

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 03. 003

三沙海底峡谷识别与地貌特征分析

李学杰¹, 王大伟², 吴时国², 王微微³, 刘刚⁴

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000;
3. 中国石油大学(华东), 青岛 266580; 4. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206)

摘要:三沙海底峡谷是连接西沙碳酸盐台地与南海西北次海盆的深水海底峡谷,起源于永兴岛和东岛之间的浅水区域,输送了大量碳酸盐碎屑到西北次海盆。三沙海底峡谷是迄今为止发现的南海最大碳酸盐型海底峡谷。海底峡谷的横断面呈现 V、U 字形,可以分为峡谷外侧、斜坡和谷底 3 个部分。峡谷外侧平缓、两侧斜坡陡峭、谷底平缓。沿着峡谷走向,可以分为上游、中游和下游 3 部分。上游部分坡度较陡、坡度变化较大,环礁周边的水道和海底滑坡体系是源区的碎屑物质搬运通道;中-下游部分坡度平缓、坡度变化小,主要以碎屑物质的搬运为主,汇入两侧斜坡上的侵蚀、坍塌形成的碎屑,在西北次海盆形成了喇叭状的入海盆口。通过三沙海底峡谷的研究,有助于揭示岛礁与海盆之间的沉积物输送、海底不稳定性等基础科学问题,为碳酸盐岩油气储层预测、岛礁生态旅游开发提供理论基础。

关键词:海底峡谷;重力流;西沙碳酸盐台地;西北次海盆

中图分类号:P737.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)03-0028-09

深水重力流沉积体系是国际海洋地质研究的前沿课题,是大陆架-深海平原的深水沉积扩散系统中重要的一个环节^[1-3],在联合国教科文组织每两年举行一届的国际学术研讨会 ISSMMTC (International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences) 中占有重要研究地位。在过去的十几年中,海洋国家纷纷对这一重要过程提出自己的研究计划。例如,美国发起的 MARGINS 计划中的 S2S(source to sink),加拿大开展的 COSTA (Continental Slope Stability) 计划综合研究海底滑坡运动^[4], IODP Japan Trench Fast Earthquake Drilling Project 研究海底滑坡与 3.11 东日本大地震的关系^[5]等等,不胜枚举。随着深水调查的逐步深入,在南海北部陆续发现了珠江口盆地白云深水扇与白云海底滑坡、琼东南盆地红河深水扇、中央峡谷水道、珠江峡谷水道、台湾浅滩南海海底峡谷、南海东北部海底沉积物波、华光大型块体搬运沉积体系、琼东南深水重力流沉积旋回等深水沉积体^[6-14]。南海深水区域重力流储层具有良好的勘探前景,例如,

南海西北部的 LS17-2-1 井测试获得 $160 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产油气流^[15]。因此,海底峡谷作为深水重力流的运输通道,是深水沉积体系研究的前沿课题。

三沙海底峡谷作为一条发育在西沙海域的深水海底峡谷,起源于永兴岛和东岛之间的浅水区域,将碎屑物质搬运到南海西北次海盆。由于该峡谷的源头临近永兴岛,因此,它的发育与演化与永兴岛岛礁的稳定性息息相关(图 1),是值得探索和研究的深水峡谷。通过三沙海底峡谷的研究有助于揭示岛礁区与深海盆地之间的沉积物输送、海底不稳定性等基础科学问题,为碳酸盐岩储层的深水油气勘探与开发、岛礁区的生态旅游开发提供理论研究基础。本文利用多波束资料,对三沙海底峡谷进行了平面识别及地貌特征分析,圈定海底峡谷的分布。

1 区域地质背景

西沙群岛位于 $15^{\circ}43' \sim 17^{\circ}07' \text{ N}$ 、 $111^{\circ}11' \sim 112^{\circ}54' \text{ E}$,陆地总面积大于 8 km^2 。古近纪末期,西沙地块由华南大陆裂离到现今位置^[16]。在随后热沉降过程中,早期高地成为发育碳酸盐台地的水下隆起。1973 年以来,先后钻探西永 1 井、西石 1 井、西永 2 井、西琛 1 井等多口科学探井,力图揭示西沙隆起区碳酸盐台地发育、演化规律。最新的分析资料显示中晚中新世和第四系为主要成礁期^[17]。因此,从古近纪末期开始,西沙群岛一直是碳酸盐台地发育的

基金项目:国家自然科学基金项目(41576049, 41666002);中国科学院前沿科学重点计划项目(QYZDB-SSW-SYS025)

