

南海浊流地貌

钟广法¹, 朱本铎², 王嘹亮²

1. 同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 广州海洋地质调查局, 广州 510075

摘要 南海深海底部浊流地貌十分发育。陆坡区有大量的海底峡谷, 部分峡谷的谷底、越岸区或出口部位分布有超临界流成因的大型沉积物波和周期阶坎底形。多数峡谷在陆坡脚的出口处并未形成像样的海底扇, 而深海平原中却保有高丰度的浊流沉积。这可能暗示, 南海峡谷浊流的能量较高, 即使在经历陆坡脚的减速之后仍有足够的能量维持其沿平缓的深海平原作较长距离的搬运。浊流地貌的出现大多始于晚中新世, 其成因与南海及周缘强烈的构造活动有关。

关键词 深海地貌; 超临界浊流; 海底峡谷; 沉积物波; 周期阶坎; 南海

碧波万顷的南海底下有你想象不到的美景: 广袤无垠的深海平原, 壁立千仞的海底山脉, 幽深莫测的海底峡谷, 蜿蜒曲折的海底水道, 还有大小不等、形态各异的泥火山、烟囱、麻坑、沉积物波、阶梯状的周期阶坎(cyclic steps)底形等。这些海底地貌的发现得益于现代高分辨率多波束测深及反射地震等先进地球物理技术的应用。业已查明, 大陆架以外, 南海的深海底在平面上大致呈菱形, 其长轴沿北东-南西向, 面积约 176 km²; 在三维空间上则为盆状, 中间低、四周高: 中间是一马平川的深海平原, 平均坡度仅 0.02°~0.1°, 水深为 3400~5000 m, 其上分布着海底山脉——“海山链(群)”; 四周

为陡峭而崎岖的大陆坡, 平均坡度 0.5°~2.5°, 水深 200~3400 m, 在这里无数的海底峡谷与海山、海台或岛礁错落分布^[1](图 1)。

南海深海地貌的种类繁多、成因复杂。有的与海底岩浆活动有关, 如海底火山、火山链或火山群; 有的与海底气液物质渗漏作用有关, 如麻坑、烟囱和泥火山; 还有的与海底沉积过程特别是深海浊流活动有关, 如海底峡谷、海底扇、深海平原及大型沉积物波和周期阶坎底形。相比之下, 我们对南海深海浊流地貌的了解还比较少。特别是近年来随着南海深海油气勘探开发和天然气水合物试采工程的快速推进, 对深海浊流地貌的关注与日俱增, 因

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(91028003, 41676029, 41876049)

作者简介: 钟广法, 教授, 研究方向为地震/测井数据解释与深海沉积学, 电子信箱: gfz@tongji.edu.cn

引用格式: 钟广法, 朱本铎, 王嘹亮. 南海浊流地貌[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 75-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.012

