C1 全段以及冲沟-朵体复合体的扇体部分,发育面积达 75 km²,平均发育坡度为 1.3°,其波长为 0.03~3.56 km,波高分布于 1.2~5.44 m,具有独特的阶梯状形态。水道体系内周期阶坎底形普遍具有不对称特性,呈现出迎流面较长、背流面较短的形态,多数似月牙形向上游迁移,部分向下游迁移^[17]。其地震剖面表现为强振幅、高连续的地震反射特征(图 5b)。西侧堤岸形成的周期阶坎,其波峰和波谷的趋势与水道内部呈亚平行展布(图 5a)。

滑坡体系周期阶坎多以簇或场的形式分布在

区域内东西两侧滑坡堆积地带,发育面积约 250 km²,平均发育坡度为 1.3°,其波长为 0.04~5.14,且总体上从上坡往深海方向有逐渐增大的趋势,波高为 1.66~4.75,具有高度不对称的特征(图 5e)。

不同区域和位置的波具有不同的波长和波高,滑坡体系的波长相较于水道体系,且其平均波高也比水道体系的要高(表 2、图 5)。一般来说,更陡峭的斜率和更高密度的弗劳德数将有利于周期阶坎的形成。当地形坡度较大时,重力作用占主导,高密度流体处于不断加速过程,以侵蚀堆积作用为主^[30]。而当地形坡度变化减缓时,高速沉积物流体从上陆坡逸散开来,浊流在海底扩散并产生水跃现象,在区域内形成周期阶坎地貌,然后受到水跃消能作用的影响,加之地形坡度不足以支撑流体转化作用的消失,周期阶坎底形逐渐消失。

3.3 滑坡地貌单元

根据研究区滑坡发育的位置及滑块体运动的方向可分为水道壁滑塌和陆坡滑塌体。水道 C1 末端西侧谷壁受到深水重力流长期冲刷侵蚀,造成水道壁重力失稳向水道内部滑塌。陆坡重力失稳,滑动、滑塌向下部运动形成的滑块体,具有朵状几何外形,滑块体顺滑移面滑动,并发生一定程度的旋转,内部具有杂乱形态特征^[8]。研究区处于陆架坡

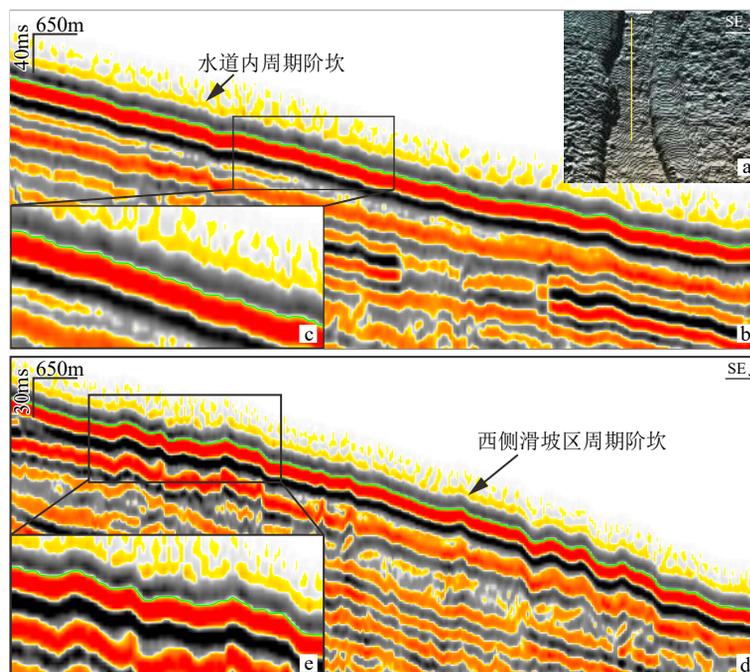


图 5 周期阶坎典型剖面

a: 水道内周期阶坎(黄色测线是地震剖面所在位置), b: 西侧滑坡区周期阶坎。

Fig.5 Typical sections of the cyclic steps

a: Cyclic steps inside channels, b: cyclic steps in the landslide zone to the west.