作者简介:李学杰(1964—),男,教授级高工,主要从事海洋地质与第四纪地质研究,E-mail:xuejieli@yeah.net

通讯作者:王大伟(1976—),男,副研究员,主要从事地震沉积学、深水油气和海洋地质灾害研究,E-mail:wangdawei@idsse.ac.cn

收稿日期:2016-10-28; **改回日期:**2017-01-07. 蔡秋蓉编辑

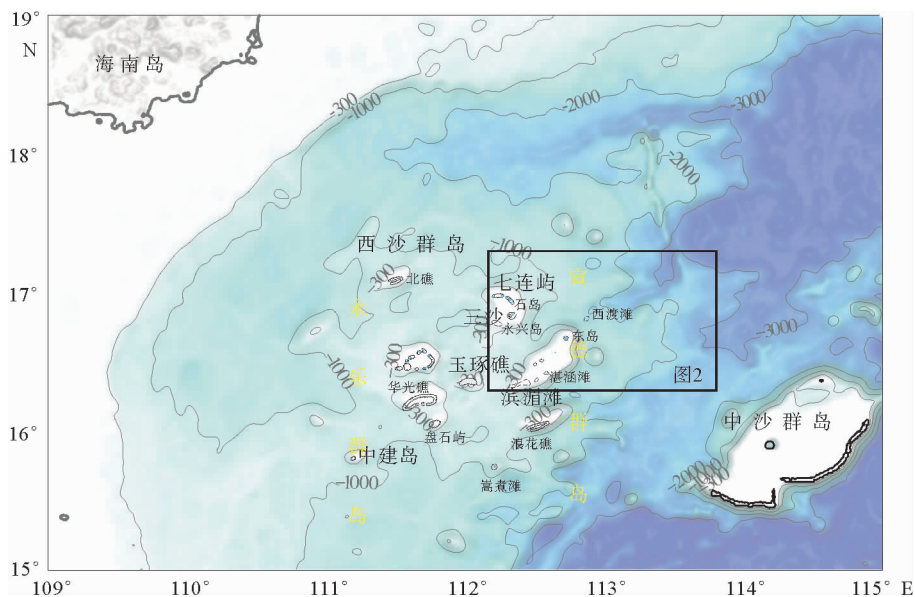


图 1 三沙海底峡谷位置

Fig. 1 Location of study area

地区,直至今日,仍发育大量的碳酸盐岛礁。

研究区范围位于 16°18′~17°18′N、112°08′~113°52′E,包括了宣德群岛的东部和西北次海盆的西南部区域,水深变化范围是 0~3 500 m。宣德群岛主要由永兴岛、七连屿、石岛、东岛等组成,其中,永兴岛位于宣德环礁上,是西沙群岛的主岛(图 1)。永兴岛外形呈椭圆形,面积 2.6 km²,平均海拔 5 m,是西沙、南沙、中沙 3 个群岛的军事、政治、文化中心,是三沙市人民政府和众多中央、省直属派出机构、市级单位以及永兴工委管委驻地。东岛环礁为一长形弧状巨大礁盘,向东北突出。东岛位于东岛环礁的西北部,呈长条状,面积约 1.7 km²,平均海拔 4~5 m。东岛环礁的西南部,未出露的珊瑚礁形成了暗礁滩,如堪涵滩、滨涓滩等。西北次海盆位于研究区西北侧,海底自 SW 向 NE 缓倾,平均坡度为 $(0.3\sim 0.4)\times 10^{-3}$,水深 3 000~3 800 m,沉积层厚 1~2 km^[18]。

2 数据和方法

本文的基础数据是多波束海底测深数据(图 2),该数据覆盖了从宣德群岛到西北次海盆范围内水深 700~3 500 m 区域,由广州海洋地质调查局与德国基尔大学合作的“太阳号”SO-177 航次于 2004 年采集,数据处理使用 NEPTUNE、MB-System、Petrel 和 GMT 等软件完成。水深小于 700 m 的岛礁数据采用 NOAA(美国国家海洋和大气管理

局)的数据进行补充(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)。本研究通过 Surfer 软件计算了坡度及坡度变化率,利用 Global Mapper 成像,分析三沙海底峡谷的地貌特征。

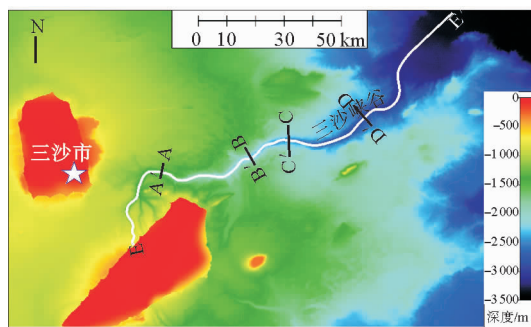


图 2 三沙海底峡谷多波束水深图

Fig. 2 Bathymetric map of multi-beam survey

本文采用的研究方法及流程如下:根据多波束测深数据,(1)提取峡谷长度、宽度、坡度和坡度变化率等地貌参数;(2)确定三沙海底峡谷的平面展布;(3)识别横断面上的峡谷的边界、斜坡和谷底等部分;(4)根据海底地貌特征,对海底峡谷的源区、搬运通道等进行分析。海底峡谷的横断面呈现 V 或 U 字形,可以分为峡谷外侧、斜坡和谷底 3 个部分,峡谷外侧平缓、两侧斜坡陡峭、谷底平缓。在地貌特征分析中,引入了坡度变化率,也就是地形坡度的一阶导数,表征地形坡度的变化速率。通过坡度变化率更容易定量识别峡谷外侧、斜坡和谷底之间的分界

线,避免了根据海底地形坡度进行识别产生的误差。

3 海底峡谷搬运沉积体系

3.1 构成元素与识别标志

3.1.1 边界

峡谷边界是峡谷与峡谷外侧地形之间的天然分界线。在横截面上,峡谷边界呈现为海底地形由平坦地形转变为陡峭地形,V或U形的起始点。坡度图上这种变化尤为清晰,可以分为两种类型:(1)突变型,在很短的距离内,海底坡度由 $0\sim 3^\circ$ 突然变为 $8^\circ\sim 20^\circ$,平均坡度变化率大于 $3^\circ/\text{m}$ (图3a,3b);(2)渐变型,在较长的距离内,海底坡度由 $0\sim 3^\circ$ 逐渐变为 $5^\circ\sim 15^\circ$,平均坡度变化率小于或等于 $3^\circ/\text{m}$ (图3c,3d)。

