

伊善堂,胡小三,罗宗杰,等.南海北部陆坡一统峡谷群地貌特征及控制因素分析[J].海洋地质前沿,2020,36(4):18-26.

南海北部陆坡一统峡谷群地貌特征及控制因素分析

伊善堂^{1,2},胡小三^{1,2},罗宗杰³,罗伟东^{1,2}

(1 中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 510075;2 自然资源部海底矿产资源重点实验室,广州 510075;
3 浙江华东建设工程有限公司,杭州 310014)

摘要:基于最新的高分辨率多波束全覆盖测深数据、单道地震和多道地震剖面数据,对南海北部陆坡一统峡谷群 9 条峡谷的地形地貌及沉积特征进行了分析:峡谷群自陆坡向深海盆方向呈聚敛型,横断面主要呈“V”型,谷壁对称发育,坡度较陡;研究区海底地层受多条断裂控制,呈典型阶梯状发育,海底断陷、重力滑塌面和小型滑坡体等海底不稳定地质灾害高度发育,说明峡谷群海底环境处于极不稳定状态。在研究区海底峡谷群地貌演化过程中,西沙海槽区域沉降等新生代构造运动控制着峡谷群地貌格局的形成;来自北部陆架的充足沉积碎屑物质的输入往往伴随着高密度浊流、海底滑坡、坍塌等海底灾害的发生,控制着峡谷群的进一步发育;相对海平面变化直接改变了研究区的沉积环境,为陆源碎屑物质的搬运提供了更加直接的通道,这也是诱发陆坡海底失稳、塑造峡谷群地貌特征的重要因素之一。

关键词:南海北部陆坡;峡谷群;地貌特征;控制因素

中图分类号:P736 **文献标识码:**A **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2019.185

0 引言

海底峡谷又被称作“水下峡谷”,是发育于大陆坡之上,连接陆架与深海盆的深切型谷地,也是陆源物质向深海沉积搬运的重要通道。海底峡谷通常呈长条“V”型(剥蚀状态)或长条“U”型(堆积状态),谷壁两侧陡峭,自浅海区以“阶梯状”或“平滑状”过渡到深海区,偶尔可见峡谷分支。由于海底峡谷特殊的沉积搬运模式,往往在峡谷底部形成富含砂、浅水生物碎屑的峡谷扇,这些峡谷扇是良好的海洋石油、海底天然气水合物富集场所^[1-2]。因此,通过识别并探讨海底峡谷的地貌特

征、形成发育机制和控制因素,对于深入了解和开发海底峡谷的价值意义重大。

海底峡谷最初于 19 世纪末由 Spencer^[3]发现和提出,近一百多年来,国内外众多学者借助新型海洋探测技术对海底峡谷进行深入探究并取得了一系列丰硕成果。Taylor 和 Smoot^[4]通过对波林前弧海底峡谷的地貌形态进行研究总结,将海底峡谷划分为直线型、蛇曲型和树枝型 3 种类型;Lastras 等^[5]通过对葡萄牙中央峡谷的地貌及下蚀特征研究发现,峡谷的形态差异主要是由沉积运输驱动机制控制,一般分为 3 种类型:①海平面较低时,沉积物直接由陆向海沿海底峡谷搬运并不断侵蚀增大;②高海平面时,峡谷顶部汇聚沿岸高密度浊流沉积物并向深海侵蚀移动;③早期不稳定陆坡上的滑塌体发生溯源侵蚀,逐步达到陆架之上。20 世纪末,国内海洋调查研究单位对我国周边及邻近海域开展的海洋区域地质调查工作,获取了大量高精度地球物理调查数据,海底地貌形态逐渐引起了国内海洋地质学者的兴趣。进入 21 世纪以来,我国近海海底峡谷的研究成果呈

收稿日期:2019-09-11

资助项目:自然资源部海底矿产资源重点实验室基金(KLMMR-2018-A-08);中国地质调查局项目(DD20160138, DD20190209, DD20190627, DD20191002)

作者简介:伊善堂(1989—),男,硕士,助理工程师,主要从事海底地形地貌和海洋工程环境地质研究。E-mail: yishantang1990@126.com

爆发式增长,特别是对发育于南海北部陆坡及台湾附近海域的琼东南中央峡谷、珠江口外海底峡谷、神狐峡谷、东沙海底峡谷、台湾峡谷、澎湖峡谷等海底峡谷的形态特征、发育演化规律及控制因素关注程度较高^[6-12]。由于受调查手段和精度限制,直到近几年才发现南海北部陆坡紧邻西沙海槽东北侧发育有大型峡谷群,笔者暂将其命名为—统峡谷群。

本文利用最新的高分辨率多波束全覆盖测深数据,结合多条单道地震、多道地震剖面,详细分析了南海北部陆坡—统峡谷群 9 条峡谷的地形地貌特征和沉积堆积特征,并对—统峡谷群附近的滑坡地貌等灾害性地质进行识别,最后探讨了其形成控制因素及地质意义。

1 区域地质背景

—统峡谷群位于南海北部陆坡之上,南海北部陆坡为华南板块的延伸部分,在构造上属于陆壳性质^[13]。白垩纪晚期,太平洋板块俯冲作用减弱,在地壳-地幔均衡作用调整下,原以挤压为主

