



· 地球科学 ·

琼东南盆地中央峡谷充填晚期限制型海底扇的 沉积演变规律及主控因素

梁超^{1,2}, 解习农³, 高远², 何云龙³, 田冬梅⁴, 李明军⁵, 张辉⁵

1. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069; 2. 广州海洋地质调查局自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 511458; 3. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 湖北武汉 430074; 4. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江舟山 316022; 5. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要 综合测井资料、高精度三维地震数据和数值模拟发现, 琼东南盆地中央峡谷发育的限制型海底扇由两个伸长状扇体组成, 被分布于其间的浊积水道连接。其受控于中央峡谷的多级台阶式深泓线斜坡地形, 浊流在一级斜坡显著加速, 沉积物主体表现为过路, 而在一级台阶由于坡度骤降, 浊流发生水跃并快速减速, 部分流体溢出水道堆积, 形成了扇体1, 水跃所引起的沉积物快速堆积很可能是扇体1浊积砂岩分选较差的主要原因; 随后, 浊流在二级斜坡小规模加速, 沉积物再次以过路为主, 最终流动到二级台阶后缓慢减速堆积, 形成了扇体2。在扇体1部位, 晚期浊积水道向东南方向迁移的最大距离超过了5 km, 并在扇体2堆积范围内向前延伸数十公里。研究认为, 该水道的改道受控于早期沉积物的堆积所导致的平缓地形, 而向下游的进一步延伸受控于海平面下降所导致的沉积物供给增强。因此, 限制性地形特征和沉积物供给强弱的变化是控制限制型海底扇沉积演变的主要因素, 需在以后的研究中加以重视。

关键词 海底扇; 海底峡谷; 浊流; 沉积演化; 南海西北部

中图分类号: P618.13 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-01-018

Depositional evolution of the confined submarine fan within the Central Canyon in the Qiongdongnan Basin and their main controlling factors

LIANG Chao^{1,2}, XIE Xinong³, GAO Yuan², HE Yunlong³,
TIAN Dongmei⁴, LI Mingjun⁵, ZHANG Hui⁵

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources of Ministry of Natural Resources,
Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China;

3. College of Marine Sciences and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

4. Department of Ocean Exploration and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

5. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang 524057, China

收稿日期: 2025-04-21 修回日期: 2025-07-09

基金项目: 自然资源部海底矿产重点实验室开放基金课题(KLMMR-2022-G03); 国家自然科学基金(42202124);
广州市基础与应用基础研究项目(2023A04J0936)。

第一作者: 梁超, 男, 副教授, 从事沉积学与盆地动力学研究, lc1110@nwu.edu.cn。

Abstract Based on the well data and high-resolution 3D seismic data, as well as numerical simulation, we find that the confined submarine fan within the Central Canyon consists of two fan bodies connected by the turbidite channels. Depositional evolution of turbidity flows forming the submarine fan was severely influenced by the paleotopography. Turbidity flows accelerated within the first slope and mainly bypassed. They decelerated abruptly when they flowed into the first step and hydraulic jump occurred. Therefore turbidity flows spilled out of the turbidite channel to form the fan body 1. The fast deposition of turbidity flows is probably responsible for the poor sorting of turbidite sandstones within the fan body 1. Noting that turbidity flows accelerated slightly in the second slope and mainly bypassed. Finally, they flowed into the second step and slowed down gradually to form the fan body 2. Within the fan body 1, the late turbidite channel migrated at least 5km southeastward resulting from the gentle topography. Additionally, the late turbidite channel extended forward for tens of kilometers compared to the early turbidite channel. This is attributed to the enhanced sediment supply resulting from the sea level falling. Overall, variations of the topography and sediment supply are the main controlling factors for the depositional evolution of the confined submarine fan. Future researches should pay more attention to these factors.

Keywords submarine fan; submarine canyon; turbidity flow; depositional evolution; Northwestern South China Sea

近年来,全球深水油气勘探相继取得重大突破,成为常规油气发现最为重要的接替领域^[1]。作为深水油气储层的主要富集区,海底峡谷和海底扇的沉积演变机制得到了国内外研究人员的持续关注。海底峡谷是广泛分布于全球古今大陆边缘的长条状负地形(长约数千千米至数百千米,宽约数百米至数十千米,深约数百米甚至上千米),在横切剖面上具有典型的 V 型或者 U 型几何形态^[2-6]。它是连接陆架砂质沉积物和海底扇之间的重要沉积物输送通道,同时也是砂质沉积物的有利富集区^[7-8]。随着逐步充填,海底峡谷在变浅的同时,也在显著变宽^[9]。在物源供给减弱的背景下,海底扇的发育位置可能会向陆架边缘方向后退,甚至充填在海底峡谷中^[10]。前人针对海底扇的研究,主要集中在开阔地形背景下呈扇状展布的海底扇。这一类型的海底扇发育有内扇、中扇和外扇,在内扇范围内以浊流水道沉积为主,在中扇范围内则主要表现为水道朵叶体在侧向和垂向上的复合叠置,而在外扇范围内则以朵叶体前缘和半远洋或远洋泥质沉积的指状交互为主要特征^[11-17]。值得注意的是,受到海底峡谷长条状形态的限制以及沿峡谷流向地形坡度变化的影响,对地形变化敏感的浊流必然表现出不同的动态演化过程。因此,充填在海底峡谷中的海底扇很可能与常规呈扇状展布的海底扇,在沉积演变机制和浊积砂岩分布规律上具有较大差异。限制型海底扇的沉积演变机制以及对深水油气勘探的指示

作用仍需进一步开展研究。

琼东南盆地中央峡谷(见图 1)在其晚期充填阶段,发育了限制型海底扇。前人针对该海底扇开展了部分研究工作,但只注重了陵水段的扇体展布及内部叠置样式的刻画^[18-19]。该海底扇的系统演变,物源供给特点等问题都还没有得到系统的解答。这些问题的研究对于该区进一步的深水油气勘探非常重要。另外,在前期的针对中央峡谷的古地形恢复的研究工作中,发现在中央峡谷的晚期充填阶段,峡谷深泓线斜坡地形具有台阶式的变化特点^[10],且浊流的流动对地形的变化极其敏感^[20-21]。该台阶式深泓线斜坡地形很可能直接影响着浊流的动态演化过程,从而决定着限制型海底扇的沉积演变规律。台阶式深泓线斜坡地形是如何控制浊流的动态演化过程,需要进一步开展研究工作。

基于深水钻井岩性、测井曲线、电阻率成像测井和砂岩粒度分析等数据,以及高精度三维地震数据,结合基于纳维斯科托斯方程和湍流模型的数值模拟,本研究旨在系统阐明琼东南盆地中央峡谷充填晚期限制型海底扇的沉积演变规律,并揭示其主要控制因素及其内在机理,旨在为全球其他海域类似限制型海底扇的研究提供典型范例,并为研究区的深水油气勘探提供科学依据。

