

# 南海西沙海域多种海底地貌特征及成因

杨涛涛<sup>1,2</sup>, 吕福亮<sup>1,2</sup>, 鲁银涛<sup>1,2</sup>, 王雪峰<sup>1,2</sup>, 王新<sup>3</sup>, 李丽<sup>1,2</sup>, 张远泽<sup>1,2</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团杭州地质研究所有限公司; 3 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院

**摘要** 西沙海域位于南海西北部陆坡区,受陆缘张裂和走滑的双重控制,经历了断陷和拗陷2个构造演化阶段,受越东、红河、海南岛和西沙等4个物源区的共同影响,充填了陆相—过渡相—海相地层,发育火山、气烟囱、块体搬运和水道等多种地质体,孕育了多种类型的海底地貌。基于丰富的二维和三维地震资料,应用三维可视化等技术,完整直观地展示了西沙海域海底地貌。将位于大陆坡的研究区海底地貌细分为海底平原、海底斜坡和海槽等3个三级海底地貌,进一步细分为深海平原、深海水道、深海蜂窝状、深海海山、深海月牙状、深海似圆状、深海蝌蚪状、深海海槽和深海条带状共9个四级地貌。结合地质条件分析了各种地貌成因及展布的主控因素:深海平原、深海水道和深海海槽等3种海底地貌主要受控于断陷期的构造格局和晚期的沉积充填;深海蜂窝状地貌与块体搬运体系伴生;深海海山为火山活动成因,底流有改造作用;深海月牙状地貌是底流侵蚀的产物;深海似圆状、深海蝌蚪状和深海条带状地貌是气体逸散造成的不同形状的海底麻坑。这项成果有助于西沙海域构造特征、深水沉积类型与分布、地质体展布及海流等方面的深化研究。

**关键词** 海底地貌; 地震特征; 成因; 大陆坡; 深海; 西沙海域; 南海

**中图分类号**: TE121.3 **文献标识码**: A

## 0 前言

海底地貌是指海水覆盖的固体地球表面形态的总称,总体可分为平坦的大陆架、陡峭的大陆坡、多样的海底平原和巨大的洋中脊共4个大类。海底地貌是在长期内外地质作用过程中形成的,研究其形态及分布可为进一步掌握现代海底的沉积作用、过程和产物提供直接依据<sup>[1]</sup>,对沉积学的研究起到“将今论古”的指导作用;海底地貌与下伏地层有着密切的联系,对构造地质学的研究有指示作用<sup>[2]</sup>,也为钻井和海底管线等海洋工程施工提供直接依据<sup>[3]</sup>。海底地貌是全球地形的重要组成部分,不仅对海洋科学几乎所有分支学科的研究都有重要意义<sup>[4]</sup>,而且是维护国家海疆界的根本依据和重要保障<sup>[5]</sup>。

西沙海域位于南海西北部陆坡区,发育多种类型海底地貌。该区受北东向南海北部陆缘张裂和北西向红河走滑断裂的双重控制,经历了断陷和拗陷两个构造演化阶段,受越东、红河、海南岛和西沙

等4个物源区的共同影响,充填了陆相—过渡相—海相地层,发育火山、气烟囱、块体搬运和水道等多种地质体,因而孕育了多种类型的海底地貌。而且,该区受底流改造作用明显<sup>[6-7]</sup>,使得海底地貌更加复杂。本文基于丰富的高精度二维和三维地震资料,应用三维可视化等技术,完整直观地展示了西沙海域海底地貌,描述了其展布特征,结合地质条件分析了各种地貌的成因及展布的主控因素,以期深化西沙海域地质研究提供帮助。

## 1 地质背景

南海位于欧亚、太平洋和印度—澳大利亚3大板块的交会处,经历了复杂的地质演化过程,发育陆缘断陷盆地、走滑拉分盆地、前陆盆地和大洋盆地共4大类盆地<sup>[8]</sup>,孕育了多种类型的地质体,蕴含了丰富的油气资源<sup>[8-9]</sup>。越来越多的学者认为南海的扩张和演化是太平洋板块向欧亚板块俯冲和印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞共同作用的结果<sup>[10-12]</sup>,南海经历了陆缘张裂和海底扩张两大构造

收稿日期: 2020-07-24; 改回日期: 2020-11-02; 网络出版日期: 2021-04-13

本文受国家科技重大专项课题“南海中建海域深水油气地质条件及目标评价”(编号:2017ZX05026-006)和国家自然科学基金“海洋一次波与多次波联合最小二乘逆时偏移”(编号:41504105)联合资助

**第一作者**: 杨涛涛, 硕士, 高级工程师, 从事海域油气地质综合评价工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: yangtt\_hz@petrochina.com.cn

演化阶段,陆相—海陆过渡相—海相的沉积演化过程<sup>[10]</sup>。南海的海底地貌类型齐全(图1),既有宽广的大陆架,又有陡峭的大陆坡和辽阔的深海盆地,整体上呈马蹄形缺口朝东展布<sup>[13]</sup>。南海北部陆架地形平缓,宽度为80~320 km,等深线呈北东向大致平行于海岸。陆坡走向趋势与陆架总体相同,呈两端宽、中间窄的特点,向深海盆呈斜坡或阶梯状下降,发育有海槽和海岭等地貌类型<sup>[5,13]</sup>。海盆地势宽广平坦,向中部水深逐渐增加,发育孤立或链状海山等地貌。

研究区西沙海域位于南海西北部陆坡区,该部位陆坡宽度明显增加,最宽处达500 km;除部分岛礁区水深较小外,大部分地区的水深大于500 m(图1)。

西沙海域经历古近纪断陷和新近纪以来的拗陷2个构造演化阶段,具有“下断上拗”双层结构特征,相应地形成2个构造层<sup>[14-16]</sup>。下构造层具有半地堑或地堑控制的多凸多凹的构造格局,以近源沉积为主,沉积物较粗,充填始新统、下渐新统崖城组 and 上渐新统陵水组,属河湖相—海陆过渡相含煤沉积及半封闭浅海相沉积。上构造层具有中部高、四周低、被大型凹陷所包围的构造格局,无大型河流供给,为远源海相沉积地层,充填中新统三亚组—黄流组、上新统莺歌海组和第四系乐东组<sup>[17-19]</sup>。地震资料揭示研究区发育多种类型的海底地貌,前人对局部海底地貌形态有所刻画<sup>[20-21]</sup>。

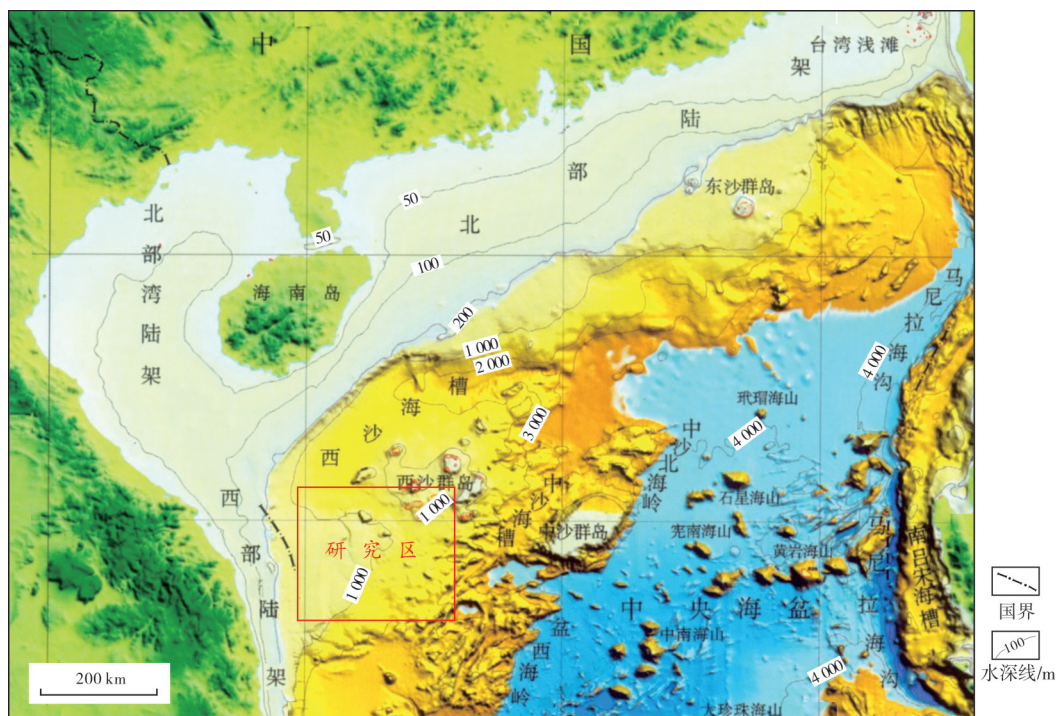


图1 南海北部海底地貌及研究区位置示意图(据文献[22])

