

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.005

碳酸盐台地周缘西沙海槽现代地质过程

——来自“深海勇士号”载人潜器深潜观测

陈万利

中国科学院深海科学与工程研究所海底资源与探测技术重点实验室, 三亚 572000

摘要: 西沙海槽长期活跃于南海北部, 记录了南海的深部演变过程, 有特殊的地质研究意义。基于对西沙海槽的深潜实地考察, 发现了槽底平原可分为小型谷、大型对称脊和顶平对称脊等次级地貌, 可能是槽坡上较强的重力流和近东西向的槽底等深流共同作用的结果。此外, 还发现一些成群分布的小型丘体, 推测可能是超压气体释放喷口或者为生物栖居巢穴; 西沙海槽生物类型相对单一, 数量小, 其生物生存条件较为苛刻, 为海底中的“沙漠”。该区的泥质沉积中含有异常高压气体, 其成因可能是沉积物快速堆积导致。

关键词: 深潜实地考察; 地形地貌; 生物种类; 异常高压气体; 西沙海槽

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Modern geological processes in the Xisha Trough on the margin of a carbonate platform: Evidence from the geological observation by manned submersible

CHEN Wanli

Laboratory of Marine Geophysics and Georesources, Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

Abstract: The Xisha Trough in the northern part of the South China Sea has existed for a long time. Deepwater processes of the South China Sea are well recorded in the trough. Therefore, it has special implications for deepwater geology. According to the geological observation of the manned submersible, the bottom plain of the trough can be subdivided into several sub-order geomorphic units, such as small grooves, large symmetrical ridges and flat-top ridges, as the results of the joint action of episodic turbidity current and near east-west bottom flow. Some small sand dunes are also observed, which are interpreted as the nozzle of overpressure gas or living caves of small animals. In the Xisha Trough, biological diversity is low since the small number of species and the harsh living conditions. It could be called the “desert of seabed”. Abnormal high pressure gas is found in the argillaceous sediments in this area, probably caused by high rate of sedimentation.

Key words: geological observation by manned submersible; topographic features; biological species; abnormal high pressure gas; Xisha Trough

由于人类下海能力有限, 过去深海海底都被认为是平坦且平静的沉积物保留场所。随着地球物理勘测技术的发展, 海底及掩埋在海底之下的地层的外部形态和内部结构才得以成像出来。然而由于地球物理技术的瓶颈, 人类对海底的认识大部分停留在对海底及其以下地层反射的相关信号处理及图像的解释, 难免受到信号采集的分辨率和多解性限制

而产生认识上的偏差。深海载人潜水器的发明实现了人们对深海海底的直接观测, 在 2002 年启动的“蛟龙计划”推动下, 中国已经成为继美国、法国、俄罗斯、日本后第 5 个把人类送到 3500m 海底的国家, 并在 2012 年 7 月 16 日, 开创了同时把 3 个人送到 7062m 的海底的记录, 标志着中国已经掌握了大深度载人深潜技术^[1]。“深海勇士号”载人潜水器是

资助项目: 国家重点研发计划“4500 米载人潜水器的海试及试验性应用”项目(2016YFC0304900); 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题“南海中建海域深水油气地质条件及目标评价”(2017ZX05026-006); 中科院深海科学与工程研究所知识创新前沿课题(SIDSSE201403)

作者简介: 陈万利(1990—), 男, 在读博士, 主要从事海洋地质、海洋地球物理方向的研究, E-mail: chenwl@idsse.ac.cn

收稿日期: 2018-06-26; **改回日期:** 2018-09-14. 文凤英编辑

中国自主研发的第二台深海载人潜水器,水下作业最大深度达4500m,海试及科学应用过程中已创造多个国内及世界纪录,且已掌握夜间下潜实验的能力。“深海勇士号”南海TS07航次第4航段主要在西沙海槽海域进行下潜,科学任务是在西沙海槽及北缘滑坡体开展深海过程的观测、样品采集与实验。作者本人很荣幸参加了该航次,并且作为潜航科学家,在2018年6月2日执行了“深海勇士号”第86次潜航,本文基于本次“深海勇士号”载人深潜观测,认识台地周缘西沙海槽的地形地貌和现代沉积过程。

西沙海槽槽底和槽坡上发育的与重力流相关的深水地形一直是国内外研究的重点^[2,3]。在Nor-mark等利用勘探地震在Monterey峡谷发现重力流成因的沉积物波后^[4],美国地质调查局在1993—2011年间对Monterey海底峡谷陆续开展了3次观测,每次时长为一年,共收集到7次浊流过程中悬浮的沉积物样品及流动参数^[5],之后类似浊流成因的沉积物波也在加那利岛的海底斜坡上被发现^[6]。浊流形成的底形还能在水槽实验中观察到,并且能通过数值模拟呈现出来^[7]。国内对重力流成因的深水底形的研究较晚,Xu用实测的浊流参数验证了实验室所得到浊流流速的参数的实用性^[8],Zhong等利用高分辨率海底地形数据和勘探地震数据研究了南海东北陆坡的周期阶坎底形的形态和内部结构,揭示其成因机制^[9]。

本文主要描述在西沙海槽下潜过程中实地观测到的深海底形,推测相关的重力流和底流对底形的塑造作用,其次还对下潜区域的生物群落、底质特征进行了简单的概括。西沙海槽的实地考察发现其槽底平原并不“平”,岩石底质基本为泥质,含有高压气体,有岩石和现代的塑料污染物零星分布,生物发育并不密集,种类相对单一。槽坡上发育的岩石底质为泥岩,有岩石零星分布。本次在该区进行了插入式取样和采水等试验,提出了关于西沙海槽的海底地形、岩石底质、生物分布情况等方面的新认识。此外,本次下潜也为载人深潜的科学考察提供了成功的经验。