1 地质背景

琼东南盆地位于南海西北部〔见图 1(a)〕,是形成于前古近系基底上的新生代裂陷盆地^[22]。盆地的构造演化包括两个阶段:①裂陷期(始新世—渐新世)(见图 2)。在始新世—早渐新世,太平洋板块和印度板块分别与欧亚板块相互作用所产生的 NW 和 SN 向拉张应力造成了盆地内 NNE—NE、近 E—W 和 NW—NNW 断裂的活动,盆地发生快速沉降;晚渐新世早期,南海扩张产生 S—N 向拉张应力促使盆地内发生近 E—W 向断裂活动;晚渐新世晚期洋脊发生跃迁,地幔热流的

衰减导致盆地开始发生快速的沉降。②裂后期(中新世—全新世)(见图 2)。早中—中新世,盆地进入了缓慢的热沉降期;晚中新世—全新世,热衰减使得盆地的沉降速度加快,进入快速沉降期,盆地发育 NWW—NW 向断裂^[23-25]。盆地主体具有两拗加两隆的格局,由北向南依次为北部拗陷带、中部隆起带、中央拗陷带和南部隆起带〔见图 1(b)〕。其中,北部拗陷带包括崖南凹陷、崖北凹陷、松西凹陷和松东凹陷,中央拗陷带则由乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南宝岛凹陷和长昌凹陷组成。盆地的沉积环境经历了由陆相湖泊到半深海、深海的渐进式演变(见图 2)。

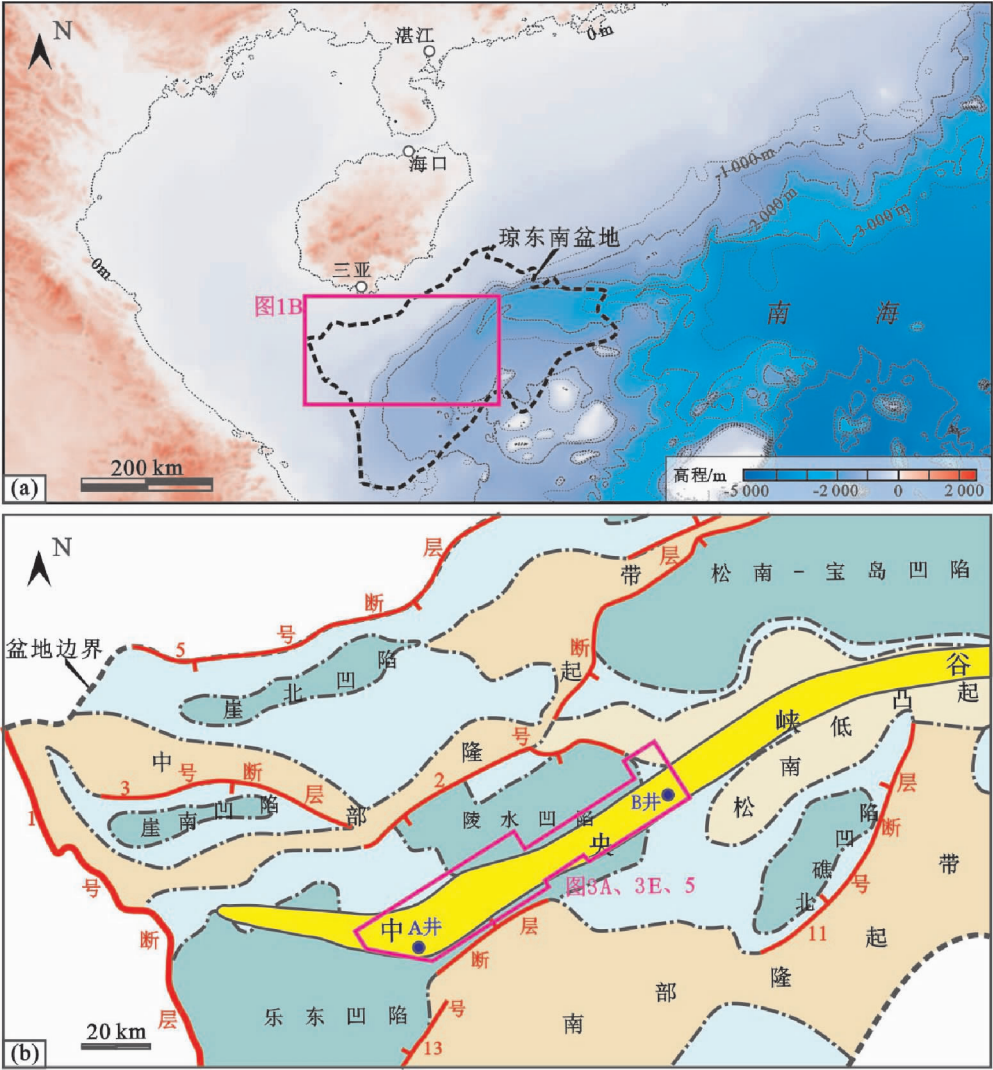


图 1 研究区位置及其邻区盆地构造单元划分

Fig. 1 Tectornic units of the study area and adjacent basins

中央峡谷位于中央拗陷带内,总长度约 425 km,宽度 930 km^[26]。峡谷的空间展布方向受控于盆地的控凹断裂分布〔见图 1(b)〕。研究区位

于中央峡谷西段〔见图 1(b)〕,包括了中央峡谷乐东段东部和陵水段。在中央峡谷形成时期,研究区的演化进入了半深海环境(见图 2)。峡谷的

积水道复合体,再到弯曲浊积水道溢岸沉积体。
③晚期充填阶段。该阶段表现为北部陆坡物源供给的块体流沉积体、细粒浊积体与轴向物源供给的相对粗粒浊积体的交互充填^[9-10]。本研究的限制型海底扇形成于中央峡谷的晚期充填阶段,在该阶段,中央峡谷的深泓线斜坡地形具有台阶式变化特点^[10]。