的华南古陆边缘开始向张裂转化,导致新生代华南陆缘扩张、断裂、解体、沉陷,形成南海北部大陆架和大陆坡^[14]。

研究区所在珠江口盆地白云凹陷为华南大陆的水下延伸部分,是属于南部坳陷带(珠二坳线)的一个三级构造单元,位于南海北部陆坡中下部,是南海北部陆坡面积最大、沉积最厚的新生代构造单元^[6,15],其整体上呈 NEE 向展布,水深主要介于 1 000~3 000 m 范围内。对于珠江口盆地白云凹陷的构造演化,前人已经做过大量研究,特别是近年来研究成果发现,自始新世以来,白云凹陷区发生了大规模断陷和张裂迁移活动,形成了密集的 NWW 向白云凹陷断裂,渐新世与中新世之间的白云运动,使得该区域产生强烈的热沉降,并伴随着高沉积速率的滑塌变形,这进一步改造了断裂等负地形单元的形态,此后,随着南海大规模海退现象的发生,原本处于半深海沉积环境的白云凹陷逐步发展为浅水陆架-陆坡环境,在陆源物质不断向海运输的过程中,浊流、滑塌等重力沉积物流对断裂等负地形不断磨蚀改造,在南海北部陆坡发育了多个切割较深的海底峡谷群^[2,6-9,12,20]。

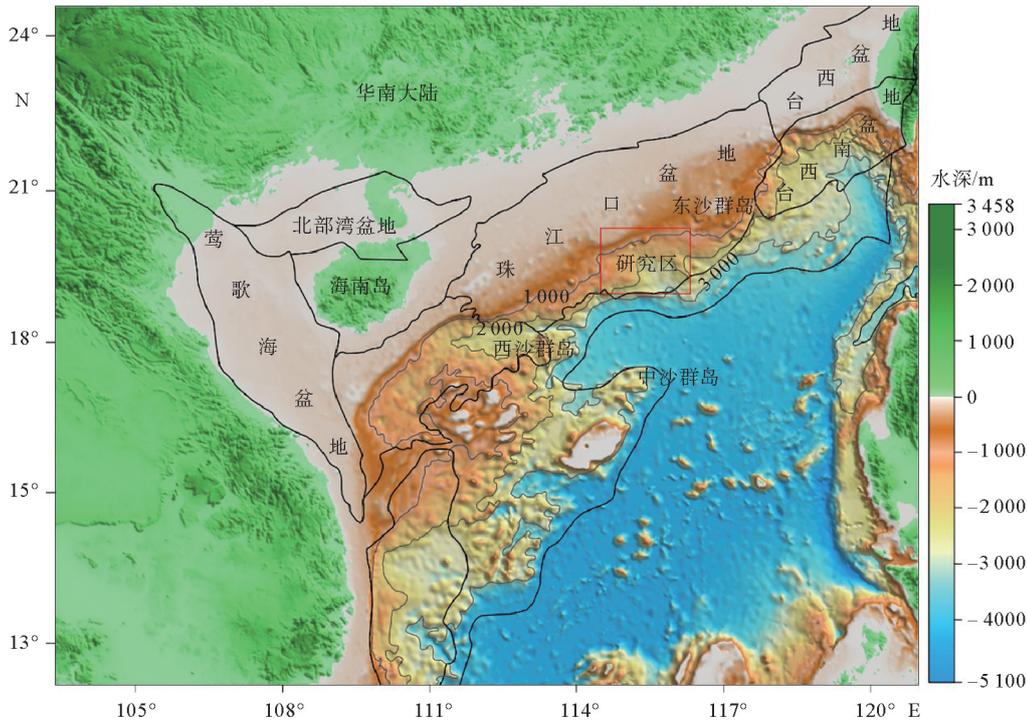


图 1 南海北部陆坡三维地形图

Fig.1 Three-dimensional topographic map of the northern slope of the South China Sea

2 数据来源与方法

本文研究区调查资料主要来源于广州海洋地质调查局 2008—2011 年在南海北部陆坡进行的多波束水深地形和高分辨率单道地震测量数据。

多波束水深地形测量采用“海洋六号”调查船配备的“EM122 多波束测深系统”以及“海洋四号”调查船配备的“SeaBeam2112 多波束测深系统”进行全覆盖调查获取,数据经过声速改正、水深校正、交互除错等处理后形成网格化数据,最后采用 Global Mapper17 生成三维地形图并对研究区内的海底峡谷进行剖面提取、分析。

高分辨率单道地震测深采用“奋斗五号”船配备的 Ixsea Delph Seismic 数字单道地震记录系统采集,采用 G.I 气枪震源,测网精度为 $20\text{ km} \times 40\text{ km}$,完全覆盖研究区一统峡谷群。本文选取其中 3 段典型地震剖面进行海底地层反射及沉积演化特征分析,并结合构造背景、峡谷发育特征进一步探讨峡谷的成因机制。