海底峡谷的边界容易受到峡谷外侧或内侧地层

的失稳作用改造。早期边界逐渐向两侧拓宽,形成了现今的边界。沿海底峡谷的走向,由上游到下游,峡谷边界受到包括海底地形、抗剪切能力、碎屑注入等多种因素影响,边界的坡度变化率没有规律可循。

3.1.2 斜坡

斜坡是介于海底峡谷边界与谷底之间的、坡度较陡的区域,呈现V或U型两翼的斜坡形态,平均坡度大于 5° (图3),局部最大坡度可以达到 27° (图3b),是曾经的海底峡谷侧壁经过后续的、沿斜坡向下的、重力流的削截/侵蚀作用形成。

斜坡的坡度不是一成不变的,经过多期的、沿斜坡向下的重力流改造之后,斜坡表面形成了整体平滑、局部凸凹不平的特点,绝大部分地形的坡度变化率小于、等于 $0.5^\circ/\text{m}$,少数的、局部区域的坡度变化率大于 $5^\circ/\text{m}$,极少数区域呈现台阶式斜坡(图3c),坡度的变化率可以大于 $10^\circ/\text{m}$ 。

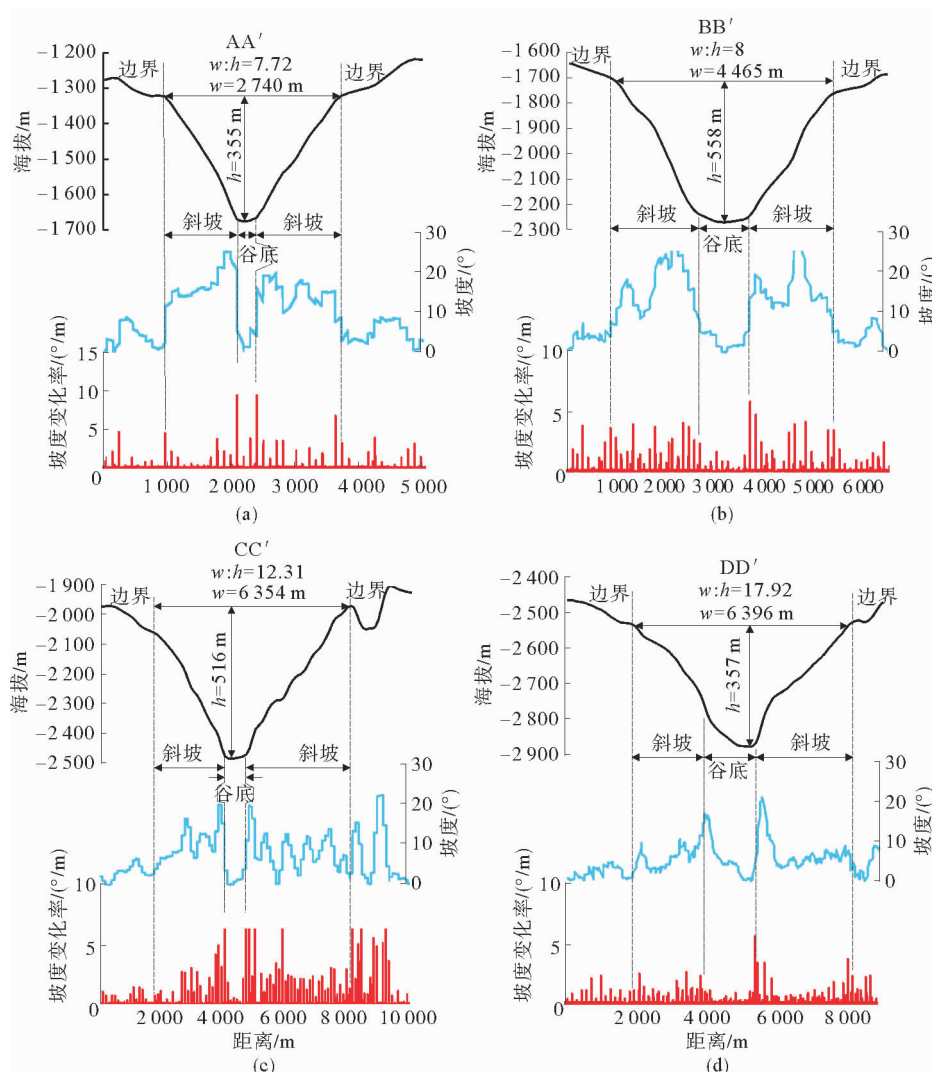


图3 三沙海底峡谷识别特征(位置见图2中的AA', BB', CC', DD')

Fig. 3 Identifying characteristics of Sansha canyon (location of lines AA', BB', CC', DD' are shown in the Fig.2)

3.1.3 谷底

谷底是现今重力流流动的通道,谷底与峡谷斜坡之间的分界极易识别(图 3)。斜坡的坡度远大于谷底,利用这点在海底高程、海底坡度和坡度变化率曲线中,可以清晰的识别出二者之间的界限。

谷底地形平坦,坡度变化小。中泓线的坡度最小值为 0° 、最大值为 14.4° 、平均坡度 0.93° ,峡谷(中泓线)总长度 150 km,高程差 2 440 m(图 4)。其中,98.53% 区域的坡度小于 5° ,92.17% 区域的坡度小于 3° ,55.59% 区域的坡度小于 1° ,坡度变化率的最小值为 $0^\circ/\text{m}$ 、最大值为 $0.39^\circ/\text{m}$ 、平均值为 $0.013^\circ/\text{m}$ 。