表 2 研究区内周期阶坎发育主要参数
Table 2 Measurements of the cyclic steps in the study area

发育体系	发育位置	沉积区特征			周期阶坎基本特征	
		面积/km ²	坡度/(°)	形态	波长/km	波高/m
水道体系	水道	55.92	1.33	长条状	0.03~3.56	1.2~5.44
	冲沟-朵体带	19.18	1.04	叶状	0.05~2.06	1.88~2.06
滑坡体系	西侧滑塌区	87.06	1.41	分散展布	0.38~4.24	2.8~5.36
	东侧滑塌区	157.82	1.12	分散展布	0.04~5.14	1.66~4.75

折带滑坡 2—4 的体部-趾部区域(图 1b),因此能够识别出沉积物滑移所形成的挤压脊、舌状体。

3.3.1 水道壁滑塌

水道壁滑塌是水道堤岸在重力流的作用下沿水道壁侧向垮塌的一种现象,在其滑塌过程中会对基底及周围地层产生较强的侵蚀作用,滑塌方向一般与水道的展布方向垂直。

水道 C1 末端的滑塌沉积在平面上呈半圆或扇形(图 6a),其滑塌方向的堆积物呈波浪式起伏形态,滑塌体厚度约 35 m,面积达 12.19 km²,占比水道总面积的 36%。西侧水道壁在发生滑塌之前,坡度始终保持在 3°~8°之间,在滑塌发生后,骤然转变为 0.8°~1.1°(图 3b),这就表明水道壁倾斜程度是造成滑塌发生的重要条件之一。滑塌体内部为杂乱反射,具有强振幅、高连续性的地震反射特征(图 6b)。水道壁滑塌过程中,滑塌物受地形控制影响,停止向前搬运,而此时滑塌产生的动能并未减小,因此会产生严重的挤压作用,形成规律起伏的挤压褶皱(图 6b)。

由图 1b 可以观察到,水道 C1 的西北方向陆坡区发育有滑坡 1,滑坡 1 的沉积物流向趋近于水道壁滑塌点,推测认为,水道发生滑塌的条件除了水道壁倾斜程度大之外,还可能由于滑塌点堤岸物源不断加积所导致。水道发育初期,水道堤岸到底部高度逐渐增大,在重力流与海水冲刷作用下,水道堤岸愈发不稳定,通常这个时期水道堤岸发生滑塌的可能性增大。在滑塌发生后,滑塌沉积物可能导致水道内部重力流流速减慢,更易于在轴部形成沉积,在重力流较大的条件下,最终可能形成溢岸流。滑塌沉积可能导致该段水道逐渐被废弃。

3.3.2 陆坡滑塌体

(1) 舌状体

舌状体是 MTDs 在趾部区的产物,它的存在反映了滑坡体逐渐向深海平原消亡的过程^[23]。区域内舌状体以叶状形态展布,外部表现为起伏波动较

大的鼓丘状地形(图 1c),发育面积约 105 km²,高出研究区其余地形约 75 m,平均坡度 2°。舌状体振幅频率较强表明此处岩性差异大,以重力流发育为主(图 7a)。剖面强振幅,内部呈杂乱反射,推测为上陆坡滑塌物的产物(图 7c)。

舌状体的表面还发育有小型沟槽,其平均长度为 5.4 km,整体宽度趋近于 0.6 km,平均切入深度为 5 m,具有明显的 V 形横截面(图 7c),往深水方向无明显加宽趋势。这样的冲沟可能是由悬浮的沉积物流形成的,因为强烈的冲刷可能会使沉积在槽口的沉积物重新悬浮起来,另外此处地形比区域外其他地方高,更易引发密集的浊流冲刷。

现今陆坡区沉积物源在水动力的作用下往深海方向滑移,由于受下伏地层早期滑塌搬运堆积的影响,沉积物在此处受阻,在二次沉积的作用下,物源堆积在此处,覆盖在原有滑塌堆积物上,形成一个鼓丘状地形。推测认为,舌状体物源与上陆坡滑塌区物源相一致。