1 地质背景

西沙海槽位于中西沙地块与南海北部陆缘地块之间,走向与1000m的等深线近似平行(图1)。西沙海槽最早被认为是一条印支时期的古缝合线,槽中沉积层多属新生代中、晚期产物,局部发育新生代

早期沉积^[10]。之后又有研究报导该区发育一条东西向的西沙海槽断裂,众多数据显示这里是新生代的构造活跃区^[11]。也有结果认为西沙海槽可能属于早新生代开始拉张的裂谷,海槽两侧地壳结构相似,南北呈对称分布^[12,13]。还有学者认为晚中新世琼东南盆地的快速沉降,沉积欠补偿导致了西沙海槽的形成,槽内沉积物主要在晚中新世后开始充填^[14]。Chen等在2016年利用地球物理和物理海洋数据对西沙海槽、海槽北侧的滑坡和南侧的西沙碳酸盐台地区域可能存在的底流进行了研究,发现西沙海槽中存在由东向西的底流,海槽北部受到东西方向的底流影响的同时还有重力流不规则的出现,海槽南部的台地则受来自东北方向流的影响^[15]。Qin等在西沙海槽北部斜坡识别出3个第四纪块体流沉积体系(图1B),并利用地震剖面证据解释了这些块体沉积体系能直接向槽底输送沉积物^[16]。从地震剖面上可以看出,西沙海槽在11.6Ma开始充填,形成时代是中中新世晚期(图1C)。前人基于多波束资料对西沙海槽海域的地形地貌特征和成因做了系统的分析,已经把该区大体划分为槽底平原和槽坡,在槽坡上进一步划分了阶地、冲刷沟谷等次一级地貌单元^[17]。然而,这些研究大多数基于地球物理和少数钻孔资料,没有进行实地考察的案例。本文从现场考察视角对西沙碳酸盐台地周缘深部西沙海槽现今的生态环境和存在的底形进行了初步的描述和探讨,希望能为正确理解西沙海槽底形及过程演变提供一定的素材。

2 地形地貌与沉积动力过程

2.1 多波束地形勘测与观测路线

在载人潜器下潜之前,我们先利用船载的EM122(波束开角130°)对该区进行了小范围高精度的多波束地形勘测(图1),用于西沙海槽地形单元的初步识别和潜器路线的规划。西沙海槽主要由槽坡和槽底平原组成,从地形图上也可看出槽底平原比较平坦而分辨不出任何次级地貌单元,槽坡有一定的坡度,与槽底平原间有明显的坡折(图2、图3)。从横切面上可以看出,槽底平原3100~3103m水深的地形坡度小于0.1°,在3060~3100m水深的地形坡度为1°~1.5°,槽坡区坡度大约为8°(图3)。此外,西沙海槽槽坡上还发育冲刷沟谷和滑坡体等次级地貌。由于潜器的航行速度及航行时间上的限制,规划的实地观测路线近垂直于海槽走向(图2),