3.2 平面展布与划分依据

通过海底地形坡度和剖面的共同约束,在平面上识别了海底峡谷的边界,圈定了海底峡谷的展布(图 5),定量计算了平均坡度、坡度、坡度变化率、宽深比等参数,将峡谷分为上游、中游和下游(图 4、表 1)。

表 1 三沙峡谷特征参数表

Table 1 Characters of Sansha canyon

	平均坡度/ $(^\circ)$	坡度/ $(^\circ)$	坡度变化率/ $(^\circ/\text{m})$	宽深比	剖面
上游	1.33	0.0~14.4	0.0~0.39	<8	AA'、EE'
中游	0.7	0.0~4.73	0.0~0.39	8~13	BB'、CC'、EE'
下游	0.49	0.0~5.8	0.0~0.22	>13	DD'、EE'

3.2.1 上游

海底峡谷上游(0~65 km)是峡谷主体逐渐加宽、加深的起始阶段,横截面的宽度显示由源头的几百米宽的水道,到峡谷主体宽度 2 740 m(图 2、3a),峡谷主体的深度由 710 m 逐渐加深到 2 220 m,中泓线高程差 1 510 m(图 4),坡度较陡、坡度变化较大(表 1)。

上游区域主要集中在物源的供给区域,源区包含了两个区域(图 5),东岛台地和永兴岛台地,其中主要沉积物来自东岛台地。来自源区的沉积物以滑动、滑塌、碎屑流、浊流等多种重力流形式搬运到峡谷中,形成了连续的下凹地形。

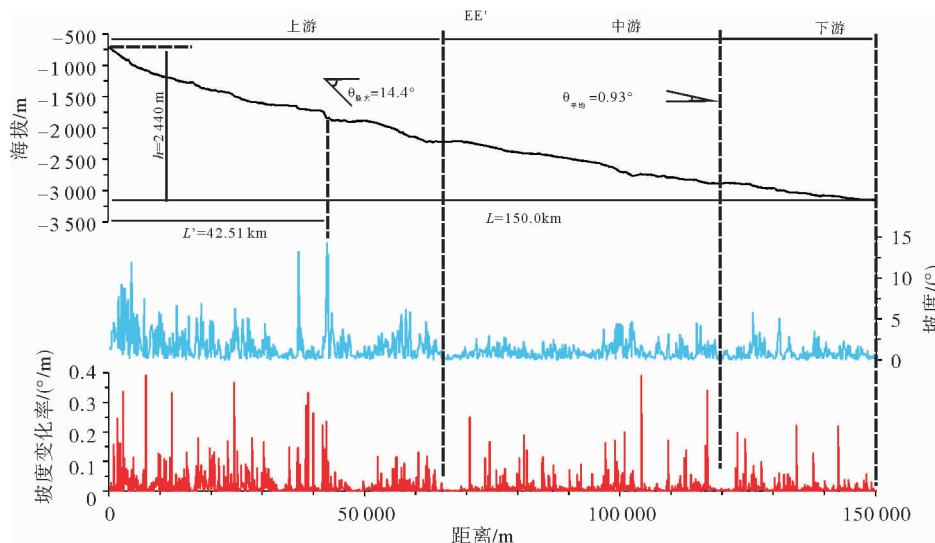


图 4 三沙海底峡谷中泓线特征(位置见图 2 中的 EE')

Fig. 4 Tomographic characteristics of thalweg of Sansha canyon(location of the line EE' is shown in Fig. 2)

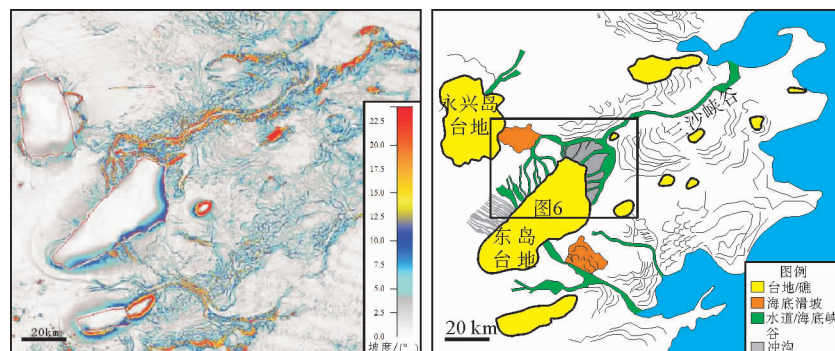


图 5 三沙海底峡谷分布

Fig. 5 Distribution of Sansha canyon

3.2.2 中游

海底峡谷中游(65~120 km)是主要的峡谷区,峡谷主体的深度由 2 220 m 逐渐加深到 2 892 m,中泓线高程差 672 m(图 4),坡度较平缓、坡度变化较小(表 1)。

中游区域主要以碎屑物质的搬运为主,除此之外,来自两侧斜坡上的侵蚀、坍塌形成的碎屑,形成了源区之外的主要物源供给。

3.2.3 下游

海底峡谷的下游(120~150 km)是主要的沉积区域,峡谷主体的深度由 2 892 m 逐渐加深到 3 150 m,中泓线高程差 258 m(图 4),坡度最为平缓,坡度变化最小(表 1)。

三沙峡谷将源区及两侧斜坡上的碎屑搬运至此,逐渐失去动能,在西北次海盆中形成了透镜状的扇体沉积(据中国石油天然气集团公司勘探开发研究院内部资料,2013),呈现喇叭状的人海盆口(图 5)。