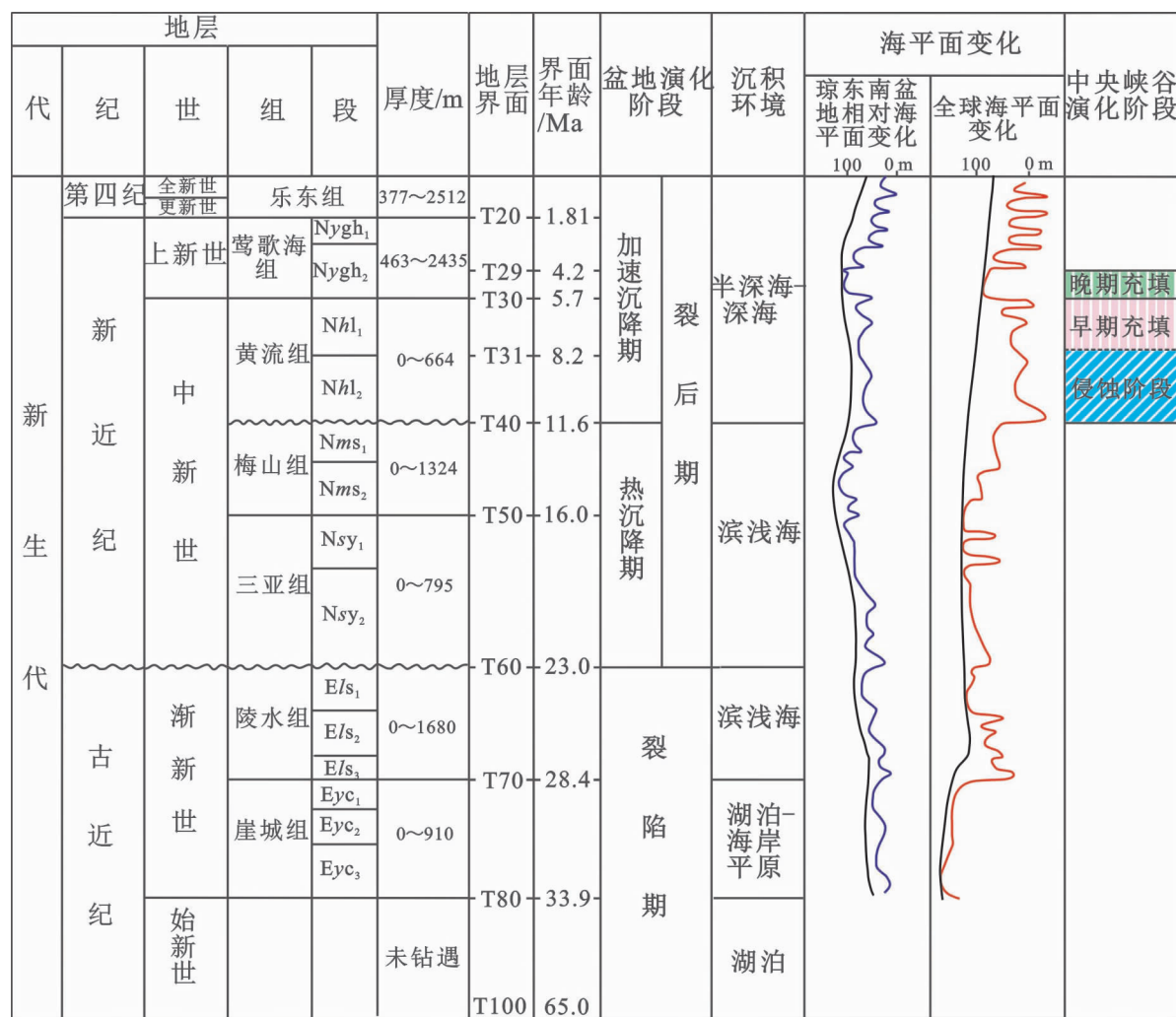


Fig.2 Stratigraphy, basin evolution, eustatic sea-level change and sedimentary response of the Central Canyon in the Qiongdongnan Basin

本研究利用的数据包括覆盖研究区的高分辨率三维地震数据(6 130 km²), 2 口钻井[A 井和 B 井, 见图 1(b)]的岩性、测井曲线和电阻率成像测井数据, 以及部分井壁心照片和粒度数据。这些数据全部来源于中海石油(中国)有限公司湛江

分公司。其中,三维地震数据的平面分辨率为 $25\text{ m} \times 12.5\text{ m}$,垂向分辨率约 20 m ,主频在 45 Hz 左右。地震数据的解释采用 GeoFrame 软件中的 Seismic Interpretation 模块,通过观察地震反射的振幅、频率和连续性,以及地震反射的终止类型,对关键地层界面〔海底扇顶部界面(4.2 Ma)、海底扇底部界面、中央峡谷的峡谷壁和 T30 界面(5.7 Ma)〕进行全区的追踪和闭合。沿海底扇顶

部和底部界面的方差体切片、海底扇的均方根振幅属性在 GeoFrame 中的 Seismic Attribute Toolkit 模块中进行计算。另外,将基于三维地震数据解释得到的时间域层位数据,利用研究区的时-深转换标尺转换到深度域,利用 Petrel2018 软件来计算海底扇的厚度:

$$D = 4 \times 10^{-5} t^2 + 1.011 4t - 363.25 \quad (1)$$

式中: D 为深度,单位为 m; t 为双程旅行时间,单位为 ms。

本研究采用的电阻率成像数据均为动态图像,它是在特定的滑动深度窗口内,重新进行了颜色标注,用来突出局部电阻率的变化,展示其所揭示的海底扇的沉积构造。粒度测试数据由中海石油(中国)有限公司湛江分公司利用激光粒度分析仪测试井壁心样品得到。本研究开展的浊流数值模拟采用了纳维斯托克斯方程和湍流的数值模型,并采用了有限体积法求解^[27]。数值模拟的沉积物输入粒径采取 A 井和 B 井各井壁心样品粒径的平均值(0.022 mm)。海底扇顶部界面(T29 界面)的古地形据前人研究成果^[10]。