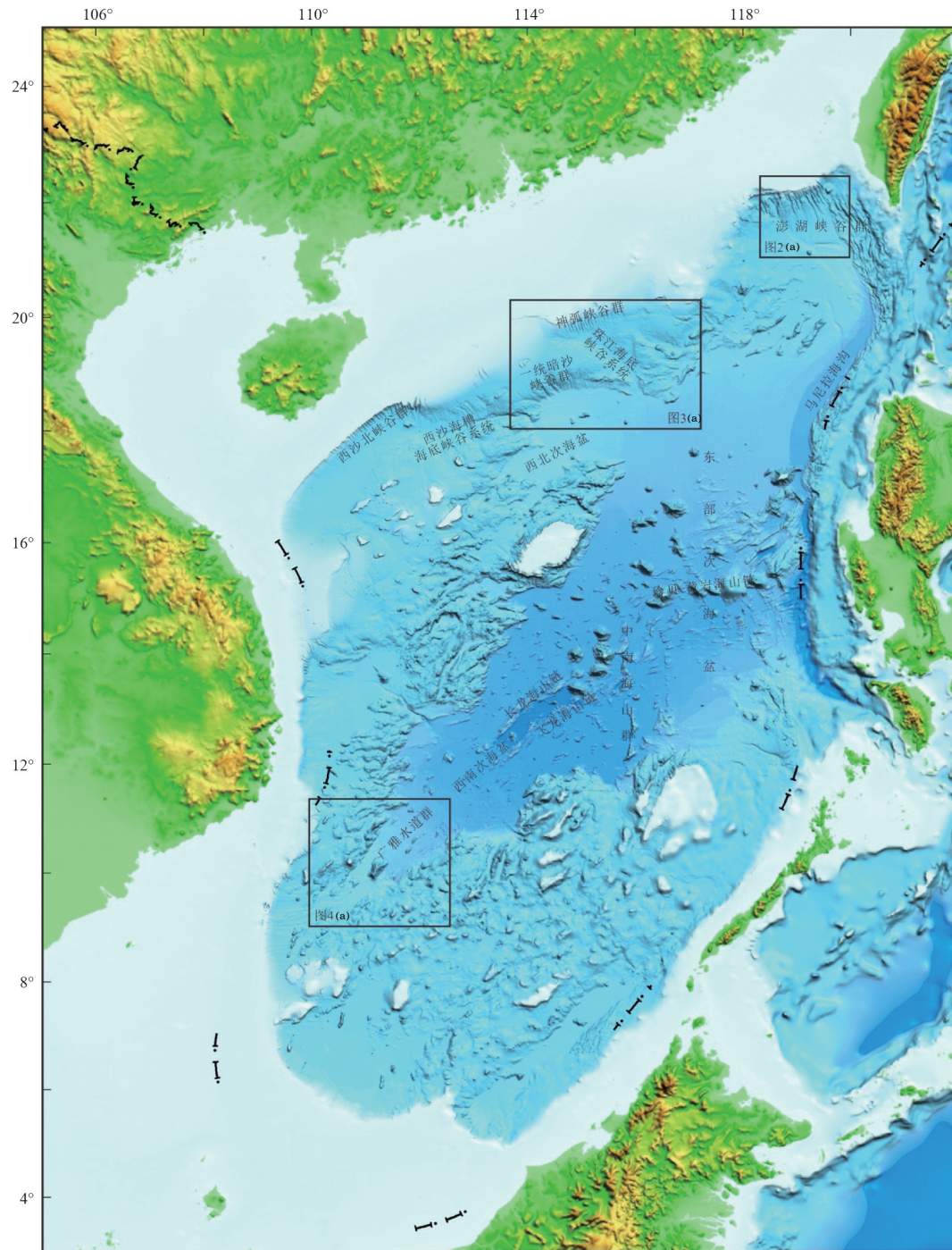


图1 南海海底地貌图(据文献[1]修改)

为深海的很多油气和天然气水合物资源都可以储存在浊流沉积物中。根据多波束海底测深和反射地震等资料,简要介绍我们近年来在南海与浊流有关的深海地貌研究方面所取得的一些进展,并提出对南海深海浊流地貌成因的认识。