Fig. 1 Seafloor topography and location of the study area in the northern South China Sea (cited from reference [22])

## 2 西沙海域海底地貌概况

海底是明显的波阻抗界面,在地震剖面上呈现为强振幅、强连续性的反射界面。基于深海区的二维和三维地震资料,追踪海底反射界面,可获得较高精度的海底形态数据<sup>[23]</sup>,这是海底地貌分析的基础。本文使用了由中石油采集的超过 $1 \times 10^4$  km<sup>2</sup>的二维地震资料(道间距6.25 m)和3 500 km<sup>2</sup>的三维地震资料(线间距25 m,道间距12.5 m),地震资

料品质好,海底反射明显,易识别追踪。应用三维可视化等技术,完整直观地展示了西沙海域西部海底地貌特征。根据海底地貌的形态、展布特征和几何参数,将位于大陆坡的研究区海底地貌细分为海底平原、海底斜坡和海槽等3个三级海底地貌,进一步细分为深海平原、深海水道、深海蜂窝状、深海海山、深海月牙状、深海似圆状、深海蝌蚪状、深海海槽和深海条带状共9个四级地貌(表1,图2,图3)。



表1 西沙海域海底地貌分类表  
Table 1 Classification of seafloor topography in Xisha sea area

海底地貌			几何特征				
二级	三级	四级	平均长度/km	平均宽度/km	平均深度/m	长宽比	宽深比
大陆坡	海底平原	深海平原	56.0	30.0	—	1.9	—
		深海水道	47.0	1.5	35	31.0	0.043
	海底斜坡	深海蜂窝状	4.1	2.5	30	1.6	0.083
		深海海山	17.5	6.5	700	2.7	0.009
		深海月牙状	3.0	0.1	150	30.0	0.001
		深海似圆状	3.0	3.0	120	1.0	0.025
		深海蝌蚪状	5.4	1.3	60	4.2	0.022
	海槽	深海海槽	80.0	14.0	150	5.7	0.093
		深海条带状	5.0	2.0	50	2.5	0.040

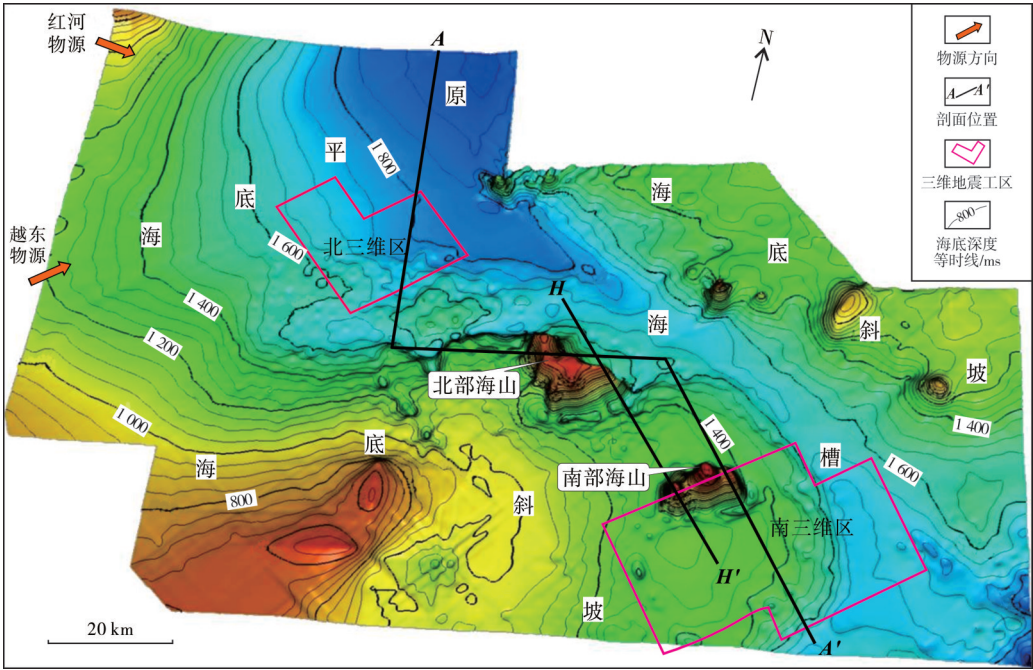


图2 西沙海域海底地貌三维显示图  
Fig. 2 3D visualization map of seafloor topography in Xisha sea area

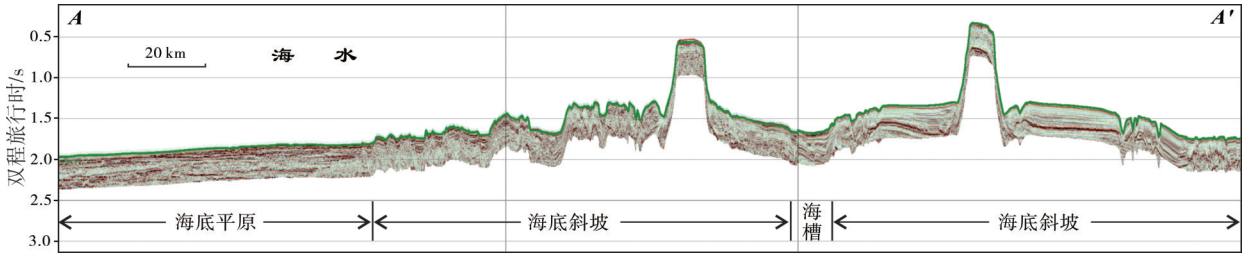


图3 西沙海域地震剖面显示海底地貌(位置见图2)  
Fig. 3 Seismic section showing seafloor topography in Xisha sea area (location is shown in Fig. 2)

3 海底地貌特征及成因分析

3.1 海底平原

海底平原区地貌较平坦(图2,图3),可分为深海平原和深海水道两种地貌类型(图4,图5)。

3.1.1 深海平原

西沙海域深海平原十分平坦,从东北至西南地形有抬升(图2),平均抬升幅度为5.2 m/km。深海平原顶界在地震剖面上呈强振幅、强连续地震反射(图5)。平原地貌位于琼东南盆地西部规模巨大的凹