3 限制型海底扇的沉积特征

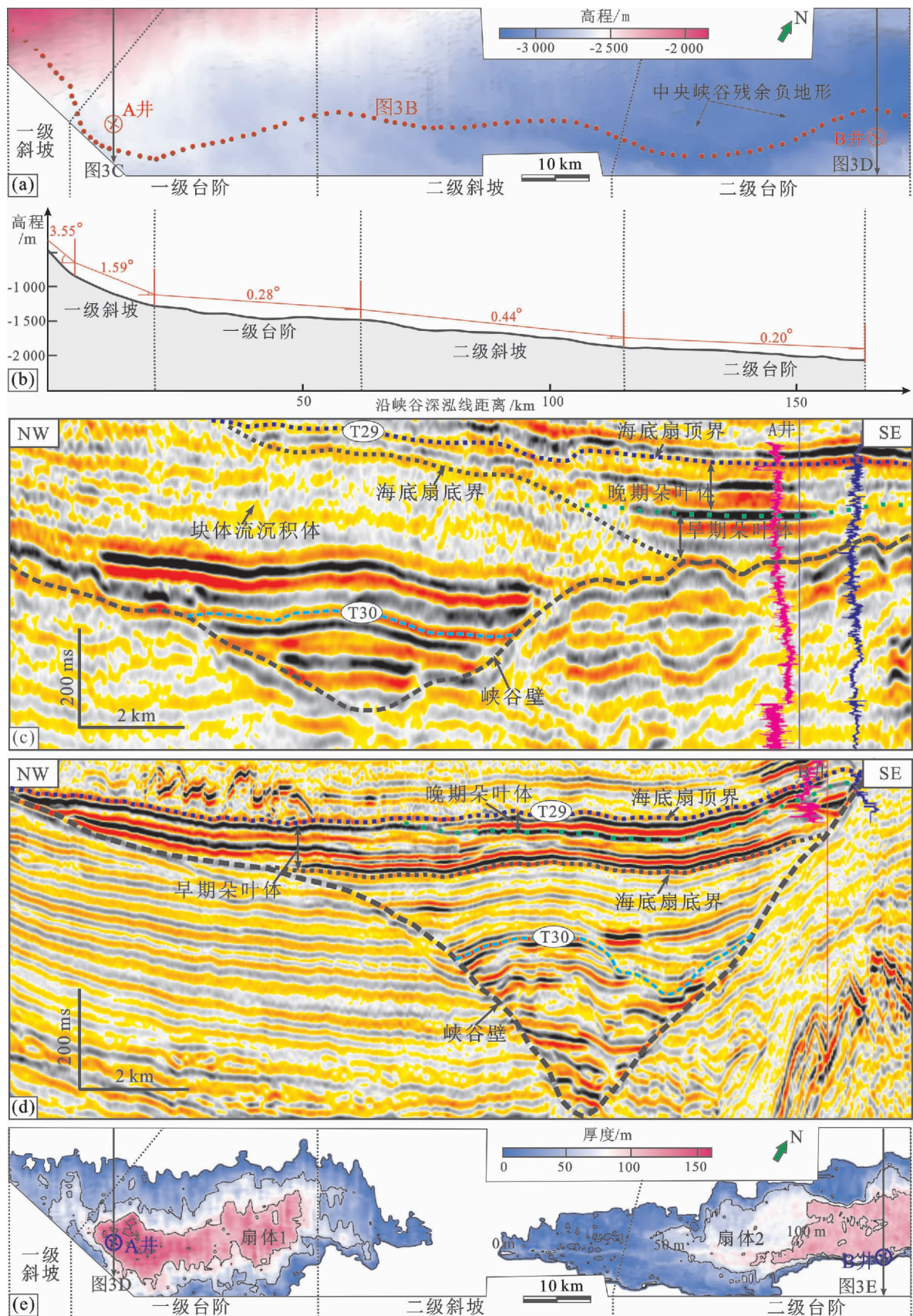
3.1 海底扇的发育位置

在限制型海底扇的发育时期,研究区基本具有多级台阶式的古海底地形,由上游向下游方向,依次包括一级斜坡、一级台阶、二级斜坡和二级台阶[见图 3(a)、(b)],这时海底扇所处的中央峡谷已完成主体充填[见图 3(c)、(d)]。一级斜坡最陡,坡度在 $1.59^\circ \sim 3.55^\circ$,二级斜坡相对较缓,坡度在 0.44° 左右;一级台阶和二级台阶则非常平缓,坡度分别在 0.28° 和 0.20° 左右。一级斜坡和一级台阶坡度差异较大,在二者的结合部位存在着坡度的骤降[见图 3(b)]。限制型海底扇由两个扇体组成(扇体 1 和扇体 2),二者均呈狭长的伸长状[见图 3(e)],这与以往其他研究中观察到的扇状展布形态显著不同。从限制型海底扇的厚度来看,扇体 1 主体位于一级台阶上,其沉积中心最大厚度达到了 160.2 m;扇体 2 的主体位于二级台阶上,沉积中心最大厚度为 140.1 m[见图 3(e)]。海底扇在地震剖面上,具有中-强振幅、高连续性反射特征,并表现为早期和晚期朵叶体的垂向叠置[见图 3(c)、(d)]。值得注意的

是,在扇体 2 内部,晚期朵叶体对早期朵叶体具有明显的侵蚀特征[见图 3(d)]。

3.2 海底扇的岩性组合和沉积构造特征

目前,共有 2 口深水钻井(A 井和 B 井)完整揭示了研究区限制型海底扇的岩性特征。A 井的岩性组合表明,扇体 1 的早期朵叶体主要为浊流成因的灰色泥岩(厚 77.5 m),该套泥岩质不纯,常局部含有粉砂,在其底部发育有 4.8 m 厚的浊积席状砂体。扇体 1 的晚期朵叶体则呈现出浊积席状砂和半远洋泥质沉积的交互沉积特征[见图 4(a)]。扇体 2 相对于扇体 1 而言,整体更为富砂;扇体 2 的早期朵叶体厚于扇体 1,但扇体 2 的晚期朵叶体却较扇体 1 薄[见图 4(b)]。在扇体 2 的早期朵叶体中,浊积席状砂单层最大厚度达到了 30 m,其下部表现为浊积席状砂与半远洋泥质沉积的互层;扇体 2 的晚期朵叶体则以浊积席状砂为主,仅发育很薄的半远洋泥质沉积(厚 2.9 m)(见图 4)。B 井的电阻率成像测井清晰地揭示出,浊积席状砂发育块状层理、波状层理和水平层理[见图 4(c)、(d)];井壁心照片表明,浊积砂体虽然已经成岩,但固结程度不高,局部呈松散的颗粒[见图 4(e)]。具块状层理的粉砂岩或泥质粉砂岩属于鲍马序列中的 A 段,为高密度浊流形成的典型沉积之一,而呈波状层理和水平层理的粉砂岩或泥质粉砂岩分别属于鲍马序列中的 C 段和 D 段,为低密度浊流的产物。另外,A 井揭示的扇体 1 的砂岩分选系数平均值为 6.3,B 井揭示的扇体 2 的砂岩分选系数平均值则为 7.5,指示扇体(粒度累积曲线 1% 处对应的粒径值)平均值为 0.27 mm,B 井揭示的扇体 2 的 C 值平均值为 0.26 mm,即扇体 1 的 C 值大于扇体 2;A 井揭示的扇体 1 的 M 值(粒度累积曲线 50% 处对应的粒径值)平均值为 0.01 mm,B 井揭示的扇体 2 的 M 值平均值则为 0.02 mm,即扇体 1 的 M 值要小于扇体 2。 M 值反映形成浊积砂体的浊流的平均动能,因此,从 M 值来看,形成扇体 2 的浊流动力要强于扇体 1。 C 值则代表了形成浊积砂体的浊流的最大搬运能力,因而从 C 值来看,形成扇体 1 的浊流的最大搬运能力要强于扇体 2。综合扇体 1 和扇体 2 的 C 值和 M 值来看,尽管形成扇体 1 的浊流的平均动能要弱于形成扇体 2 的浊流,但形成扇体 1 的浊流的动能相较于扇体 2,可能具有较大的幅度变化,并不稳定。



(a)、(b) T29 界面古地形; (c)、(d) 海底扇地震反射特征; (e) 厚度分布

图 3 中央峡谷限制型海底扇发育位置及地震反射特征

Fig. 3 Location and seismic characteristics of cerifined submarine fans in the Central Canyon