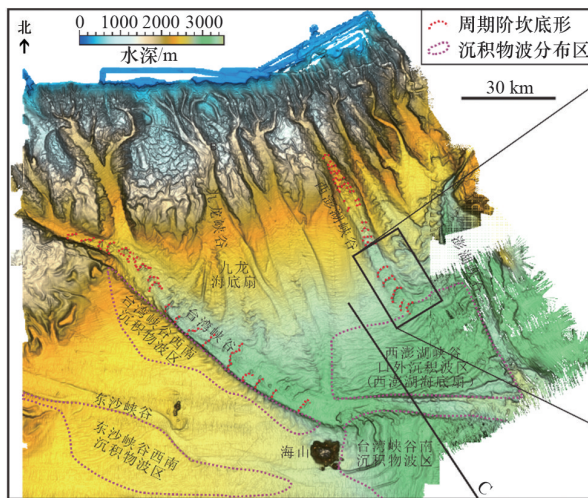
1 陆坡区壮观的海底峡谷系统

南海的海底峡谷很发育,主要分布于陆坡区,部分切入陆架,有的甚至直接与河口相连(如高屏峡谷)。南海的海底峡谷不仅数量多,规模也很悬

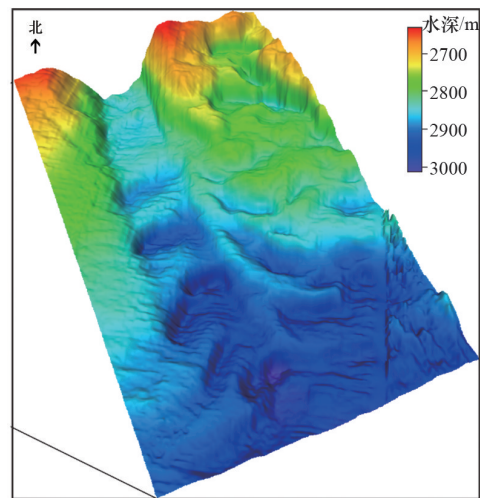
殊,从宽度不足千米的小型冲沟(gullies)到宽达数十甚至上百千米的大型峡谷均有分布。小型冲沟大量发育于陆架边缘至上陆坡坡度较陡部位,也广泛分布于碳酸盐台地或岛礁边缘的陡坡区。规模较大的海底峡谷(群)自东北到西南主要有澎湖海底峡谷群、珠江海底峡谷系统、一统暗沙海底峡谷群及西沙海槽海底峡谷系统等(图1)^[1]。

澎湖海底峡谷群以澎湖峡谷为中心,由10余条规模较大的海底峡谷组成,包括发育于澎湖峡谷

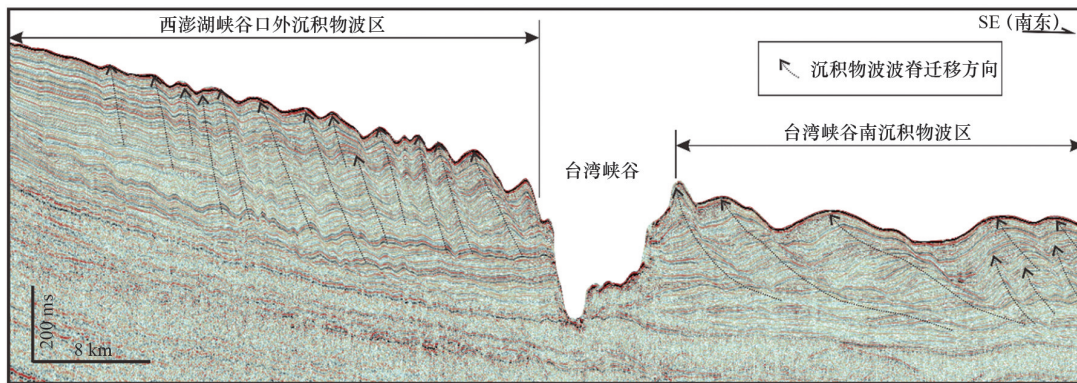
以东台湾西南陆坡上的寿山、高屏、枋寮等海底峡谷及发育于澎湖峡谷以西东沙东南至台湾浅滩南部陆坡上的东沙、台湾和西澎湖等海底峡谷^[2-5](图2)。这些峡谷组成了一个大型的树枝状水系,所有峡谷自北向南逐渐汇集至澎湖峡谷,最终汇入马尼拉海沟。海底重力柱状样及水合物钻探证实,澎湖峡谷群所在海区,海底滑坡、碎屑流及浊流沉积发育^[3,6]。该峡谷群中,各峡谷的形成时间不一,但均不早于晚中新世。



(a) 南海东北部海底多波束地形图与海底峡谷、周期阶坎底形及沉积物波区的分布(据文献[2]、[3]修改)



(b) 西澎湖峡谷下游周期阶坎底形三维多波束地形起伏图(据文献[2]修改)