(2) 挤压脊

挤压脊往往出现在 MTDs 的趾部区(图 7b、d)。随着滑坡物质的动能逐渐减小,沉积滑移过程中的挤压作用和来自下伏未扰动地层的摩擦力,使得此处常常形成一些褶皱及伴生的逆冲断层,产生一系列叠瓦状逆冲构造;如果再失去流体物质,则易形成长条形塑性横向脊-挤压脊^[6]。然而,由于剪切面的局部地形变化或流动障碍,它们也有可能出现在其他地方^[31]。挤压脊通常与泥石流沉积物有关,并且发生在 MTDs 以不受限制的方式自由散布,形成凸下坡。叶状形态的地方,其通常垂直于最大压缩应力定向的主要流动方向^[32]。当地形坡度较大或者地形隆起使块体向前搬运时受阻,地层会受到更严重的挤压作用,容易形成规模较大的挤压脊。

由于研究区处于琼东南陆架破折带滑坡体系的体部-趾部区域,所以能够观察到大规模挤压脊构造大多分布在东西两侧陆坡滑塌区域,形似海水波

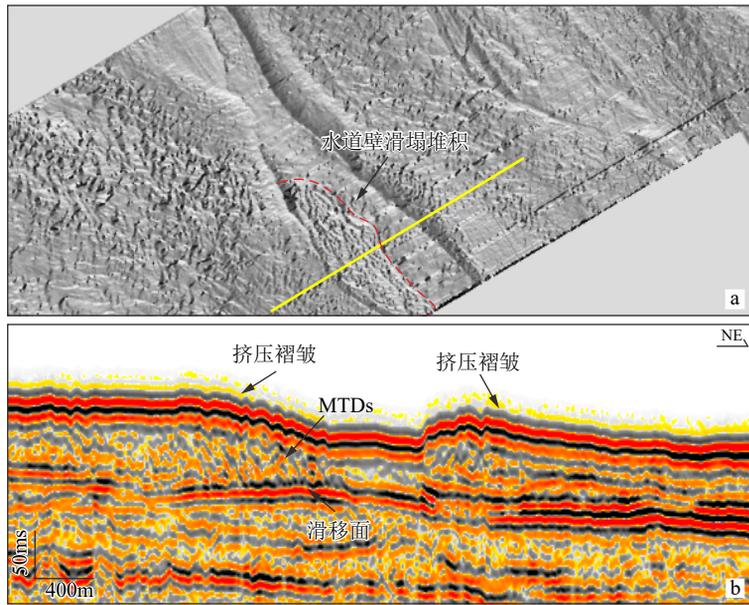


图6 水道壁滑塌

a: 倾角属性平面图(黄色测线是地震剖面所在位置), b: 水道壁滑塌地震剖面。

Fig.6 The channel wall slumpage

a: Image of the dip attribute, b: typical seismic profile.