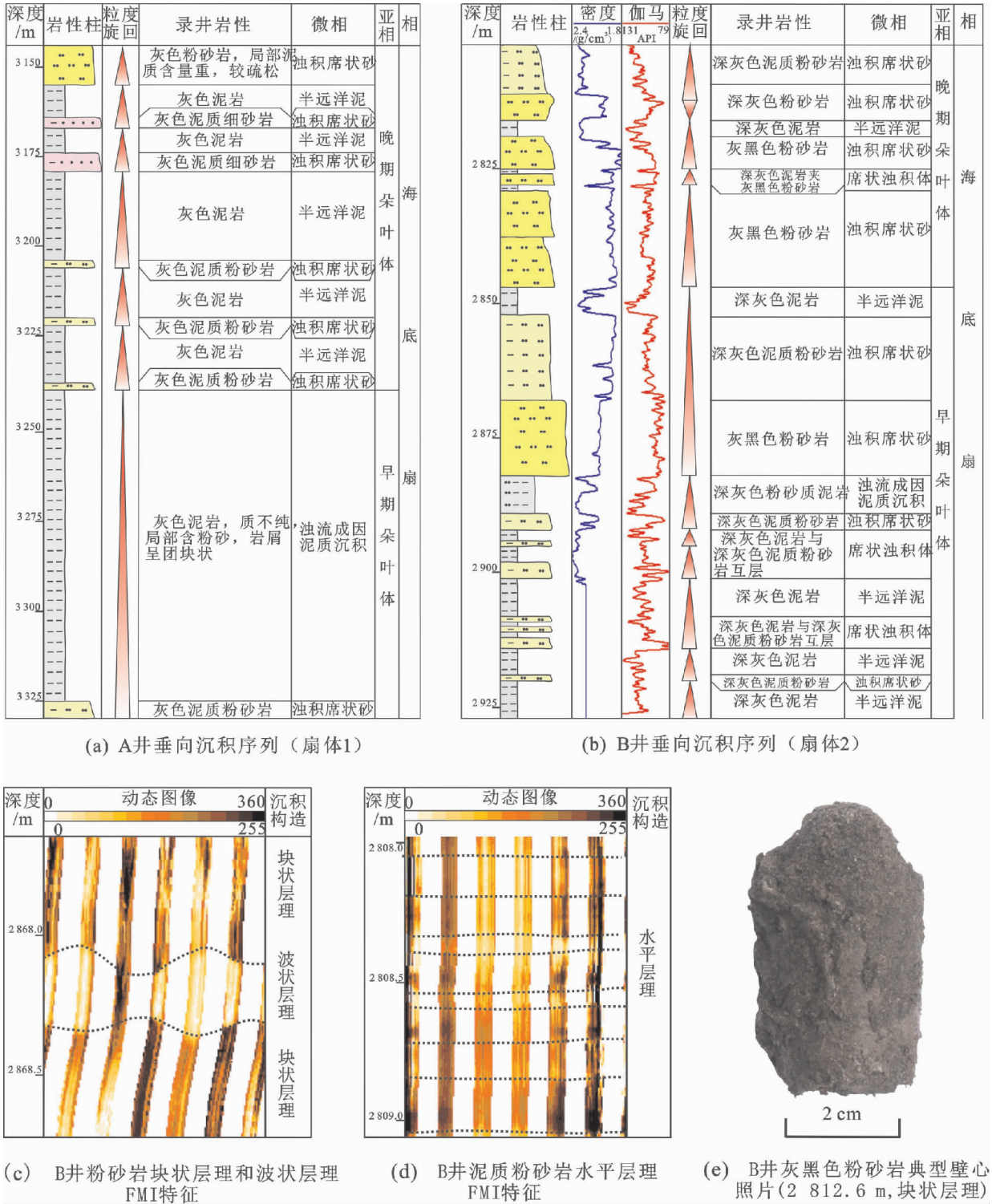


图 4 限制型海底扇垂向沉积序列

Fig. 4 Vertical Sedimentary Sequence of a Confined Submarine Fan

3.3 限制型海底扇的沉积相构成

岩性、测井曲线和地震反射特征表明,研究区限制型海底扇发育早期和晚期朵叶体亚相〔见图 3(c)、(d),图 4〕,它们由半远洋泥和浊积席状砂等微相在垂向上交互叠置组成(见图 4)。此外,

沿限制型海底扇顶部和底部界面的方差体切片直观揭示出了连接扇体 1 和扇体 2 的浊积水道亚相〔见图 5(a)、(b)〕。其中,沿海底扇底部界面的方差体切片所揭示的浊积水道连接的是扇体 1 和扇体 2 的早期朵叶体;该时期,浊积水道分布在一

范围内向东南发生明显迁移,并在二级台阶的范围内向下游延伸了数十公里〔见图 5(a)、(b)〕。组成海底扇的扇体 1 和扇体 2 由于三维地震数据范围有限,未能完全揭示出它们的展布范围,但从现有的结果来看,它们在平面上总体具有伸长状的形态,扇体 1 和扇体 2 的覆盖面积至少分别有 931.5 km^2 和 737.3 km^2 〔见图 5(c)〕。它们在均方根振幅属性图上具有不同的表现〔见图 5(c)〕。在扇体 1 中,除了分布有较多强振幅值区域之外,还分布有较大范围的均方根振幅属性低值区〔见图 5(c)〕,这指示扇体 1 内部砂泥比很可能较低—中等,与 A 井所揭示的岩性组合相吻合〔见图 4(a)〕。扇体 2 则仅在其头部分布有零星的均方根振幅属性低值区,整体均方根振幅值较高〔见图 5(c)〕,指示扇体 2 很可能整体富砂, B 井所揭示的岩性组合〔见图 4(b)〕很好地证明了这一点。从平面上来看,早期和晚期浊积水道将扇体 1 和扇体 2 连接,作为沉积物的输送通道,为扇体 1 和扇体 2 的形成提供充足的物源。