(c) 过西澎湖峡谷口外和台湾峡谷南沉积物波区的地震剖面(据文献[3]修改)

图2 澎湖海底峡谷群的地貌特征

珠江海底峡谷系统位于南海北部大陆边缘中部,发源于珠江河口外的陆架边缘至上陆坡水深约300~500 m部位,往南一直延伸到陆坡底部与深海平原的交汇处。该峡谷系统的主干峡谷大致呈

NNW-SSE向延伸,长约300 km,宽度16~40 km,其头部发育了19条NNW向、近平行排列的海底峡谷,统称“神狐海底峡谷群”(图3)^[1,7]。该峡谷群从晚中新世开始发育,目前覆盖面积近4000 km²,但

在晚中新世的鼎盛期,其面积超过 12000 km²。地球物理资料分析和油气、水合物钻探证实,珠江海底峡谷系统主要被浊流、滑坡和碎屑流沉积充填(图 3(d))^[7-8]。该峡谷系统的发育大致始于早-中中新世^[8]。

一统暗沙峡谷群分布于珠江海底峡谷系统西南侧的下陆坡区,水深 1260~3600 m,覆盖面积约 8000 km²。该峡谷群大致由 12 条海底峡谷组成,峡谷的规模不大,长度 6~53 km,最大宽度 2~12 km,峡谷间距 3~18 km;峡谷横剖面形态多呈 V 字形,下切深度介于 89~652 m。多数峡谷直接注入南海北部深海平原(图 3(c))。地震剖面揭示,这些峡谷多呈侵蚀下切状态,或仅被少量的滑坡和碎

屑流沉积充填。初步分析认为,该峡谷群的形成大致始于晚中新世以前^[9]。

西沙海槽海底峡谷系统分布于南海西北部陆坡区。其主体为近 E-W 走向的西沙海槽,全长约 524 km,宽度 22~130 km,下切深度一般为数百米至近千米^[1]。西沙海槽北部的陆架边缘至上陆坡区发育了数十条冲沟或小型峡谷,合称“西沙北峡谷群”^[1];它们向南汇入西沙海槽,构成了西沙海槽上游的分支峡谷系统(图 1)。地震解释认为,西沙海槽的谷底主要被滑坡及重力流沉积充填。油气钻探进一步证实,西沙海槽上游谷底发育粗粒浊流及其他重力流沉积。多数意见认为,西沙海槽海底峡谷系统的形成始于晚中新世。

