

文章编号: 1000-0550(2013)04-0706-11

南海西北次海盆深水扇系统沉积演化特征

刘睿¹ 周江羽¹ 张莉² 刘晓峰¹ 韦振权² 钱星² 帅庆伟² 廖锦芳¹

(1. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074; 2. 广州海洋地质调查局 广州 510760)

摘要 基于高品质二维地震资料的分析解释,在南海西北次海盆深海平原区识别出大规模深水扇系统。深水扇系统上扇为限制性水道复合体发育区,中扇为多期扇体垂向叠置区,下扇则以水道—朵体沉积为主。琼东南中央峡谷—水道是本区深水扇系统的主要物源通道,沉积物主要来源于红河、北部陆架—陆坡以及中西沙隆起区。本区深水扇系统可基本划分为晚中新世(I)、中新世(II和III)以及第四纪(IV和V)五期。各期深水扇的空间展布受到先存地形和物源供给强度的控制,双峰海山将深水扇系统分隔为南北两部分,早期沉积的扇体改变了后期扇体沉积地形。在丰富物源供给下,水道的冲溢频率较高,各个深水扇之间存在明显的侧向上叠迁移特征。沉积物源和南海北部“三段式”陆坡地形控制着整个南海北部深水扇系统的发育和演化。

关键词 深水扇 琼东南中央水道 西北次海盆 南海北部

第一作者简介 刘睿 男 1988年出生 研究生 能源地质工程 E-mail: liur56639@163.com

通讯作者 周江羽 男 教授 E-mail: zjy522@163.com

中图分类号 P512.2/P67 **文献标志码** A

深水扇作为深水重力流的重要产物,以其规模大、砂质含量高的显著特点,已成为深水油气勘探的优质目标^[1-6]。工业需求极大的促进了深水扇相关科学研究的发展。Walker通过对古代、现代深水扇模式的归纳和总结,建立了深水扇经典沉积模式,突出了深水扇的典型识别标志,如扇上水道—堤坝、朵体、扇体叠置等^[4,7]; Mitchum等基于层序地层理论,建立了首个与深水扇相关的地震(层序)地层模型,强调了海平面变化对深水扇发育的控制作用^[8,9]; Nilsen等开始发现单一的深水扇沉积模式存在局限性,并提出将深水扇划分为大型三角洲物源供给下的细粒型和峡谷物源供给下的粗粒型两类^[10]; Richards等基于深水扇发育的物源背景(点、线、多物源以及富泥质、富砂质、富砾物源)和构造背景(斜坡、坡脚、盆底平原)对深水扇进行了进一步类型划分,并分别建立相模式,突出了不同物源和构造背景对深水扇发育的控制作用^[2,6,11,12]。

众多模式基本总结了深水扇发育的控制因素,显示了水道和朵体为深水扇的基本组件。前人对这些组件进行了深入分析,特别是相关的限制性水道^[13-16]、水道—堤坝体系^[16-19]、水道—朵体转换带^[20]及水道—朵体体系^[21-27],系统总结了这些构成

组件的形态、结构以及岩性特征,将其发育的控制因素再次归纳为地形限制性、物源供给(频率、强度)构造活动等,并建立起了相应储层模型。此外,通过物理模拟与岩芯、露头观察,对于深水扇相关沉积机理产生了新的认识,从传统的浊流发展到高密度浊流、碎屑流,甚至不同阶段存在不同流体状态的转换^[1,28,29]。

随着国内深水油气勘探的不断深入,先后在南海北部深水区发现了珠江深水扇系统^[5,30-32]、红河海底扇^[33],其中,珠江深水扇油气勘探已经取得了重大突破。南海北部深水扇系统与孟加拉扇、印度深水扇的发育均以青藏高原隆升为物源背景^[5,31,34,35],它们均可归纳为大型河流三角洲供给下的点或线型物源作用结果。不同的是珠江深水扇、红河海底扇规模较小且均局限于陆坡上,而印度扇、孟加拉扇则规模巨大并已经延展至深海平原。南海北部的深海平原区——西北次海盆内是否存在大规模深水扇成为疑点。

南海北部琼东南中央峡谷的发育为西北次海盆内发育深水扇创造了有利条件^[33,34,36-42]。基于现有大量高品质2D地震资料,对南海北部深海平原区西北次海盆内大规模深水扇系统进行了识别。深水扇系统以琼东南中央峡谷—水道为主要物源供给通道。

①国家海洋保障工程“南海北部陆坡双峰南海域油气资源潜力调查与研究”(编号:1212011088109)资助
收稿日期:2012-09-09; 收修改稿日期:2012-12-06

本文就该深水扇系统的地震反射结构特征、物源供给以及时空演化规律进行分析。

1 区域地质背景

西北次海盆位于南海北部深水区,西部为西沙海槽,北部为南海北部陆坡,西南部为中西沙隆起,东部为中央海盆,现今盆地最大水深可达3 500 m(图1a、b)。晚白垩纪南海北部陆缘发生近S-N向裂隙,形成一系列NEE-NE向断陷;32~16 Ma南海进入扩张期^[43-45]。扩张过程受印度-欧亚板块碰撞、哀牢山-红河断裂带左旋走滑以及地幔柱上涌联合机制作用^[46];32~30 Ma西北次海盆与中央海盆发生自东向西“剪刀式”扩张,伴随海水侵入,沉积环境从陆相过渡为海陆交互相;28 Ma左右西北次海盆扩张衰

减,中央海盆继续扩张,南海北部边缘叠加在早期断陷之上的陆架-陆坡-海盆格局基本成型,西北次海盆沉积环境转变为深海相;25~23 Ma左右南海扩张轴向南跃迁,随之西北次海盆停止扩张并进入初始热沉降阶段,跃迁过程中南海北部陆架坡折线从白云凹陷南侧跳跃至北侧;16 Ma左右南海海盆停止扩张,海盆整体进入热沉降期;10.5~5 Ma南海西北部莺-琼盆地快速沉降,莺-琼盆地坡折线向西北后退形成向东开口的喇叭状地形,西沙海槽断层活动性也逐渐加强^[45,47-55]。与此同时,10.5 Ma左右全球海平面的显著下降(图1c),中央峡谷-水道开始发育,向西北次海盆输送大量沉积物^[34,36,38,56,57]。据此,Wang等预测了西北次海盆内深水扇的存在^[33],Yuan等在西北次海盆内初步识别出深水侵蚀水道^[34]。

