

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020110301

基于水下自主航行器(AUV)的神狐峡谷谷底块体搬运沉积特征及其对深水峡谷物质输运过程的指示

刘铮¹, 陈端新^{2,3,4,5}, 朱友生⁶, 张广旭^{2,5,7}, 董冬冬^{2,3,5}

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054
2. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266061
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266071
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
5. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071
6. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300459
7. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266061

摘要:海底峡谷是陆源物质向深海运移的重要通道。对于远离陆地的海底峡谷, 通常认为浊流是物质搬运的主要营力。受限于探测精度和复杂作业环境影响, 使用常规地球物理资料对深水海底峡谷尤其是对谷底沉积体的形态和结构特征的刻画不够精细。基于水下自主航行器(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)采集的高分辨率多波束、旁扫声呐和浅地层剖面资料, 对神狐峡谷群中的一条峡谷的谷底表面及部分浅部地层的沉积特征进行了分析。结果表明, 峡谷谷底浅部地层并不像它平滑的表面那么简单, 而是由大量内部杂乱弱反射、厚度在 8.4 m 及以下的块体搬运沉积体组成。峡谷中下游块体搬运沉积体大都沿峡谷走向整体呈条带状展布, 不是直接来源于相邻的峡谷脊部。研究认为在特定沉积环境下(例如高海平面时期), 陆坡限定性峡谷谷底的块体搬运沉积过程的重复进行是峡谷谷底物质输运的重要途径, 与浊流共同雕刻了峡谷的地形地貌。基于 AUV 的地球物理探测技术将是研究海底浅表层沉积过程和保障海底工程施工的重要手段。

关键词:海底峡谷; 物质输运; 水下自主航行器(AUV); 块体搬运沉积; 神狐峡谷群

中图分类号: P736.21 文献标识码: A

Geophysical studies of mass transport deposits on the slope canyon floor with high-resolution autonomous underwater vehicle (AUV) in the Shenhu area and its implications for sediment transportation

LIU Zheng¹, CHEN Duanxin^{2,3,4,5}, ZHU Yousheng⁶, ZHANG Guangxu^{2,5,7}, DONG Dongdong^{2,3,5}

1. Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen 518054, China
2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266061, China
3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China
4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
6. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China
7. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: Submarine canyons are important pathways for terrestrial sediment moving to the deep water far away from the land, and turbidity current is considered as the primary agent. Detailed sedimentary features of the canyon floor are not clear so far due to the low resolution of conventional geophysical data and complicated operating setting in deep water. Here, in this program, high-resolution autonomous underwater vehicle (AUV) based multi-beam bathymetry data, side-scan sonar data and chirp sub-bottom profiles are jointly used to map the floor of a canyon and image its shallow strata in the Shenhu area. The canyon floor looks quite flat. However, the underlying shallow strata are composed of widespread mass transport deposits (MTDs) which are a little less than 8.4 meters with weak and chaotic acoustic reflections. They are

资助项目:国家自然科学基金面上项目“基于三维地震资料和底边界层潜标观测的珠江迁移峡谷的沉积过程研究”(41776068); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“南海北部海底滑坡形成机制及其与天然气水合物的关系”(GML2019ZD0104)

作者简介:刘铮(1979—), 男, 工程师, 主要从事地球物理综合研究工作, E-mail: liuzheng2@cnooc.com.cn

通讯作者:陈端新(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事深水沉积过程和流体活动研究, E-mail: chenduanxin07@qdio.ac.cn

收稿日期:2020-11-03; **改回日期:**2020-12-28. 蔡秋蓉编辑

distributed along the canyon floor in an elongated shape and show little direct links with adjacent steep canyon ridges at the middle and lower segments of the canyon. Thus, we suggest the repeated mass wasting downslope on the canyon floor is an effective mechanism for sediment transportation in addition to turbidity currents. The AUV based geophysical exploration is a efficient tool for further studies of marine sedimentation and seabed installation under deep water.

Key words: submarine canyon; sediment transportation; autonomous underwater vehicle (AUV); mass transport deposits (MTDs); canyon groups in the Shenhu area

海底峡谷通常发育在陆架陆坡区,是陆源物质向深海运移的重要通道^[1]。海底峡谷既可发育于主动大陆边缘,又可发育于被动大陆边缘^[2]。浊流通常被认为是峡谷内部物质运输的主要营力,尤其对于那些与陆地河流连接的峡谷。Xu等监测到蒙特利峡谷最大的浊流速度可达2.60 m/s^[3]; Paull等推算的浊流的前锋可以达到7.2 m/s,并且浊流能够以至少4 m/s的速度搬运800 kg的物体^[4]。2006年台湾西南恒春地震引起了多处的滑坡和浊流,有序切断了1 500~4 000 m水深的14条电缆,其中6条在峡谷外,估算的流速为3.7~20 m/s^[5]。同样的事情发生在2009年,莫拉克台风引起的高密度流/浊流有序切断了多条海底通讯电缆,计算的最大速度达16.6 m/s^[6]。

南海神狐峡谷群是垂直陆坡方向发育的多条

近似平行的限制型海底峡谷(图1a、b)。神狐峡谷群远离陆地,更新世以来沉积速率较高(20~34.16 cm/ka)^[7],海底发育了总面积超过1 000 km²的滑动、滑塌、碎屑流等块体搬运沉积(MTDs, Mass Transport Deposits)^[8-9]。与同处南海北部陆缘且有大量碎屑物质输入的台湾高屏海底峡谷相比,陆坡限定性峡谷内浊流发生的频率相对较小^[5]。