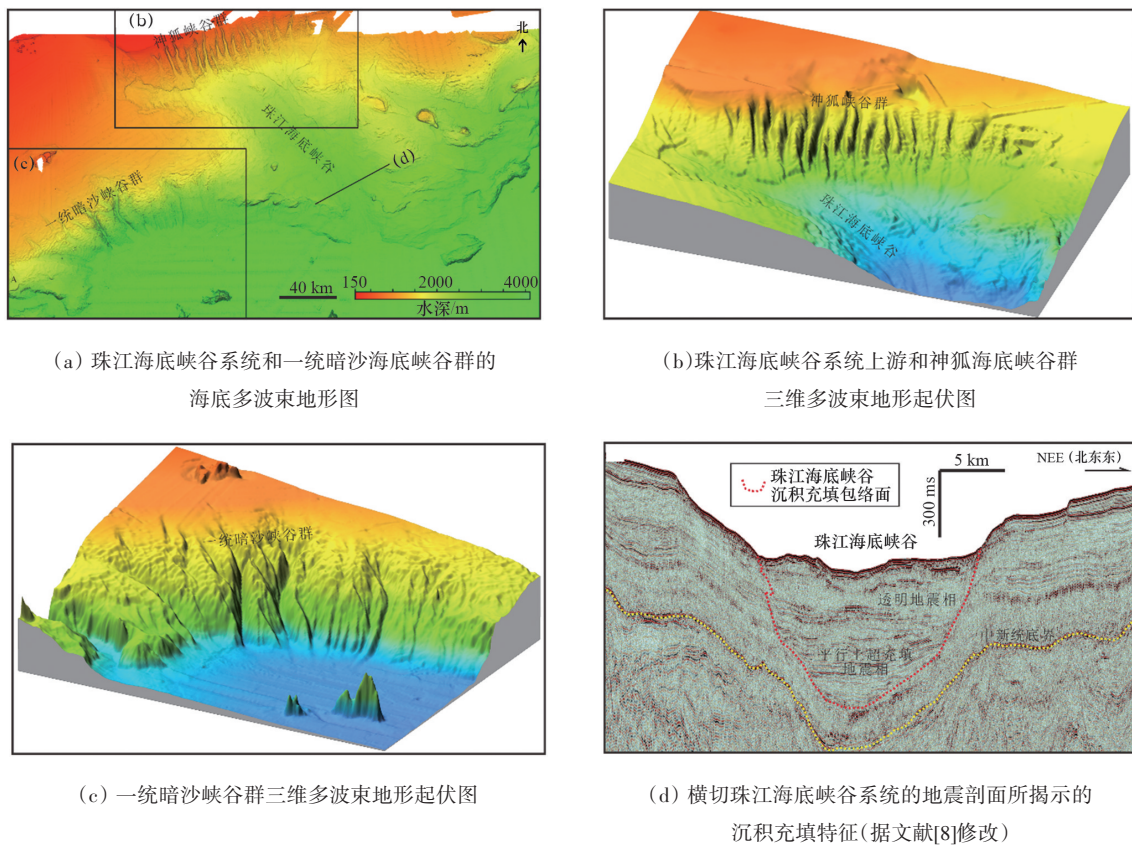


图3 珠江海底峡谷系统神狐海底峡谷群和一统暗沙峡谷群的地貌特征

2 与海底峡谷有关的超临界浊流底形

南海是最早发现大型深海波状底形——“沉积

物波”——的海区之一。Damuth^[10]在南海东部马尼拉海沟西壁及其西侧的深海平原发现了一个面积达 2.5×10⁴ km² 的大型沉积物波分布区,并提出了“浊流沉积物波”的概念。近年来,随着研究程度的

深入,在南海东北部、西沙海槽等地相继发现了多个浊流沉积物波分布区。

南海东北部澎湖海底峡谷群所在的陆坡区是浊流沉积物波最为发育的海区之一。根据多波束测深和反射地震资料,已在澎湖峡谷以西鉴别出了4个规模较大的沉积物波区,分别发育于东沙峡谷下游西南翼、台湾峡谷中游西南翼、台湾峡谷下游南翼及西澎湖峡谷口外陆坡海底扇表面(图2)^[9]。这些沉积物波区由10~30列沉积物波组成,面积介于712~3000 km²之间。单个沉积物波的波长为2.8~7.2 km,波高一般为30~60 m。沉积物波大致沿陆坡等深线延伸,其波长和波高顺坡而下逐渐减小,波脊逆坡迁移(图2),其成因被认为与溢出峡谷或流至峡谷口外的浊流有关^[9]。

除沉积物波外,在台湾和西澎湖峡谷的谷底还鉴别出了2条大型的周期阶坎底形列,分别由19个周期阶坎底形组成,底形列的总长度分别为100 km和60 km(图2(a)、(b));单个底形的长度(波长)和高度(波高)分别为1.2~10.0 km和5.4~80.9 m。地震剖面揭示,周期阶坎底形内部具有特征的逆坡倾斜的后积层理^[9]。周期阶坎底形是十多年前才从海底鉴别出来的一种新的超临界流(弗劳德数>1的高速流体)成因的底形,它们一般成列出现,空间上由周期性或重复出现的阶梯状底形首尾相连而成^[2,11]。在南海鉴别出来的2个周期阶坎底形列无论是总长度还是底形个数均远超此前已知规模最大、发育于加州岸外Monterey峡谷越岸区的周期阶坎底形列,后者由4个底形组成,底形列的总长度为28 km^[11]。