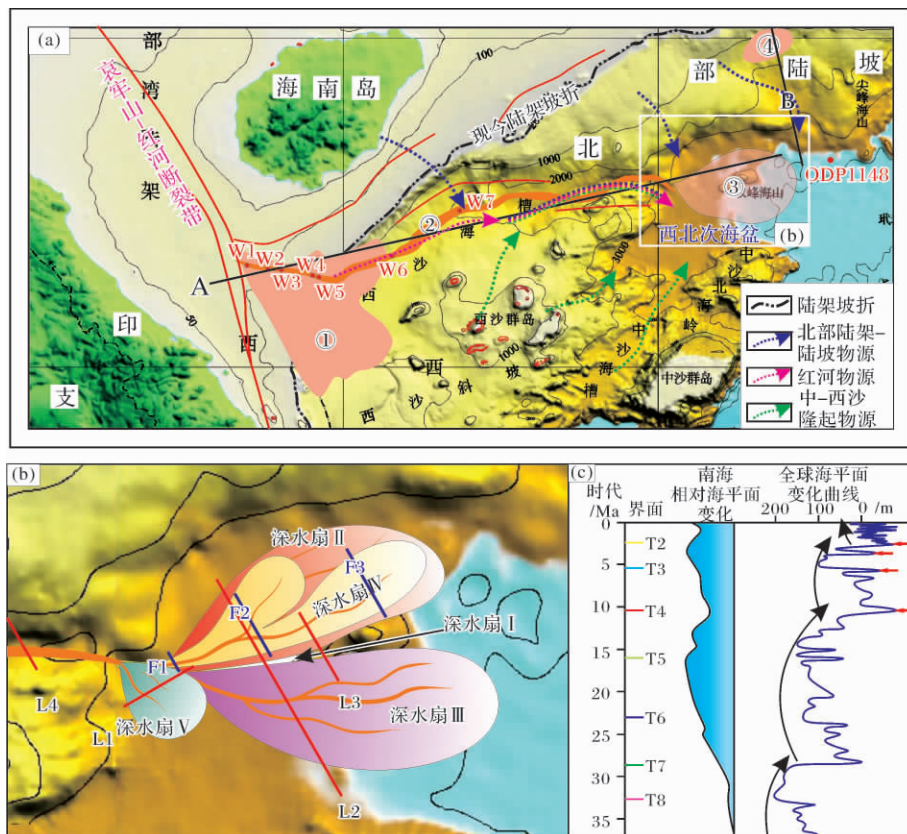


图1 (a) 研究区地形图 ①红河海底扇(据Wang等,2012) ②琼东南中央峡谷-水道及相关钻井(据许怀智等2012) ③研究区 ④珠江深水扇系统(据彭大钧等2007) 箭头指示不同物源;(b) 西北次海盆深水扇系统平面展布图,F1-F3及L1-L4指示剖面线,I-V代表深水扇复合体/期;(c) 地震反射界面与海平面变化关系,红色箭头指示琼东南中央峡谷侵蚀期次

Fig.1 (a) Topographic map of the study area, ①Red River submarine fan(Accorded to Wang *et al.*, 2012), ②Qiongdongnan center canyon-channel and boreholes(Accorded to Xu *et al.*, 2012), ③Study area, ④Pearl River deep-water fan system(Accorded to Peng *et al.*, 2012), Arrows indicate the different provenance systems, A and B show the cross sections in Fig. 8a and 9; (b) Sketch distribution of the deep-water fan system complex in the Northwestern Sub-basin, F1-F3 and L1-L4 show the cross sections in Fig. 3-7; (c) Relations between sea level variation and seismic reflectors, Red arrows show the central canyon erosion times

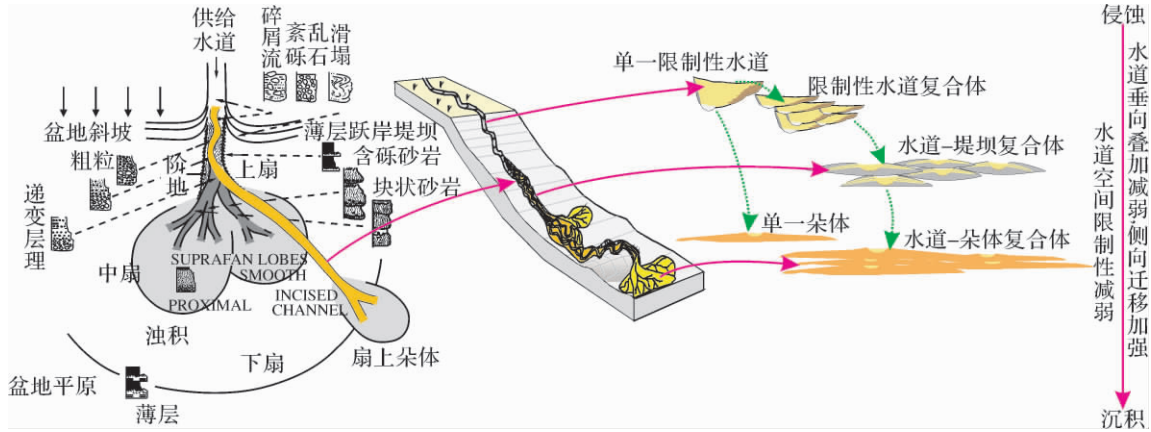


图 2 深水扇与深水水道空间特征示意图(据 Walker, 1978; Jonathan 等, 2012 改编)

Fig. 2 Sketch map of space characteristics of deepwater fan and channels (modified after Walker, 1978; Jonathan, et al., 2012)

2 地震反射结构特征

2.1 深水扇识别

基于 Walker 等^[7]建立的深水扇经典沉积模式(图 2),以及地震反射剖面中典型的高振幅反射(High Amplitude reflections, HARs)特点,在西北次海盆内自 T4 地震反射界面(10.5 Ma 左右)以上识别出大规模深水扇。

经典单一物源深水扇模式中,上扇存在物源供给峡谷的延伸,中扇的重要特征为大规模扇体相互叠置区,下扇水道逐渐消失,据此可将本区深水扇划分为上扇、中扇以及下扇三部分。

上扇为限制性水道复合体发育带,限制性水道复合体具有整体强反射、宽缓的 U 状形态,宽度可达 4 km 左右,厚度可达 0.5 s(双程反射时间),内部填充有相对杂乱、弱反射特征的小规模 U 或 V 形水道,以及平行、连续、中低频、强反射的内岸坝,不太发育外岸堤坝,单个小型水道宽度在 0.5 ~ 1.5 km 左右,水道表现出明显的向 SE 方向的侧向迁移特点(图 3-F1,图 4);

中扇存在明显扇体的空间叠置,单个扇体内部为大规模水道—堤坝复合体,水道—堤坝复合体在剖面上具有整体强反射特征、呈透镜状或海鸥翼状形态,其宽度可达 10 km 以上,厚度在 0.3 s(双程反射时间)左右,内部仍填充有相对较小规模的 U 或 V 形杂乱反射水道,水道外侧发育亚平行、连续、中低频、强反射的外岸堤坝,部分堤坝外缘存在具有杂乱反射特征的滑塌体(图 3-F2,图 5);

下扇水道消散,发育典型的水道—朵体体系,水

道—朵体体系剖面上具有整体亚平行、连续、强反射特征,呈宽缓的透镜状或上突丘状形态,单个水道—朵体体系宽度可达 16 km 以上,厚度较薄;内部水道特征不太明显,开始弥散消亡;朵体的边缘可见侧向的上超特征(图 33-F3)。