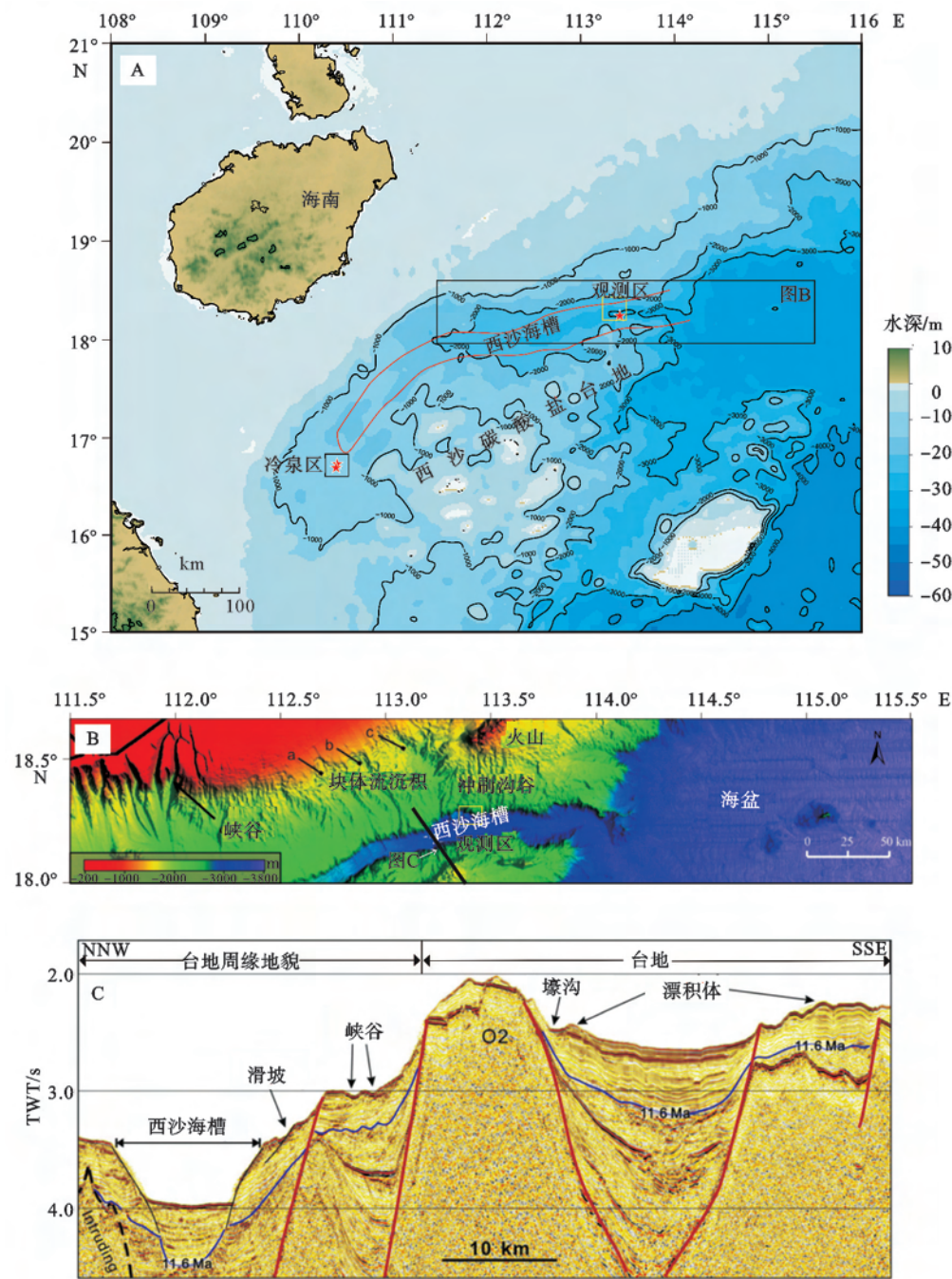


图 1 西沙海槽地理位置(A)、多波束地形地貌(B)及过海槽的地震剖面(C)
图 A 的五角星为深海勇士号下潜点位置,黄色方框为西沙海槽北缘滑坡体下潜观测点附近多波束地形勘测范围。
黑色方框是生物生长旺盛的冷泉区。图 B 为西沙海槽区域地形图,来源于 Qin 等,略有修改^[15]。
黑色线表示跨越西沙海槽的地震测线位置。图 C 的地震解释结果来源于 Chen 等,略有修改^[14]
Fig.1 Geographic location, topography and seismic profile of the Xisha Trough in the South China Sea

观测的重点放在槽底—槽坡方向上的环境及地形特征和变化规律。潜器下潜的最大深度为 3103m,下潜到目的点后我们先进行槽底平原地形的观测,然

后再沿着槽坡往上爬坡进行地形观测(图 2、图 3),现场的地形地貌描述如下。

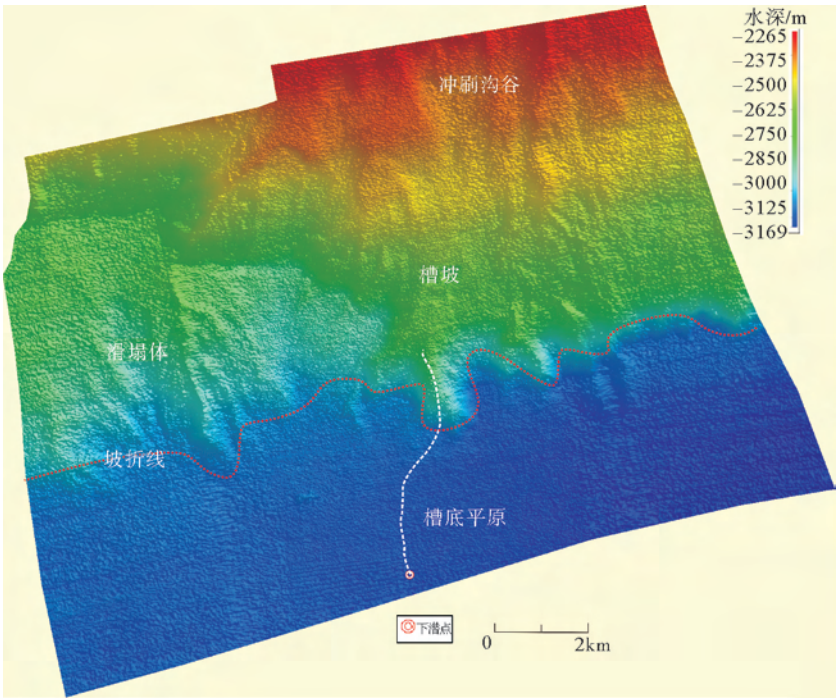


图 2 西沙海槽北缘沉积体多波束地形图
白色为载人潜器观测路线
Fig.2 Geomorphologic map of the northern Xisha Trough

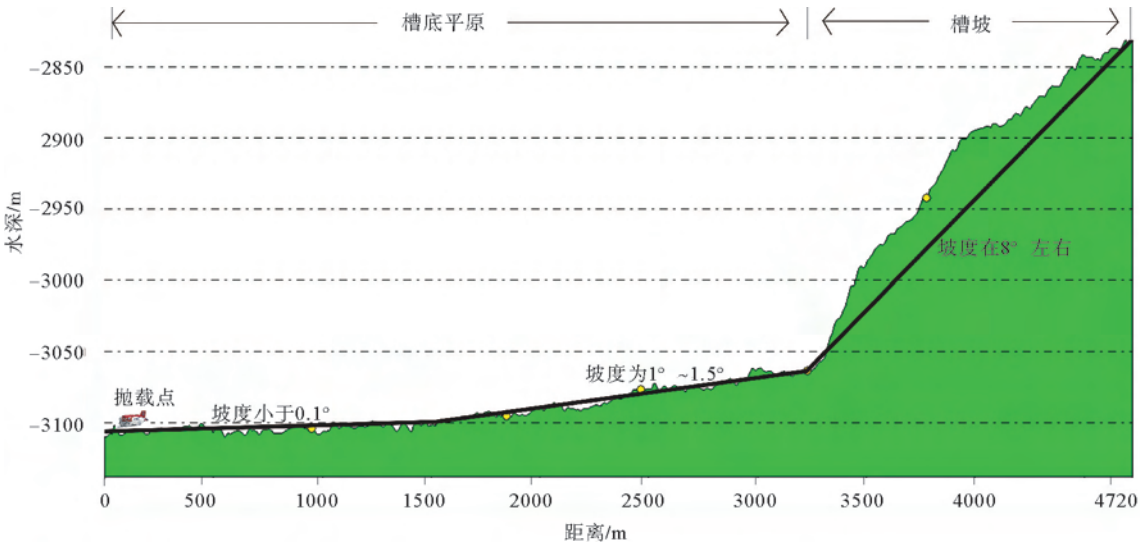


图 3 载人潜器观测路线的海底地形变化
Fig.3 Morphologic profile along the route of the manned submersible observation