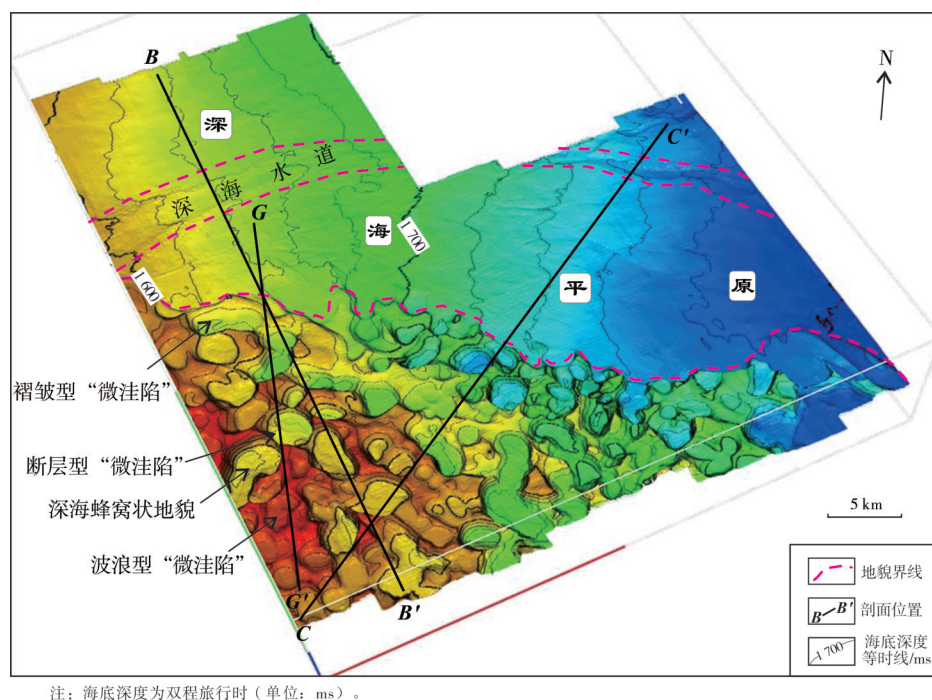


图4 西沙海域北三维区海底地貌三维显示图(位置见图2)

Fig. 4 3D visualization map of seafloor topography in the northern 3D survey of Xisha sea area(location is shown in Fig. 2)

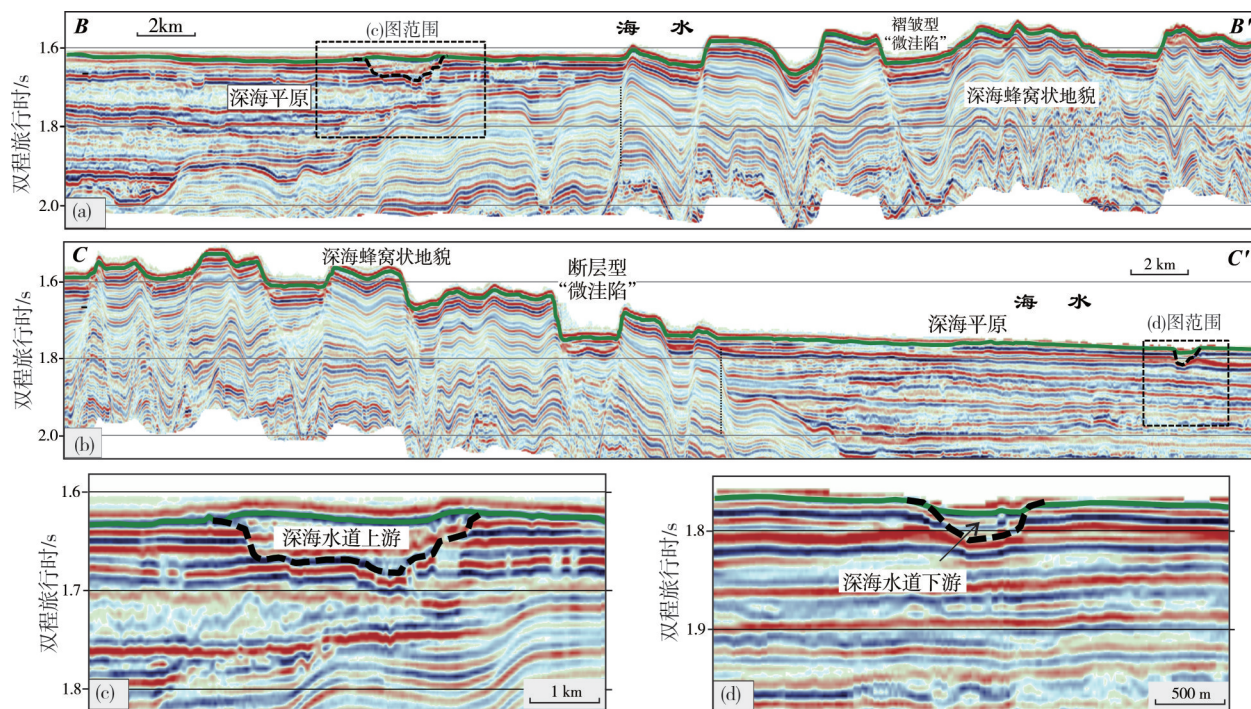


图5 西沙海域北三维区地震剖面显示海底平原和海底斜坡地貌(位置见图4)

Fig. 5 Seismic sections showing submarine plain and submarine slope in the northern 3D survey of Xisha sea area (locations are shown in Fig. 4)

陷群内,是有利的沉积物卸荷区,也是盆地内地层厚度最大的部位,残余地层厚度最大约为12 000 m<sup>[24]</sup>。研究区的平原地貌主要受越东和红河两个物源的影响。西南部的越东物源在中新世最为发育,将莺

歌海盆地南部的凹陷基本填平;在上新世越过莺歌海盆地,向琼东南盆地西部的凹陷群输送沉积物<sup>[25]</sup>;上新世以来研究区已完全进入深水环境,越东物源的沉积物主要在西南部堆积,造成了西南部



较高的海底地形。西北部的红河物源,在输送到琼东南盆地和莺歌海盆地交界处(研究区西北部)后,受地形影响物源转向朝东,自上中新统沉积后形成“C”字形向东南开口的陆架坡折<sup>[25]</sup>,沉积物大多靠近陆架坡折堆积,形成了西北部较高的海底地形(图2)。研究区自拗陷期以后,特别是自上新世以来以热沉降为主,主要在规模分布的凹陷和两个充足的物源控制下,受一定的构造改造作用,形成了总体西高东低、平坦的深海平原地貌。火山活动仅对局部地貌有较强的改造作用。

### 3.1.2 深海水道

深海水道是深海中常见地貌类型之一,可以在陆架、陆坡和盆地内发育,陆架和陆坡上的水道主要为限制性强的顺直水道,盆地内部多出现限制性弱的曲流水道<sup>[26]</sup>。研究区水道(北三维区东北部无数据,据水道形态及二维地震分析应是同一条水

道)上游形态较宽缓平直(图5a,5c),两侧发育小规模天然堤,使得水道两侧稍有增高,中部相对稍低;上游宽2 500 m,最大下切深度约为50 m。下游为弯曲水道,发育过程存在“凹岸侵蚀、凸岸沉积”的沉积作用,使得弯曲度更大,表现出限制性水道特征,水道顶面为明显的负地形(图5b,5d);下游宽约700 m,最大下切深度约为20 m。根据第四系海底地貌形态及水道的特征,推断沉积物来自越东物源<sup>[20,27-29]</sup>。水道内部以弱—中振幅地震反射为主,结合邻区井-震对比关系,分析其应以泥质充填为主,夹少量粉砂岩,这与水道发育期已完全进入深水且距越东物源较远的沉积环境一致<sup>[30]</sup>。

### 3.2 海底斜坡

海底斜坡地貌类型多样,研究区从北到南依次发育深海蜂窝状、深海海山、深海月牙状、深海似圆状和深海蝌蚪状共5种类型海底地貌(图5—图7)。

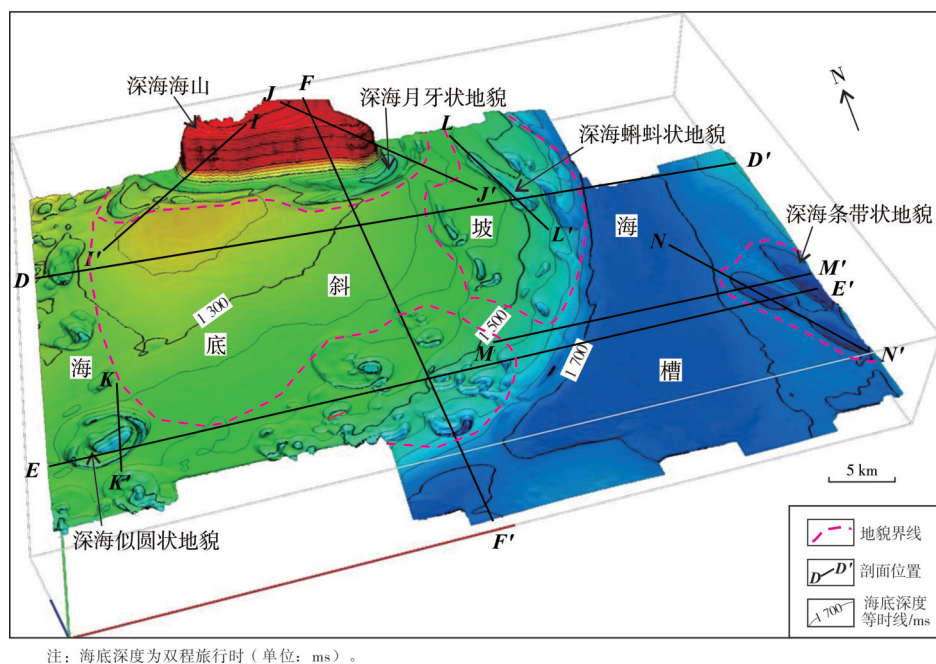


图6 西沙海域南三维区海底地貌三维显示图(位置见图2)