2.2 深水扇的空间特征

2.2.1 扇体内水道的充溢改道

本区深水扇系统的上扇部位剖面显示,存在多期“侵蚀—废弃”的水道复合体(图 4)。Flood 等^[58]首次在 Amazon 扇的上扇部位发现这一现象,将其成因归纳为间歇性强烈重力流作用突破堤坝的束缚,流体破坏堤坝边坡并漫溢改道,新的水道侵蚀形成,旧水道废被弃。本区深水扇发育的第一次深水重力流在三级层序 T4 界面(约 10.5 Ma)开始侵蚀形成水道复合体 I;之后在三级层序 T3 界面(约 5.5 Ma)第二次强烈重力流向 NE 方向充溢偏移,并侵蚀形成水道复合体 II;第三次强烈重力流在次一级层序 T2 界面(约 4.2 Ma)向 WS 方向偏移,与水道复合体 II 间存在平行、连续、弱反射分隔层,水道复合体 II 被废弃,流体侵蚀形成 III;三级层序 T2 界面(约 2.6 Ma)以上水道复合体 IV、V 的发育与水道复合体 I、II、III 类似,水道复合体 IV、V 也受到弱反射层分隔,相比之下,水道复合体 IV、V 内侵蚀水道规模远小于水道复合体 I、II、III,推测与 2.6 Ma(T2 界面)、1.9 Ma 的重力流强度减弱有关(图 4)。

五期充溢侵蚀不仅对应着全球海平面的快速下降期,而且与琼东南中央峡谷—水道的侵蚀期次^[36, 39, 40]也具有较好的对应关系。层序地层分析表明,全球海平面在 10.5 Ma、5.5 Ma、4.2 Ma、2.6 Ma

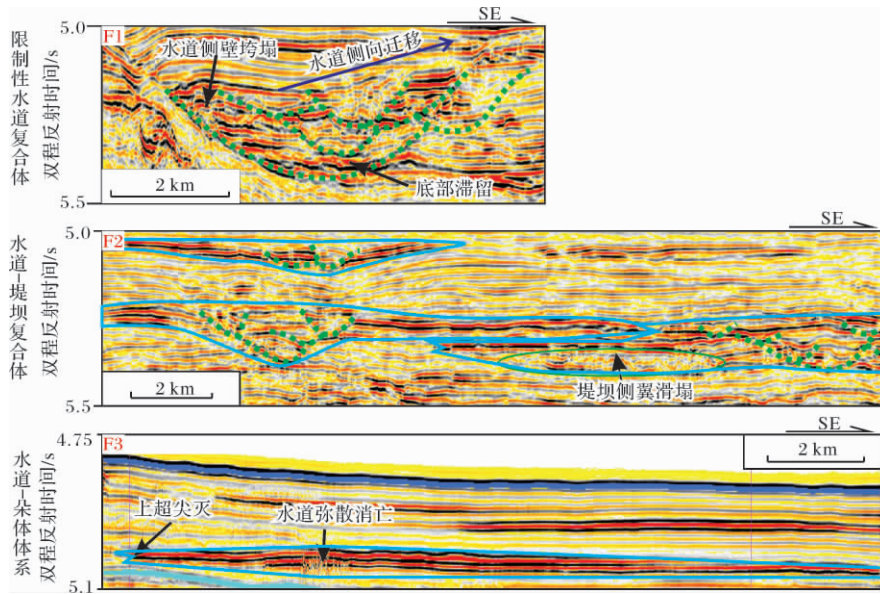


图 3 西北次海盆内扇体基本单元(剖面位置见图 1b)

Fig. 3 Basic sedimentary units of the deepwater fan in the Northwestern Sub-basin (location of profile is shown in Fig. 1b)

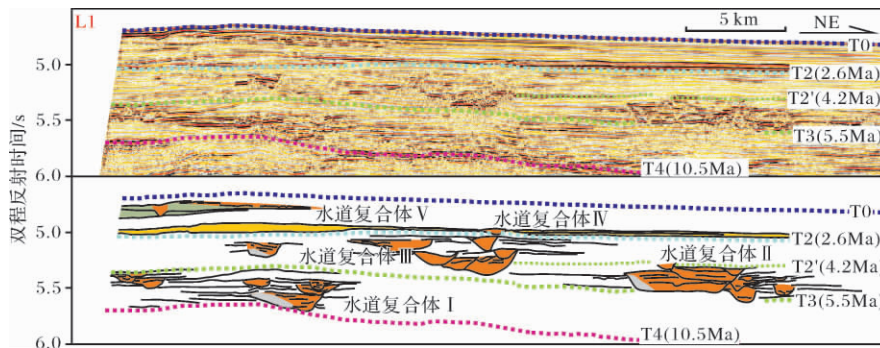


图 4 西北次海盆内深水扇上扇水道充溢改道(剖面位置见图 1b)

Fig. 4 Channel avulsion on the upper deepwater fan in the Northwestern Sub-basin (location of profile is shown in Fig. 1b)

以及 1.9 Ma 存在显著下降(图 1c), 与此同时琼东南中央峡谷—水道也存在 10.5 Ma、5.5 Ma、4.2 Ma、2.6 Ma 四期明显下切侵蚀^[36, 39~42, 59], 琼东南中央水道东段出口即为西北次海盆, 海盆内也在 10.5 Ma、5.5 Ma、4.2 Ma、2.6 Ma 以及 1.9 Ma 分别发育深水扇。时间—空间耦合为西北次海盆内深水扇系统的期次划分提供了依据(图 4)。

2.2.2 扇体的空间叠置

上扇部位的限制性水道充溢改道可直接导致中或下扇扇体的侧向迁移、摆动, 其侧向迁移距离可达几十或上百公里^[3, 58]。本区深水扇中扇部位就存在明显的扇体的空间相互叠置现象, 迁移方向、叠置规律均与上扇水道充溢方向基本吻合(图 4、图 5); 不同的是, 中扇部位各期次级扇体内水道分支明显增

多, 复合水道宽度显著增加(部分可达 10 km)、厚度降低, 复合水道内部仍然存在明显的水道侧向摆动迁移(图 5)。

3 物源供给

西北次海盆内深水扇系统的主要物源供给通道为琼东南中央峡谷—水道^[34, 36, 38, 40, 60], 汇聚了来自于红河、北侧陆架—陆坡、中—西沙隆起区的沉积物。在时空上可基本推断为: 晚中新世(10.5~5.5 Ma) 以北部陆架—陆坡物源为主导, 上新世(5.5 Ma、4.2 Ma) 以北部陆架—陆坡和红河物源为主导, 第四纪则以北部陆架—陆坡、中—西沙隆起区气候作用下物源为主。