2.2 槽底平原

由于船载仪器所测得的地球物理数据精度随着水深的加深而降低,槽底的地形地貌不能在地球物理数据上显示,导致槽底平原现代地貌特征在以往的文献描述中是纵向起伏小,横向地形平坦,很少发育次一级的地形地貌^[17]。然而,在西沙海槽槽底的近底观测中,发现实际的槽底地形地貌和前人所描

述的并不同,先后识别出了一系列近东西走向的小型对称谷(图 4A)、大型的对称脊(图 4B)、顶平对称脊(图 4C)、顶平对称脊翼部的早期滑塌体和台阶(图 4D)、小型泥丘(图 4G),在槽底和槽坡都发现一些零星分布的岩石和塑料污染物。

(1) 小型对称谷(Groove)

小型对称凹槽发育于槽底平原中部,水深在 3100 以下,槽坡上没有发育该地貌类型。谷宽度大

约为 3m,深度不到 1m,近东西走向,一般这种地貌分布的周围地形都比较平缓,底质几乎为成分较细的泥质沉积,只见比较轻的塑料污染物,不见较重的外来岩石。

(2)大型对称脊(Ridge)

大型的对称脊发育于槽底平原中部和北部,水深范围为 3100~3060m,槽坡上不发育该地貌类型。脊宽度大约为 20m,高度大约为 10m,近东西走向,两脊之间成谷,底质大部分为成分较细的泥质

沉积。

(3)大型顶平对称脊(Ridge)

大型顶平对称脊发育于槽底平原中部和北部,与对称脊相互伴生,水深范围为 3090~3050m,脊宽度为 40 多米,高度为 20 多米,规模上要比对称脊大一倍,其顶部为 30 多米宽的平地。在脊翼部发现早期已成岩的岩石露头(图 4D),推测为早期的沉积体。脊翼部成台阶状(图 4D,E),台阶之间坡角能达到 60°。脊顶部平地上能看到零星分布的外来岩