Fig. 6 3D visualization map of seafloor topography in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 2)

#### 3.2.1 深海蜂窝状地貌

深海蜂窝状地貌在地震剖面上呈现3种特征:①明显的“V”形“微洼陷”,沿着两侧断层面反射轴发生明显的错断,断距40~60 m,称为断层型“微洼陷”,具有深度大、顶部平坦、内壁陡峭的特点(图5b,图8)。断层型“微洼陷”平面上多为似圆形(图4),直径为1~

3 km。②以较大幅度的褶皱变形为主,地层错断减少,海底起伏较大,洼陷深度变化较大,最深约30 m,深度多小于断层型“微洼陷”,称为褶皱型“微洼陷”,具有深度不等、顶部起伏、内壁较平缓的特点(图5a,图8)。褶皱型“微洼陷”平面上多为似椭圆形(图4),走向无明显的定向性,直径为1~4 km。③以较小幅度的褶皱变形为主,相对高差变化小,多数在10 m左

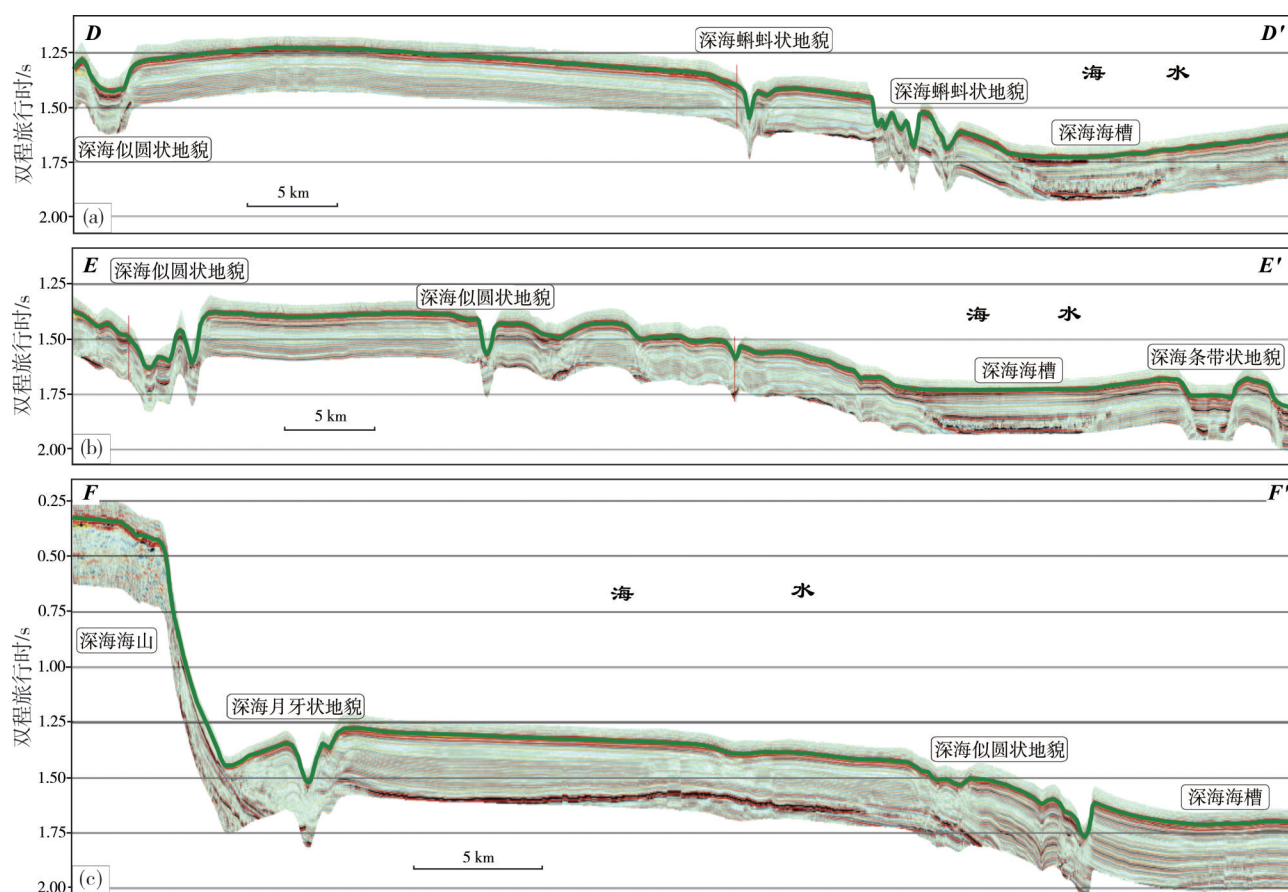


图7 西沙海域南三维区地震剖面显示海底斜坡和海槽地貌(位置见图6)

Fig. 7 Seismic sections showing submarine slope and trough in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 6)

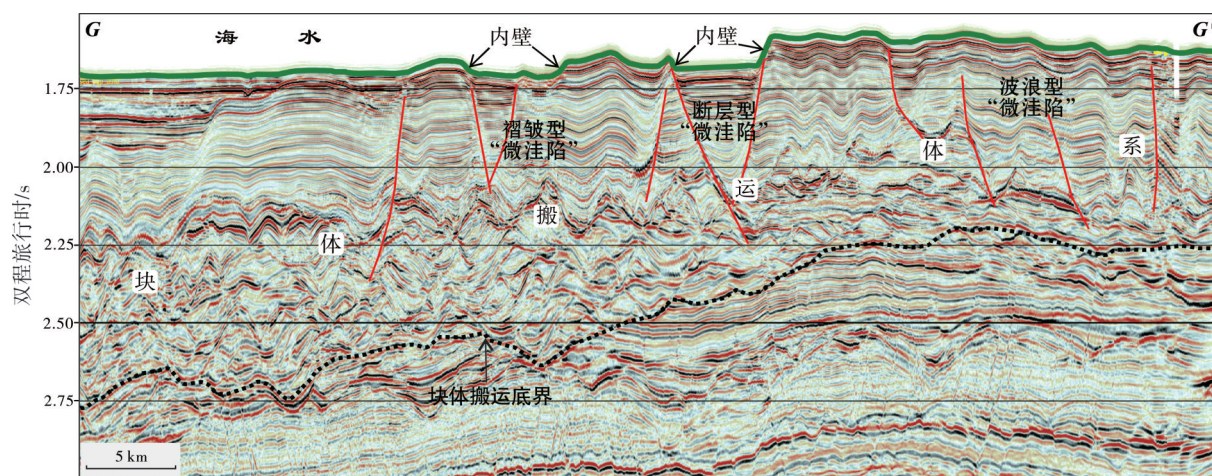


图8 西沙海域北三维区地震剖面显示深海蜂窝状地貌(位置见图4)

Fig. 8 Seismic section showing abyssal honeycomb topography in the northern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 4)