在南海扩张背景下, 10.5 Ma 左右莺—琼盆地边

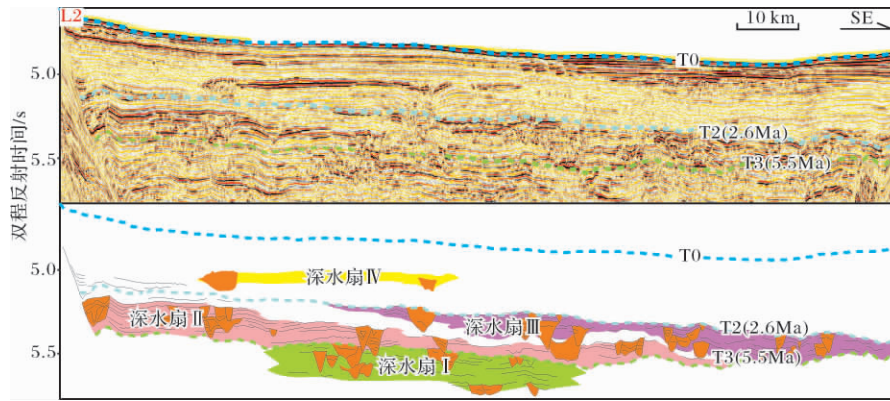


图 5 西北次海盆内深水扇中扇扇体空间叠置(剖面位置见图 1b)

Fig. 5 Suprafan region of the middle deepwater fan in the Northwestern Sub-basin (location of profile is shown in Fig. 1b)

缘陆架坡折基本形成,造成了整个莺—琼盆地整体呈现向东喇叭状开口地形格局^[56]。在此过程中西沙海槽盆地(长昌凹陷)进入加速沉降期^[53],盆地内先存断裂的继承性活动形成琼东南中央峡谷—水道的东段^[36]。伴随海平面大规模下降,重力流首先垂直于水道轴线侧向侵蚀北侧陆架—陆坡^[59],沉积物到达东段水道底部后则平行于水道轴部继续向东侵蚀,将大量沉积物输送至西北次海盆,其北部陆坡区 T4 (10.5 Ma) 界面上下振幅差异明显,具有明显侵蚀特

征(图 6);5.5 Ma 左右,随着陆坡向西上溯及红河断裂的右旋走滑达到高峰^[61,62],中央峡谷—水道向西迁移并东西连通,对峡谷—水道的钻井证实红河物源开始沿中央水道轴部向东侵蚀并最终进入西北次海盆^[38,42]。北部陆架—陆坡物源自 T3 (5.5 Ma) 界面也以大规模滑塌或块体流形式垂直于水道轴线侧向进入中央水道,之后转变方向平行于水道轴线向东为深水扇系统做出物源贡献(图 6)。4.2 Ma 存在海平面明显下降(图 1c),再次促进了红河物源向西北次海

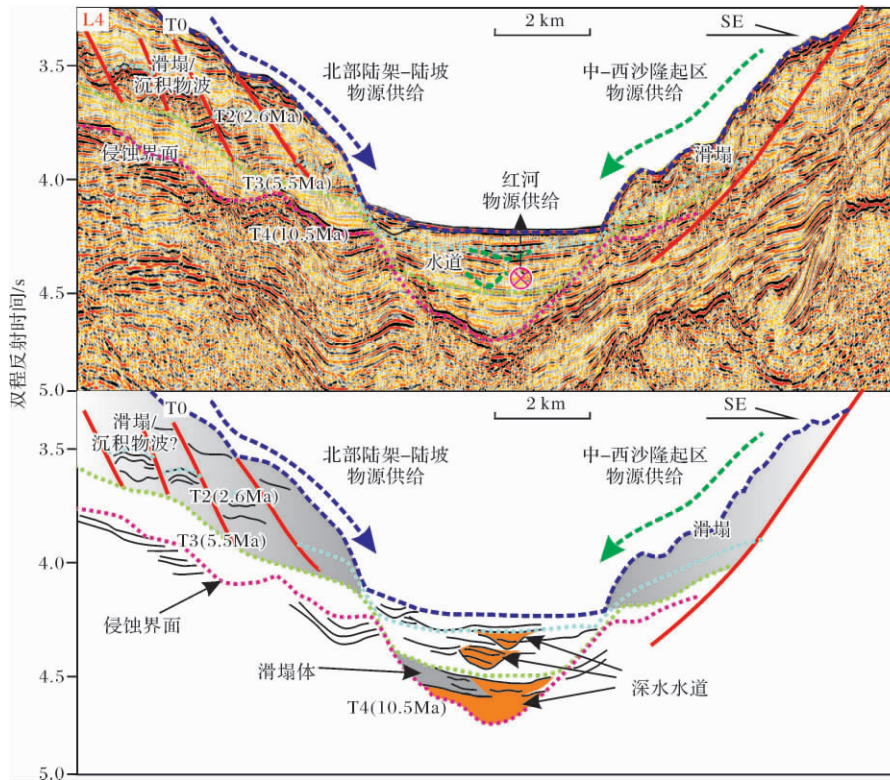


图 6 深水扇系统物源供给系统分析(剖面位置见图 1b)

Fig. 6 Provenance system of deepwater fan system in the Northwestern Sub-basin (location of profile is shown in Fig. 1b)

盆的供给;3.6 Ma之后海平面回升,对中央峡谷—水道的钻井揭示红河物源逐渐削弱^[38,40]。更新世以来在约2.6 Ma、1.9 Ma全球海平面波动,并联合气候作用,陆架区及中—西沙隆起区沉积物以滑塌形式侧向进入中央峡谷—水道,受到阻挡后平行于水道轴向向深水扇系统输送沉积物(图6)。琼东南与珠江口盆地陆架边缘三角洲显著的前积以及位于陆坡坡脚附近的ODP1148站约2.6 Ma、1.9 Ma沉积速率剧烈波动都预示了陆架区沉积物供给加强^[50,57]。

由于研究区缺乏可靠的钻井资料,关于物源的推断是否与红河物源区(包括中南半岛)的物质供应、早期物源供应是否与西沙海槽—琼东南中央水道的沉降历史有关、以及与海平面变化之间的关系等,有待进一步工作。

4 控制因素与演化模式

4.1 控制因素

目前对深水沉积体系的发育及空间展布控制因素研究较多^[1,2,15,21,27],可归纳为物源属性和古地形两大主控因素。其中,物源属性包括沉积物供给浓度、粒度、速度等,地形则主要体现在与构造相关的空间限制性、坡度等。

如上所述,物源供应上呈现先强后弱的特点,即晚中新世较强、上新世最强、第四纪最弱。与之对应,上新世存在红河及北部陆架—陆坡多重充足物源供给,水道侵蚀显著(图6),扇体规模最大,为本区深水扇系统发育的壮年期;第四纪扇体规模最小,空间上逐渐向西沙海槽内后退萎缩,标志着本区深水扇整体进入老年期(图1b、图8)。