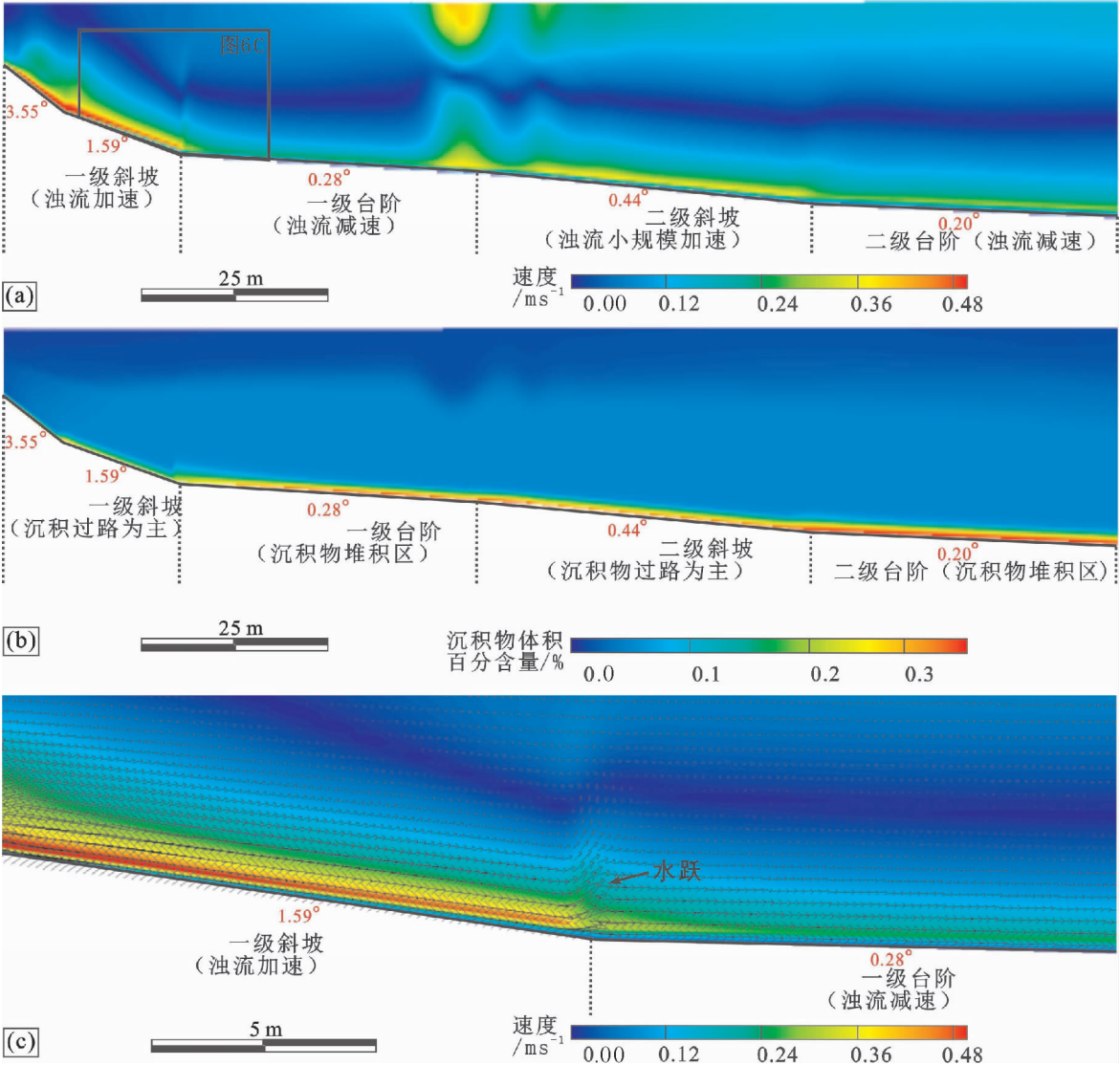


Fig. 5 Planform Distribution Pattern of the Confined Submarine Fan

4 海底扇沉积过程的数值模拟

研究区海底扇沉积过程的二维数值模拟结果表明,在一级斜坡区,浊流的加速非常明显,最大可达 0.5 m/s;流速的高值区主要分布在接近底床的位置,往上流速快速减小,即流体中上部的雾状云朵往往流速较低〔见图 6(a)〕。在下游的一级台阶上,浊流减速明显,流速保持在 0.1 m/s 左右〔见图 6(a)〕。这种浊流流速的骤降,使得在一级斜坡区和一级台阶区的结合部位,发生了较为明显的水跃,浊流流体首先涌动导致浊流厚度增大,随后厚度小规模降低,趋于稳定〔见图 6

(c)〕。值得注意的是,在二级斜坡部位,浊流的流速重新增大,但最大流速仅达到 0.37 m/s,浊流流速最高的部位同样分布在接近底床的位置,往上浊流的流速快速减小〔见图 6(a)〕。在二级台阶部位,浊流的流速保持在 0.2 m/s 左右,相较于紧邻的上游二级斜坡区域,浊流发生明显减速,但未见明显的水跃,在经过坡度变化部位前后,浊流的厚度未发生明显的变化〔见图 6(a)〕。从沉积物的分布特征来看,在一级斜坡区域和二级斜坡区域,仅有小部分沉积物发生堆积,沉积物表现为以过路为主〔见图 6(b)〕。在一级台阶和二级台阶区域,沉积物堆积较厚,且二级台阶地区沉积物堆积的量要高于一级台阶地区〔见图 6(b)〕。



(a) 流速分布; (b) 沉积物体积分数分布; (c) 一级斜坡和一级台阶结合部位的水跃现象

图 6 限制型海底扇浊流动态演化数值模拟结果

Fig. 6 Dynamic modeling of turbidity current evolution in a confined submarine fan

5 限制型海底扇的沉积演变过程及其主控因素

研究区限制型海底扇形成于中央峡谷的晚期充填阶段,这一时期中央峡谷的内部空间已大部分被沉积物充填,残余的中央峡谷负向地形仍保存着一定的峡谷形态,但宽度显著增大〔见图3(c)、(d)和图7〕。三维地震数据的地震反射特征、方差体切片和均方根振幅属性〔见图3(c)~(e)和图5〕等综合表明,研究区限制型海底扇由两个伸长状扇体组成,它们被早、晚两期浊积水道连接。扇体主体分布在一级台阶和二级台阶地区,在一级斜坡和二级斜坡区域沉积物主体表现为过路〔见图3(e)和图5(c)〕。针对该海底扇沉积过程的数值模拟得到了相同的研究结果〔见图6(b)〕。在这种情况下,数值模拟得到的浊流动态演化过程就非常贴合浊流的真实动态沉积过程。在一级斜坡区域,地形较陡,坡度达到了 $1.59^{\circ} \sim 3.55^{\circ}$,在重力沿斜坡分力的作用下,浊流快速加速〔见图6(a)〕。在高流速的状态下,浊流将沉积物往下游输送,能够沉积下来的厚度很薄〔见图3(e)〕,且以水道两侧的小规模溢岸沉积为主,即沉积物呈狭长条状分布在浊积水道两侧〔见图5(c)〕。在一级台阶地区,地形急剧变缓,降为 0.28° 。坡度的骤降,使得沿斜坡的分力急剧减小,浊流主要受到摩擦力的作用,快速降速,在一级斜坡和二级斜坡的结合部位,发生水跃,使得浊流的厚度增大,将大部分动能转化为浊流的势能〔见图6(c)〕。浊流厚度的增大,使得流体中上部可以溢出水道,急剧降低的流速则导致沉积物的快速堆积,从而形成了扇体1(见图7)。而这种沉积物的快速堆积,很可能是导致扇体1浊积砂岩分选较差的主要原因。在浊流向下流动进入二级斜坡后,坡度增加到了 0.44° 〔见图6(a)〕。尽管这个坡度增加的幅度很小,但浊流的流动对地形的变化非常敏感,从而使得浊流重新加速,它的最大流速保持在 0.37 m/s 左右〔见图6(a)〕。小规模加速,使得浊流继续将沉积物往下游输送,因此在二级斜坡部位沉积物仍以过路为主,仅有少量沉积物堆积〔见图6(b)、图7〕。随着浊流流动进入二级台阶之后,坡度降到了 0.20° ,地形变得非常平缓,浊流在摩擦力的作用下缓慢减速,沉积物得以充分分选后沉积,

这应该就是扇体2浊积砂岩的分选要好于扇体1的主要原因。由于二级斜坡和二级台阶的地形坡度相差不大,浊流流速降低的幅度也较为有限,因此在二级斜坡和二级台阶结合部位并未观察到明显的水跃。