3.3 供给通道与地貌特征

从地貌特征上可以识别出连接源区和三沙海底峡谷的重力流通道有两种形式^[19], (1)环礁周围的水道; (2)海底滑坡。重力流类型包括滑动、滑塌、碎屑流和浊流等,并进一步将滑动、滑塌和碎屑流统一称为 MTDs(Mass transport depositions, 中文概念是块体搬运沉积体系或块体流)^[8, 19]。西沙碳酸岩台地的碳酸盐碎屑物质以多种重力流类型输入到峡谷中,最终沉积到西北次海盆中。

3.3.1 水道

水道作为连接岛礁与海底峡谷之间的重力流

道,其输送通道形成了两种方式,第一种是多条水道汇聚于一点之后注入峡谷,第二种是单独一条水道直接汇入水道(图 6)。A 区呈现第一种方式,A 区 8 条发源于东岛台地西北侧边缘的水道(1~8)沿台地周缘的斜坡向下汇聚于一点注入三沙峡谷;B 区呈现第二种方式,B 区 8 条发源于东岛台地东侧边缘的水道(9~16)沿台地周缘的斜坡向下直接注入三沙峡谷。

3.3.2 海底滑坡

海底滑坡是另外一种主要的连接岛礁与海底峡谷之间的重力流通道,其中形成的 MTDs——作为台地周边不稳定沉积物失稳之后的重力流搬运形式,具有平面分布面积大、陡峭侧壁和后壁等特点(图 6 中 C 区)。永兴岛台地与三沙峡谷之间的海底滑坡特征明显,垂流方向的宽度为 8.74 km,侧壁形成的陡崖高度分别为 76、91 m。沿着流动方向的海底最大坡度可以达到 26°。后壁到海底峡谷中心的距离 17.23 km(图 7),高程差可以达到 1.18 km,形成了楼梯状,两头陡、中间缓的特征。

4 讨论

4.1 海底峡谷输送模式

在碳酸盐台地的斜坡外,碳酸盐裙以线状物源供给方式向斜坡输送物质,形成围绕台地的裙体沉积;碳酸盐海底扇以点源特征为主,通过一个主要的海底峡谷或下切水道向下斜坡输送物质,形成扇体沉积^[20]。三沙海底峡谷属于一个点源型峡谷,峡谷

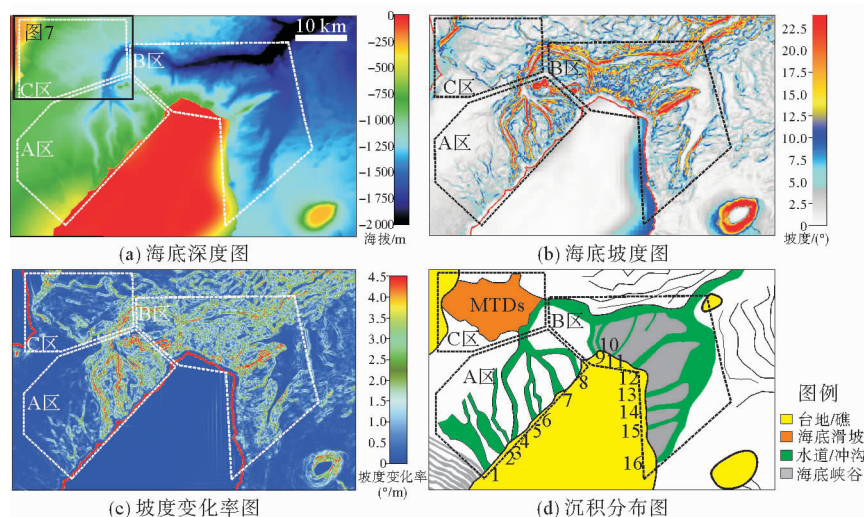


图 6 源区沉积物供给通道

Fig. 6 Transport pathway of sediments within source area

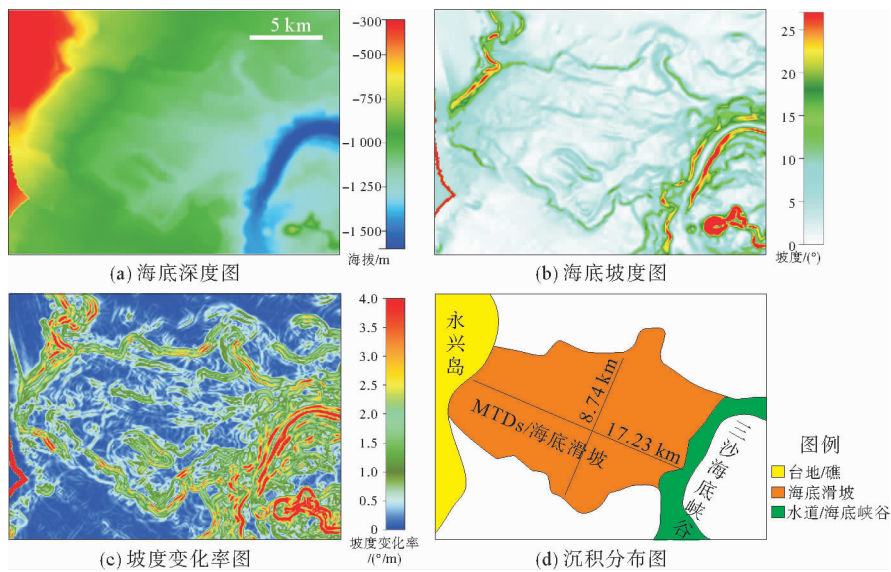


图 7 永兴岛海底滑坡(位置见图 6)

Fig. 7 Yongxingdao MTDs or submarine slides(location is shown in Fig. 6)