以往对深水区地层结构的探测主要依赖二维、三维(2D/3D)反射地震资料和浅地层剖面;前者探测深度几千米,分辨率较低,在数米至数十米之间;后者探测深度较浅,几十米到几百米,容易受到能量吸收和复杂作业环境干扰,设备分辨率较高,但实际获取的数据质量较差。即便是能量和探测精度更高的电火花震源,其分辨率也只有约2 m。这对

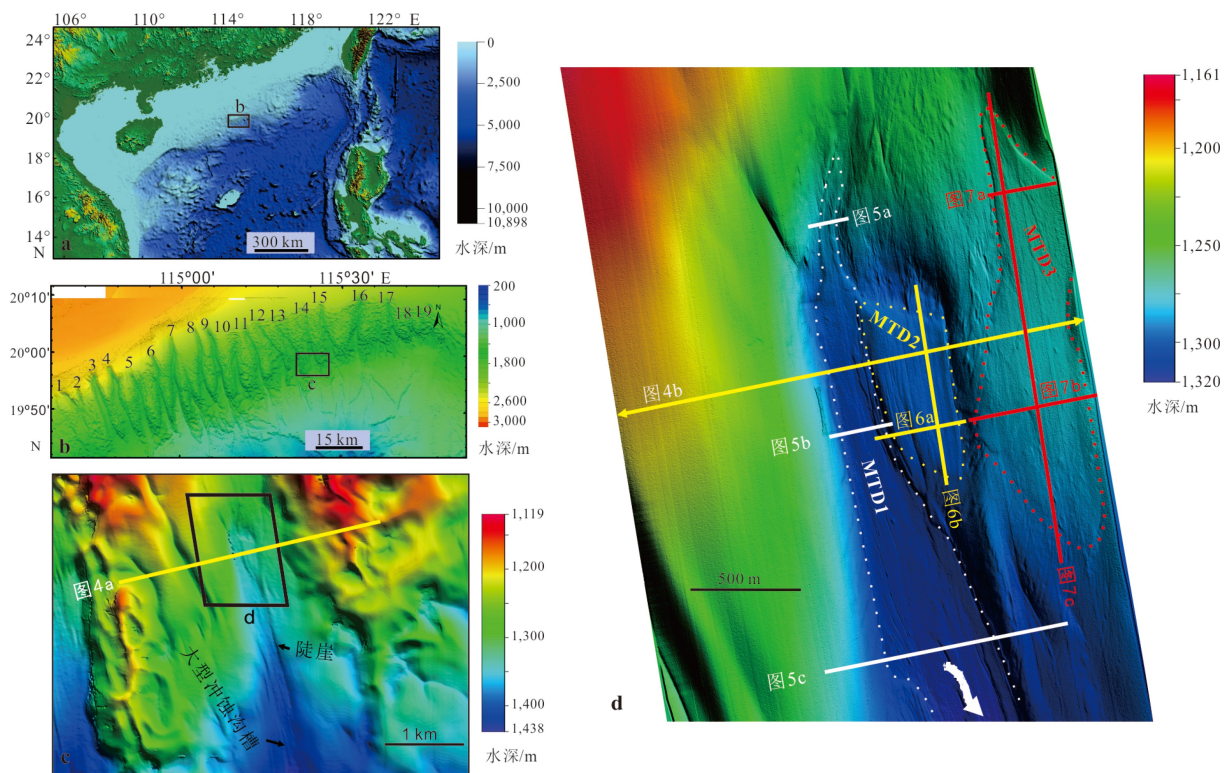


图1 研究区位置

a.神狐峡谷群的位置, b.神狐峡谷群海底地形图, c.基于三维地震资料的研究区海底地形图, d.基于AUV采集的多波束的研究区海底地形图。

Fig.1 Locations of the study area

a. The location of the studied slope confined canyons, b. the bathymetric map of canyons, c. the bathymetric map of the studied canyon segment based on 3D seismic reflection data, d. the bathymetric map of the studied canyon segment based on multi-beam data acquired by AUV.

于研究深水区海底沉积层的精细结构是不够的。AUV探测是加载各种探测设备的自主水下航行器保持与海底几十米的距离并按照设定的路由线路进行数据采集,具有很好的横向和纵向的分辨率,例如中海油服3 000 m级AUV携带的EdgeTech2200-M浅剖仪的垂向分辨率可达6~10 cm^[10-11]。国际上AUV探测已经越来越多地应用到深海沉积研究中^[12-14]。国内也研发出多套AUV设备,但应用范围有限^[15]。

对于神狐峡谷群,以往的研究主要集中在滑坡广泛发育的崎岖的峡谷脊部,但对较为平坦的峡谷谷底研究较少。本文利用AUV获取的地球物理资料刻画神狐峡谷谷底沉积特征,对研究陆坡限定性峡谷的物质输运过程具有重要意义。