3 陆坡脚鲜贝大型的海底扇

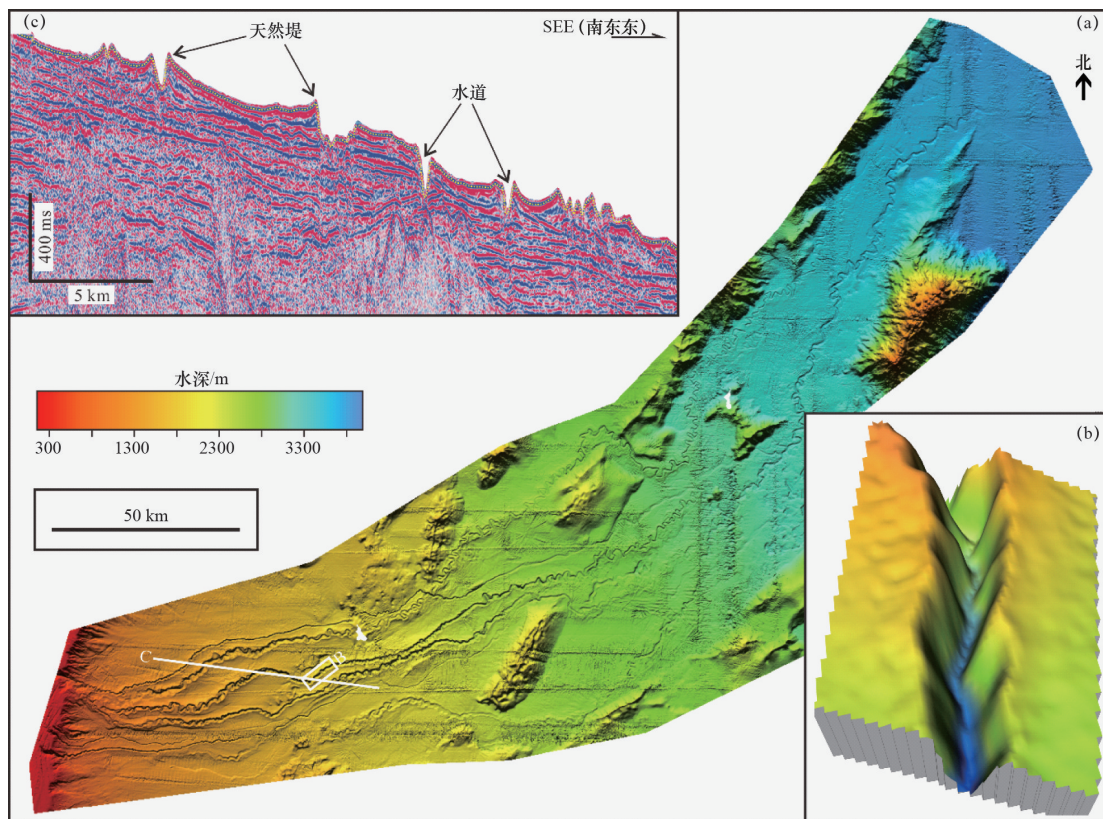
浊流沿海底峡谷顺坡而下,在抵达陆坡与深海平原的过渡部位时,由于坡度骤降,浊流的流速突减、能量耗散,以至于浊流所携带的沉积物会在谷口大量堆积,形成扇形或锥状的沉积体,即海底扇。研究表明,浊流的搬运量惊人,单次浊流所携带的沉积物可以抵上全球所有河流年输沙量总和的10倍以上。因此,大型海底峡谷的出口部位通常都会

形成大型的海底扇。世界上已知规模最大的海底扇是位于印度洋的孟加拉扇,该扇体大致呈南北向,从北纬20°延伸至南纬7°,长约3000 km,平均宽度达1000 km,总面积近300万km²,最大沉积厚度逾16.5 km。