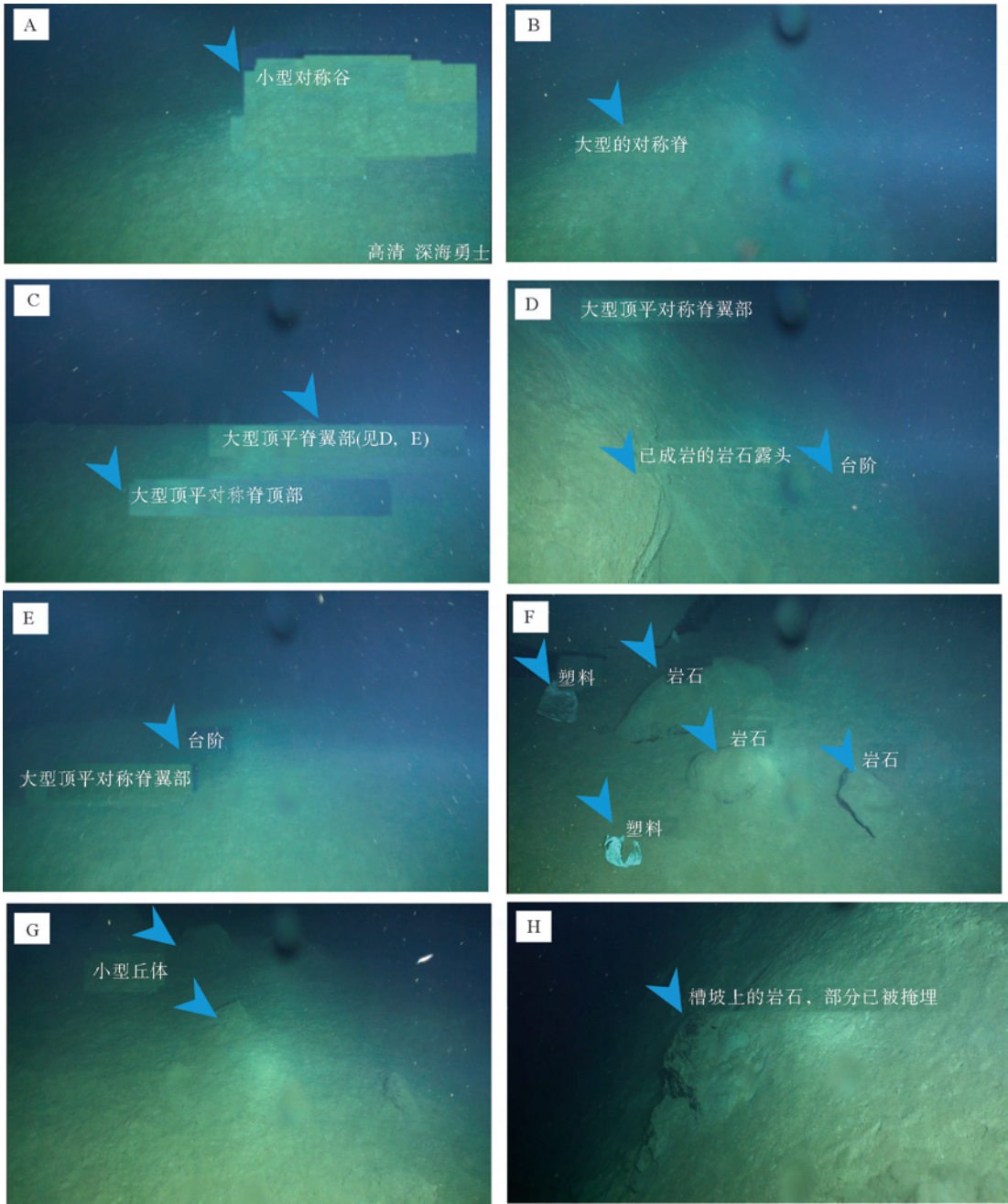


图 4 西沙海槽地貌与沉积体摄像

其中 A-G 位于槽底平原区,H 位于槽坡区

Fig.4 Photos of modern bottom morphology and deposition in Xisha Trough

石和塑料污染物,岩石大小不一,最大的长轴直径约30cm,最小的长轴直径约5cm(图4F),底质主要是成分较细的泥质沉积。

(4) 小型丘体

小型丘体分布于顶平对称脊的顶部,高30cm左右,宽10cm左右,一般6~7个丘体集中分布(图4G)。另外,在槽坡上也能观测到此类地貌。

2.3 槽坡

坡折线北部为西沙海槽的槽坡区,该区的次级地貌单元基本在地形图上都能识别出来(图2)。本次实地观测结果显示槽坡区底质基本为未成岩的泥质沉积,在槽坡上也能发现零星分布的外来岩石,岩石的长轴直径50cm左右,部分已被掩埋(图4H),但是没有发现已经成岩的岩石露头。

2.4 沉积动力过程

基于地球物理和物理海洋方面的数据,前人已经对西沙海槽深水沉积体系及沉积动力做了研究^[14,15,18]。自晚中新世以来槽坡上发育的是浊流滑塌沉积体系(图1),这一点与我们实地考察结果是一致的。在槽底平原我们观察到了地球物理数据没有分辨出来的地貌特征,那便是一系列走向为近东西向的大型对称脊、对称顶平脊和小型谷等,且脊的翼部和顶部都有零星的外来岩石分布。Qin等利用地震剖面证据证明了西沙海槽北部斜坡重力流沉积体系能直接向槽底输送沉积物^[16]。此次发现的外来岩石可能来源于西沙海槽北部的火山,塑料污染物可能来源于陆地,也是被重力流通过斜坡上的冲刷沟谷带到槽底平原之中的(图1B)。延着观测路线,从南到北,首先在水深大于3100m的槽底平原观测到的是小型谷,靠近西沙海槽平原中部,地形起伏小,由于距离西沙海槽北部较远,观测不到由重力流搬运下来的岩石,所以推测该区受西沙海槽北部斜坡重力流影响较小,输送的沉积物也少,仅受西沙海槽槽底由东向西的等深流^[15]改造而形成该地貌。在水深3060~3100m的槽底平原,地形坡度为 $1^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$,发现大型的对称脊之后,又观测到比对称脊规格大一倍的大型顶平对称脊。在顶平对称脊的顶部还发现外来岩石和塑料污染物,说明在该区受重力流的影响较大,该区主要是泥质沉积,推测该区主要受到来自北部槽坡的浊流的影响,发现的岩石长轴直径达30cm,说明重力流的搬运能力很大,不仅以浊流的形式,还有可能夹杂着碎屑流。在顶平对称脊的翼部还能发现早期已成岩的沉积体露头,说明

该区受到多期重力流的影响。浊流是沿着水下斜坡或海底峡谷流动、携带有大量泥沙的高密度流体,是重力流的一种特殊形式^[3]。Zhong等发现浊流作用在下游较平缓的区域形成的周期阶坎是净沉积成因,在 $0.26^{\circ}\sim 1.24^{\circ}$ 之间能形成周期性阶坎^[9]。结合船载的多波束数据,在3060~3100m的槽地平原发育的地形坡度为 $1^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$,地貌存在发生浊流作用的可能性,其中还同时存在有碎屑流等多种重力流类型的影响,更多的认识还有待后期系统的研究继续发现。该区物理海洋模拟结果显示西沙海槽槽底的地形地貌长期以来受到南海深层水的改造作用,存在沿着西沙海槽北缘,由西向东的等深流^[15]。因此,结合所有结果,可初步认为实地观测到西沙海槽槽底现今的地貌由北部槽坡比较强的重力流和近东西向较弱的等深流共同作用的结果,且重力流塑造作用强,等深流塑造作用则相对较弱。此外,需要补充说明的是在西沙海槽其他槽段下潜的观测发现这类地形并不是在西沙海槽整段槽底都有分布,各个地方的分布特点和规模都是不一样的,作者下潜的西沙海槽的东段槽底更为发育,可观察到的零星岩石也多一些,西沙海槽其他位置的下潜实地考察情况还有待其他下潜科学家进行补充。

3 西沙海槽生物群落

目前还没有关于西沙海槽的生物群落研究的文献资料,本次西沙海槽的现场考察对该区的生物进行了初步观察和描述,尚待进一步种属鉴定。观测结果与西沙群岛西部的海马冷泉区生物群进行对比,发现西沙海槽区发育的生物量小,物种相对单一。

(1) 鱼类

鱼类大多数为头部较大的蝌蚪状鱼,长约十多公分,喜欢待在原地一动不动,但是游泳速度很快,很灵活(图5A)。基本上潜器航行20m就能看到一只,鱼在槽底的分布密度比槽坡要大,该鱼类多在西沙海槽的海底生活,为西沙海槽的特有鱼种。

(2) 海参

海参是西沙海槽发育最多的生物,大多数海参是紫色的(图5B),少数为白色(图5C),大小不一。紫色的海参约20m有一只,在槽坡和槽底上分布密度一样。白色海参在斜坡上发现了一只,分布密度很小。