1 地质概况

神狐峡谷群分布在珠江口外海陆坡区,具体位于珠江口盆地的白云凹陷。珠江口盆地所在的南海北部经历古近纪的裂陷期和新近纪—第四纪的裂后期^[16]。在约23.8 Ma的渐新世末期,受南海扩张中心南向跃迁的影响,陆架坡折带从白云凹陷的南部退移到目前的位置^[17]。神狐峡谷群开始于13.8 Ma的中中新世,经历了4个期次的北东向迁移发育,峡谷覆盖面积从I期(13.8~12.5 Ma)、II期(12.5~10.5 Ma)到III期(10.5~5.5 Ma)逐渐增大,再到IV期(1.8 Ma~)缩小^[18-19]。浊流、底流及两者之间的相互作用被认为影响了峡谷的迁移发育^[20-22]。

2 数据和方法

研究使用了三维地震数据和AUV资料进行对比分析。三维地震数据的时间采样间隔2~4 ms,空间采样间隔6.25 m×12.5 m,上部1 500 m地层主频约为40 Hz。三维地震数据中的海底反射时间经时深转换生成水深图(海水声速取值1 500 m/s)。AUV资料使用Echo Surveyor III(Kongsberg Hugin 1 000 AUV)采集,主要加载了多波束、旁扫声呐和浅地层剖面仪等设备。多波束为Kongsberg EM2000,声脉冲频率平均2 Hz,扫描宽度为240 m,水平分辨率可以达到0.6 m;旁扫声呐用来反映地形变化和底质类型,采用Edgetech全谱旁扫声呐,频率105/410 kHz,声脉冲频率3 Hz,脉冲长度9 ms/2 ms,扫描范围221 m/100 m;浅地层剖面仪为Edgetech全谱线性调频剖面仪,频率范围2~16 kHz,实际工作频率2~10 kHz,地层分辨率可达3~4 cm,声脉冲频率

3 Hz,记录长度143 ms。作业时AUV在距海底35 m的水深处以3~4节的速度航行。2010年在水深1 302.21 m的块体搬运沉积体上实施了重力柱状取样(GC-3),取样长度3.6 m。基于AUV获取的旁扫声呐、浅地层剖面和多波束等高分辨率地球物理数据,对第14条峡谷进行了海底地貌和部分谷底的浅地层分析。

3 结果

3.1 峡谷地形地貌特征

神狐峡谷群水深200~2 000 m,由19条近似平行的峡谷组成。峡谷起源于陆坡的上部,向深水逐渐加宽,最下端汇聚到珠江大峡谷。峡谷长3.6~36 km,宽1~5 km,深100~400 m。峡谷脊部地形崎岖不平,沟壑陡崖普遍发育,峡谷谷底较为平坦(图1)。基于三维反射地震可以在峡谷谷底观测到巨大的陡崖和大型的沟槽,可以大体分辨边界明显的MTDs(图1c)。基于AUV获取的旁扫声呐图则更加清晰地展示了所选取峡谷谷底的精细地貌特征(图1b,图2a)。MTDs在谷底广泛分布,总面积近17 km²。MTDs在峡谷头部的弧形斜坡和谷底都有分布,MTDs呈不规则的圆形展布,其表面起伏不平(图2b);在峡谷中下游MTDs沿着谷底狭长条带状分布(图2c-e)。基于AUV的多波束数据(图1d)和旁扫声呐数据(图2d),选取了峡谷下游水深1 280~1 360 m、距离峡谷出口10~15 km的MTDs典型发育区进行了详细分析。3个MTDs分别位于不同台阶上(图3,图4)。MTDs的上面发育了数量众多的宽3~10 m、长20~700 m、深5~20 cm的冲蚀沟槽(图3)。MTDs的厚度都在8.4 m及以下,这在常规2D/3D地震资料上是难以分辨的(图4)。

3.2 MTD1

MTD1位于谷底的最西边,是峡谷谷底主水道的位置,中间宽、上下两端窄,在下部受到突出的水道堤岸的阻挡而改变方向且宽度变窄。MTD1的上部可以识别出狭长的渠道状的物质输运后的残留物(图3),而在MTD1邻近的峡谷翼部没有识别出明显的滑坡体或滑坡遗迹。MTD1长5.00 km,头尾两端厚度小,中间厚度大,厚度最小1.30 m,最大8.40 m,面积0.90 km²,体积约4.37 km³(表1)。MTD1可以清晰识别出连续的底边界反射指示底部剪切面,其反射强度低于海底反射但明显高于其他正