另外,结合深水钻井的岩性组合、测井曲线响应特征(见图4),以及三维地震数据的地震反射特征、方差体切片和均方根振幅属性〔见图3(c)~(e)和图5〕来看,研究区限制型海底扇的形成应包括两个阶段,即早期阶段和晚期阶段。在早期阶段,浊流沿早期浊积水道流动,在台阶式斜坡地形的作用下,按照上述讨论的方式沉积形成早期的扇体1和扇体2(由早期朵叶体和早期的浊积水道组成)〔见图7(a)〕。在进入晚期阶段后,很可能由于早期阶段沉积物对中央峡谷残余负向地形的充填,使得地形变得平缓,浊积水道在一级斜坡和一级台阶的结合部位发生决口改道〔见图5(c)、图7(b)〕,向东南方向迁移距离至少达到5 km。受台阶式地形的影响,晚期浊积水道在二级斜坡地区仍主体表现为沉积物过路〔见图6(b)〕。值得注意的是,晚期浊积水道在二级台阶地区向下游延伸了数十公里,虽然在二级台阶地区因为坡度的减小,下切作用减弱,侧向侵蚀作用增强,宽度显著增加到了3 km左右,但对于早期沉积的朵叶体仍表现出了一定的侵蚀性〔见图5(b)、(c),图7(b)〕。这种特征指示物源供给强度在晚期阶段的增强,从而导致物源输送通道(浊积水道)向下游方向延伸,沉积物堆积部位相应向洋盆方向迁移。在中央峡谷晚期充填阶段的末期,琼东南盆地的相对海平面和全球海平面均发生了小幅度的下降(见图2),因此轴向物源(来自海南岛西部和越南中部)向深水环境输送沉积物的强度增强,这就是研究区晚期浊积水道在二级台阶地区向下游方向延伸数十公里的根本原因。

综合来看,限制型海底扇的沉积物分布样式受到地形起伏变化的显著控制,与以往沉积在半深海低角度斜坡或深海平原开阔、平缓地区的海底扇具有着显著不同。限制型海底扇的形态可能随着限制性地形形态的不同而不同,且它常常由于地形的起伏变化,发育多个扇体,这些扇体被浊积水道(沉积物输送通道)连接起来。组成限制型海底扇的各个扇体的浊积砂岩的分选性取决于坡度变化导致的水跃程度,坡度的急剧变化往往

会导致较强的水跃发生,所引起的沉积物的快速堆积会导致浊积砂岩的分选较差,孔隙度和渗透率较低。坡度急剧降低的幅度、水跃的程度、以及

浊积砂岩的分选系数变化这 3 个因素间的半定量或定量关系,有赖于后续的进一步研究。

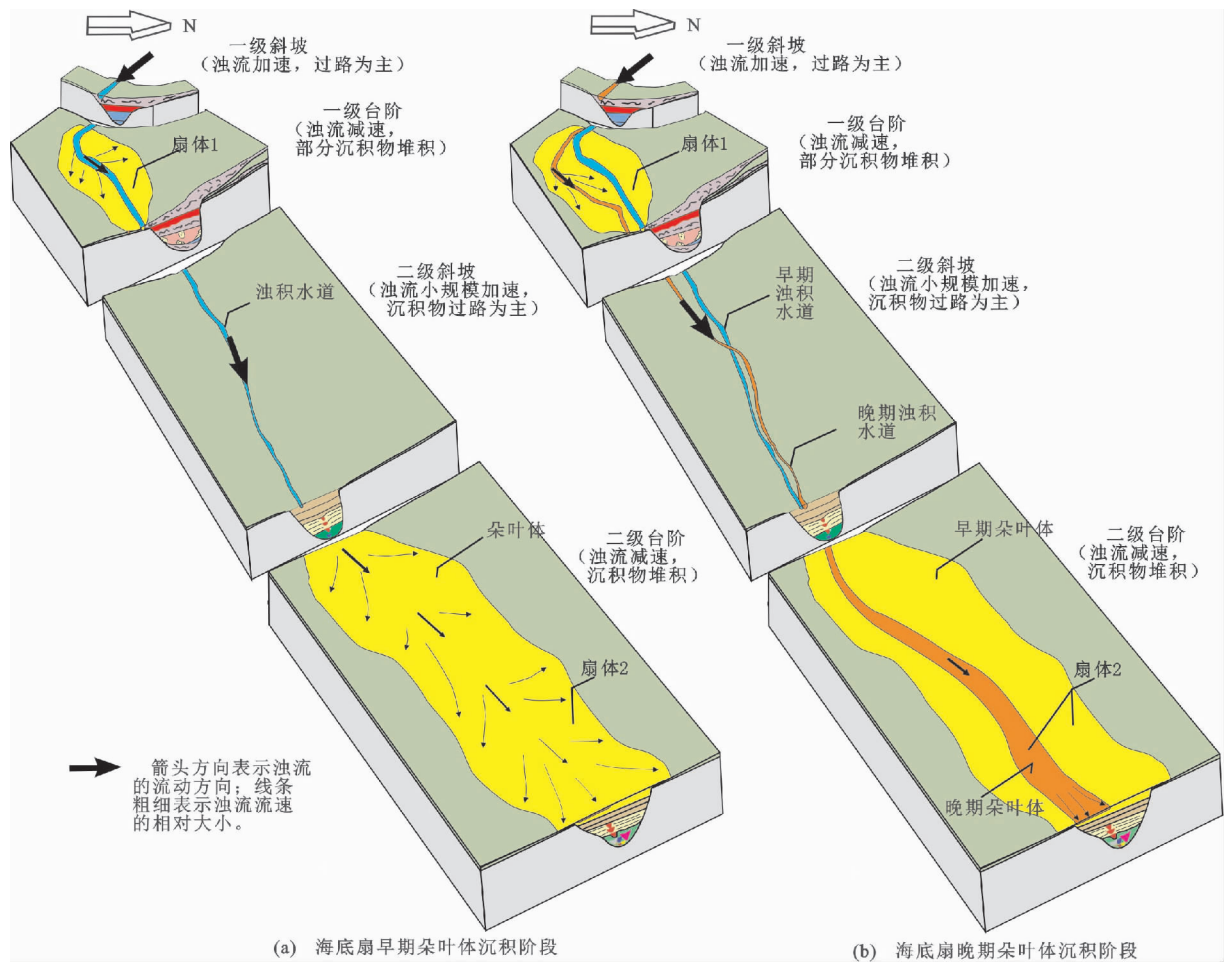


图 7 琼东南盆地中央峡谷充填晚期限制型海底扇沉积演化模式图

Fig. 7 Sedimentary evolution model of the late-stage confined subarinarine fans in the Central Canyon, Qiongdongnan Basin

6 结论

1)研究区限制型海底扇由两个伸长状的扇体组成,它们被早期和晚期两条浊积水道(沉积物输送通道)连接。扇体整体表现为浊积席状砂体和半远洋泥质沉积的交互叠置。浊积席状砂包括粉砂岩和泥质粉砂岩,它们常发育块状层理、波状层理和水平层理。