上游表现为一个树枝状分支谷网络。三沙海底峡谷上游的重力流通道类型包含了水道和海底滑坡。东岛台地周围的水道是点源输送体系,可以分为 A 区和 B 区,其中 B 区是线源的侵蚀沟将碳酸盐物质搬运到点源的水道中,最后将东岛台地的碳酸盐物质输送到三沙峡谷中(图 6)。永兴岛台地外缘的海底滑坡可以认为是点源输送体系(图 7)。中游区域来自两侧斜坡上的侵蚀沟或坍塌将斜坡上的碳酸盐沉积物以线源的形成汇入峡谷底部的输送体系中,推测这部分物质供应量仅仅是一个补充作用,无法与上游的物源供给相比拟。在下游区域,三沙峡谷将源区及两侧斜坡上的碎屑搬运至此,逐渐失去动能,在南海西北次海盆中形成了透镜状的扇体沉积。因此,三沙海底峡谷是点源型碳酸盐输送通道(图 8)。

碳酸盐型海底峡谷中物质输送方式一般与陆源碎屑型海底峡谷一样,以重力流为主。陆架边缘沉积物的特点是沉积速率快、结构疏松、压实与固结程度低、发育超压,在重力作用、地震或断裂活动、风暴潮、水合物分解等因素的诱发下,容易沿层理面发生蠕动或解离,这是陆架边缘不稳定性的地质结构因素^[5, 8, 14, 21-22]。尽管碳酸盐台地周边重力流的研究是刚刚开始的前言科学问题,但是,随着岛礁生态旅游、岛礁吹填等工程项目的开展,碳酸盐台地边坡稳定性的研究已经得到了重视,相信随着深入细致的地质调查和研究,该项科学问题能够得到解决。

4.2 海底峡谷类型及对比

按照海底峡谷的水深分布范围、发育区域和是

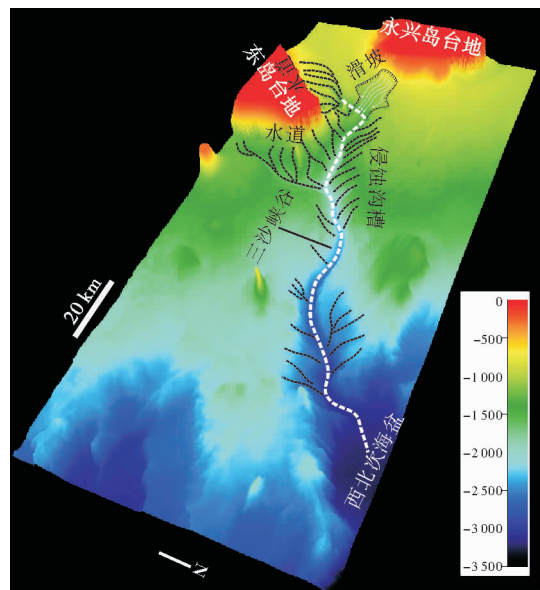


图 8 三沙海底峡谷立体图

Fig. 8 3D map of Sansha canyon

否与河流相连,海底峡谷可以分为 3 种类型^[23]。第一种,开始发育于大陆架,并与河流相连,侵蚀大陆架和大陆坡,碎屑物质往往在海底峡谷的谷口向深海平原的转换区域或深海平原上沉积,从而形成从陆到海的、完整的源-汇系统;第二种,开始发育于大陆架,但不与河流相连;第三种,发育在陡峭的大陆坡上,这类海底峡谷的源头没有侵蚀到大陆架,通常侧壁高度小,并且顺直。东南亚地区和岛礁周围的海底峡谷多数以第三种类型为主,根据最新的统计数据,该类海底峡谷在东南亚地区海底峡谷总数中的占比是 59.8%,在岛礁周围海底峡谷总数中的占

比是76.64%^[23]。三沙海底峡谷也属于第三种类型,源头开始于东岛和永兴岛周缘400~1450 m水深的区域,峡谷主体比较顺直(图8、表2)。

近年来,通过高精度海底多波束、2D/3D地震等数据,在巴哈马滩、大堡礁、马尔代夫台地和西沙碳酸盐台地等区域,识别了碳酸盐台地周缘发育大量的、不同规模的海底峡谷^[24-27]。碳酸盐台地周缘海底峡谷的形成原因分析也是碳酸盐岩台地演化的重点内容之一,涉及到碳酸盐台地边缘稳定性,与陆架边缘失稳一样,影响碳酸盐台地斜坡失稳的因素按照周期可以分为长期因素和短期因素。长期因素包括陆坡坡度、海平面变化、沉积速率、沉积物内聚力或基质(岩石)强度等,短期因素由一些触发机制构成,包括地震、海啸、底水循环方式和人为因素等,这些都是开展碳酸盐台地周缘海底峡谷研究的内容,这些都需要多学科合作研究才能够得到解决。

4.3 碳酸盐型峡谷成因分析

三沙海底峡谷属于没有侵蚀到大陆架、顺直的第三种类型海底峡谷——斜坡限制型海底峡谷^[23]。综合分析认为,三沙海底峡谷的起源与台地斜坡上的碳酸盐岩碎屑沉积物重力流相关,其主要证据如下:(1)从沉积背景上看,三沙海底峡谷位于西沙碳酸盐台地东部,与南海西北次海盆连接,从古近纪末期开始,西沙群岛一直是碳酸盐台地发育的地区^[17],该海底峡谷应该以碳酸盐岩碎屑为主;(2)多波束数据显示,三沙海底峡谷垂直区域等深线延伸,轴向切口的形成机制是沿斜坡向下的重力流作用^[28],表明重力作用下的轴向切口是一个重要的因素,控制峡谷形态和进化;(3)三沙海底峡谷是点源型输送通道,其上游的重力流通道类型包含了水道和海底滑坡(图8),物源区包含了东岛台地和永兴