3 峡谷形态分布及沉积特征

3.1 峡谷形态及分布特征

通过绘制研究区高精度三维地形图模型(图 2),在南海北部陆坡—统海丘南部水深 $1\ 500 \sim 3\ 000\text{ m}$ 范围内识别出 9 条规模、走向不一的海底峡谷,本文统一暂将其命名为 C1—C9 峡谷。9 条海底峡谷自陆坡向深海盆方向呈聚敛型,其中, C1、C2、C3 峡谷规模大,分布范围广, C4—C9 峡谷平面形状相近,平行排列,规模小。各峡谷横断面主要呈“V”型,偶见“U”型,两侧峡谷壁基本呈对称发育,坡度较陡。为进一步分析海底峡谷群中各条峡谷形态及平面分布特征,本文针对谷口较宽的中下段主峡谷段绘制了 3 条垂直于峡谷的平行剖面进行对比分析,剖面均始于 C1 峡谷左侧,止于 C9 峡谷右侧,相互平行,分别命名为剖面 A-A'、剖面 B-B'和剖面 C-C'。

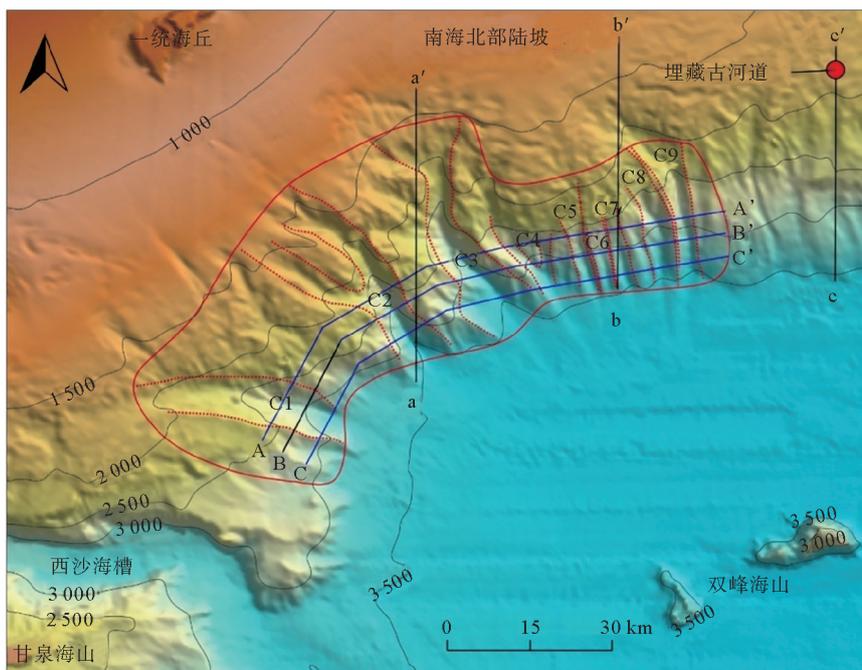


图 2 一统峡谷群三维地形示意图

Fig.2 Three-dimensional topographic map of Yitong Canyon Group

根据横切剖面对比图(图 3)可以看出,3 条剖面中 C1—C9 各条峡谷断面形态基本一致,仅在峡谷谷口宽度、两壁发育和切割深度等方面有细

微差异。C1—C2 峡谷自陆坡向海盆谷口逐渐增大,谷壁渐趋平滑,谷底也逐渐变宽;C3 峡谷谷底形态呈明显的“V”型向“U”型过渡状,谷口下段

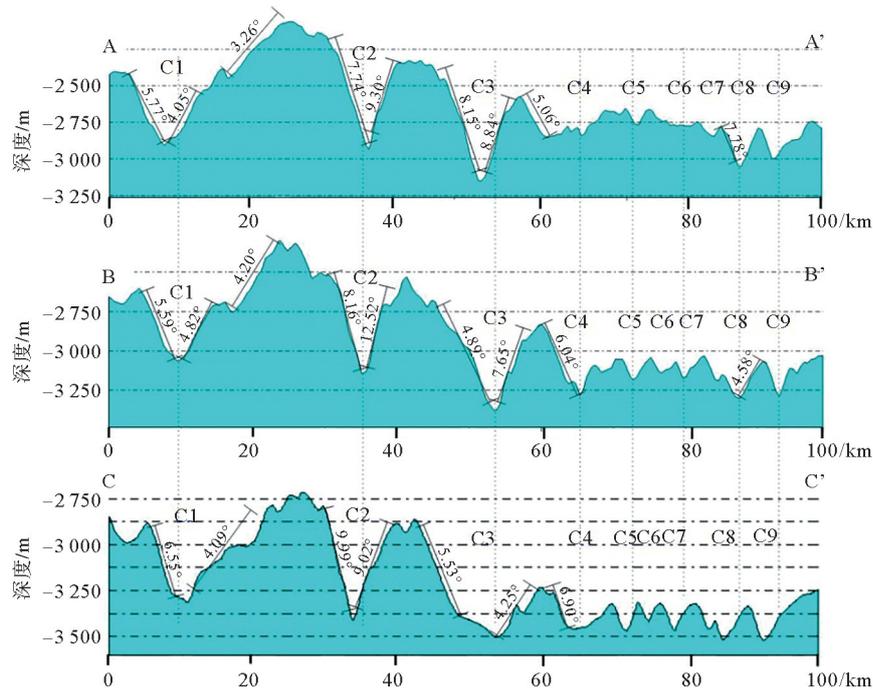


图 3 一统峡谷群横切剖面对比图(剖面位置见图 2)