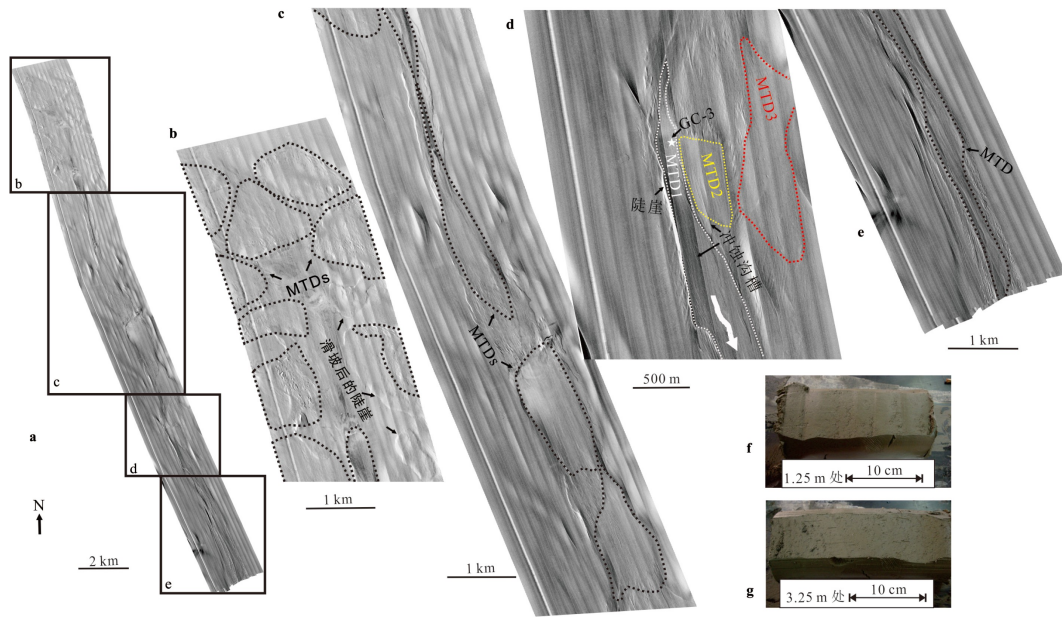


图2 峡谷的旁扫声呐图和岩心图

a.研究区所在峡谷的旁扫声呐图, b—e.局部放大的旁扫声呐图, f—g. MTD1上 GC-3 站位的部分重力柱状岩心样品。虚线多边形指示 MTDs 的位置。

Fig.2 The side-scan sonar map of the canyon floor and sections of the gravity core acquired from the canyon floor

a. The side-scan sonar map of the studied canyon, b-e. amplified side-scan sonar maps of the study area, f-g. sediment samples from the gravity core GC-3 over MTD1 at 1.25 m and 3.25 m, respectively. The dashed polygons denote locations of MTDs on the canyon floor.