岛台地,为三沙海底峡谷中的重力流活动提供了重要证据;(4)根据现代层序地层学理论^[29]分析认为,低水位期,碳酸盐台地大片出露,陡峭的碳酸盐台地斜坡非常容易失稳,峡谷逐渐深化导致复发性轴向切口的形成;高水位期,碳酸盐台地斜坡被淹没,台地周缘相对稳定,重力流不发育,具有类似特性的陆坡限制型峡谷在其他大陆边缘、碳酸盐台地斜坡上均有发育^[23]。

碳酸盐型海底峡谷的成因是一个复杂的问题,往往与台地边缘稳定性相关。目前,海底稳定性的主要研究对象是陆架边缘。陆架边缘沉积物的特点是沉积速率快、结构疏松、压实与固结程度低、发育超压,在重力作用、地震或断裂活动、风暴潮、水合物分解等因素的诱发下,容易沿层理面发生蠕动或解离,这是陆架边缘不稳定性的地质结构因素。与陆架边缘失稳不一样,影响碳酸盐台地斜坡失稳的短期因素应主要包括重力作用、地震或断裂活动、风暴潮等。二者的长期因素应该一致,包括坡度、海平面变化、沉积速率、沉积物内聚力或基质(岩石)强度等。基于目前的资料,还无法就碳酸盐型海底峡谷的成因进行深入讨论。只有通过多学科的综合考察,才能够揭示碳酸盐型海底峡谷的成因机制。

5 结论

三沙海底峡谷起源于永兴岛和东岛之间的浅水区域,直接连通西沙碳酸盐台地与南海西北次海盆,具有典型的海底峡谷特征(图8)。通过上述分析,得出以下认识:

(1)三沙峡谷总长150 km,上游(0~65 km)区域主要集中在物源的供给区域,中-下游(65~150 km)是主要的峡谷区;

表2 三沙海底峡谷与世界海底峡谷参数对比

Table 2 Characters comparing Sansha canyon to the others in the world

类别	长度/km		坡度/(°)		深度范围/m		弯曲度
	最小	最大	最小	最大	最小	最大	
全部	1.5	411.6	0.4	42.3	158	6 542	3.088
东南亚	2.9	274.9	0.9	27.9	319	4 447	3.088
岛礁周缘	1.5	165.2	1.1	42.3	217	4 438	2.006
第三种类型	1.5	284.1	0.4	42.3	158	5 559	1.817
三沙海底峡谷	150		0.93		400	3 150	1.329

注:除三沙海底峡谷之外的参数引自参考文献^[23]

(2) 三沙海底峡谷是西沙岛礁与西北次海盆之间的碎屑物质搬运通道,碎屑搬运通道以水道和海底滑坡为主;

(3) 岛礁周缘的海底峡谷是需要加强考虑的不稳定因素,其形成机制及后续稳定性研究,有助于评价岛礁稳定性、提供岛礁合理开发建议。

参考文献(References)

- [1] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings[M]. Tulsa: AAPG, 2007.
- [2] Tripsanas E K, Piper D J W, Jenner K A, et al. Submarine mass-transport facies: new perspectives on flow processes from cores on the eastern North American margin[J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 97-136.
- [3] 汪品先. 深海沉积与地球系统[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 1-11. [WANG Pinxian. Deep sea sediments and earth system[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(4): 1-11.]
- [4] Mienert J. COSTA—continental slope stability: major aims and topics[J]. Marine Geology, 2004, 213(1-4): 1-7.
- [5] Chester F M, Mori J J, Toczko S, et al. The expedition 343/343T scientists (2012) Japan trench fast drilling project (JFAST)[R]. Integrated Ocean Drilling Program Preliminary Report, 2012: 343/343T.
- [6] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水油气成藏与勘探[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1833-1841. [ZHU Weilin, ZHONG Kai, LI Youchuan, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deepwater basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 3121-3129.]
- [7] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇[J]. 科学通报, 2011, 56(10): 781-787. [WANG Yingmin, XU Qiang, LI Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(14): 1488-1494, doi: 10.1007/s11434-011-4441-z.]
- [8] 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等. 南海西北陆缘深水沉积体系内部构成特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2012, 37(4): 627-634. [XIE Xinong, CHEN Zhihong, SUN Zhipeng, et al. Depositional architecture characteristics of deepwater depositional systems on the continental margins of northwestern South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(4): 627-634.]
- [9] 丁巍伟, 李家彪, 韩喜球, 等. 南海东北部海底沉积物波的形态、粒度特征及物源、成因分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 96-105. [DING Weiwei, LI Jiabiao, HAN Xiqiu, et al. Geomorphology, grain-size characteristics, matter source and forming mechanism of sediment waves on the ocean bottom of the northeast South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(2): 96-105.]
- [10] 钟广法, 李前裕, 郝沪军, 等. 深水沉积物波及其在南海研究之现状[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 907-913. [ZHONG Guangfa, LI Qianyu, HAO Hujun, et al. Current status of deep-water sediment wave studies and the South China Sea perspectives[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 907-913.]
- [11] Wang D W, Wu S G, Lü F L, et al. Seismic Characteristics and Distribution of Large Scale Mass Transport Deposits in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[M]//Krstel S, Behrmann J H, Völker D, et al. Submarine Mass Movements and Their Consequences: 6th International Symposium. Switzerland: Springer, 2014: 413-422.
- [12] Wang D W, Wu S G, Yao G S, et al. Architecture and evolution of deep-water cyclic deposits in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: relationship with the Pleistocene climate events[J]. Marine Geology, 2015, 370: 43-54.
- [13] Wang L, Wu S G, Li Q P, et al. Architecture and development of a multi-stage Baiyun submarine slide complex in the Pearl River Canyon, northern South China Sea[J]. Geo-Marine Letters, 2014, 34(4): 327-343.
- [14] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3184-3195. [WU Shiguo, QIN Zhiliang, WANG Dawei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the northern continental slope of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3184-3195.]
- [15] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 1-8. [XIE Yuhong. A major breakthrough in deepwater natural gas exploration in a self-run oil/gas field in the northern South China Sea and its enlightenment[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 1-8.]
- [16] Taylor B, Hayes D E. Origin and History of the South China Sea Basin[M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands; Part 2. Washington D C: American Geophysical Union, 1983: 89-104.
- [17] 朱伟林, 王振峰, 米立军, 等. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2015, 40(4): 677-687. [ZHU Weilin, WANG Zhenfeng, MI Lijun, et al. Sequence Stratigraphic framework and reef growth unit of well Xike-1 from Xisha Islands, South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 677-687.]
- [18] 丁巍伟, 黎明碧, 赵俐红, 等. 南海西北次海盆新生代构造-沉积特征及伸展模式探讨[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 147-156. [DING Weiwei, LI Mingbi, ZHAO Lihong, et al. Cenozoic tectono-sedimentary characteristics and extension model of the Northwest Sub-basin, South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 147-156.]
- [19] 吴时国, 秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 922-930. [WU Shiguo, QIN Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009,