Fig.3 Cross-sections of Yitong Canyon Group (section location is shown in Fig.2)

较上段明显变宽,切割力减弱,切割深度减小,两侧谷壁坡度相对中上段也逐渐变缓;C4—C9 峡谷规模较小,自上段至下段峡谷“V”型轮廓越来越明显,下切深度均不断增加,下文将详细分析 C1—C9 单条峡谷的平面形态及分布特征。

C1 峡谷:峡谷水深 2 050~3 350 m,平面上呈 NWW—SEE 向展布,长约 21 km,谷底较平滑,平均坡度值约 2.88°。主峡谷上段谷口宽约 13.1 km,切割深度约 500 m,两侧谷壁坡度介于 4.05°~5.77°;中段谷口宽约 9.0 km,切割深度约 356 m,两侧谷壁坡度介于 4.82°~5.59°;下段谷口宽约 10.6 km,切割深度约 480 m,两侧谷壁坡度介于 4.09°~6.55°,西南侧谷壁较平滑,东北侧谷壁略起伏。

C2 峡谷:峡谷水深 2 100~3 520 m,平面上呈 NNW—SSE 向展布,长约 22.9 km,峡谷谷底非常平滑,但坡度随水深变化在约 3 070 m 处发生转折,谷底水深 2 100~3 070 m 范围内,平均坡度值约为 3.96°,水深 3 070~3 520 m 范围内,平均坡度值约为 2.42°。主峡谷上段谷口宽约 8 km,切割深度约 570 m,两侧谷壁坡度介于 7.74°~9.30°;中段谷口宽约 10 km,切割深度约

620 m,两侧谷壁坡度介于 8.16°~12.52°;下段谷口宽约 9.6 km,切割深度约 560 m,两侧谷壁坡度介于 9.02°~9.99°,C2 峡谷谷口宽度和切割深度较 C1 峡谷均有明显增大。

C3 峡谷:峡谷水深 2 350~3 500 m,是该峡谷群中最长的峡谷,平面上由 SN 向转 NW—SE 向展布,长约 24.5 km,峡谷谷底平滑,平均坡度值约为 2.86°。主峡谷上段谷口宽约 9.8 km,切割深度约 565 m,两侧谷壁坡度介于 8.15°~8.84°;中段谷口宽约 12.5 km,切割深度约 545 m,两侧谷壁坡度介于 4.89°~7.65°;主峡谷下段呈扇形展布,开口较大,谷口宽约 12 km,切割深度较小,约 250 m,两侧谷壁坡度介于 4.25°~5.53°。

C4 峡谷:从三维地形图上看,C4 峡谷平面形态呈“Y”型,由 2 条小型海底峡谷汇聚而成,其中,峡谷左上段长 8 km,谷口宽约 3.5 km,走向为 NW—SE 向,水深值介于 2 800~3 400 m,该段谷底平滑,坡度值介于 3.2°~5.2°,切割深度介于 75~140 m,两壁坡度值约为 6.17°~7.41°,呈“V”字型;峡谷右上段长约 5 km,谷口宽约 2.3 km,自陆坡向下呈自 NNW 向 SN 向转折,水深值介于 2 950~3 400 m,谷底坡度值较大,约

6.5°,无明显起伏,两壁坡度值约为8.17°~9.20°,亦呈“V”字型发育。左右两条峡谷在水深约3400m处汇聚,形成一条坡度平缓的宽型沟谷,其谷底宽约900m,谷口宽约4.3km,下切深度约170m,谷底地形变化分为2段,自汇集点处往深海延展约2km段地形平缓,之后谷底转折向下,坡度约0.8°,沟谷两壁坡度值介于4.50°~6.65°。

C5—C7峡谷:这3条峡谷发育规模较小,其峡谷形态变化特征基本一致,水深主要为2500~3500m,平面上均呈近似SN向展布,自N向S各条峡谷随水深值增加切割深度逐渐增大,峡谷上段发育轮廓不明显,下段呈明显“V”型切割。峡谷长约8.5~8.7km,谷口宽介于2.3~3.2km,C5峡谷、C7峡谷下切深度较大,约150~170m,C6峡谷下切深度较浅,约105m。这3条峡谷谷底坡度均在水深3500m发生明显转折,坡度由陡逐渐变缓,两壁坡度值基本一致,为5.3°~7.2°。

C8峡谷:峡谷水深主要介于2650~3500m,平面上呈近SN向展布,顶部表现为多条小峡谷汇聚到一条大型主峡谷,主峡谷长约14.5km,其剖面形态呈近似“V”型,其中西侧谷壁呈二级阶梯状发育,转折点位置随水深增加而逐渐下移,中下段谷壁坡度值基本一致,约4.99°,东侧谷壁较平滑,其坡度值约为4.7°。C8峡谷谷口较宽,约7.5~8.0km,其下切深度随水深增加而逐渐减小,峡谷上部下切深度可达320m,中部下切深度为250m,而下部下切深度仅为180m,谷底较平滑,坡度在水深3400m处逐渐变缓。