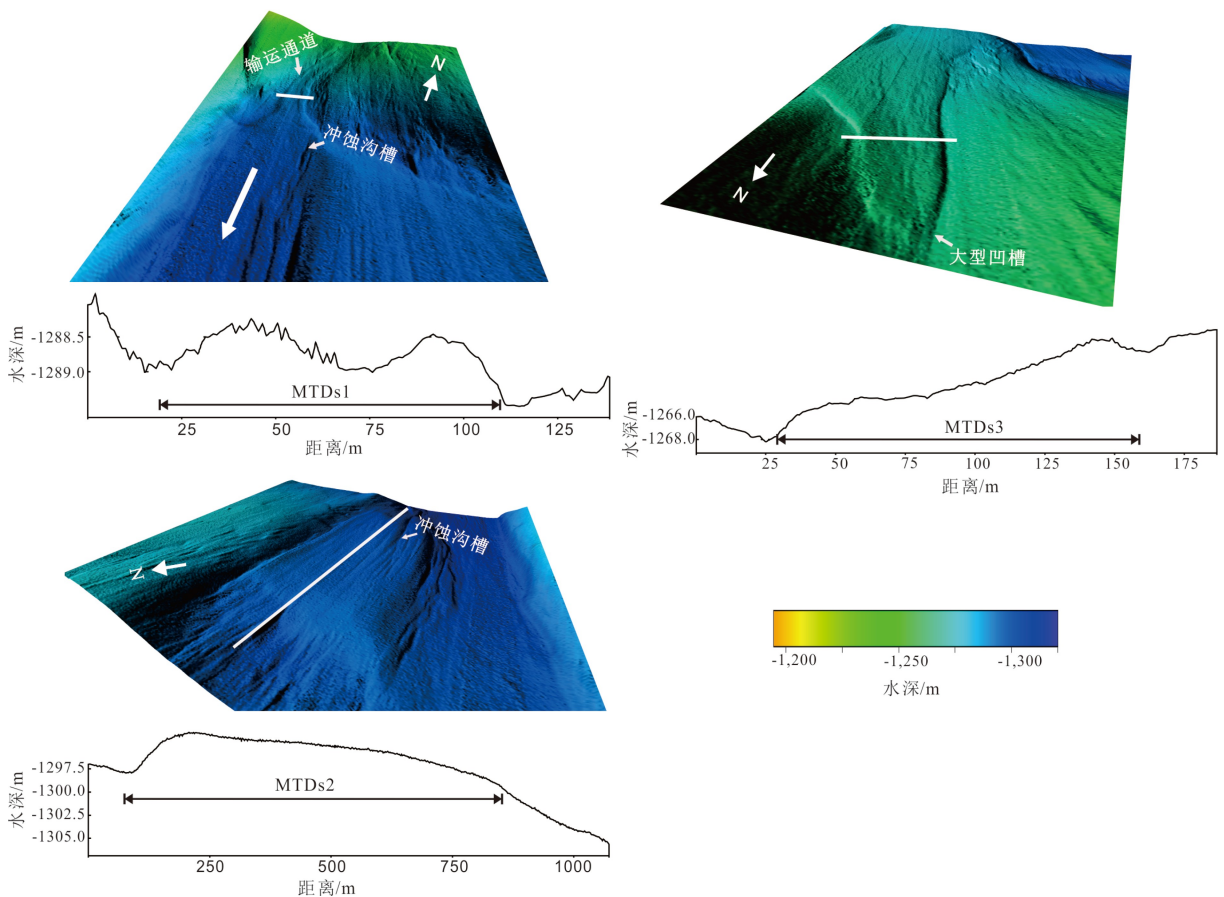


图3 研究区3个典型MTDs的地形立体图及穿过MTDs的地形变化曲线

Fig.3 Stereo views of three MTDs and bathymetric curves crossing these MTDs

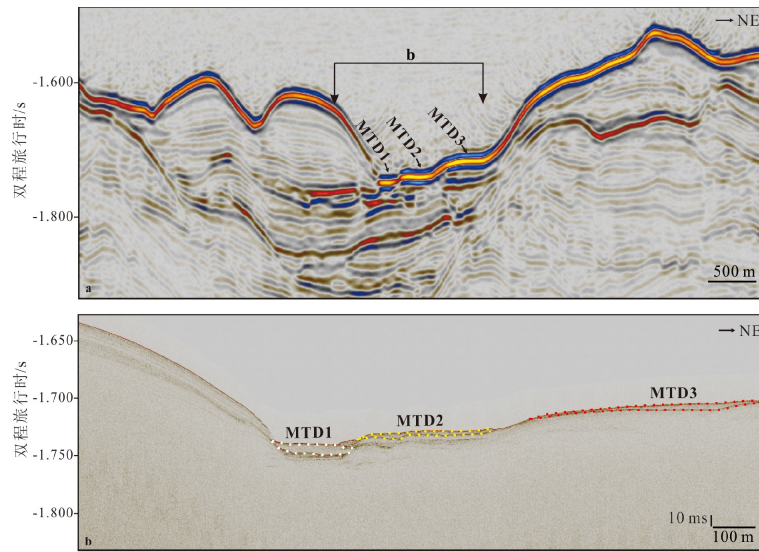


图 4 过同一峡谷位置的三维反射地震剖面 and AUV 浅地层剖面

a. 反射地震剖面, b. AUV 浅地层剖面。

Fig.4 The seismic profile extracted from the 3D seismic data and sub-bottom profiles acquired by AUV crossing the same section of the canyon

a. The seismic profile, b. The AUV based sub-bottom profile.

表 1 峡谷谷底 MTDs 的几何参数

Table 1 Geometric parameters of MTDs on the canyon floor

编号	宽度/m	长度/km	长宽比	厚度/m	面积/km ²	体积/km ³
MTD1	80~500	5.00	10.00~62.50	1.30~8.40	0.90	4.37
MTD2	260~350	0.75	2.14~2.88	0.90~3.20	0.28	0.58
MTD3	70~600	2.00	3.33~28.57	1.20~3.00	1.10	2.31

常地层反射。MTD1 内部为振幅较弱的杂乱反射(图 5), 仅在底部的局部位置有少量的长度有限的连续反射轴(图 5c)。沉积体上发育了大量平直的冲蚀沟槽, 尤其在主水道上更为低洼的地方(图 3)。基于 AUV 的旁扫声呐图(浅色)指示整条峡谷谷底浅表层主要由软的沉积物组成(图 2); 重力柱状取样结果证实 MTD1 沉积体由很软的高可塑性的灰绿色粉砂组成, 含非常少的砂(图 2f—g)。

3.3 MTD2

MTD2 位于峡谷谷底中部的台阶上, 平面上呈不规则梯形展布(图 1d, 图 2d, 图 3)。MTD2 并非直接出露在海底, 上部覆盖了一层厚约 0.6 m 的沉积层。MTD2 宽度变化不大, 为 260.0~350.0 m; 长 750.0 m; 厚 0.90~3.20 m; 面积较小, 为 0.28 km²; 体积约 0.58 km³(表 1)。MTD2 沉积体上面也发育有冲蚀沟槽, 此外在沉积体头部发育了更多的冲沟。MTD2 同样可以识别出强反射的底边界和弱的顶界

面。底边界并非平直光滑, 而是出现了大量的凹槽, 这些凹槽宽 5.0~20.0 m, 高 0.375~0.75 m, 其宽度明显大于沉积体上面的冲蚀沟槽, 推测是由块体搬运沉积体在运动过程中侵蚀海底形成的侵蚀沟。不同于 MTD1 两端较小的厚度, MTD2 从头部到尾部厚度逐渐减小(图 6)。

3.4 MTD3

MTD3 位于谷底最东侧的台阶上。头部宽度小, 中部和尾部宽度大。MTD3 长 2.0 km, 宽 70~600 m, 厚 1.2~3.0 m, 面积 1.10 km², 体积约 2.31 km³。垂直于峡谷走向, 沉积体呈楔形展布, 整个沉积体分布在中间低两侧高的大型凹槽中(图 3, 图 7a—b)。MTD3 在大型凹槽东侧宽度大于其西侧宽度, 且东侧厚度逐渐变薄。沿着峡谷走向, 沉积体厚度在中部最大, 头部稍小, 尾部最薄。MTD3 底部反射较为平滑, 反射强度较强, 但明显小于 MTD1 和 MTD2 的底部反射强度。