右,称为波浪型“微洼陷”,具有深度小、顶部起伏幅度小、内壁平缓的特点(图8)。

深海蜂窝状地貌由块体搬运形成。研究区块体搬运在地震剖面上呈现为杂乱的地震反射特征,底界面发育侵蚀沟谷,内部发育多个侵蚀界面及断

层(图8)。快速堆积的沉积物,由于内部压实排水作用较弱,且未完全固结成岩,在重力作用下从南部斜坡向北部平原区滑动(图2),周围的地层被不断捕获,经过不断搅拌、挤压,在开阔地带散开,失去动能后逐渐沉积下来<sup>[31]</sup>,形成该类型海底地貌。



### 3.2.2 深海海山

深海海山在 seismic 剖面上呈明显的、孤立的突起状外形特征(图9),相较于周围海底高出400~1 000 m,有些甚至出露地表,形成岛屿,如中建岛等。由于海水与下伏地层有明显的波阻抗差别,海山顶界面表现为强振幅、强连续反射;其侧翼地层陡峭,受地震资料成像方法的制约,地震反射连续性变差。海山内部可见明显的多次波反射(图9),即具有与海山顶反射形态相似、与海山顶面到海面的时间相等或成倍数增加、向下逐渐收敛的特征,这是因地震资料处理过程中多次波去除不彻底造成的。小规模海山平面形态多呈近圆形或近椭圆型;大规模海山总体呈不规则长条形,长轴

方向约为15~20 km,短轴方向约为5~8 km。沿着海山周围可见由底流侵蚀作用造成负地形(图2,图6,图9)。

研究区海山是火山活动形成的。西沙海域晚期火山活动频繁,自上新世(5.5 Ma)开始了新一期与岩浆活动有关的构造事件<sup>[32-33]</sup>;杨涛涛等<sup>[34]</sup>基于西沙海域的地震资料识别出晚期活动的海山。地震资料分析表明,研究区火山沿着深大断裂发育,岩浆上涌过程中的挤压作用,对已沉积地层进行挤压和抬升等改造,使得地层原产状发生明显变化。岩浆到达海底时,受海水的冷却迅速凝固,形成陡峭的海山,若海山受到底流的长期侵蚀,则出现向海山“内凹”的特点,使其更为陡峭(图9)。

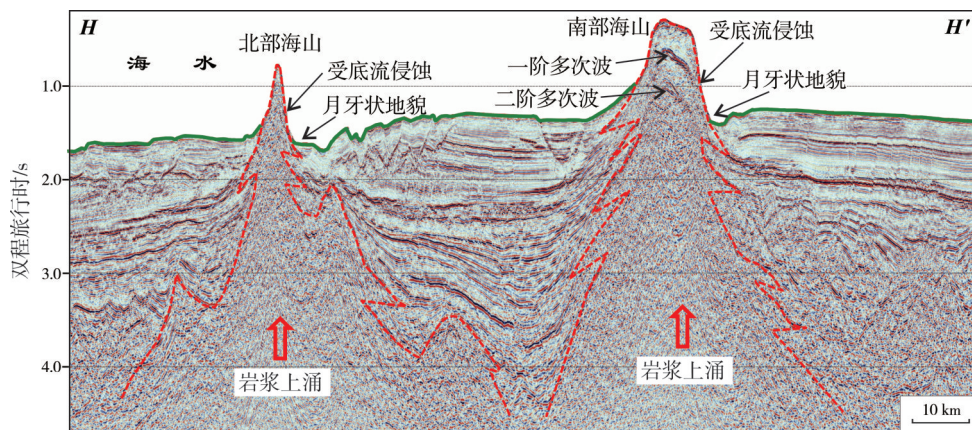


图9 西沙海域地震剖面显示海底斜坡地貌(位置见图2)

Fig. 9 Seismic section showing submarine slope in Xisha sea area (location is shown in Fig. 2)

### 3.2.3 深海月牙状地貌

深海月牙状地貌呈明显下凹的负地形,紧邻海山分布(图6,图7c,图9,图10)。南三维区西北部海山周缘,月牙状地貌的东侧部分狭窄且下凹更明显,可见次级小沟槽与南部斜坡地貌有明显的坡折

边界,深度为100~200 m;西侧部分地貌宽缓,无明显的小沟槽,与南部的斜坡地貌自然过渡,深度约为50~90 m(图6,图10)。研究区月牙状地貌平面上具有两个特征:一是都发育在规模较大海山(北部海山和南部海山)的东南侧(图2,图9),其他方向不明显;二是月牙状地貌的东侧部分规模更大,

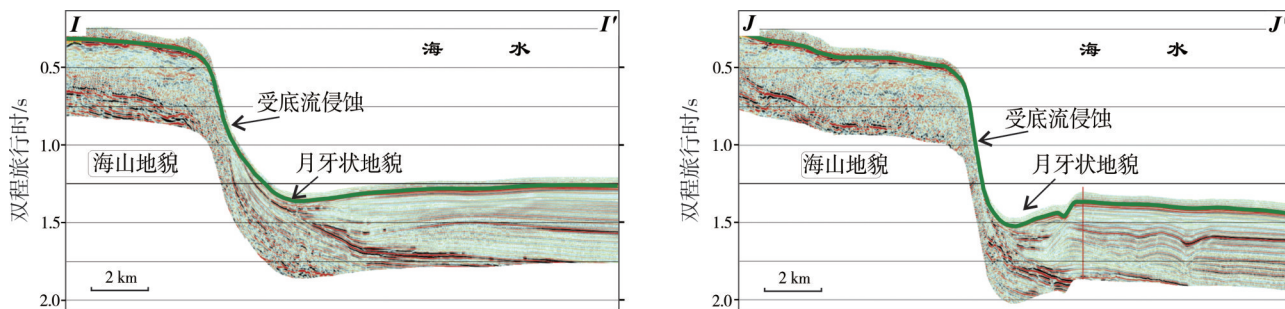


图10 西沙海域南三维区地震剖面显示深海海山和月牙状地貌(位置见图6)

Fig. 10 Seismic sections showing abyssal mountain and abyssal crescent in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 6)

如三维地震资料局部覆盖的南部海山,其月牙状地貌的东侧部分深度约为150 m,宽度为3.6 km,而西侧部分深度约为70 m,宽度为2.5 km(图6)。

月牙状地貌是底流侵蚀形成的。以巴士海峡为通道,太平洋上层水(水深<300 m)和底层水(水深>1000 m)进入南海后,在珠江口盆地南部的陆坡区形成了多种深水底流沉积现象,这已被大量研究成果所证实<sup>[6,35]</sup>。该底流持续向西南方向流动,分成两支,北支沿着西沙海槽流向西南,受越东陆坡的阻挡,向南流过研究区西部;南支沿着中沙海槽向西南流过研究区<sup>[6,36]</sup>。在研究区北部海山和南部海山都识别出明显的侵蚀现象,侵蚀作用使得海山两侧形态有明显的差异,表明受到了底流的改造(图9,图10)。来自东北方向的底流,受到北部海山、南部海山和西南侧的高地形的阻挡(图2),向南转向,同时底流侵蚀并搬运海山南侧未固结沉积物,从而形成了月牙状地貌。该底流对海山东北侧的侵蚀最明显,往西南侧月牙状地貌的下凹逐渐减弱。陈慧等<sup>[37]</sup>发表了在珠江口盆地的研究成果,认为海山周围受底流改造发育明显下凹的负地形。

### 3.2.4 深海似圆状地貌

似圆状地貌以外形近似圆形而命名。地震剖面上,似圆状地貌呈明显的“V”形“微洼陷”,若其规模进一步增大则演变为复式“微洼陷”,呈“W”形(图7b);“微洼陷”深度为40~200 m。似圆状地貌下伏地层与平行—近平行连续反射的围岩有明显的滑

脱面分隔,滑脱面两侧地层错断明显,且产状不同;其内部反射形态较杂乱,小断裂发育(图11)。平面上,似圆状地貌呈圆形—似圆形“洼陷”,与周围平坦海底地貌明显不同(图6);其规模差别大,小的直径约为1 km,大的直径甚至达5 km。似圆状地貌主要分布在南三维区西部或南部西侧,西部的规模大、数量少、内壁相对陡峭,南部西侧的数量多、规模小、内壁相对平缓(图6)。