(3) 海绵

西沙海槽的海绵分布密度很小,整个航行过程

中只发现了一只,海绵高度为 10 cm 左右,比其他地区的海绵要矮很多(图 5D)。

(4) 木头上的生物

本次我们发现了两块木头,大量生物在分支上生长(图 5E),还有铠甲虾栖居在木头上(图 5F),但铠甲虾的数量少,一般就 3 只左右。从而可以看出,在西沙海槽区,生物赖以生存的资源贫瘠,该区相当于海底中的“沙漠”,像木头这种外来物都能为生物提供一片“绿洲”,生物大量栖居在木头上,造就一个小的生态系统。

(5) 西沙海槽区与海马冷泉区的生物群对比

黑色方框圈定的是海马冷泉区的位置(图 1),

基于地球物理和地球化学资料,前人已经发现海马冷泉区海底存在来自深部地层的甲烷气体^[19-21]。本航次中其他科学家也在海马冷泉区进行下潜作业,发现该区发育大量的生物群,种类繁多,数量巨大。此外,科学家们也在水中观察到大量的气泡(图 5G),对获取的泥质沉积物进行了测试,确定存在甲烷气体。甲烷气体能为生物提供非常丰富的生命物质来源,因此,在海马冷泉区能观测到深海贻贝、铠甲虾、管虫等,生物种类繁多且数量巨大(图 5H)。与冷泉区的生物群相比,西沙海槽区观测到的生物物种相对单一,种类稀少,可以看出该区对生物生长的条件相对苛刻。