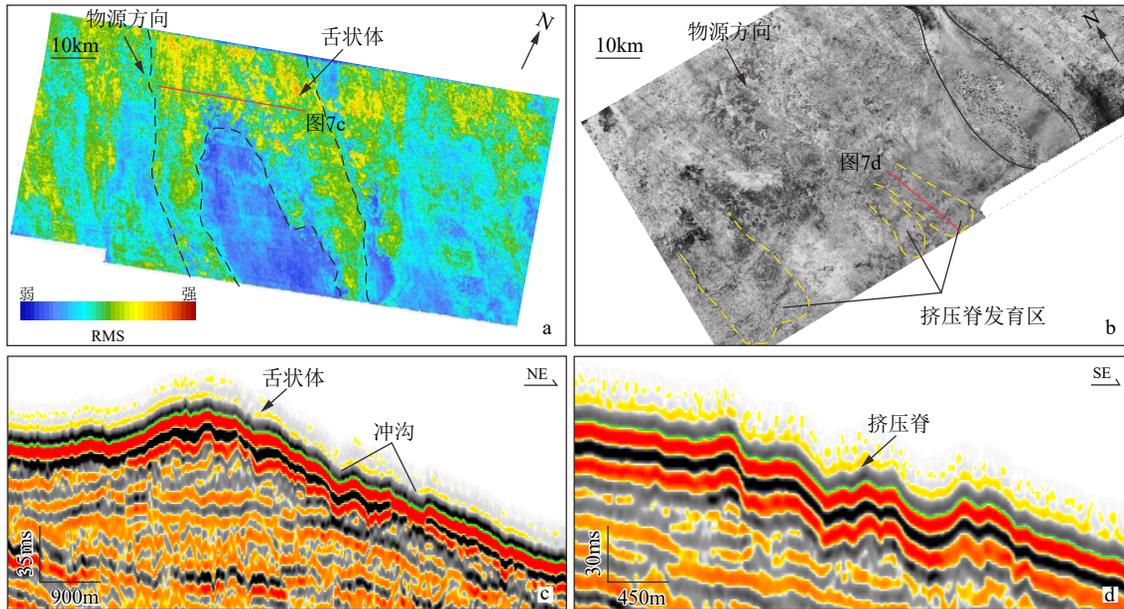


图7 滑坡地貌特征

a: 均方根振幅(RMS)属性特征, b: Amplitude*H 属性图, c: 舌状体地震剖面, d: 挤压脊地震剖面。

Fig.7 The features of submarine landslide

a: Attribute of the RMS (root mean square) amplitude, b: attribute of amplitude × H, c-d: lobe body and compressed ridges on seismic profiles.

浪,呈均匀凹凸起伏状,具有强振幅、高连续性的地震反射特征(图7d),这是在外流块停留在海底时犁入下面的沉积物所形成的。挤压脊的上倾边缘沿SE方向倾斜,说明水流动力足够强,流体所携带的泥沙等碎屑物质能量强,背部挤压脊较为密集,越往南部,越来越稀疏,水动力逐渐减弱^[7]。

4 成因

4.1 滑坡为引

滑坡在海底陆坡区域内很常见,特别是诸如快

速沉积、细粒沉积物或破裂岩石等弱地质材料受到地震、海啸和内部高孔隙度压力等环境应力条件下,下坡分量超过抵抗应力时,地层沿着一个或几个凹槽的滑动面移动。

琼东南盆地现今陆架坡折平均坡度在 4° 以上,局部可达 10° ,平均宽度约 15 km,且坡度越陡,陆坡宽度越窄^[33],这更有利于滑坡的形成。前人研究表明,琼东南盆地北部陆坡自 5.5 Ma 以来发育多期典型叠置的滑坡体系,且发育规模大、延伸距离远^[34],至今尚可以清晰地观察到海底滑坡发生后形成的弧形陡坎(图 1b)。琼东南盆地北部陆坡滑坡是造成下部研究区海底地貌形成的重要原因之一。由图 1b 可以看出,研究区上部坡折带多发育峡谷、沟谷、浊积扇等深水沉积类型,受海平面升降、物源供应以及陆坡坡度变化等多重因素影响,陆坡沉积物发生重力失稳,引发多期次滑坡。当滑坡发生时,海底块体被迅速移走并运送至更深的水域,粒度较大的沉积物在高速运移过程中冲刷出初期水道,在后期浊流的二次搬运以及陆坡水道长期稳定的物源供给作用下,水道 C1 逐渐加大变宽,形成现今地貌。其中一些块体在长距离搬运下沉积在研究区,在其内部形成挤压脊等沉积构造,另一部分以较高的流速加之水跃的发生,在区域内广泛发育周期阶坎。由此在研究区内形成了复杂、综合的海底地貌特征。

4.2 物源加持

近 2~4 Ma 以来,在气候的影响下,地球上无论构造稳定区还是构造活动区,沉积速率均突然增加了 2~10 倍。琼东南盆地大部分沉积物厚度达 1000 m,呈披覆式发育^[35]。

琼东南盆地主要物源供给体系包括红河物源、海南岛物源和越南中部物源三大体系^[36]。根据 IODP349、367-368X 航次钻探研究发现,上新世(5.3 Ma)至今,南海海域夏季风盛行,降雨量增大,陆上河流的径流量增大,搬运能力加强,运送到陆坡的陆源碎屑物质增加^[37],该时期,琼东南盆地所接收沉积物通量增大,平均可达 $20 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{Ma}$,且自新生代以来,琼东南盆地伸展作用明显,形成较大的沉积物可容空间,引起了陆架破折的北向迁移。通过研究琼东南盆地不同区域稀土元素特征,可以看出第四纪沉积物源主要受海南岛影响,海南岛是该地区持续稳定的源区^[38],沉积物供给量一直呈递增趋势,可达 $15 \sim 45 \text{ km}^3/\text{Ma}$ ^[39],而红河输送量稍有减小,最大为 $38 \text{ km}^3/\text{Ma}$ ^[40]。因此认为,海南岛