C9峡谷:峡谷水深跨度较大,顶端水深2350m,末端水深3570m,平面上由NW—SE向转为SN向展布,峡谷长约24km,谷底平滑,平均坡度值约为2.90°。主峡谷上段谷口宽约6.6km,切割深度约230m,两侧谷壁坡度介于3.45°~8.96°;中段谷口宽约3km,切割深度约180m,两侧谷壁坡度介于7.15°~7.98°;下段谷口宽约5.3km,切割深度约180m,两侧谷壁坡度介于3.95°~7.20°。

3.2 峡谷海底地震反射界面特征

通过对调查区进行高分辨率单道地震剖面资料进行解释,结合该区地震反射特征并与钻探资

料对比,识别出多个地震反射界面,本文结合地震剖面变化特征,选取海底面下反射较清晰的3个连续地震反射界面进行分析,自海底(T_0)而下分别命名为 T_1 、 T_2 、 T_3 界面(图4~6)。

T_0 :呈高频、强振幅、高连续、双相位反射特征,随海底起伏而起伏;该反射界面为海底地震反射界面,主要为海底表面,海底峡谷的谷底很难追踪到该界面。

T_1 :呈高频、中振幅、高连续、双相位反射特征,反射同相轴总体上相对平直、稳定,可连续追踪,部分界面之上可见地震反射波的上超与下超现象,界面之下局部有削截现象。该反射层在峡谷顶端(浅水区)中较常见,而在峡谷底端(深水区)难以识别,说明峡谷底端受断层或滑塌体错断和底流冲刷影响较顶端更强烈。

T_2 :呈高频、中—强振幅、中—高连续、1~2相位反射特征。界面上下反射波总体平行。同 T_1 反射界面一样,在峡谷下切和断层错断作用下,该反射界面连续性变差,仅在峡谷顶端可见,在峡谷底端较难追踪。

T_3 :呈现中频、中—强振幅、中—高连续、双相位反射特征,且地层遭受断层频繁错断,部分区域可见对下伏地震层序有明显削截作用,界面上可见上覆地层的上超现象。该反射层基本可以全区追踪,仅少量切割较深的峡谷存在轻微中断。

通过对研究区高分辨率地震资料的综合解释,充分结合已有珠江口盆地的勘探和研究成果,将ODP184航次(18°50.17'N,116°33.94'E)1145和1146站位的钻井资料与本区地震测线进行了系统追踪对比,对本区地层年代进行了划分,地震反射界面 T_1 为更新世与上新世地层的分界(约为2.588Ma), T_2 为上新世与中新世地层的分界(约为5.332Ma), T_3 为晚中新世与中中新世地层的分界。

3.3 峡谷群海底沉积特征

一统峡谷群自西向东分为9条规模、走向不一的海底峡谷,整体呈梳状发育。根据各条峡谷的分布位置和发育形态,将峡谷群分为西段、中段和东段3部分。其中,西段峡谷群包括C1、C2、C3峡谷,发育规模大,分布范围广;中段峡谷群包括C4—C7峡谷,平面形状相近,平行排列,规模

小;东段峡谷群包括 C8—C9 峡谷,其切割深度较中段明显增加,近平行排列。

(1)峡谷群西段沉积特征

测线 a-a' 穿越峡谷群西侧,呈 SN 向,自 N 向 S 海底由南海北部陆坡逐渐过渡到南海海盆,中途切过 C3 峡谷顶部和 C2 峡谷底部(图 4)。地震剖面显示,海底地层受多条断裂控制,地层呈阶梯状,在剖面上表现为“V”型和“U”型发育,海底斜