2)限制型海底扇的沉积物分布受控于台阶式斜坡地形(从上游向下游依次为一级斜坡、一级台阶、二级斜坡、二级台阶)。一级斜坡地形坡度较陡,浊流快速,高流速的浊流将沉积物向下游输送,该段沉积物以过路为主。在一级台阶地区,坡度的骤降使得浊流发生水跃并减速,浊流厚度变大,溢出浊积水道堆积形成扇体 1。在二级斜

坡地区,浊流在坡度小规模增加的作用下,小规模加速,沉积物以过路为主。在浊流进入二级台阶地区后,在平缓地形的作用下,浊流缓慢减速,沉积物卸载堆积形成了扇体 2。

3)晚期浊积水道在一级斜坡和一级台阶结合部位的决口改道,受控于海底扇发育早期,沉积物对中央峡谷残余负向地形的充填,使得地形变得平缓,浊流向东南低地势部位汇聚。晚期浊积水道向洋盆方向延伸数十公里,受控于海平面小幅度下降导致的沉积物供给增强。

4)坡度的骤减可能导致水跃现象的发生,其所造成的沉积物的快速堆积会导致浊积砂岩分选较差,孔隙度和渗透率较低。

参考文献

[1] 张功成,屈红军,张凤廉,等. 全球深水油气重大新

- 发现及启示[J]. 石油学报, 2019, 40(1):1-55.
- ZHANG G C, QU H J, ZHANG F L, et al. Major new discoveries of oil and gas in global deepwaters and enlightenment [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1):1-55.
- [2] 苏明,李俊良,姜涛,等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4):85-93.
- SU M, LI J L, JIANG T, et al. Morphological features and formation mechanism of the Central Canyon in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(4):85-93.
- [3] HARRIS P T, WHITEWAY T. Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins [J]. *Marine Geology*, 2011, 285: 69-86.
- [4] NORMANDEAU A, LAJEUNESSE P, ST-ONGE G. Submarine canyons and channels in the lowerstlawrence estuary (eastern Canada): Morphology, classification and recent sediment dynamics [J]. *Geomorphology*, 2015, 241: 1-18.
- [5] 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.
- LI X J, WANG D W, WU S G, et al. Geomorphology of Sansha Canyon: Identification and implication [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(3):28-36.
- [6] 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.
- ZHONG G F, ZHU B D, WANG L L. Turbidity current related landforms in the South China Sea [J]. *Science and Technology Review*, 2020, 38(18):75-82.
- [7] MANSURBEG H, DEROS L F, MORAD S, et al. Meteoric-water diagenesis in late Cretaceous canyon-fill turbidite reservoirs from the Espírito Santo Basin, eastern Brazil [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 37: 7-26.
- [8] 王振峰,孙志鹏,张迎朝,等. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(4):54-64.
- WANG Z F, SUN Z P, ZHANG Y C, et al. Distribution and hydrocarbon accumulation mechanism of the giant deepwater Central Canyon gas field in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4):54-64.
- [9] LIANG C, XIE X N, HE Y L, et al. Multiple sediment sources and topographic changes controlled the depositional architecture of a palaeoslope-parallel canyon in the Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 104161.
- [10] LIANG C, LIU C, XIE X N, et al. The role of large-scale mass wasting processes in changing the sediment dispersal pattern in the deep-water Central Canyon of the northwestern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 122:104693.
- [11] RICHARDS M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(5):792-822.
- [12] PAYROS A, PUJALTE V. Calciastic submarine fans: An integrated overview [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 86: 203-246.
- [13] WANG J H, PANG X, WANG H, et al. Seismic geomorphological analysis of submarine fan architecture in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin: Impact of second-order relative sea-level change[J]. *Marine Geology*, 2024, 469: 107234.
- [14] 张佳佳,吴胜和. 海底扇朵叶沉积构型研究进展[J]. 中国海上油气, 2019, 31(5):88-106.
- ZHANG J J, WU S H. Research progress on the depositional architecture of submarine-fan lobes [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(5):88-106.
- [15] FISHER W L, GALLOWAY W E, STEEL R J, et al. Deep-water depositional systems supplied by shelf-incising submarine canyons: Recognition and significance in the geologic record [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103531.
- [16] 李亚茹,李华,杨朝强,等. 南海莺歌海盆地黄流组海底扇储层构型特征[J]. 古地学报, 2022, 24(3):556-567.
- LI Y R, LI H, YANG Z Q, et al. Reservoir architecture of the Huangliu Formation submarine fan in Yinggehai Basin South China Sea [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(3):556-567.
- [17] 李建平,贾万丽,李宏义,等. 物源地貌双控背景下海底扇沉积储层特征及勘探意义:以琼东南盆地梅山组为例[J]. 地质科学, 2024, 59(1):148-165.
- LI J P, JIA W L, LI H Y, et al. Sedimentary reservoir characteristics and exploration significance of submarine fan under the dual control of provenance and geomorphology: Taking the Meishan Formation in Qiongdongnan Basin as an example [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024, 59(1):148-165.
- [18] 李冬,徐强,王永凤,等. 琼东南盆地中央峡谷西段

- 充填体系沉积演化与砂体分布[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5):799-803.
- LI D, XU Q, WANG Y F, et al. Filling evolution and sand distribution in the west part of Central Canyon, Qiongdongnan Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5):799-803.
- [19] WU W, LI Q, YU J, et al. The Central Canyon depositional patterns and filling process in east of Lingshui depression, Qiongdongnan Basin northern South China Sea [J]. Geological Journal, 2018, 1:1-18.
- [20] JACKSON C A, JOHNSON H D. Sustained turbidity currents and their interaction with debrite-related topography: Labuan Island, offshore NW Borneo, Malaysia [J]. Sedimentary Geology, 2009, 219: 77-96.
- [21] JAIJEL R, BITON E, WEINSTEIN Y. Observations of turbidity currents in a small, slope-confined submarine canyon in the Eastern Mediterranean Sea [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 604: 118008.
- [22] XIE X N, MÜLLER R D, REN J Y, et al. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea [J]. Marine Geology, 2008, 247: 129-144.
- [23] XIE X N, MÜLLER R D, LI S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(7):745-765.
- [24] 雷超,任建业,裴健翔,等. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J]. 地球科学,2011, 36(1): 151-162.
- LEI C, REN J Y, PEI J X, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea [J]. Earth Science,2011, 36(1): 151-162.
- [25] 纪沫,张功成,杨海长,等. 琼东南盆地深水区东区凹陷带结构构造及其演化特征[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(9):26-35.
- JI M, ZHANG G C, YANG H C, et al. Structural pattern and evolution of eastern sag belt in deep-water area of Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology Frontiers,2014, 30(9):26-35.
- [26] SU M, XIE X N, LI J L, et al. Gravity flow on slope and abyssal systems in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85, 243-253.
- [27] TIAN D M, JIANG T, LIU B J, et al. Early Miocene sedimentary processes and their hydrocarbon implications in the Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 132-147.

(编辑 雷雁林)