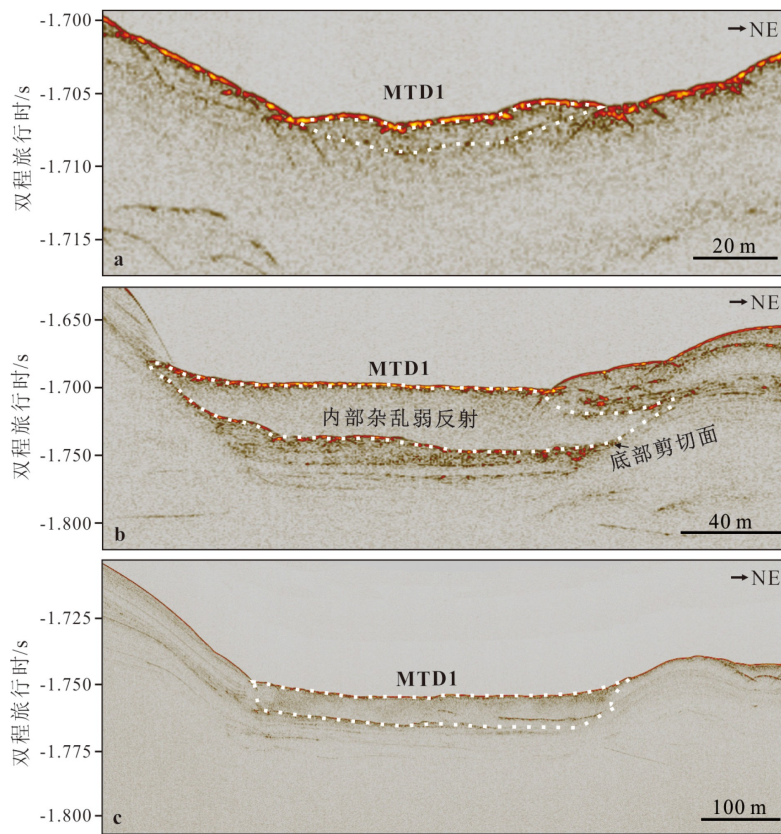


图5 过 MTD1 的 AUV 浅地层剖面图

a.上部横剖面, b.中部横剖面, c.下部横剖面。

Fig.5 AUV based sub-bottom profiles across MTD1

a. The upper profile perpendicular to the strike, b. the middle profile perpendicular to the strike, c. the lower profile perpendicular to the strike.

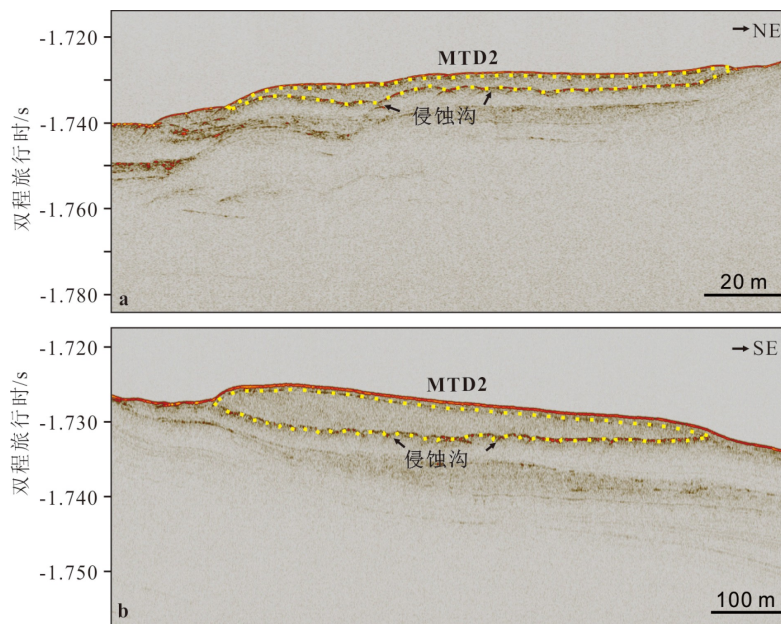


图6 过 MTD2 的 AUV 浅地层剖面图

a.横剖面, b.纵剖面。

Fig.6 AUV based sub-bottom profiles across MTD2

a. The profile perpendicular to the strike, b. the profile parallel to the strike.

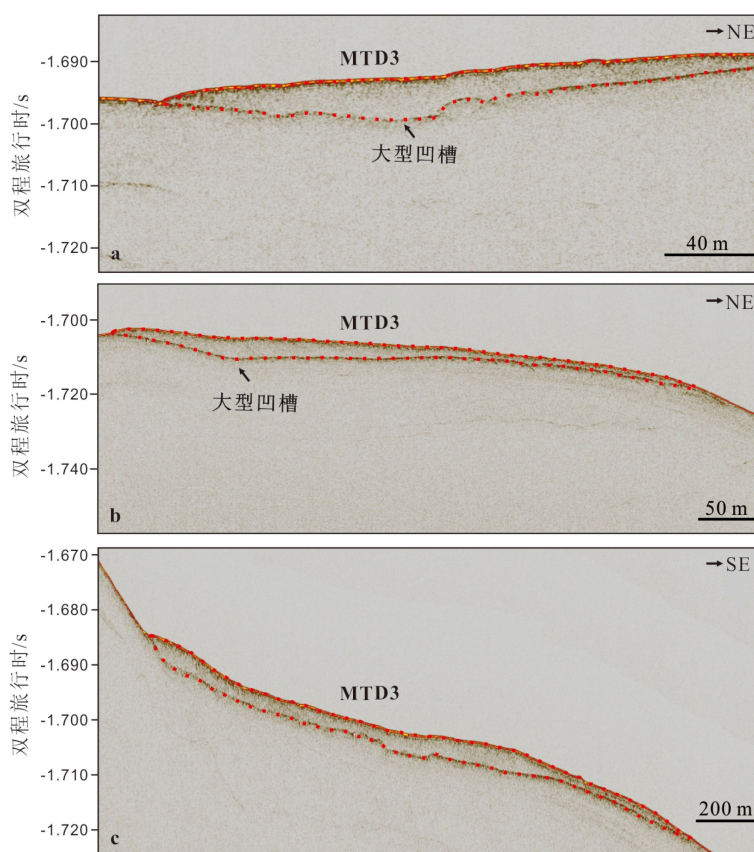


图 7 过 MTD3 的 AUV 浅地层剖面图

a. 上部横剖面, b. 下部横剖面, c. 纵剖面。

Fig.7 AUV based sub-bottom profiles across MTD3

a. The upper profile perpendicular to the strike, b. the lower profile perpendicular to the strike, c. the profile parallel to the strike.