西北次海盆内5期深水扇的空间展布受到先存地形的控制。在上扇区,地形坡度较大,流体动力强,

水道充溢频率较高,造成水道的多期废弃与侵蚀改道(图4);在中扇区,地形限制性削弱开始大规模扇体叠置,但依据南海扩张时期形成的双峰海山,扇体空间展布可基本划分为南北两部分,其中以深水扇I、II、IV位于双峰海山以北,深水扇III则基本位于双峰海山以南(图1b、图7),深水扇III的向南发育一方面受到早期扇体沉积后的地形限制,另一方面推测与双峰海山以南在上新世发生沉降有关。

此外,南海北部“三段式”陆坡地形影响了整个南海北部深水扇的发育。南海北部、西部陆坡存在明显的上、中、下“三段式”结构,整体上“宽而缓”,珠江深水扇、红河海底扇主要发育中陆坡,珠江深水扇所在的中陆坡可长达80~100 km,红河深水扇所在中陆坡长达250 km以上;而与之相对,孟加拉湾陆坡“窄而陡”,且不发育明显的中陆坡(图8)。

南海北部、西部中陆坡的发育一方面减缓了陆坡坡度,削弱了流体动力,另一方面中陆坡断陷发育,对沉积物进一步向下陆坡运移存在一定阻碍。在南海北部、西部中陆坡还发育一些列NEE向断陷,其中北部NEE向断陷与珠江近SN向的物源相垂直,自21 Ma垂直白云凹陷轴向发育的珠江深水扇系统表现出明显的线型物源特征,在10.5 Ma之后珠江口盆地海平面变化幅度不足导致珠江物源的削弱(仅在第四纪再次加强),以及白云凹陷中新世以来的快速沉降,不利于大量沉积物穿越整个北部陆坡进入到西北次海盆;相反,西北部NNE断陷与红河SE向物源近于平行,且在10.5 Ma以来的物源供给加强、坳陷沉降导致NEE向断层的活化,共同促进了琼东南中央峡谷—水道发育并贯穿上百千米的陆坡进入到深海平原,沉积形成西北次海盆深水扇系统。

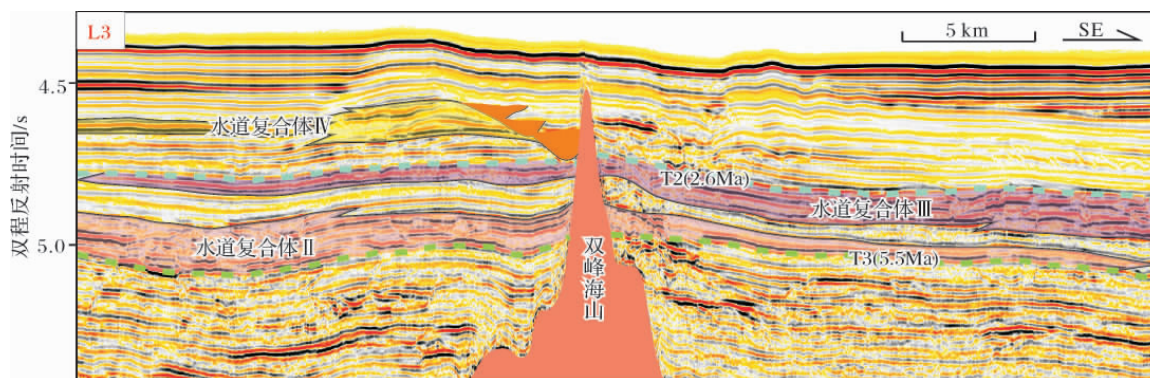


图7 双峰海山对深水扇系统的分隔作用(剖面位置见图1b)

Fig. 7 The deep-water fan system is divided by the Shuangfeng seamount (location of profile is shown in Fig. 1b)

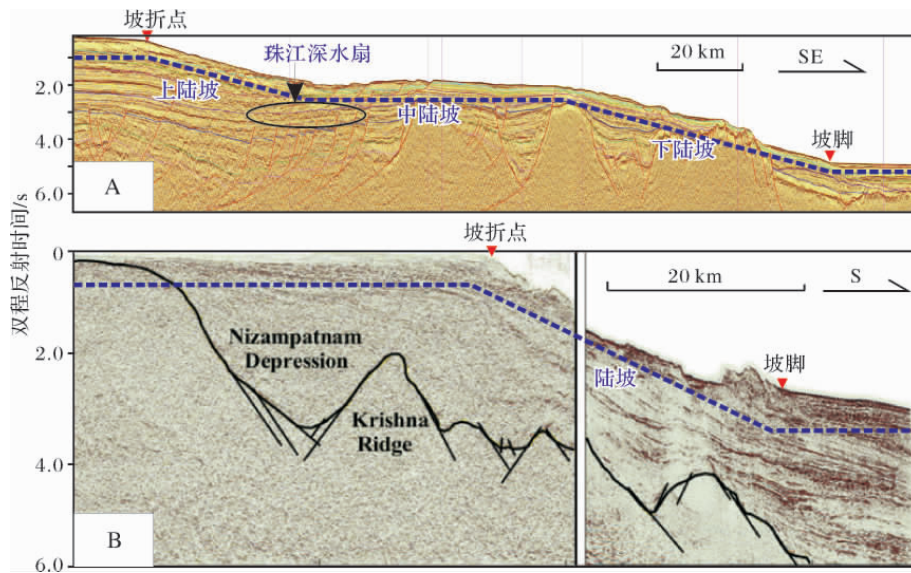


图 8 (A) 南海北部“三段式”陆坡地震剖面(剖面位置见图 1a-B) (B) 孟加拉湾陆坡地震剖面^[63]

Fig. 8 (A) Seismic profile across the northern "Three step" continental slope of South China Sea (location of profile is shown in Fig. 1a-B) , (B) Seismic profile across the continental slope of Bengal Bay^[63]

4.2 演化模式

在“三段式”陆坡背景下,可将西北次海盆内深水扇系统发育模式归纳如下: 10.5 Ma 左右位于“中一下陆坡”附近的西沙海槽内近 NEE 向断裂活动加强以及全球海平面下降,北侧陆架—陆坡遭受侵蚀,沉积物经过琼东南中央峡谷—水道东段向西北次海盆输入,并沉积形成深水扇 I,扇体进入盆地后受到双峰海山和北部陆坡的围限,深水扇 I 略向北部偏移,与此同时位于“上一中陆坡”的红河海底扇开始发育(图 1b、图 9); 5.5 Ma 左右琼东南中央峡谷—水道东西连通,横切整个南海西北部陆坡,红河物源、北部陆架—陆坡物源经中央峡谷—水道输入到西北次海盆(图 9),陆坡坡脚较强的流体动力促使水道的冲溢改迁(图 4),受到早期扇体和双峰海山的限制,在双峰海山与北部陆坡之间沉积形成深水扇 II (图 1b); 4.2 Ma 海平面下降,中央峡谷—水道仍贯穿整个南海西北部陆坡,红河物源、北部陆架—陆坡物源再次经中央峡谷—水道向西北次海盆输送,水道向南冲溢决口,从而在双峰海山以南沉积形成深水扇 III (图 1b、图 9); 4.2 Ma 之后伴随海平面的回升,上陆坡红河物源逐渐消亡; 2.6 Ma、1.9 Ma 存在海平面下降,位于中一下陆坡北侧陆架—陆坡发育大量滑塌体或块体流,沉积物进入中央峡谷—水道后受到阻挡并对峡谷—水道底部形成侵蚀,沉积物继续向西北次海盆输送形成深水扇 IV、V (图 1b、图 9)。在多物源充