物源体系控制着琼东南盆地东北部陆架边缘轨迹迁移演化。

综上所述,琼东南盆地自上新世以来所接收的沉积物量大,致使研究区西北部陆架边缘体系向前推进。随着海平面升高,沉积物供给速率与可容纳空间增长速率相差不大时,陆架边缘发育地层垂向叠加的加积沉积,当上陆坡的坡度达到一定程度后,沉积物更容易失稳^[41],形成了峡谷和重力流广泛发育的陡峭地形,影响了研究区海底地貌的形成。

4.3 海平面升降

海平面升降会改变陆坡沉积物的水动力条件、沉降速率和剪切强度等参数,导致沉积物失稳,增加沉积物向深海方向的供给。全球海平面的波动是由海洋水量或海洋盆地体积的变化引起的,通常可以调节源汇系统的连通性并改变沉积物供应和运输距离。一般情况下,当海平面下降时,沉积物会远离陆地,靠近深水区,这就为海底地貌的形成提供了物源条件(图 8)。特别是海平面自 1 Ma 以来急剧波动,频繁上升和下降,这可能与冰期到间冰期的气候循环有关^[42]。低海平面或海平面急剧上升会影响沉积物稳定性。

根据 ODP 1148 的海平面记录^[43],琼东南盆地的海平面呈现快速的周期性变化,振荡幅度和频率很高,且琼东南盆地现今陆架宽达 100~450 km^[44],是世界上最宽广的陆架之一,一旦海平面发生微小的变化都会引起海岸线大规模的进退,这对邻近深海区的沉积物供应变化造成巨大影响^[45]。因此,快速的海平面波动可能是研究区多类第四纪沉积地貌形成的关键机制。

海平面变化在整体上对陆坡区的水深有直接的影响^[33]。晚中新世以来琼东南盆地发生过 3 次大的海退事件,海南岛隆起和红河提供了充足的沉积物来源,向深海方向强烈的进积作用使沉积体在一定坡度下自身重力不断增加^[46]。因此,认为海平面的变化是触发研究区上陆坡滑塌沉积的关键外部因素,导致上陆坡沉积物滑移至此,形成各种沉积地貌单元。

5 结论

(1)高分辨率三维地震资料及综合数据的利用对研究区海底地貌的识别效果显著,研究区现今海底受深水重力流及流体作用的影响,主要发育水道、周期阶坎和陆坡滑坡体 3 种地貌单元。

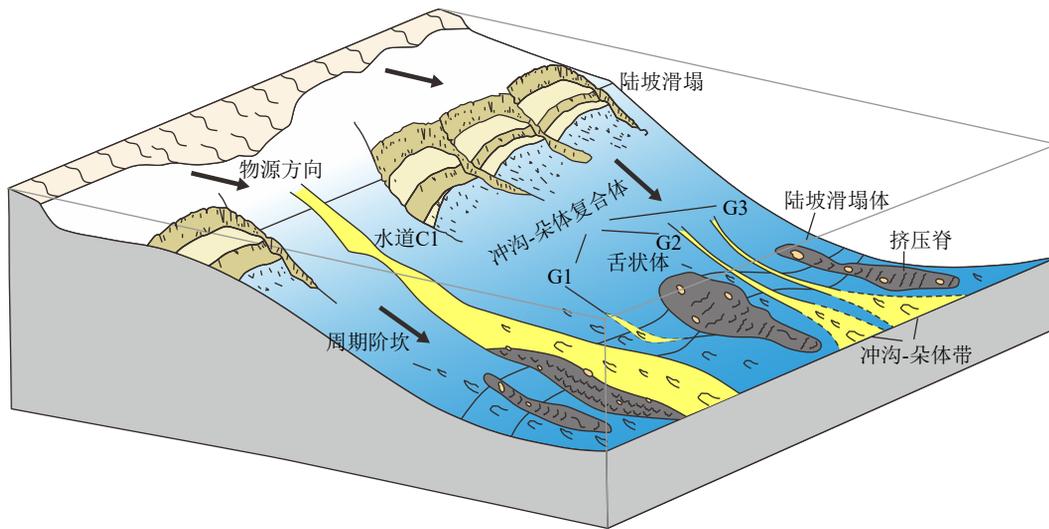


图8 研究区地貌模式图

Fig.8 The geomorphic model of the study area

(2)研究区深水水道主要分为水道和水道-朵体复合体两种地貌,水道C1是宽深比为31.5~232的大型水道,主要由陆坡水道运输的碎屑物质冲刷而成,同时,水道C1末端还发育半圆或扇形的水道壁滑塌;冲沟-朵体复合体G1—G3由陆坡滑坡系统控制而成,末端可见明显朵体发育,推测由坡折处滑坡2—4导致。