4 讨论

4.1 峡谷谷底 MTDs 的形成

通过对 MTDs 埋深的分析, 推断 MTDs 形成的时间距今不远, 因为在 MTD1 和 MTD3 上面没有识别出正常沉积的地层。MTD2 的上部发育厚约 0.60 m 的沉积地层(图 6), 明显晚于 MTD1 和 MTD2。

基于 AUV 的地球物理资料对 MTDs 特征的分析结果, 我们推测峡谷中下游大多数 MTDs 并不是直接从邻近的峡谷脊部上搬运下来, 而是从上游通过滑塌-碎屑流的形式运移下来。首先, 除了峡谷头部弧形斜坡分布有大量不规则圆形展布的 MTDs, 峡谷中下游的 MTDs 大都沿峡谷走向狭长展布, 并不是垂直峡谷走向展布(图 2)。虽然脊部沉积物滑移后可以继续通过谷底向下继续运移, 但在谷底两侧靠近坡脚的位置并没有发现较厚块体搬运沉积体的存在, 在邻近的脊部也没有发现物质滑移的证据, 相反, 我们在 MTD1 上部发现了明显的物质输

运后的残留遗迹(图 5a)。MTD2 具有较小的长宽比以及逐渐减小的厚度, 说明该沉积体搬运的距离并不远(表 1, 图 6), 推测其是从邻近的谷底陡坡上搬运下来。MTD3 沉积体在大型凹槽东侧宽度要大于西侧, 且东侧的沉积厚度向东逐渐变薄, 说明 MTD3 不是直接来源于峡谷东侧的脊部, 这表明峡谷上游比中下游发生滑坡的概率更大。三维反射地震资料的解释也表明 MTDs 在峡谷上游的数量更多, 分布面积更广(图 2a)^[8-9]。虽然三维反射地震资料也显示峡谷中下游的脊部有大量 MTDs, 但这些 MTDs 厚度较大, 在几十米以上, 很多 MTDs 的内部地层变形不严重, 反映了块体滑移或程度较弱的滑塌, 但不能反映当前较小时间尺度内峡谷谷底的沉积过程。相比较而言, 基于 AUV 的高分辨率地球物理资料更真实反映了峡谷内部的沉积特征和过程, 即当前或较短时间内峡谷谷底分布着大量小规模的沿峡谷走向呈狭长展布的 MTDs。

研究区声学剖面上的块体搬运沉积体可能是一次块体流沉积的结果, 也可能是多次块体流沉积的结果, 但块体流间隔的时间较短, 没有形成声学

可识别的正常沉积地层。MTD1所处的谷底主水道位置更容易汇聚长距离搬运下来的碎屑流沉积。

4.2 峡谷谷底的物质输运

神狐峡谷群距离陆地近 250 km, 河流高悬浮物注入引起的浊流对峡谷影响很小, 在 MTD1 上 GC-3 站位细粒粉砂沉积物也指示缺少陆源粗粒沉积物的输入。前人的研究表明峡谷坡度较陡的脊部发育了大量的 MTDs, 形成了起伏不平的地貌^[23], 谷底地形相对比较平坦。通过以上对 AUV 获取的高分辨率地形和浅部地层资料的解析, 我们认识到峡谷谷底并不像它的地表那么简单, 而是在平坦的地表下发育了 MTDs。这些 MTDs 的面积和厚度远没有峡谷脊部的大, 但在峡谷谷底大量分布。峡谷中下游谷底的大多数 MTDs 并不是直接来源于峡谷脊部, 而是来自 MTDs 的上部。这指示了峡谷谷底的物质输送的一种重要途径可能是通过不断重复的发生块体搬运沉积的形式进行的。滑坡并引起浊流被认为是陆坡限定性峡谷物质输运的主要营力, 这种情况下浊流的产生通常是伴随着滑塌-碎屑流的产生而产生。在高海平面的情况下, 以紊流为支撑力的浊流会侵蚀并携带部分沉积物流向下坡方向输运, 但很难将垂直峡谷走向的 MTDs 完全改造成沿峡谷走向展布而不留下痕迹, 除非发生大规模的滑坡事件。但高分辨率 AUV 资料表明目前的峡谷中下游的谷底只是分布着大量的小规模 MTDs, 而不是大量的浊流沉积体。据此, 我们认为 AUV 可辨识的较小的时间尺度范围内, 在特定沉积环境下(比如高海平面时期), 神狐峡谷内物质输运的主要营力不只是浊流, 还应该考虑峡谷谷底不断重复进行的块体搬运沉积过程。AUV 资料和三维反射地震资料的解释结果并不冲突, 只是存在空间尺度和时间尺度的不同。新形成的 MTDs 的表面通常会有沉积物堆积造成的凹凸不平, 但谷底 MTDs 的表面只发育了大量小型冲蚀沟槽, 这很可能是峡谷内部的较强的水动力对 MTDs 表面进行了改造。前人研究表明, 神狐峡谷内部具有复杂的海洋水动力环境, 其中内潮普遍发育且能量最大, 峡谷内部发育的内潮最大流速可达 50 cm/s, 沿着峡谷轴向往复运动^[24]。MTDs 沉积体上面的冲沟是由潮流、余流还是其他类型的水体运动造成的还不明确。