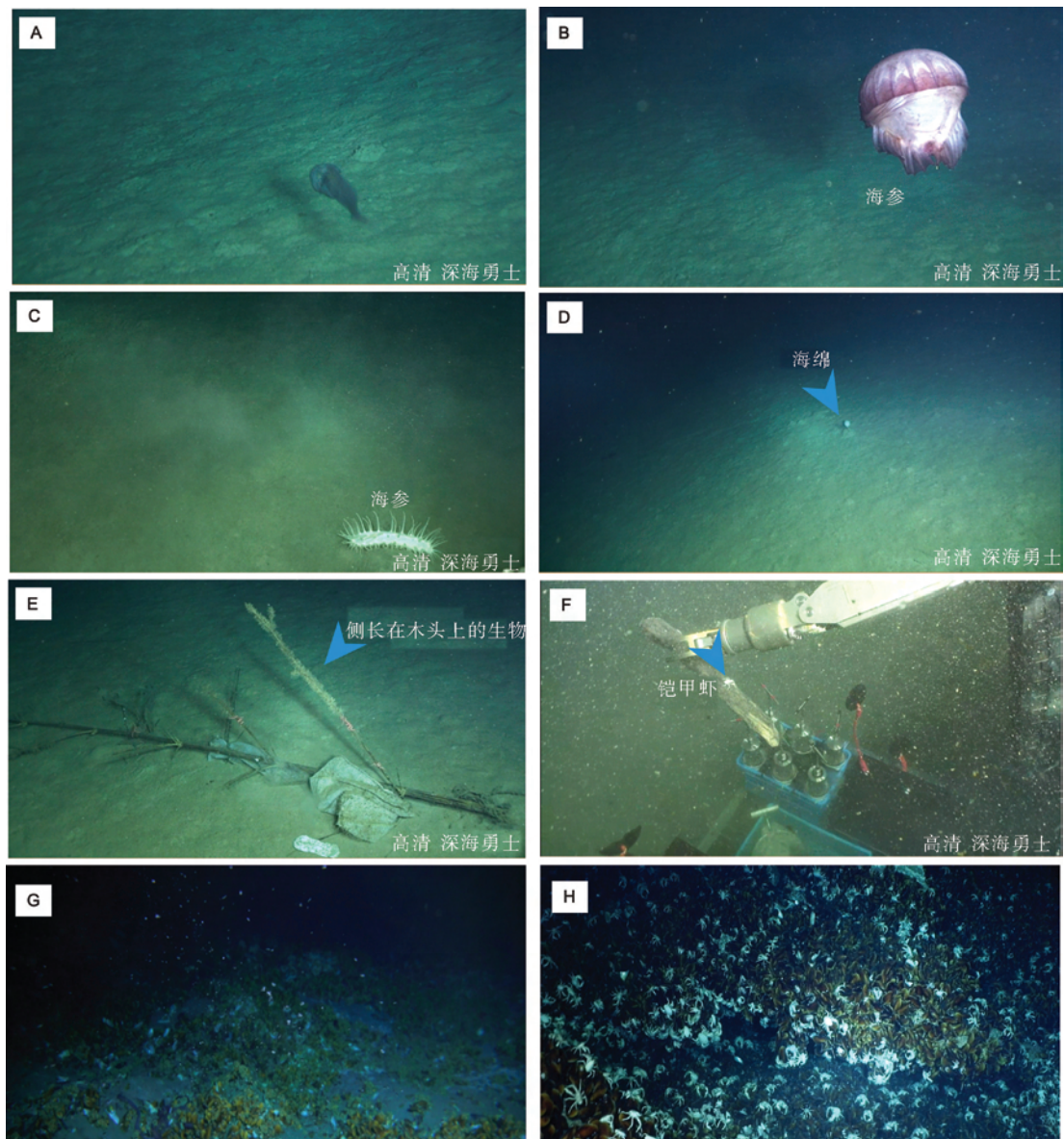


图 5 不同海区生物群

A-F 为西沙海槽区, G、H 为冷泉区

Fig.5 Biological communities in different sea areas

4 海底浅层沉积物

为了揭示海底沉积物的属性和沉积过程,本潜次共取得插入式取样器沉积物样品 5 管,编号为 Pushcore-1 #, Pushcore-2 # (图 6A), Pushcore-3 # (图 6B), Pushcore-4 # 和 Pushcore-5 #。岩石样品 1 块,编号为 SY086-G01。SY086-G01 为中性岩,浅灰色,长宽高约为 $16\text{cm} \times 7\text{cm} \times 5\text{cm}$,重约 0.7kg,质硬,可见白色晶斑,暗色矿物比浅色矿物多(图 6C)。插入式取到的 6 管沉积物长度在 15~22m 之间,顶部为浅黄色沉积物,颗粒较细,含水量高;底部为深灰色泥质沉积物,含水量低,细腻,黏性小,可见白色小颗粒有孔虫。值得注意的是,潜器上浮到浅水时,可观察到泥土采集器内不断冒泡,且水深越浅,气泡越多(图 6D)。前人分析过西沙海槽的海底表层沉积物,结果显示沉积物中含有甲烷气体,并且该区具备良好的气体运移通道^[22],另外也有文献报导该区的冷泉碳酸盐岩^[23]。载人潜器在用插入式样品采集器进行作业时(图 6E),可以将泥土中包含的天然气水合物一起采集上来,在潜器回收上浮到浅水时,温压条件改变,可使采样器中的水合物分解释放出甲烷气体。然而,再结合该区的生物群落观

测,并没有发现类似冷泉活动区的繁盛生物群落,因此尽管前人已在该区发现甲烷气体活动证据,但在该区的泥质沉积物可能不会保存大量甲烷气体,这些气体可能是沉积物快速堆积所保留的异常高压气体。

5 结论

(1)在槽底平原观察到了地球物理数据没有分辨出来的地貌,为一系列走向近东西向的大型对称脊、对称顶平脊和小型谷等,且脊的翼部和顶部都有零星的外来岩石分布,结合所有结果可初步判断实地观测到的西沙海槽槽底现今的地貌是由北部槽坡比较强的重力流和近东西向较弱的等深流共同作用的结果。

(2)西沙海槽生物种类相对单一,数量少,其生物生存的条件较为苛刻,为海底中的“沙漠”。结合该区的生物群落观测,并没有发现类似冷泉活动区的繁盛生物群落,因此尽管前人已在该区发现甲烷气体活动证据,但在该区现今的泥质沉积物可能不会保存大量甲烷气体,潜器上浮过程中采样管里喷出的气泡可能是沉积物快速堆积所保留的异常高压气体释放形成的。

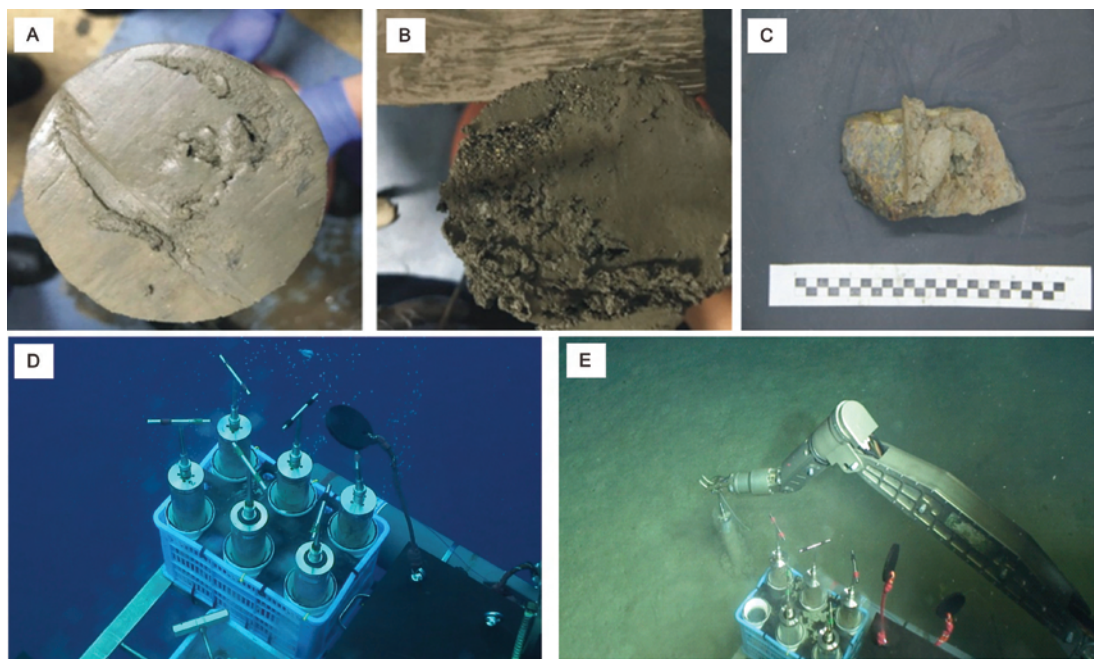


图 6 采样和样品照片

A,B 为 Pushcore 样品照片;C 为岩石样品;D 为潜器上浮到浅水时,泥土内的高压气体渗出,疑似甲烷气体释放;E 为载人潜器机械手用 Pushcore 采集器采样照片

Fig.6 Samples collected by manned submersible

(3)应进一步在该区开展 AUV 搭载的多波束近底地形勘测,沉积物采集,有助于进一步理解西沙海槽现代地质过程。

致谢:感谢中国科学院深海科学与工程研究所组织的 2018 年“深海勇士”号试验性应用科考航次 TS07-04 航段为作者提供了此次现场科学考察的机会,在此向“深海勇士号”全体潜航员、“探索一号”全体船员和科学家们一并表示感谢。特别感谢中国科学院深海科学与工程研究所的吴时国老师对本文提出的建设性意见以及中国地质大学(武汉)的孙启良教授对地形地貌命名和成因方面给出的建议。

参考文献 (References)