(3)在研究区水道和滑坡体系可以识别到周期阶坎,且滑坡体系的波长和平均波高高于水道体系。同时,研究区位于陆架滑坡体系的趾部区域,可识别出挤压脊、舌状体等构造。

(4)研究区现今海底地貌主要由上陆坡区滑塌引起,伴随着第四纪至今物源供给增强,以及海平面升降等多重因素,形成如今的综合型海底地貌。

参考文献 (References)

- [1] Ou X L, Zhu J J, Li S Z, et al. Submarine geomorphological features and their origins analyzed from multibeam bathymetry data in the South China Sea [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(12): 1419.
- [2] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388.
- [3] Francis J M, Daniell J J, Droxler A W, et al. Deep water geomorphology of the mixed siliciclastic-carbonate system, Gulf of Papua [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1): F01S16.
- [4] Hogan K A, Dowdeswell J A, Noormets R, et al. Submarine landforms and ice-sheet flow in the Kvitøya Trough, northwestern Barents Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(25-26): 3545-3562.
- [5] Serié C, Huuse M, Schødt N H, et al. Subsurface fluid flow in the deep-water Kwanza Basin, offshore Angola [J]. *Basin Research*, 2017, 29(2): 149-179.
- [6] 罗进华, 朱培民. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积体系超高精度解析 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(6): 42-50. [LUO Jinhua, ZHU Peimin. Gravity induced deposits in the continental slope of Qiongdongnan Basin based on ultrahigh resolution AUV data [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 42-50.]
- [7] 朱友生, 王艳秋, 冯湘子, 等. 琼东南盆地陵水17-2深水气田开发区表层沉积物类型及工程地质特性 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 45-56. [ZHU Yousheng, WANG Yanqiu, FENG Xiangzi, et al. Surface sediments and their geotechnical characteristics in the development area of deepwater gas field LS17-2 [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 45-56.]
- [8] 李磊, 李志军, 闫瑞, 等. Rio Muni盆地第四纪陆坡地震地貌学 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 485-493. [LI Lei, LI Zhijun, YAN Rui, et al. Seismic geomorphology of Quaternary continental slope in Rio Muni Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 485-493.]
- [9] 尚文亮, 徐少华, 李小刚, 等. 浅述深水水道的形态学特征 [J]. *地质找矿论丛*, 2020, 35(2): 204-209. [SHANG Wenliang, XU Shaohua, LI Xiaogang, et al. Brief introduction to morphological characteristics of deep-water channels [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2020, 35(2): 204-209.]
- [10] 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 等. 深水重力流水道-朵体体系形成演化及储层分布: 以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲露头为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 917-928. [LI Hua, HE Youbin, TAN Mengting, et al. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: a case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 917-928.]
- [11] 陈亮, 赵千慧, 王英民, 等. 深水水道沉积单元及演化分析 [J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(3): 12-19. [CHEN Liang, ZHAO Qianhui, WANG Yingmin, et al. Depositional elements of deepwater channels and their evolution [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(3): 12-