足供给下,深水扇 II、III 空间展布范围巨大(图 11b、图 9); 第四纪红河物源逐渐消亡且海平面整体回升,中一下陆坡附近陆架、中—西沙隆起区物源供给能力有所削弱,深水扇 IV、V 逐渐向西沙海槽内后退萎缩(图 1b、图 9)。

5 结论

通过对二维地震反射界面和结构的详细分析,揭示南海西北次海盆内自上新世(约 10.5 Ma)开始发育规模巨大的深水扇系统,覆盖面积达 18 000 km²。扇体表现出整体的强振幅反射特征,剖面上呈透镜状,边缘具有下超或上超特征。深水扇系统上扇为限制性水道复合体发育区,内部水道多次充溢改道;中扇为扇体叠置区,内部以水道—堤坝沉积为主;下扇则以水道—朵体沉积为主。

琼东南中央峡谷—水道为本区深水扇系统的主要物源通道。根据地震反射结构和层序界面以及琼东南中央峡谷—水道的侵蚀期次,可将深水扇系统内部划分为 5 期:晚中新世一期(深水扇 I /10.5 Ma)、上新世二期(深水扇 II /5.5 Ma、III /4.2 Ma)、第四纪二期(深水扇 IV /2.6 Ma、V /1.9 Ma)。在上、中、下“三段式”陆坡背景下,晚中新世以中一下陆坡北侧物源为主导,上新世以上陆坡红河物源为主导,第四纪则以中一下陆坡北侧陆架—陆坡、中—西沙隆起区物源为主。本区深水扇系统被双峰海山分为南北两

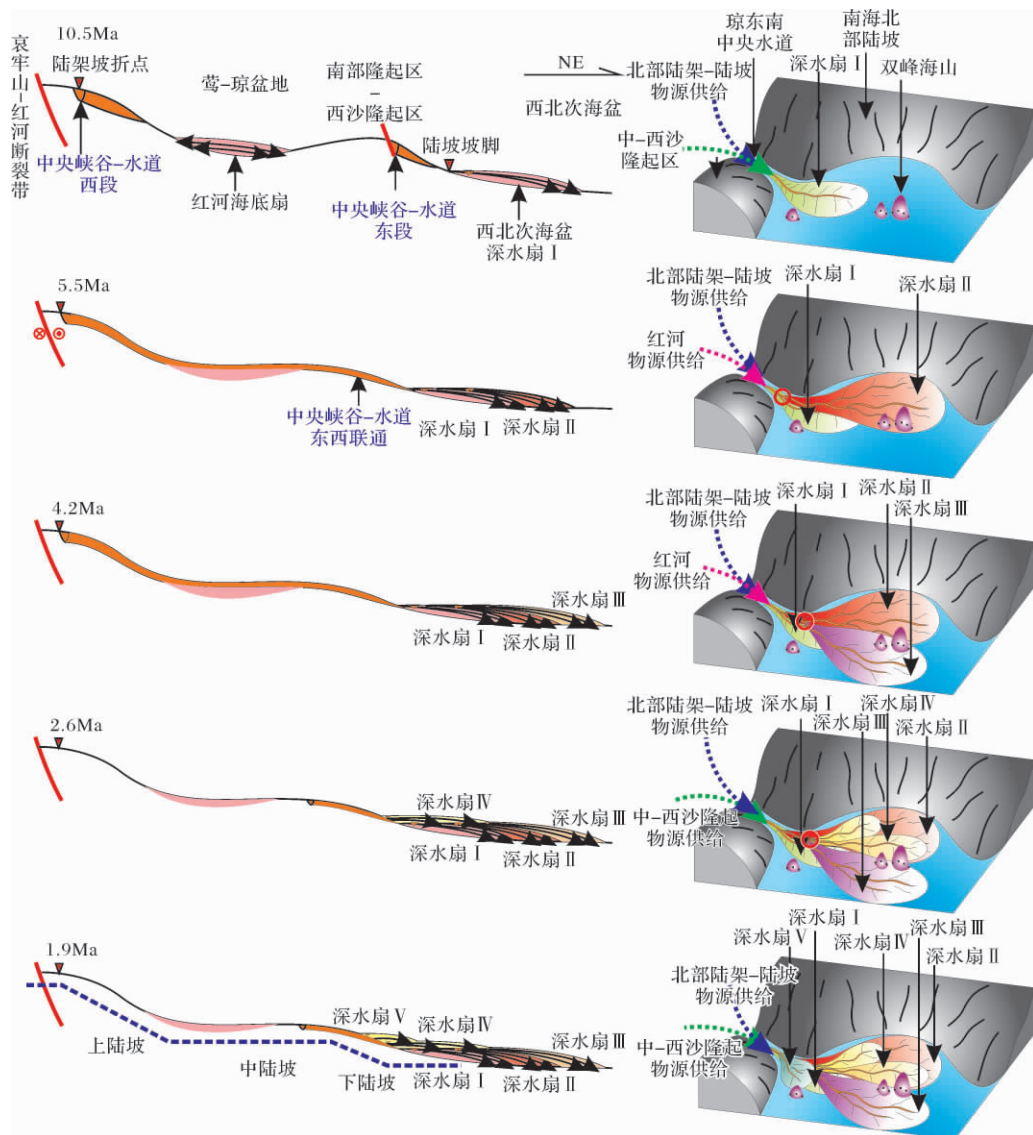


图9 西北次海盆深水扇系统演化模式图(剖面位置见图 1a-A)

Fig. 9 Model showing evolution of the deepwater fan system in the Northwestern Sub-basin(location of profile is shown in Fig. 1a-A)

部分,其中深水扇 I、II、IV 位于双峰海山以北,深水扇 III 则基本位于双峰海山以南。各个深水扇之间存在明显的侧向上叠迁移特征。本区深水扇系统的发现将为南海北部深水区提供新的油气勘探领域和勘探目标。

参考文献(References)

- 1 Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 285-342
- 2 Stow D A V, Johansson M. Deep-water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 145-174
- 3 Lopez M. Architecture and depositional pattern of the Quaternary deep-