- [1] 刘保华, 丁忠军, 史先鹏, 等. 载人潜水器在深海科学考察中的应用研究进展[J]. 海洋学报, 2015, 37(10): 1-10. [LIU Baohua, DING Zhongjun, SHI Xianpeng et al. Progress of the application and research of manned submersibles used in deep sea scientific investigations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(10): 1-10.]
- [2] Wang D, Wu S, Wang Y, et al. Deep-water sediment cycles in the Qiongdongnan Basin[J]. Chinese Journal, 2015, 60(10): 933.
- [3] 王大伟, 白宏新, 吴时国. 浊流及其相关的深水底形研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 52-65. [WANG Dawei, BAI Hongxin, WU Shiguo. The research progress of turbidity currents and related deep-water bedforms[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 52-65.]
- [4] Normark W R, Hess G R, Stow D A V, et al. Sediment waves on the Monterey fan levee: A preliminary physical interpretation[J]. Marine Geology, 1980, 37(1): 1-18.
- [5] Wynn R B, Masson D G, Stow D A V, et al. Turbidity current sediment waves on the submarine slopes of the western Canary Islands[J]. Marine Geology, 2000, 163(1): 185-198.
- [6] Cartigny M J B, Postma G, Berg J H V D, et al. A comparative study of sediment waves and cyclic steps based on geometries, internal structures and numerical modeling[J]. Marine Geology, 2011, 280(1-4): 40-56.
- [7] 徐景平. 科学与技术并进——近 20 年来海底峡谷浊流观测的成就和挑战[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 552-558. [XU Jingping. Accomplishments and challenges in measuring turbidity currents in submarine canyons[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(5): 552-558.]
- [8] Xu J P. Normalized velocity profiles of field-measured turbidity currents[J]. Geology, 2010, 38(6): 563-566.
- [9] Zhong G, Cartigny M J B, Kuang Z, et al. Cyclic steps along the South Taiwan Shoal and West Penghu submarine canyons on the northeastern continental slope of the South China Sea[J]. Geological Society of America Bulletin, 2015, 127(5-6): 804-824.
- [10] 姚伯初, 曾维军. 南海西沙海槽——一条古缝合线[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(1): 1-10. [YAO Bochu, ZENG Weijun, CHEN Yi zhong, et al. Xisha Trough of South China Sea—an ancient suture[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(1): 1-10.]
- [11] 万玲, 曾维军, 吴能友, 等. 南海北部陆缘西沙海槽-台湾恒春半岛地质断面[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 564-572. [WAN Ling, ZENG Weijun, WU Nengyou, et al. Geotranssect from Xisha Trough in the northern continental slope of the South China Sea to Hengchun Peninsular in Taiwan[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 564-572.]
- [12] 丘学林, 叶三余. 南海西沙海槽地壳结构的海底地震仪探测与研究[J]. 热带海洋学报, 2000, 19(2): 9-18. [QIU Xuelin, YE Sanyu. OBH experiment and crustal structure of Xisha Trough, South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(2): 9-18.]
- [13] 涂广红, 钟广见, 冯常茂, 等. 南海西沙海槽盆地重磁资料综合研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 963-974. [TU Guanghong, ZHONG Guangjian, FENG Changmao, et al. 2015. Comprehensive Research on Geological Characteristics of Xisha Trough Basin in South China Sea Using Gravity-Magnetic data[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 963-974.]
- [14] 熊斌辉, 刘春成, 郭瑞. 西沙海槽沉积模式[C]// 中国地质学会 2009 年学术年会. 2009: 1-9. [XIONG Binhui, LIU Chuncheng, GUO Rui. The depositional model of Xisha Trough[C]// 2009 annual meeting of the Chinese Geological Society. 2009: 1-9.]
- [15] Chen H, Xie X, Zhang W, et al. Deep-water sedimentary systems and their relationship with bottom currents at the intersection of Xisha Trough and Northwest Sub-Basin, South China Sea[J]. Marine Geology, 2016, 378: 101-113.
- [16] Qin Z, Wu S, Wang D, et al. Mass transport deposits and processes in the north slope of the Xisha Trough, northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(9): 117-125.
- [17] 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. [LIU Fanglan, WU Lushan. Topographic and morphologic characteristics and genesis analysis of Xisha Trough sea area in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 7-14.]
- [18] 熊斌辉. 构造控制下的西沙海槽沉积模式[J]. 海洋石油, 2013, 33(1): 1-6. [XIONG Binhui. Xisha trough depositional model under controlling by structure[J]. Offshore Oil, 2013, 33(1): 1-6.]
- [19] Chen D F, Huang Y Y, Yuan X L, et al. Seep carbonates and preserved methane oxidizing archaea and sulfate reducing bacteria fossils suggest recent gas venting on the seafloor in the Northeastern South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2005, 22(5): 613-621.
- [20] Wang J, Wu S, Kong X, et al. Subsurface fluid flow at an active cold seep area in the Qiongdongnan Basin, northern

- South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168:17-26.
- [21] Liang Q, Hu Y, Feng D, et al. Authigenic carbonates from newly discovered active cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea: Constraints on fluid sources, formation environments, and seepage dynamics[C]//*Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*. 2017: 124.
- [22] 王宏语, 孙春岩, 张洪波, 等. 西沙海槽潜在天然气水合物成因及形成地质模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(4): 85-91. [WANG Hongyu, SUN Chunyan, ZHANG Hongbo, et al. Origin and genetic model of potential gas hydrates in Xisha Trough, South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4):85-91.]
- [23] 陈忠, 黄奇瑜, 颜文, 等. 南海西沙海槽的碳酸盐结壳及其对甲烷冷泉活动的指示意义[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(2): 26-33. [CHEN Zhong, HUANG Qiyu, YAN Wen, et al. Authigenic carbonates as evidence for seeping fluids in Xisha Trough of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(2):26-33.]