- 19.]
- [12] 王大伟, 曾凡长, 王微微, 等. 海底冲沟: 深水沉积输运系统的“毛细血管”[J]. 地球科学进展, 2022, 37(4): 331-343. [WANG Dawei, ZENG Fanchang, WANG Weiwei, et al. Submarine gullies: the capillary of deep-water sediment transport system [J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(4): 331-343.]
- [13] 杜文波, 聂鑫, 杨楚鹏, 等. 南海北部珠江口外峡谷体系沉积特征、演化及其控制因素[J]. 地球科学, 2022, doi:10.3799/dqkx.2022.166. [DU Wenbo, NIE Xin, YANG Chupeng, et al. Sedimentary characteristics, evolution and controlling factors of the Pearl River canyon system in the northern South China Sea [J]. *Earth Science*, 2022, doi:10.3799/dqkx.2022.166.]
- [14] 杨志鹏, 李磊, 张威, 等. 海底麻坑表征及成因研究: 以尼日尔三角洲为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(6): 61-70. [YANG Zhipeng, LI Lei, ZHANG Wei, et al. Characteristics and genesis of submarine pockmarks: a case from the Niger Delta [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 61-70.]
- [15] 沈奥, 孙启良, 蔡砥柱, 等. 海底麻坑的特征、分类与成因机制[J/OL]. 地质科技通报, 2022: 1-14. [2022-10-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0144>. [SHEN Ao, SUN Qiliang, CAI Dizhu, et al. Characteristics, classification and genetic mechanism of pockmarks[J/OL]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022: 1-14. [2022-10-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0144>.]
- [16] 李磊, 裴都, 都鹏燕, 等. 海底麻坑的构型、特征、演化及成因: 以西非木尼河盆地陆坡为例[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 53-58. [LI Lei, PEI Du, DU Pengyan, et al. Architecture, character, evolution and genesis of seabed pockmarks: a case study to the continental slope in Rio Muni Basin, West Africa [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 53-58.]
- [17] 程琳燕, 李磊, 高毅凡, 等. 琼东南盆地陵水凹陷海底周期阶坎底形的特征及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 37-44. [CHENG Linyan, LI Lei, GAO Yifan, et al. The characteristics and genesis of bottom cyclic steps in the Lingshui Sag of Qiongdongnan Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 37-44.]
- [18] 赵蒙维. 琼东南盆地新生代古海洋环境演变[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2013. [ZHAO Mengwei. Evolution of paleoenvironment in Qiong-Dongnan Basin during Cenozoic[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2013.]
- [19] 康波. 琼东南盆地新生代沉降—热演化模拟[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2014. [KANG Bo. Cenozoic subsidence and thermal history modelling of Qiongdongnan Basin[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2014.]
- [20] 姚根顺, 袁圣强, 吴时国, 等. 琼东南盆地深水区双物源沉积模式及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 685-691. [YAO Genshun, YUAN Shengqiang, WU Shiguo, et al. Double provenance depositional model and exploration prospect in deepwater area of Qiongdongnan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(6): 685-691.]
- [21] 曾小明, 潘燕, 于佳, 等. 陵水凹陷北坡低密度浊流海底扇沉积特征[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(33): 48-53,78. [ZENG Xiaoming, PAN Yan, YU Jia, et al. Low-density turbidity submarine fan sedimentary characteristics in north slope of Lingshui Sag [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(33): 48-53,78.]
- [22] 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水油气成藏条件早期预测与评价[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 780-789. [HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, MA Wenhong, et al. Early forecast and evaluation on petroleum accumulation conditions in deep basin in northern continental margin of the South China Sea [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6): 780-789.]
- [23] 冯湘子, 朱友生. 南海北部陵水陆坡重力流沉积调查与分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(5): 25-35. [FENG Xiangzi, ZHU Yousheng. Investigation of gravity flow deposits on the Lingshui slope of the northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(5): 25-35.]
- [24] Mosher D, Bigg S, LaPierre A. 3D seismic versus multibeam sonar seafloor surface renderings for geohazard assessment: case examples from the central Scotian Slope [J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(12): 1484-1494.
- [25] Meng M M, Liang J Q, Kuang Z G, et al. Distribution characteristics of Quaternary channel systems and their controlling factors in the Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 902517.
- [26] 陈昱瑶, 周江羽, 钟佳, 等. 南海西北缘深水水道体系的地震响应及其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(2): 69-78. [CHEN Yuyao, ZHOU Jiangyu, ZHONG Jia, et al. Seismic characteristics of deepwater channel system in northwestern margin of South China Sea and its evolution [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(2): 69-78.]
- [27] 姚悦, 周江羽, 雷振宇, 等. 西沙海槽盆地强限制性中央峡谷水道地震相与内部结构的分段特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 787-795. [YAO Yue, ZHOU Jiangyu, LEI Zhenyu, et al. High restriction seismic facies and inner structural segmentation features of the central canyon channel systems in Xisha Trough Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4): 787-795.]
- [28] 李爽, 李伟, 詹文欢. 南海东北部陆缘浊流活动的地貌记录及其形成机制分析[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(1): 111-121. [LI Shuang, LI Wei, ZHAN Wenhuan. Geomorphological records of turbidity current activity in the northeastern margin of the South China Sea and analysis of triggering mechanism [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(1): 111-121.]
- [29] Symons W O, Sumner E J, Talling P J, et al. Large-scale sediment waves and scours on the modern seafloor and their implications for the prevalence of supercritical flows [J]. *Marine Geology*, 2016, 371: 130-148.
- [30] 李全, 林畅松, 盖海洋, 等. 西非科特迪瓦盆地深水底形样式及成因分析[J]. 沉积学报, 2022, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.045. [LI Quan, LIN Changsong, GAI Haiyang, et al. Deep-water bedform patterns and genesis in the Cote D' Ivoire Basin, west Africa [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.045.]
- [31] Masson D G, Huggett Q J, Brunsten D. The surface texture of the Saharan debris flow deposit and some speculations on submarine