- sea fan of the Amazon[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(4): 479-486
- 4 Shanmugam G. Deep-water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs[M]. Elsevier Science, 2006
- 5 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 等. 三级“源-渠-汇”耦合研究珠江深水扇系统[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 857-864 [Pang Xiong, Peng Dajun, Chen Changmin, et al. Three hierarchies “Source-Conduit-Sink” coupling analysis of the Pearl River deep-water fan system[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 857-864]
- 6 李云, 郑荣才, 高博禹, 等. 深水扇沉积研究现状和展望——以珠江口盆地白云凹陷珠江深水扇系统为例[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 549-560 [Li Yun, Zheng Rongcai, Gao Boyu, et al. Reviews and prospects on submarine fan deposition: A case study of Zhujiang submarine fan system in Baiyun depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Geological Review, 2010, 56(4): 549-560]

- 7 Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 932-966
- 8 Mitchum Jr R M, Vail P, Thompson III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis [C]//Payton E C, ed. Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 1977: 53-62
- 9 Mitchum Jr R M. Seismic stratigraphic expression of submarine fans [M]. AAPG Memoir, 1985, 39: 117-136
- 10 Nilsen T H. Modern and ancient submarine fans: discussion of papers by R G Walker and W R Normark [J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(7): 1094-1101
- 11 Bastia R, Das S, Radhakrishna M. Pre- and post-collisional depositional history in the upper and middle Bengal fan and evaluation of deepwater reservoir potential along the northeast continental margin of India [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(9): 2051-2061
- 12 Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain-size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(5): 792-822
- 13 Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(6-8): 649-676
- 14 Wynn R B, Cronin B T, Peakall J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6-9): 341-387
- 15 Kolla V. A review of sinuous channel avulsion patterns in some major deep-sea fans and factors controlling them [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6-9): 450-469
- 16 Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels: Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6-9): 388-405
- 17 Beaubouef R T. Deep-water leveed-channel complexes of the Cerro Toro Formation, Upper Cretaceous, southern Chile [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(11): 1471-1500
- 18 Hubbard S M, de Ruig M J, Graham S A. Confined channel-levee complex development in an elongate depocenter: Deep-water Tertiary strata of the Austrian Molasse basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(1): 85-112
- 19 McHargue T, Pyrcz M J, Sullivan M D, et al. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: Patterns and predictions [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(3): 728-743
- 20 Wynn R B, Kenyon N H, Masson D G, et al. Characterization and recognition of deep-water channel-lobe transition zones [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(8): 1441-1462
- 21 Gervais A, Savoye B, Mulder T, et al. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(4): 485-502
- 22 Jegou I, Savoye B, Pirmez C, et al. Channel-mouth lobe complex of the recent Amazon Fan: The missing piece [J]. Marine Geology, 2008, 252(1-2): 62-77
- 23 Ito M. Downfan transformation from turbidity currents to debris flows at a channel-to-lobe transitional zone: The Lower Pleistocene Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan [J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78(10): 668-682
- 24 Deptuck M E, Piper D J W, Savoye B, et al. Dimensions and architecture of late Pleistocene submarine lobes off the northern margin of East Corsica [J]. Sedimentology, 2008, 55(4): 869-898
- 25 Bourget J, Zaragosi S, Mulder T, et al. Hyperpycnal-fed turbidite lobe architecture and recent sedimentary processes: A case study from the Al Batha turbidite system, Oman margin [J]. Sedimentary Geology, 2010, 229(3): 144-159
- 26 Mulder T, Etienne S. Lobes in deep-sea turbidite systems: state of the art preface [J]. Sedimentary Geology, 2010, 229(3): 75-80
- 27 Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6-9): 406-433
- 28 李存磊, 任伟伟, 唐明明. 流体性质转换机制在重力流沉积体系分析中应用初探 [J]. 地质论评, 2012, 58(2): 285-296 [Li Cunlei, Reng Weiwei, Tang Mingming. Preliminary study on gravity flow depositional system based on fluid properties conversion theory [J]. Geological Review, 2012, 58(2): 285-296]
- 29 高红灿, 郑荣才, 魏钦廉, 等. 碎屑流与浊流的流体性质及沉积特征研究进展 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 815-827 [Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Wei Qinlian, et al. Reviews on fluid properties and sedimentary characteristics of debris flows and turbidity currents [J]. Advance in Earth Sciences, 2012, 27(8): 815-827]
- 30 彭大钧, 陈长民, 庞雄, 等. 南海珠江口盆地深水扇系统的发现 [J]. 石油学报, 2004, 25(5): 17-23 [Peng Dajun, Chen Changmin, Pang Xiong, et al. Discovery of deep-water fan system in South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 17-23]
- 31 彭大钧, 庞雄, 黄先律, 等. 南海珠江深水扇系统的形成模式 [J]. 石油学报, 2007, 28(5): 7-11 [Peng Dajun, Pang Xiong, Huang Xianlü, et al. Depositional model of Pearl River deep-water fan system in South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 7-11]
- 32 Wang Y F, Wang Y M, Xu Q, et al. The early-middle Miocene submarine fan system in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. Petroleum Science, 2012, 9(1): 1-9
- 33 Wang Y, Xu Q, Li D, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(14): 1488-1494
- 34 Yuan S, Lü F, Wu S, et al. Seismic stratigraphy of the Qiongdongnan deep sea channel system, northwest South China Sea [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(2): 250-259
- 35 Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(10): 1191-1223
- 36 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 Ming, Li Junliang, Jiang Tao, *et al.* Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan basin, Northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(4): 85-93]
- 37 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): 68-74 [Yuan Shenqiang, Cao Feng, Wu Shiguo, *et al.* Architecture and origin of deepwater sinuous channel on the Slope of Northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 68-74]
- 38 许怀智, 蔡东升, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地中央峡谷沉积充填特征及油气地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 641-650 [Xu Huaizhi, Cai Dongshen, Sun Zhipeng, *et al.* Filling characters of central submarine canyon of Qiongdongnan basin and its significance of petroleum geology[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(4): 641-650]
- 39 王振峰. 深水重要油气储层——琼东南盆地中央峡谷体系[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 646-653 [Wang Zhengfeng. Important deepwater hydrocarbon reservoirs: the central canyon system in the Qiongdongnan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 646-653]
- 40 李冬, 王英民, 王永凤, 等. 琼东南盆地中央峡谷深水天然堤-溢岸沉积[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 689-694 [Li Dong, Wang Yingmin, Wang Yongfeng, *et al.* The sedimentary and foreground of prospect for levee-overbank in central canyon, Qiongdongnan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 689-694]
- 41 林畅松, 刘景彦, 蔡世祥, 等. 莺-琼盆地大型下切谷和海底重力流体体系的沉积构成和发育背景[J]. 科学通报, 2001, 46(1): 69-72 [Lin Changsong, Liu Jingyan, Cai Shixiang, *et al.* The large scale incision valley, seafloor gravity flow system and its develop setting in Yinggehai and Qiongdongnan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(1): 69-72]
- 42 Gong C, Wang Y, Zhu W, *et al.* The central submarine canyon in the Qiongdongnan Basin, northwestern South China Sea: architecture, sequence stratigraphy, and depositional processes [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(9): 1690-1702
- 43 Cullen A, Reemst P, Henstra G, *et al.* Rifting of the South China Sea: new perspectives [J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(3): 273-282
- 44 Li C F, Zhou Z, Li J, *et al.* Structures of the northeasternmost South China Sea continental margin and ocean basin: geophysical constraints and tectonic implications[J]. Marine Geophysical Researches, 2007, 28(1): 59-79
- 45 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 等. 南海的右行陆缘裂解成因[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 180-190 [Zhou Di, Chen Hanzong, Wu Shimin, *et al.* Opening of the South China Sea by dextral splitting of the east Asian continental margin[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 180-190]
- 46 栾锡武, 张亮. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 59-74 [Luan Xiwu, Zhang Liang. Tectonic evolution modes of South China Sea: passive spreading under complex actions[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(6): 59-74]
- 47 吴振利, 李家彪, 阮爱国, 等. 南海西北次海盆地壳结构: 海底广角地震实验结果[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(10): 1463-1476 [Wu Zhengli, Li Jiabiao, Ruan Aiguo, *et al.* Crustal structure of the northwestern sub-basin, South China Sea: results from a wide-angle seismic experiment [J]. Science in China: Earth Sciences, 2011, 41(10): 1463-1476]
- 48 丁巍伟, 黎明碧, 赵俐红, 等. 南海西北次海盆新生代构造-沉积特征及伸展模式探讨[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 147-156 [Ding Weiwei, Li Mingbi, Zhao Lihong, *et al.* Cenozoic tectono-sedimentary characteristics and extension model of the Northwest Sub-basin, South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 147-156]
- 49 魏喜, 祝永军, 陈亦寒, 等. 南海西北次海扩张时代和洋壳性质: 沉积地层及重磁依据[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 383-388 [Wei Xi, Zhu Yongjun, Chen Yihan, *et al.* Ocean crust character and spreading age of Northwest Sub-sea, the South China Sea: evidence from sediment strata and the abnormality of gravity and magnetism[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 383-388]
- 50 Xie X, Muller R D, Li S, *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
- 51 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]. 地质论评, 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]
- 52 Li Q Y, Han Z M, Su X. Late Oligocene rapid transformations in the South China Sea[J]. Marine Micropaleontology, 2005, 54(1-2): 5-25
- 53 廖计华, 王华, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水区长昌凹陷构造演化及其对层序样式的控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(8): 3121-3132 [Liao Jihua, Wang Hua, Sun Zhipeng, *et al.* Tectonic evolution and its controlling on sequence pattern of Chang-chang sag, deepwater area of Qiongdongnan basin, South China Sea[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(8): 3121-3132]
- 54 袁玉松, 丁玫瑰. 南海北部深水盆地特征及其动力学背景[J]. 海洋科学, 2008, 32(12): 102-110 [Yuan Yusong, Ding Meigui. Characteristics and geodynamic setting of the basins in deepwater area of the Northern South China Sea margin[J]. Marine Sciences, 2008, 32(12): 102-110]
- 55 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 等. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 376-383 [Yuan Yusong, Yang Shuchun, Hu Shenbiao, *et al.* Tectonic subsidence of Qiongdongnan Basin and its main control factors [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 376-383]
- 56 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等. 南海西北陆缘深水沉积体系内部