5 结论

(1) 基于 AUV 的高分辨率多波束, 旁扫声呐和

浅地层剖面数据对峡谷整体和局部的 MTDs 进行了精细刻画, 在峡谷谷底识别了常规地球物理资料不能辨识或不能清晰辨识的大量 MTDs 的分布。峡谷上游弧形斜坡和谷底分布着大量不规则圆形展布的 MTDs, 峡谷中下游的 MTDs 多在谷底呈狭长展布。

(2) 对 MTDs 典型发育区的研究表明, MTDs 沉积体的厚度在 8.4 m 及以下, 沉积体内部为反射强度较弱的杂乱反射, 推断为经过一定搬运距离而充分混合的碎屑流。

(3) 通过分析 MTDs 沉积体的形态、沉积厚度变化并结合谷底两侧峡谷脊部的地层反射特征, 认为谷底分布的 MTDs 主要来源于其上部, 而不是邻近的峡谷脊部。在特定沉积环境和较小时间尺度范围内, 除了浊流外, 从峡谷上游到下游的块体搬运沉积过程的重复发生很可能是峡谷物质输运的另一种重要形式。

参考文献 (References)

- [1] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 125-135.
- [2] 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.
- [3] Xu J P, Barry J P, Paull C K. Small-scale turbidity currents in a big submarine canyon [J]. *Geology*, 2013, 41(2): 143-146.
- [4] Paull C K, Talling P J, Maier K L, et al. Powerful turbidity currents driven by dense basal layers [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4114.
- [5] Hsu S K, Kuo J, Lo C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19(6): 767-772.
- [6] Carter L, Milliman J D, Talling P J, et al. Near-synchronous and delayed initiation of long run-out submarine sediment flows from a record-breaking river flood, offshore Taiwan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): L12603.
- [7] 陈芳, 苏新, 周洋. 南海神狐海域水合物钻探区钙质超微化石生物地层与沉积速率[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2013, 38(1): 1-9. [CHEN Fang, SU Xin, ZHOU Yang. Late Miocene-Pleistocene calcareous nannofossil biostratigraphy of Shenhu gas hydrate drilling area in the South China Sea and variations in sedimentation rates [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(1): 1-9.]
- [8] He Y, Zhong G F, Wang L L, et al. Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 546-560.

- [9] Chen D X, Wang X J, Völker D, et al. Three dimensional seismic studies of deep-water hazard-related features on the northern slope of South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 1125-1139.
- [10] 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.]
- [11] 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.]
- [12] Paull C K, Anderson K, Caress D W, et al. Fine-scale morphology of tubeworm slump, Monterey canyon [M]//Lamarche G. *Submarine Mass Movements and their Consequences*. Cham: Springer, 2016: 155-162.
- [13] Gwiazda R, Paull C K, Caress D W, et al. Eel canyon slump scar and associated fluid venting [M]//Lamarche G. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Cham: Springer, 2016: 411-418.
- [14] Tubau X, Paull C K, Lastras G, et al. Submarine canyons of Santa Monica Bay, Southern California: Variability in morphology and sedimentary processes [J]. *Marine Geology*, 2015, 365: 61-79.
- [15] 李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(9): 1152-1164. [LI Shuo, LIU Jian, XU Huixi, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China [J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2018, 48(9): 1152-1164.]
- [16] Clift P, Lin J, Barckhausen U. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(8): 951-970.
- [17] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统-中新统重大地质事件及其意义[J]. *地质评论*, 2007, 53(2): 145-151. [PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications [J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 145-151.]
- [18] 陈端新. 南海北部陆缘深水盆地流体渗漏构造研究[D]. 中国科学院大学中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2012: 51-75. [CHEN Duanxin. Focused fluid flow structure in the deepwater basins of northern South China Sea margin [D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2012: 51-75.]
- [19] Ma B J, Wu S G, Sun Q L, et al. The late Cenozoic deep-water channel system in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin: Development and tectonic effects [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 122: 226-239.
- [20] Zhu M Z, Graham S, Pang X, et al. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: Implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 307-319.
- [21] Gong C L, Wang Y M, Rebesco M, et al. How do turbidity flows interact with contour currents in unidirectionally migrating deep-water channels? [J]. *Geology*, 2018, 46(6): 551-554.
- [22] Li X S, Zhou Q J, Su T Y, et al. Slope-confined submarine canyons in the Baiyun deep-water area, northern South China Sea: variation in their modern morphology [J]. *Marine Geophysical Research*, 2016, 37(2): 95-112.
- [23] Su M, Lin Z X, Wang C, et al. Geomorphologic and infilling characteristics of the slope-confined submarine canyons in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2020, 424: 106166.
- [24] Wu L Y, Xiong X J, Li X L, et al. Bottom currents observed in and around a submarine valley on the continental slope of the northern South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15(6): 947-957.