- debris flow processes [J]. *Sedimentology*, 1993, 40 (3): 583-598.
- [32] Frey-Martinez J, Cartwright J, James D. Frontally confined versus frontally emergent submarine landslides: a 3D seismic characterisation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23 (5): 585-604.
- [33] 何云龙, 解习农, 李俊良, 等. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素[J]. 地质科技情报, 2010, 29 (2): 118-122. [HE Yunlong, XIE Xinong, LI Junliang, et al. Depositional characteristics and controlling factors of continental slope system in the Qiongdongnan Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29 (2): 118-122.]
- [34] 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.]
- [35] 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, 21 (5): 465-473. [HUANG Wei, WANG Pinxian. The statistics of sediment mass in the South China Sea: method and result [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21 (5): 465-473.]
- [36] 马畅, 葛家旺, 赵晓明, 等. 南海北部琼东南盆地第四系陆架边缘轨迹迁移及深水沉积模式[J]. 地学前缘, 2022, 29 (4): 55-72. [MA Chang, GE Jiawang, ZHAO Xiaoming, et al. Quaternary Qiongdongnan Basin in South China Sea: shelf-edge trajectory migration and deep-water depositional models [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29 (4): 55-72.]
- [37] 王菲, 吴艳梅, 丁巍伟. 南海西北与西南次海盆沉积通量及其控制因素[J]. 地球科学, 2021, 46 (3): 986-1007. [WANG Fei, WU Yanmei, DING Weiwei. Sedimentary budget and controlling factors of the northwest and southwest sub-basins, the South China Sea [J]. *Earth Science*, 2021, 46 (3): 986-1007.]
- [38] 邵磊, 李昂, 吴国璋, 等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报, 2010, 31 (4): 548-552. [SHAO Lei, LI Ang, WU Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31 (4): 548-552.]
- [39] Shi X B, Kohn B, Spencer S, et al. Cenozoic denudation history of southern Hainan Island, South China Sea: constraints from low temperature thermochronology [J]. *Tectonophysics*, 2011, 504 (1-4): 100-115.
- [40] Clift P D, Sun Z. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: implications for Tibetan uplift and monsoon intensification [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2006, 111 (B6): B06405.
- [41] 龚再升, 谢泰俊, 张启民, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析及油气聚集[R]. 保定: 中国海洋石油勘探开发研究中心, 2002. [GONG Zaisheng, XIE Taijun, ZHANG Qimin, et al. Analysis of continental-margin basins and hydrocarbon accumulation in the northern South China Sea [R]. Baoding: China Offshore Oil Exploration and Development Research Center, 2002.]
- [42] Smith D E, Harrison S, Jordan J T. Sea level rise and submarine mass failures on open continental margins [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 82: 93-103.
- [43] Tian J, Zhao Q H, Wang P X, et al. Astronomically modulated Neogene sediment records from the South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2008, 23 (3): PA3210.
- [44] 龚承林, 齐昆, 徐杰, 等. 深水源—汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制[J]. 沉积学报, 2021, 39 (1): 231-252. [GONG Chenglin, QI Kun, XU Jie, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39 (1): 231-252.]
- [45] Peltier W R. On eustatic sea level history: Last Glacial maximum to Holocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21 (1-3): 377-396.
- [46] 马云, 李三忠, 梁金强, 等. 南海北部琼东南盆地海底滑坡特征及其成因机制[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42 (S3): 196-205. [MA Yun, LI Sanzhong, LIANG Jinqiang, et al. Characteristics and mechanism of submarine landslides in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2012, 42 (S3): 196-205.]