坡重力滑塌面高度发育,下部第四纪地层明显减薄,但未完全缺失, T_2 — T_3 层之间偶见杂乱反射,自陆坡向海盆海底地层顺斜坡向下尖灭,峡谷谷底部分地层缺失。

(2)峡谷群中段沉积特征

测线 b-b' 穿越峡谷群中部,亦呈 SN 向,穿切 C7 峡谷底部附近。地震剖面显示,整段剖面地层完整,未见明显缺失。剖面上半部发育 2 组断层,

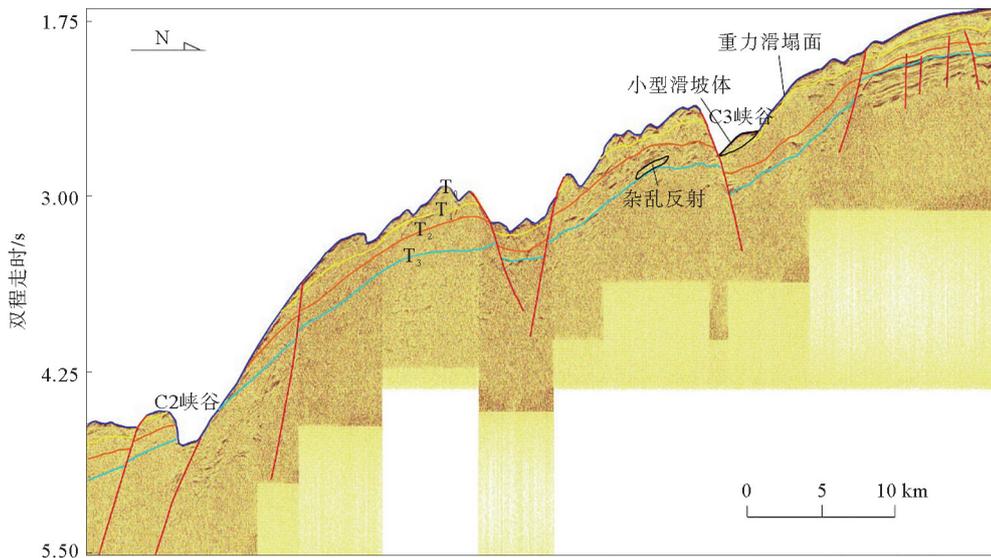


图 4 测线 a-a' 地震剖面反射特征

Fig.4 Reflection characteristic of seismic profile a-a'

地层呈平行或亚平行反射结构,具有良好的连续性;剖面下半部以平行反射结构为主,其上发育 2 组明显的大型滑坡,滑坡体地震剖面放大图可见(图 5),该滑塌体主要分为 2 级滑坡,2 条滑坡线基本平行,均呈近似长条弧形,2 级滑坡体顶部滑坡壁上均存在明显的滑坡残留,顶部滑坡体较完整,未发现明显划裂。

(3)峡谷群东段沉积特征

测线 c-c' 穿越峡谷群东部,呈 SN 向。地震剖面显示,该陆坡斜坡海底地层主要以平行和亚平行反射结构为主,地层连续性和整体性均较好,仅在斜坡中部和上下两端可见零星几条断层,规模不大(图 6)。斜坡中段的发育大规模海底滑坡,其特征与测线 a-a' 和测线 b-b' 识别的海底滑坡基本一致,但测线 c-c' 上单条滑塌体的规模、滑坡残留厚度及分布范围均较大。

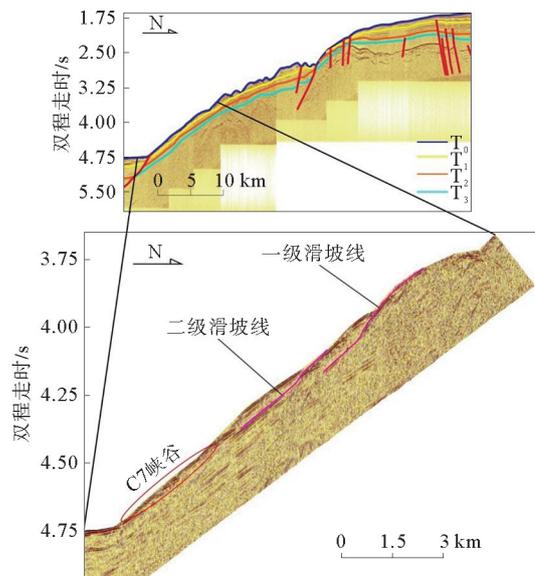


图 5 测线 b-b' 地震剖面反射特征

Fig.5 Reflection characteristics of seismic profile b-b'

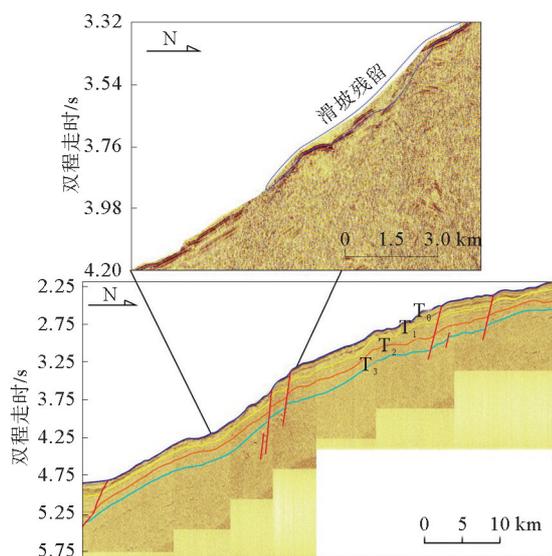


图6 测线 c-c'地震剖面反射特征

Fig.6 Reflection characteristics of seismic profile c-c'

4 峡谷群地貌特征控制因素分析

一统峡谷群地处南海北部陆坡,珠江口外侧海域,其地貌演化特征受控因素存在多样性,包括新生代地质构造、陆源沉积物输入和海平面变化等均是控制海底峡谷地貌特征演化的典型因素^[7,10,21-22]。

4.1 南海北部陆坡新生代构造运动

地震剖面显示,研究区峡谷群切穿中新世晚期地层,晚中新世以来,由于受到地球深部构造机制调整,太平洋板块和印度洋板块逐渐活跃,下地幔物质上涌至西沙海槽槽底的薄弱带,造成海槽周围海底加速沉降,并伴随着强烈的断裂活动^[23-25],研究区一统峡谷群及北部陆坡限制型峡谷群^[8]在地貌形态上均表现为近海槽的峡谷西侧规模大于峡谷东侧规模,而发育于西沙海槽西北部的琼东南盆地中央峡谷体系^[6]表现为相反的东深西浅的特征,说明西沙海槽晚中新世的沉降活动引起周围峡谷群海底下切,一统峡谷群离西沙海槽较近,受拉张幅度较大,且在此过程中伴随着海底坡度的明显增大,海底断裂、断陷等负地形成为该区域海底地形的薄弱带,为海底峡谷群的进一步发育提供了可能。