南海的海底峡谷异常发育,理应有大量的海底扇形成。但奇怪的是,很多大型海底峡谷位于陆坡脚的出口部位并未见到像样的海底扇。文献中报道的海底扇要么是深埋在陆坡地层中的古老扇体(如珠江口盆地白云凹陷早-中中新世的古珠江海底扇);要么是分布于陆坡内部海底峡谷口外的小型扇体(如枋廖扇、九龙扇、西澎湖扇等,图2(a))。惟一规模较大的、发育于陆坡脚的扇体可能分布于南海海盆西南端广雅水道群所在部位。该水道群由5条总体呈NE走向的高弯度水道组成,单条水道的长度为140~440 km,宽度为300~2000 m,水道横断面呈U字型,两翼发育有明显的天然堤(图4),其特征与分布于很多大型海底扇表面的浊流分支水道一致^[12]。该扇体的分布范围、内部结构、沉积厚度及开始发育时间等特征尚不清楚。

4 保有高丰度浊流沉积的深海平原

深海平原通常主要由细粒远洋或半远洋沉积物堆积而成,包括黏土和各种钙质或硅质生物软泥等,可以含有数量不等的细粒浊流沉积。但是,根据对地震剖面的初步分析,南海的深海平原中,浊流沉积异常发育,特别是上中新统和中-上更新统,浊流沉积的比例可能高达50%~60%以上。IODP 349、367/368航次的钻探结果也表明,南海深海平原沉积序列中,除了细粒远洋或半远洋沉积外,还含有大量较粗粒的浊流沉积,亦即南海的深海平原实际上是由远洋-半远洋沉积与浊流沉积交替构成的。IODP367/368航次的钻探揭示,南海深海平原的浊流沉积主要由陆源碎屑、钙屑及混积浊积岩组成,自中新世开始发育,晚中新世和中-晚更新世浊积岩的丰度尤高。IODP349航次的钻探表明,即使在海盆中心,各种类型的浊积岩仍普遍存在。因此,自中新世特别是晚中新世以来,南海深



(a) 广雅水道群海底多波束地形图(据文献[12]修改);(b) 水道局部放大的三维多波束地形起伏图;
(c) 斜切广雅水道群的地震剖面所揭示出来的水道、天然堤等地貌特征(据文献[12]修改)

图4 发育于南海海盆西南端海底扇(广雅水道群)的地貌特征

海平原沉积序列中有很一部分为浊流沉积,证实了我们根据地震解释得出的结论。

5 结论

南海深海底部发育着大量与浊流有关的侵蚀和沉积地貌。陆坡区分布大量的海底峡谷,这些海底峡谷主要被浊流、海底滑坡和碎屑流沉积充填。局部海底峡谷的谷底发育有规模宏大、成列出现的周期阶坎底形。部分海底峡谷的越岸区或出口部位还分布有成片的沉积物波。与海底峡谷有关的周期阶坎底形和沉积物波通常与流经峡谷的超临界浊流有关。超临界浊流地貌和底形的大量发育,可能暗示南海的深海曾经有过强劲的浊流活动。

南海不同于很多海盆的独特之处在于,发育于

陆坡区的大量海底峡谷并未在陆坡与深海平原之间的过渡部位造就出大型的海底扇堆积体。导致这一现象的原因,可能与曾经流经南海陆坡的浊流异常强劲有关。这些浊流在抵达位于陆坡脚的坡折带后,尽管流速骤降,但仍可能有足够的能量维持其沿平缓的深海平原底部作较长距离的搬运,以至于它们所携带的大量沉积物最终被分散堆积到了深海平原的不同部位。

南海的海底峡谷及有关的浊流地貌和底形主要发育于晚中新世以来的一千万年内,其成因与南海及其周缘频繁的构造活动有关。南海的海底扩张于16—15 Ma基本停止,但南海及其周缘的板块构造活动并未就此停歇。16—18 Ma以来,受南海东边菲律宾海板块快速向NWW方向移动的影响,南海与菲律宾海板块发生碰撞,导致南海海盆沿马