似圆状地貌实则为海底麻坑。海底麻坑是地层中的流体通过断层和不整合面等通道运移至海底,以快速喷逸或者缓慢渗漏的方式剥蚀海底沉积物所形成的凹坑<sup>[38-40]</sup>。南三维区西部和南部均可形成有效的运移通道,使深部天然气向上运移,在局部聚集(表现为地震反射波频率明显变低、速度降低)。随着气体不断聚集,若突破了上覆地层到达海底,由于瞬时到达的气体量,可在局部造成地层被大量侵蚀缺失,形成似圆状海底麻坑;周围未固结地层失稳向麻坑内滑动,暂时封堵了气体散逸;深部气体不断聚集并再次突破封闭释放。如此重复的过程,在局部形成了规模巨大的似圆状海底麻坑<sup>[41-42]</sup>。滑脱面有利于气体运移,因而靠近滑脱面处“微洼陷”的深度更大(图11)。南三维区西侧是深凹陷区与斜坡区的过渡带,深部张性断层十分发育,浅部多边形断层局部发育<sup>[40]</sup>,形成了数量少但规模大的似圆状地貌;南侧是凹陷和凸起的过渡带,深大断裂与浅部多边形断层均十分发育<sup>[40]</sup>,形成了数量多但规模相对小的似圆状地貌(图6)。

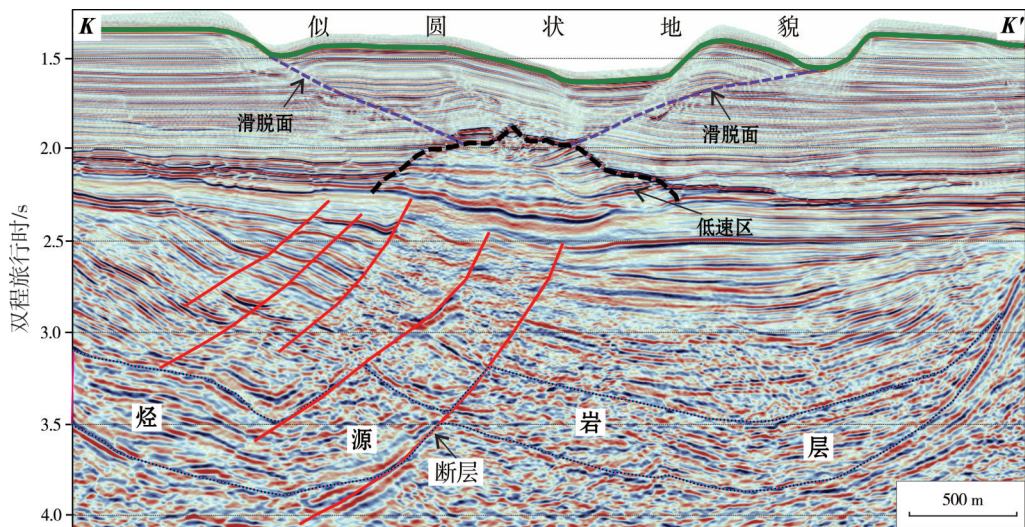


图11 西沙海域南三维区地震剖面显示似圆状地貌(位置见图6)

Fig. 11 Seismic section showing abyssal cone in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 6)



### 3.2.5 深海蝌蚪状地貌

深海蝌蚪状地貌以外形近似蝌蚪而命名。在垂直其走向的地震剖面上呈“V”形“微洼陷”,顶部平坦,两侧内壁坡度大(图7a);在沿着走向的地震剖面上呈复式“微洼陷”,两侧内壁坡度较缓(图12),未见明显的坡折,与邻近的平坦海底呈自然过渡;下伏地层未见明显的滑脱面。蝌蚪状地貌深度为40~90 m,宽度约为1~2 km,长度为5~10 km,主要分布在南三维的东部(图6),总体为近南北走向,呈“北部尾小、南部头大”的形状。

蝌蚪状地貌是受到底流改造的海底麻坑。研

究区在拗陷早期局部有明显的火山活动,受火山作用的影响,断陷期地层发生强烈反转抬升,断层十分发育,上覆地层处于张性环境,使得裂隙发育。深部断层、不整合面和浅部的裂隙带组成运移通道,将深部天然气及浅部水合物分解的甲烷运移到海底形成麻坑。微裂隙带集中的部位气体更容易运移,使得其上的海底麻坑深度更大(图12)。研究区来自东北方向的底流<sup>[43]</sup>,受到南部海山的阻挡,一部分沿着海山南侧继续向西南方向流动,侵蚀海山形成了月牙状地貌;另一部分则转向近南北向流动,改造了海底麻坑,形成了深海蝌蚪状地貌。

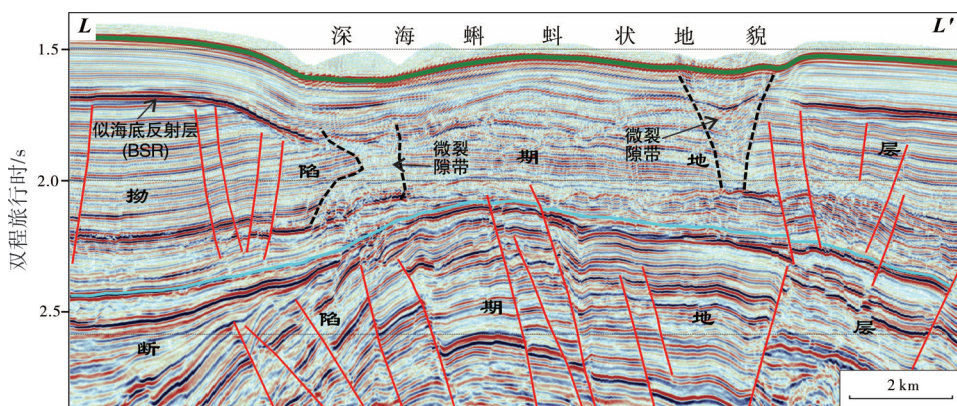


图12 西沙海域南三维区地震剖面显示深海蝌蚪状地貌(位置见图6)

Fig. 12 Seismic section showing abyssal tadpole in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 6)

### 3.3 海槽

海槽地貌总体较平坦,可分为深海海槽和深海条带状共2种地貌(图6,图7,图13)。

#### 3.3.1 深海海槽

深海海槽地貌呈宽缓的负地形,深度约为150 m;

与相邻斜坡自然过渡,无明显的坡折。海槽内部十分平坦,其下伏地层多以填平补齐为主,呈中一弱振幅、中一强连续的平行反射(图13)。平面上,研究区海槽地貌呈北西—南东走向,中部稍向北东凸出,长度约为80 km(图2)。整体来看,海槽地貌的分布具有2个特点:一是中部窄(约为9 km),西北和

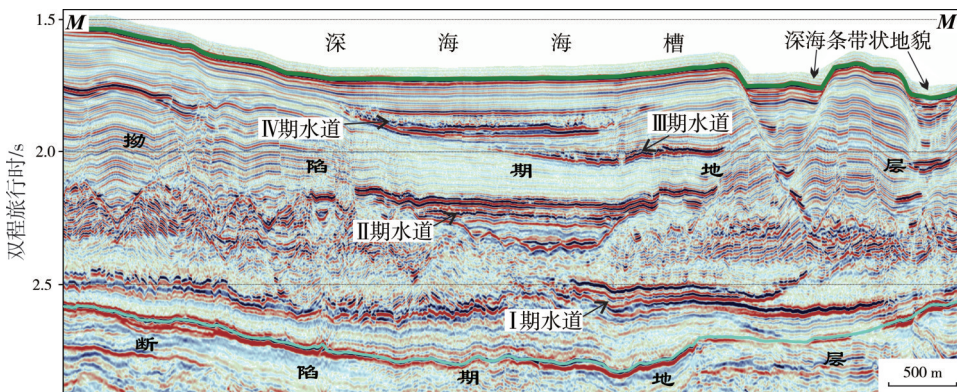


图13 西沙海域南三维区地震剖面显示海槽地貌(位置见图6)