4.2 陆源沉积物输入

深水峡谷体系的发育和深水沉积体系密切相关,大体量的沉积体运移可以大幅度加剧海底峡谷的发育规模,特别是快速变化的高速沉积体,往往以高密度浊流等形式对海底形态进行刻画和塑造。中新世以来,南海北部陆坡陆架坡折线的向下迁移,使得华南大陆古珠江有机会直接穿越陆架到达陆坡附近,随着陆缘沉积物不断由陆架向陆坡进积,当其重力达到或超过堆积阻力时,会造成沉积物失稳,碎屑自陆坡顺势滑下,形成较强密度的重力流,这为峡谷的形成及切割地形提供了初始动力,本文 a-a'地震剖面上揭示的杂乱反射和多级滑坡,以及陆坡斜坡上发育的陡坎、滑动面、滑坡残余等特征均证明了这一点;同时,中全新世季风降雨的增强,出现了洪水高发期,也带来了大量的陆源碎屑物质,上新世以来,随着在全球性沉积作用背景下,研究区第四纪沉积物的供给速率显著增加,高速率的沉积物供给增加了陆坡斜坡发育的不稳定性,成为诱发海底重力沉积物流发生的重要因素之一,而高密度重力沉积物流的向下运动对下伏地层的冲刷是形成海底峡谷地貌的主因。

4.3 海平面变化

晚中新世以来,珠江口盆地经历了多次大规模海平面升降变化,众多学者通过对该区域深海钻井资料(如珠江口盆地 60 口油气钻井资料、ODP184 航次连续深海沉积物资料)进行微体古生物定量分析,建立了相对海平面变化曲线。前人研究认为,21 Ma 以来南海海平面变化经历过多达 16 期次比较明显的海平面升降旋回,南海北部海域海平面在 11.6 Ma 和 5.7 Ma 时期存在 2 次较明显的海平面大幅下降活动,而自 5.7 Ma 始至今海平面基本维持在相对稳定水平^[26-27]。

相对海平面下降使得南海北部陆架坡折线向深海大幅度移动,峡谷群所处研究区由沉积环境转变为侵蚀环境,陆上河流搬运的沉积物质可直接输送到陆坡区,海底在沉积碎屑的搬运、磨蚀和快速堆积等重力流的强侵蚀作用下,极容易在陆坡区形成峡谷等负地形;同时,相对海平面下降,近岸波浪、潮流影响范围由陆架向陆坡过渡,浪基

面发生明显后移,海底不稳定性因素增多更容易触发陆坡失稳机制,从而发生陆坡滑塌、浊流沉积等,进一步增加海底峡谷形成的可能性。

5 结论

(1)研究区水深1 500~3 000 m范围内发育有9条规模、走向不一的小型海底峡谷群,自陆坡向深海盆地呈聚敛型。各峡谷壁两侧基本呈对称发育,其中,C1—C3峡谷规模大,自陆坡向海盆谷壁渐趋平滑,谷底渐宽,切割深度减小;C4—C9峡谷规模较小,自上段至下段峡谷“V”型轮廓越来越明显,下切深度不断增加。

(2)地震剖面显示研究区海底地层受多条断裂控制,其中,峡谷群西段可见明显的重力滑塌面和小型滑塌体发育,陆坡斜坡地层与海盆海底地层呈不整合接触,且峡谷谷底部分地层缺失,推测为受海底底流冲刷而成;峡谷群中段斜坡下部发育2组大型滑坡,两级滑坡体顶部均存在明显的滑坡残留;峡谷群东段地层连续性较好,海底滑坡、零星断层等均有发育。

(3)一统峡谷群的形成控制因素多样,主要与新生代构造运动、陆源沉积物质输入和海平面升降等相关:晚中新世以来,受西沙海槽区域沉降活动的影响,一统峡谷群周围海底在拉张作用下逐渐下切,海底坡度的明显增大,并伴随着强烈的断裂活动,初步形成构成峡谷的负地形地貌单元;同时,来自北部陆架的充足沉积碎屑自陆坡顺势滑下,形成较强密度的重力流,为峡谷的形成及切割地形提供了初始动力;相对海平面变化直接改变了研究区的沉积环境,为陆源碎屑物质的搬运提供了更加直接的通道,在此基础上,海底峡谷等负地形的发育演化更加容易。

参考文献:

- [1] 苏明,沙志彬,匡增桂,等.海底峡谷侵蚀-沉积作用与天然气水合物成藏[J].现代地质,2015,29(1):155-162.
- [2] 朱林,傅命佐,刘乐军,等.南海北部白云凹陷陆坡海底峡谷地形地貌与沉积地层特征[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(2):1-9.
- [3] Spencer J W. The submarine Great Canyon of the Hudson River[J]. American Journal of Science,1905, S4-19(109): 1-15.
- [4] Taylor B, Smoot N C. Morphology of Bonin fore-arc submarine canyons[J]. Geology,1984, 12(12):724-727.
- [5] Lastras G, Arzola R G, Masson D G, et al. Geomorphology and sedimentary features in the Central Portuguese submarine canyons, Western Iberian margin[J]. Geomorphology, 2009, 103(3):310-329.
- [6] 苏明,解习农,王振峰,等.南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J].石油学报,2013,34(3):467-478.
- [7] 丁巍伟,李家彪,李军,等.南海珠江口外海底峡谷形成的控制因素及过程[J].热带海洋学报,2013,32(6):63-72.
- [8] 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.
- [9] 陈泓君,蔡观强,罗伟东,等.南海北部陆坡神狐海域峡谷地貌形态特征与成因[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(5):19-26.
- [10] 殷绍如,王嘹亮,郭依群,等.东沙海底峡谷的地貌沉积特征及成因[J].中国科学(地球科学),2015,45(3):275-289.
- [11] 徐尚,王英民,彭学超,等.台湾峡谷的成因及其对沉积的控制[J].中国科学(地球科学),2014,44(9):1913-1924.
- [12] 聂鑫,罗伟东,周娇.南海东北部澎湖峡谷群沉积特征[J].海洋地质前沿,2017,33(8):18-23.
- [13] 姚伯初,万玲.中国南海海域岩石圈三维结构及演化[M].北京:地质出版社,2006.
- [14] 丁巍伟,陈汉林,杨树锋,等.南海西南次海盆与东部次海盆地质与地球物理分析[J].高校地质学报,2002,8(3):268-279.
- [15] 孙珍,庞雄,钟志洪,等.珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J].地学前缘,2005,12(4):489-498.
- [16] Liu Z, Zhang G C, Lu R, et al. Feature of multi sediment-source filling during the late oligocene at Baiyun Depression in the deep-water region, the Northern South China Sea[J]. Geoscience, 2010,24(5):900-909.
- [17] Pang X, Yang S K, Zhu M, et al. Deep-water fan systems and petroleum resources on the Northern Slope of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica,2004,78(3):626-631.
- [18] Sun Z, Xu Z Y, Sun L T, et al. The mechanism of post-rift fault activities in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 89: 76-87.
- [19] Peng X, Peng D J. From shallow-water shelf to deep-water slope: the study on deep-water fan systems in South China Sea. Acta Sedimentologica Sinica,2005, 23(3): 1-11.
- [20] 付超,于兴河,何玉林,等.南海北部神狐海域峡谷层序结构差异与控制因素[J].现代地质,2018,32(4):807-818.
- [21] 李学杰,王大伟,吴时国,等.三沙海底峡谷识别与地貌特

- 征分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(3):28-36.
- [22] 孙美静, 高红芳, 李学杰. 台湾东部海域台东峡谷沉积特征及其成因[J]. 地球科学, 2018, 43(10):3709-3718.
- [23] 刘方兰, 吴庐山. 西沙海槽海域地形地貌特征及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3):7-14.
- [24] 丁巍伟, 黎明碧, 何敏, 等. 南海中北部陆架-陆坡区新生代构造-沉积演化[J]. 高校地质学报, 2009, 15(3):339-350.
- [25] 王家豪, 庞雄, 王存武, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别[J]. 地球科学, 2006, 31(2):209-213.
- [26] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(1):220-229.
- [27] 赵泉鸿, 汪品先, 成鑫荣, 等. 中新世“碳位移”事件在南海的记录[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2001, 31(10):808-815.

GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND CONTROLLING FACTORS OF THE YITONG CANYON GROUP ON THE NORTHERN SLOPE OF THE SOUTH CHINA SEA

YI Shantang^{1,2}, HU Xiaosan^{1,2}, LUO Zongjie³, LUO Weidong^{1,2}

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510760, China;

2 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510760, China;

3 Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on the latest high-resolution multi-beam bathymetric data, as well as the single-channel and multi-channel seismic profiles, this paper analyzed the topographic and depositional features of the group of nine canyons on the northern slope of the South China Sea. The canyon group converges from the continental slope to the deep-sea basin, in "V" shaped cross-sections, with rather symmetrical valley walls and steep slopes. The submarine strata in the study area are disturbed by faults, and developed in a stepped manner. Unstable geological hazards, such as submarine faults, gravity sliding surfaces and small landslides are highly developed, which suggests that the submarine environment of the canyon group is very unstable. Cenozoic tectonic movements, such as the regional subsidence of Xisha Trough, doubtlessly contributed to the formation of the geomorphic pattern of the canyon groups. A great amount of sediment debris from the northern shelf was mainly contributed by high-density turbidity currents derived from submarine landslides, collapses and other submarine disasters, which accelerated the further development of the canyon group. Relative sea level changes directly change the sedimentary environment of the study area and provide a more direct channel for the transport of enormous terrigenous clastic materials. This is also one of the important factors that induced the instability of the seabed on the slope and shaped the geomorphological characteristics of the canyon group.

Key words: northern slope of the South China Sea; group of canyons; geomorphic features; controlling factors