- 27(5): 922-930.]
- [20] 牛新生, 王成善. 异地碳酸盐岩块体与碳酸盐岩重力流沉积研究及展望[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 17-30. [NIU Xinsheng, WANG Chengshan. Problems and prospect in studies of allochthonous carbonate blocks and carbonate gravity flow deposits[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(1): 17-30.]
- [21] 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 65-72. [WANG Dawei, WU Shiguo, QIN Zhiliang, et al. Architecture and identification of large quaternary mass transport depositions in the slope of South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 65-72.]
- [22] 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. [ZHANG Guangxue, ZHU Youhai, LIANG Jinqiang, et al. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their characteristics[J]. *Geoscience*, 2006, 20(4): 605-612.]
- [23] Harris P T, Whiteway T. Global distribution of large submarine canyons: geomorphic differences between active and passive continental margins[J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1-4): 69-86.
- [24] Principaud M, Mulder T, Gillet H, et al. Large-scale carbonate submarine mass-wasting along the northwestern slope of the Great Bahama Bank (Bahamas): morphology, architecture, and mechanisms[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 317: 27-42.
- [25] Tournadour E, Mulder T, Borgomano J, et al. Origin and architecture of a Mass Transport Complex on the northwest slope of Little Bahama Bank (Bahamas): relations between off-bank transport, bottom current sedimentation and submarine landslides[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 317: 9-26.
- [26] Mulder T, Ducassou E, Gillet H, et al. First discovery of channel - levee complexes in a modern deep-water carbonate slope environment [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(11): 1139-1146.
- [27] Wu S G, Yang Z, Wang D W, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 350: 71-83.
- [28] Parsons J D, Friedrichs C T, Traykovski P A, et al. The Mechanics of Marine Sediment Gravity Flows[M]//Nitttrouer C A, Austin J A, Austin M E, et al. Continental Margin Sedimentation: From Sediment Transport to Sequence Stratigraphy. Oxford, UK: Blackwell, 2007: 275-333.
- [29] Posamentier H W. Application of 3D Seismic Visualization Techniques for Seismic Stratigraphy, Seismic Geomorphology and Depositional Systems Analysis: Examples from Fluvial to Deep-Marine Depositional Environments[M]//Doré A G, Vining B A. Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives-Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference. London: Geological Society, 2005: 1565-1576.

GEOMORPHOLOGY OF SANSHA CANYON: IDENTIFICATION AND IMPLICATION

LI Xuejie¹, WANG Dawei², WU Shiguo², WANG Weiwei³, LIU Gang⁴

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760;

2. Institute of Deep Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000;

3. China University of Petroleum, Qingdao 266580;

4. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206)

Abstract: The Sansha Canyon, as a path for sediment transportation, starts from the shallow waters platform between the Yongxing island and the East island. It brings a large amount of carbonate clastics down to the northwest sub-basin of the South China Sea. It is the largest carbonate type canyon found so far in the South China Sea in typical V and U shape. In the cross section, the canyon can be divided into three parts, outer side, slope and valley. Both the outer sides and valley bottom are rather gentle, while the slopes are quite steep. The canyon can also be divided into three parts along the pathway, i. e. the upstream, midstream and downstream. The upstream part is steep with high varying slope, while the downstream is opposite. A large amount of mass deposits coming from submarine slides around the atolls are the source area of clastic sediments. On other hand, the midstream and downstream are characterized by gentle bottoms and the deposition of clastics coming from both source area and canyon slopes and finally settle down in a trumpet shape in the northwest sub-basin. The study of Sansha Canyon is helpful to the understanding of sediment delivery mechanism and the formation of deep water carbonate reservoirs between the coral reef platform and a deep sea basin.

Key words: Xisha carbonate platform; north-western sub-basin; canyon; gravity flow