Fig. 13 Seismic section showing trough in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 6)

东南两端宽(约为20 km),向东西两侧逐渐过渡到斜坡区;二是海槽西侧斜坡相对陡峭,东侧除少量陡峭海山外,较平坦(图2,图6)。

深海海槽是在断陷期构造格局和拗陷期沉积作用共同控制下形成的。断陷期末海槽处于相对低部位,拗陷期压实作用使得地形更低,是水道发育的有利区。依据丰富的地震资料,在海槽区的下伏地层中识别出4期水道(图13)。由于水道对下伏地层进行侵蚀,并将侵蚀的物质向更深的地方搬运<sup>[44]</sup>,使得海槽的负地形特征更加明显,形成了深海海槽地貌(图6)。

### 3.3.2 深海条带状地貌

深海条带状地貌因“微洼陷”呈条带状命名。这种地貌在垂直走向的剖面上呈明显的“V”形结构,与深海海槽地貌之间有较明显的坡折,其内壁陡峭,底部较平坦(图13);沿着走向的剖面上呈明

显的“U”形,具有西北侧内壁平缓、东南侧内壁陡峭、底部平坦的特点(图14)。条带状地貌深度约为50 m,主要分布在海槽区东南部,形状近似条带状,长度约为5 km,宽度为2 km;北西—南东走向,具有东西成排、南北分块的分布特点(图6)。

条带状地貌实为海底麻坑。条带状地貌发育区位于凹陷内,深大断裂与浅部多边形断层组成运移通道,深部的流体向上运移,到达海底形成海底麻坑。研究区发育明显的似海底反射(bottom simulating reflector, BSR),具有强振幅强连续反射、与海底极性相反、与海底近平行及有穿层现象等4个明显的地震响应特征,指示存在天然气水合物<sup>[19]</sup>。条带状地貌下伏地层中见有BSR反射,因此下伏地层中水合物分解的甲烷也是形成条带状麻坑的气体来源之一(图14)。若水合物大量分解,在地层本身的压力下,气体不断排出,促使条带状地貌进一步发育。

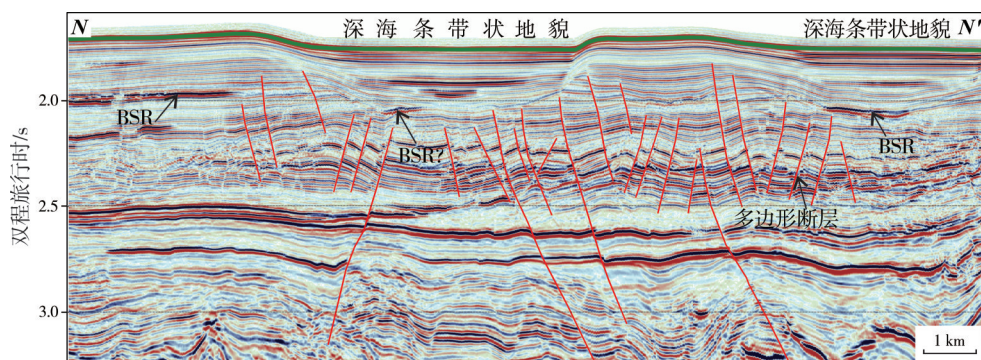


图14 西沙海域南三维地震剖面显示深海条带状地貌(位置见图6)

Fig. 14 Seismic section showing abyssal zone in the southern 3D survey of Xisha sea area (location is shown in Fig. 6)

## 4 海底地貌对地质研究的启示

海底地貌受到构造格局的控制。研究区断陷期形成了隆拗相间的构造格局,拗陷期沉积充填总体受控于早期的构造格局<sup>[36]</sup>,自晚中新世以来进入深水沉积环境,总体上物源贫乏,使得凹陷区成为海底平原,隆拗过渡区成为海底斜坡(图2)。晚期构造事件对海底地貌有一定改造作用。南部海山和北部海山均为火山作用形成,岩浆上涌造成地层反转抬升(图9),形成以海山为中心、周围地层明显抬升的似圆形区域(图2),该区域由于深部断裂及浅部裂隙均发育(图12),形成了深海似圆状和深海蝌蚪状地貌,也对海槽地貌发育有一定控制作用(图6)。

海底地貌对深水沉积研究有指导意义。通过

对现今海底地貌的研究,不仅掌握了陆架—陆坡和深海盆等各海底地貌单元的特点,而且为深入分析深水沉积的类型、产物、形成机制等提供实验场所<sup>[29,44]</sup>。研究区海底地貌的分析,对进一步研究南海北部现代深水沉积、作用和过程有现实的帮助,并通过“将今论古”思想,为老地层中的深水沉积研究和油气勘探提供依据。

海底地貌对地质体展布和海流有明显的指示作用。海底麻坑是下伏地层中的流体运移到海底形成,因此形态多样的海底麻坑可作为指示下伏地层中存在天然气水合物或者深部有热成因气体的证据<sup>[45-46]</sup>。块体搬运(未固结的地层在重力作用下沿着斜坡向下滑动)形成了蜂窝状地貌,该地貌类型可指示块体搬运的规模、强度和运动方向。沿着



海山有明显的月牙状地貌、蝌蚪状地貌等,指示研究区底流发育,对海底地貌有改造作用。

## 5 结 论

(1)西沙海域受陆缘张裂和走滑的双重控制,经历了2个构造演化阶段,受4个物源区的共同影响,充填了陆相—过渡相—海相地层,发育火山、气烟囱、块体搬运和水道等多种地质体,孕育了多种类型的海底地貌。本文完整直观地展示了西沙海域海底地貌,将位于大陆坡的研究区海底地貌细分为海底平原、海底斜坡和海槽等3个三级海底地貌,进一步细分为深海平原、深海水道、深海蜂窝状、深海海山、深海月牙状、深海似圆状、深海蝌蚪状、深海海槽和深海条带状共9个四级地貌。

(2)深海平原、深海水道和深海海槽等3种海底地貌,主要受控于断陷期的构造格局和晚期的沉积充填;深海蜂窝状地貌与块体搬运体系伴生;深海海山为火山活动成因,底流有改造作用;深海月牙状地貌是底流侵蚀的产物;深海似圆状地貌、深海蝌蚪状地貌和深海条带状地貌是气体逸散造成的不同形状的海底麻坑。

(3)海底地貌受到构造格局的控制,坳陷区为海底平原,隆坳过渡区为海底斜坡,晚期火山等构造事件对海底地貌有一定改造作用。对海底地貌特征及成因进行分析,不仅为研究深水沉积、作用和过程提供依据,而且对地质体展布和海流有明显的指示作用,有助于深化西沙海域地质研究。