尼拉海沟俯冲于菲律宾海板块西缘的吕宋岛弧之下。大约从5—8 Ma开始,吕宋弧与南海北部大陆边缘在台湾地区发生碰撞,导致台湾岛的形成及随后阶段性的快速隆升。此外,在南海的西部,受印度-澳大利亚板块与欧亚板块的碰撞及由此产生的青藏高原隆升的影响,印支半岛和华南陆块相继向东南方向挤出,导致作为二者之间边界的红河-越东走滑断裂带的走滑方向在晚中新世末或上新世初发生了从左旋到右旋的反转。这些构造活动可能是南海的海底峡谷在中-晚中新世以来大量出现的重要原因。浊流沿海底峡谷的活动促成了各种超临界浊流底形和地貌的形成。大量的浊流沉积物最终被搬运至深海平原,形成了南海特征的、具有高丰度浊积岩的深海平原沉积序列。

参考文献(References)

- [1] 广州海洋地质调查局. 南海地质地球物理图系(1: 2000000)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2015.
- [2] Zhong G F, Cartigny M J B, Kuang Z G, 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.
- [3] Kuang Z G, Zhong G F, Wang L L, et al. Channel-related sediment waves on the eastern slope offshore Dongsha Islands, northern South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79: 540-551.
- [4] Yin S R, Zhong G F, Guo Y Q, et al. Seismic stratigraphy and tectono-sedimentary framework of Pliocene to recent Taixinan foreland basin in the northeastern continental margin, South China Sea[J]. Interpretation, 2016, 4(3): SP21-SP32.
- [5] Yin S R, Wang L L, Guo Y Q, et al. Morphology, sedimentary characteristics, and origin of the Dongsha submarine canyon in the northeastern continental slope of the South China Sea[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 58(6): 971-985.
- [6] Zhong G F, Liang J Q, Guo Y Q, et al. Integrated core-log facies analysis and depositional model of the gas hydrate-bearing sediments in the northeastern continental slope, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 1159-1172.
- [7] 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: 546-570.
- [8] Huang K, Zhong G, Wang L, et al. Seismic facies in the Pearl River Submarine Canyon, northern South China Sea [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2018: 1738-1742.
- [9] Wang R W, Zhong G F, Wang L L, et al. Types and characteristics of seismic facies in the northern South China Sea basin[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2018: 1590-1594.
- [10] Damuth J E. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China Basin[J]. Geology, 1979, 7: 520-523.
- [11] Fildani A, Normark W R, Kostic S, et al. Channel formation by flow stripping: Large-scale scour features along the Monterey East Channel and their relation to sediment waves[J]. Sedimentology, 2006, 53(6): 1265-1287.
- [12] 关永贤, 杨胜雄, 宋海斌, 等. 南海西南部深水水道的多波束地形与多道反射地震研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4153-4161.

Turbidity current related landforms in the South China Sea

ZHONG Guangfa¹, ZHU Benduo², WANG Liaoliang²

1. State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract Submarine landforms associated with turbidity currents are well developed in the South China Sea (SCS). There are numerous submarine canyons in the continental slopes. Sediment waves and cyclic step bedforms related to the supercritical turbidity currents are distributed along the thalwegs, on the overbank areas or off the outlets of some submarine canyons. However, large-scale submarine fans at the foot of the continental slopes are rarely observed; on the other hand, a high proportion of turbidites are found being preserved in the pelagic to the hemipelagic succession of the abyssal plain. We suggest that the turbidity currents traversing the submarine canyons could be of high energy, enough to sustain a longer distance transport along the abyssal plain even after the deceleration at the foot of the continental slopes. The turbidity-current associated landforms in the SCS were mostly initiated in the late Miocene, and might be closely related to the active plate tectonics in the SCS and surrounding areas.

Keywords deep-sea landforms; supercritical turbidity currents; submarine canyons; sediment waves; cyclic steps; South China Sea ●



(责任编辑 祝叶华)