- 构成特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2012, 37(4): 627-634 [Xie Xinong, Chen Zhihong, Sun Zhipeng, *et al.* Depositional architecture characteristics of deepwater depositional systems on the continental margins of northwestern South China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(4): 627-634]
- 57 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录—ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 539-544 [Shao Lei, Li Xianhua, Wang Pingxian, *et al.* Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene: Evidence from deep sea sediments of ODP Site 1148 [J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 539-544]
- 58 Flood R D, Manley P L, Kowsmann R O, *et al.* Seismic facies and late Quaternary growth of Amazon submarine fan[M]//Weimer M H, ed. Seismic Facies and Sedimentary Processes of Modern and Ancient Submarine Fans. New York: Springer, 1991:415-433
- 59 He Y, Xie X, Kneller B C, *et al.* Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2012.03.002
- 60 袁圣强, 吴时国, 赵宗举, 等. 南海北部陆坡深水区沉积物输送模式探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 39-48 [Yuan Shengqiang, Wu Shiguo, Zhao Zongju, *et al.* Deepwater sediment transportation models for Northern South China sea slopes [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 39-48]
- 61 詹文欢, 丘学林, 孙宗勋, 等. 红河活动断裂带在南海西北部的反映[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 10-16 [Zhan Wenhuan, Qiu Xuelin, Sun Zongxun, *et al.* Red river active fault zone in northwestern South China sea [J]. Tropic Oceanology, 2003, 22(2): 10-16]
- 62 向宏发, 万景林, 韩竹军, 等. 红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与 FT 测年[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(11): 977-987 [Xiang Hongfa, Wan Jinlin, Han Zhujun, *et al.* Geological analysis and FT dating of the large scale right lateral strike-slip movement of the Red River fault zone [J]. Science in China: Earth Sciences, 2006, 36(11): 977-987]
- 63 Radhakrishna M, Twinkle D, Nayak S, *et al.* Crustal structure and rift architecture across the Krishna-Godavari Basin in the central eastern continental margin of India based on analysis of gravity and seismic data[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 37: 129-147

Depositional Architecture and Evolution of Deepwater Fan System in the Northwestern Sub-Basin, South China Sea

LIU Rui¹ ZHOU Jiang-yu¹ ZHANG Li² LIU Xiao-feng¹
WEI Zhen-quan² QIAN Xing² SHUAI Qin-wei² LIAO Jin-fang¹

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences Ministry of Education, Wuhan 430074;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, MLR, Guangzhou 510760)

Abstract: Based on the existing high-resolution 2D seismic data, we identified a large deep-water fan system in the Northwest sub-basin, the abyssal plain of northern South China Sea. The results show a canyon-channel transition zone with channel avulsions in the upper fan, channel-levee systems in the middle fan and channel-lobe systems in the lower fan. The Qiongdongnan Center canyon-channel is considered as the main sediment supply system, with sediments mainly from the Red River and Indochina, northern shelf and slope, and Zhongsha and Xisha uplift regions. A combination of the pre-existing topography and sediment supply strength appears to have a control on the temperospatial distribution of the deep-water fan system. Geographically the fan system is divided into north and south parts by the Shuangfeng seamount, and geologically I to V sub-fans can be identified, respectively corresponding to the late Miocene (I), Pliocene (II and III), and Quaternary (IV and V). The early-deposited sub-fans altered the topography, while strong sediment supplies improved the overflow frequency, with obvious lateral migration in individual fans. The "three step" continental slope of northern South China Sea affected the development and evolution of deep-water fan systems.

Key words: deepwater fan system; Qiongdongnan center canyon-channel; the northwest sub-basin; Northern South China Sea