### 参 考 文 献

- [1] 刘峰,裴健翔,汪洋,等.古地貌对海底扇沉积过程的控制及与油气富集的关系:以莺歌海盆地东方便黄流组一段为例[J].中国海上油气,2015,27(4):37-46.
- [2] 王海荣,王英民,邱燕,等.南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J].海洋学报,2008,30(2):70-79.
- [3] 吴海京,年永吉.南海东部几种典型海底地貌特征的研究与认识[J].地球物理学进展,2017,32(2):919-926.
- [4] 聂琳娟,吴云孙,金涛勇,等.基于海水质量亏损引起的重力异常反演南海海底地形[J].大地测量与地球动力学,2012,32(1):43-47.
- [5] 樊妙,陈奎英,邢喆,等.国际海底地形命名规则研究[J].海洋通报,2012,31(6):661-666.
- [6] 郑红波,阎贫,邢玉清,等.反射地震方法研究南海北部的深水底流[J].海洋学报,2012,34(2):192-198.
- [7] 王海荣,王英民,邱燕,等.南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J].自然科学进展,2007,17(9):1235-1243.
- [8] 王建桥,姚伯初,万玲,等.南海海域新生代沉积盆地的油气资源[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):91-100.
- [9] 姚伯初,万玲,刘振湖.南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J].地球科学(中国地质大学学报),2004,29(5):543-549.
- [10] 闫义,夏斌,林舸,等.南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):53-61.
- [11] 夏斌,崔学军,谢建华,等.关于南海构造演化动力学机制研究的一点思考[J].大地构造与成矿学,2004,28(3):221-227.
- [12] 姚伯初.南海盆地的新生代构造演化史[J].海洋地质与第四纪地质,1996,16(2):1-13.
- [13] 李倩倩,鲍李峰.高精度测高重力场反演南海海底地形[J].海洋测绘,2016,36(2):1-5.
- [14] 杨涛涛,吕福亮,王彬,等.南海北部深水西区中中新世混合沉积模式及控制因素[J].海相油气地质,2010,15(4):30-34.
- [15] 杨涛涛,吕福亮,王彬,等.西沙海域生物礁地球物理特征及油气勘探前景[J].地球物理学进展,2011,26(5):1771-1778.
- [16] 杨涛涛,吴敬武,王彬,等.琼东南盆地华光凹陷构造特征及沉积充填[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(5):13-18.
- [17] 杨涛涛,王彬,吕福亮,等.相干技术及其在西沙周缘深水区油气勘探中的应用[J].热带海洋学报,2013,32(3):16-21.
- [18] 杨涛涛,吕福亮,王彬,等.琼东南盆地南部深水区气烟囱地球物理特征及成因分析[J].地球物理学进展,2013,28(5):2634-2641.
- [19] 杨涛涛,吕福亮,王彬,等.西沙海域南部天然气水合物发育特征及成藏模式[J].海相油气地质,2014,19(3):66-71.
- [20] WANG Weiwei, WANG Dawei, SUN Jin, et al. Evolution of deepwater turbidite bedforms in the Huaguang channel-lobe transition zone revealed by 3D seismic data in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Geomorphology, 2020, 370: 1-15.
- [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] 陈洁,温宁.南海地球物理图集[M].北京:科学出版社,2010:1-8.
- [23] 陈义兰,刘乐军,刘晓瑜,等.深海油气勘探中的海底地形勘测技术[J].海洋测绘,2015,35(2):18-22.
- [24] 朱伟林,米立军,张厚和,等.中国海域含油气盆地图集[M].北京:石油工业出版社,2010:110-125.
- [25] 谢玉洪,李绪深,范彩伟,等.琼东南盆地上中新统黄流组轴向水道源汇体系与天然气成藏特征[J].石油勘探与开发,2016,43(4):521-529.
- [26] 姚根顺,吕福亮,范国章,等.深水油气地质导论[M].北京:石油工业出版社,2012:140-210.
- [27] 袁圣强,曹锋,吴时国,等.南海北部陆坡深水曲流水道的识别及成因[J].沉积学报,2010,28(1):68-75.
- [28] SUN Qiliang, WU Shiguo, THOMAS L, et al. Geophysical evidence for cyclic sediment deposition on the southern slope of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Marine geophysical research, 2011, 32(3): 415-428.
- [29] 王大伟,吴时国,王英民,等.琼东南盆地深水重力流沉积旋回[J].科学通报,2015,60:933-943.
- [30] 李丽,吕福亮,范国章,等.海洋深水水道地震综合解释技

- 术研究:以南海北部陆坡区更新统深水水道为例[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1020-1025.
- [31] 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, 2019, 29(5): 65-72.
- [32] 张峤, 吴时国, 吕福亮, 等. 南海西北陆坡火成岩体地震识别及分布规律[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 919-938.
- [33] 赵强. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010: 110-116.
- [34] 杨涛涛, 吕福亮, 李林, 等. 西沙海域上新统一全新统高伽马地层的发现及地质分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2526-2532.
- [35] 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2007, 37(6): 771-777.
- [36] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海东北部台湾浅滩陆坡的浊流沉积物波的发育及其成因的构造控制[J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 39-45.
- [37] 陈慧, 解习农, 毛凯楠. 南海北缘一统暗沙附近深水等深流沉积体系特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(4): 733-743.
- [38] WEBB K E, HAMMER O, LEPLAND A, et al. Pockmarks in the inner Oslofjord, Norway[J]. *Geo-Marine letters*, 2009, 29(2): 111-124.
- [39] ONDRAS H, OLU K, FOUQUET Y, et al. ROV study of a giant pockmark on the Gabon continental margin [J]. *Geo-Marine letters*, 2005, 25(5): 281-292.
- [40] 杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 等. 西沙海域南部多边形断层的发现及其分布特征与控制因素[J]. 海相油气地质, 2017, 22(1): 84-88.
- [41] LU Yintao, LUAN Xiwu, Lü Fuliang, et al. Seismic evidence and formation mechanism of gas hydrates in the Zhongjian-nan Basin, western margin of the South China Sea[J]. *Marine and petroleum geology*, 2017, 84: 274-288.
- [42] SUN Qiliang, WU Shiguo, HOVLAND M, et al. The morphologies and genesis of mega-pockmarks near the Xisha Uplift, South China Sea[J]. *Marine and petroleum geology*, 2011, 28(6): 1146-1156.
- [43] 拜阳, 宋海滨, 关永贤, 等. 利用反射地震和多波束资料研究南海西北部麻坑的结构特征与成因[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 2208-2222.
- [44] LU Yintao, LI Wei, WU Shiguo, et al. Morphology, architecture, and evolutionary processes of the Zhongjian Canyon between two carbonate platforms, South China Sea [J]. *Interpretation*, 2018, 11: 1-14.
- [45] KAYEN R E, LEE H J. Pleistocene slope instability of gas hydrate-laden sediment on the Beaufort Sea margin[J]. *Marine geotechnology*, 1991, 10: 125-141.
- [46] 罗敏. 南海西沙西南海底麻坑区生物地球化学过程、麻坑活动性以及麻坑形成时间研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 59-80.

编辑: 董庸

## Characteristics and genesis of various seafloor topography in Xisha sea area, South China Sea

YANG Taotao, LÜ Fuliang, LU Yintao, WANG Xuefeng, WANG Xin, LI Li, ZHANG Yuanze

**Abstract:** Xisha sea area is located in the continental slope area of the northwest South China Sea. Controlled by continental margin tension and strike slip, it has experienced two tectonic evolution stages: faulted period and depression period. Influenced by Yuedong, Red River, Hainan Island, and Xisha provenances, it fills the continental-transitional-marine strata. There are many kinds of geological bodies such as volcano, gas chimney, MTC, channel, which give birth to various types of seafloor topography. Based on abundant 2D and 3D seismic data, 3D visualization and other technologies are applied to display the seafloor topography of Xisha sea area completely and intuitively. The seafloor is divided into 3 kinds of 3rd-order topography: submarine plain, submarine slope, and trough, which are subdivided into 9 kinds of 4th-order topography, including abyssal plain, abyssal channel, abyssal honeycomb, abyssal mountain, abyssal crescent, abyssal cone, abyssal tadpole, abyssal trough, and abyssal zone. Combined with the geological conditions, the main controlling factors of the formation and distribution of various topographies are analyzed: abyssal plain, abyssal channel, and abyssal trough are mainly controlled by the tectonic framework in the faulted period and the late sedimentary filling; abyssal honeycomb is associated with the MTC system; abyssal mountain is caused by volcanic activity, and the bottom current has transformed it; the abyssal crescent is the product of the erosion of bottom current; abyssal cone, abyssal tadpole, and abyssal zone are different shapes of submarine pockmarks caused by gas escape. This is helpful to the further study of the structural characteristics, deep-water sedimentary types and distribution, geological body distribution and ocean current in Xisha sea area.

**Key words:** seafloor topography; seismic characteristics; genesis; continental slope; abyssal sea; Xisha sea area; South China Sea

**YANG Taotao**, First author: MSc, Senior Geophysicist, mainly engaged in offshore petroleum geology and comprehensive evaluation. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China