

doi:10.3799/dqkx.2012.072

南海西北陆缘深水沉积体系内部构成特征

解习农¹, 陈志宏^{1,2}, 孙志鹏^{1,2}, 姜 涛¹, 何云龙¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中海油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 深水沉积是近年来我国海域油气勘探重点之一, 利用高精度二维和三维地震剖面的精细解剖, 揭示了南海西北陆缘区深水沉积体系类型及其内部构成特征。这些深水地区除堆积正常深海一半深海泥岩外, 还发育大量深水重力流沉积, 包括块体流沉积、深水峡谷、沉积物波等大型沉积体。研究表明, 南海西北陆缘区发育4类陆坡, 即进积型、滑塌型、水道化型、宽缓渐变型陆坡。不同陆坡类型具有不同地貌形态, 发育不同的沉积体类型。大型块体流沉积主要发育于滑塌型和水道化型陆坡, 沉积物波主要发育于宽缓渐变型陆坡下部及深海中央峡谷长昌段的周缘地区。由于南海西北陆缘自晚中新世以来形成向东开口的喇叭形变深的地貌形态, 导致在盆地中央形成了独特的与陆坡走向一致的深海峡谷体系——中央峡谷。该峡谷的沉积充填不仅包括来自于西部峡谷头部的浊积水道沉积, 还包括来自于北部陆坡的块体流沉积, 特别是来自于滑塌型陆坡的块体流沉积。中央峡谷体系构成了西北陆缘区多源汇聚的深水沉积物输送系统, 同时也是南海西北陆缘深水区重要的油气储层发育层系。

关键词: 块体流; 沉积物; 深海峡谷; 上新世; 南海西北陆缘; 油气。

中图分类号: P736.1

文章编号: 1000-2383(2012)04-0627-08

收稿日期: 2012-02-15

Depositional Architecture Characteristics of Deepwater Depositional Systems on the Continental Margins of Northwestern South China Sea

XIE Xi-nong¹, CHEN Zhi-hong^{1,2}, SUN Zhi-peng^{1,2}, JIANG Tao¹, HE Yun-long¹

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

2. Zhanjiang Company, China National Offshore Oil Corporation Limited, Zhanjiang 524057, China

Abstract: Deepwater reservoir has become one of the major issues in submarine hydrocarbon exploration in China recently. Based on high resolution 2D and 3D seismic data, depositional patterns and architectures of deepwater depositional systems are identified on the northwestern continental margins of the South China Sea. Apart from hemipelagic and pelagic mudstones, a number of gravity flow deposits are extensively developed, including large scale mass transport deposits (MTDs), submarine canyons and sediment waves. Four slope types are identified, including progradational type, slumping type, channelized type, wide and gentle type slopes. Each slope type has different morphological features and depositional architectures. Giant MTDs occur on the slumping and channelized slopes, whereas the sediment waves are only developed on the lower part of wide and gentle slope and the two sides of the Changchang segment of the Central Canyon. Due to special morphological features with an eastward flared shape and increasing water depth in the deepwater area since the Late Miocene, the unique Central Canyon with a trend paralleling to shelf break of northern margins is formed along the axial deepest water-depth line. The fillings in the Central Canyon are composed by not only turbidity channels from the head segment of the canyon in the west, but also the MTDs from the continental slope in the north, particularly from the slumping and channelized slopes. The Central Canyon system could be considered as multiple-sources to sink system for sediment transportation, and also a system containing important reservoirs in the deepwater area on the northwestern continental margin of the South China Sea.

Key words: mass transport deposits; sediments; submarine canyon; Late Miocene; northwestern continental margin of the South China Sea; hydrocarbons.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 91028009); 教育部博士点基金(No. 20100145110002); 国家重大油气专项(No. 2011ZX05025-002-02-04)。

作者简介: 解习农(1963—), 男, 教授, 博导, 主要从事盆地动力学分析、海洋地质与资源、盆地流体和油气藏动力学的研究。E-mail: xnjie@cug.edu.cn

0 引言

20世纪70年代末期,国外油气勘探开始涉足深水领域。30余年的勘探结果显示深水油气勘探具有广阔前景,特别是近10多年来,在南美巴西、西非大西洋沿岸、墨西哥湾、北海以及东南亚、澳大利亚西北大陆架等海域相继发现了许多大型油气田,其勘探领域已扩展到3 000 m的深海区。大量深水油气勘探成果及海洋调查结果揭示,深水区发育多种沉积体系和复杂的沉积构成样式(Stow and Mayall, 2000; Casas *et al.*, 2003; Posamentier and Kolla, 2003; Piper, 2005),特别是深水重力流沉积。因此,深水重力流体系沉积机制、沉积模式及预测研究日益受到人们的高度重视和关注(Kneller, 2003; Sultan *et al.*, 2004; Hodgson *et al.*, 2011; McHargue *et al.*, 2011)。

随着日益加剧的能源需求,我国加快了南海北部大陆边缘盆地油气勘探,取得了丰硕成果。然而,现阶段南海北部的油气勘探活动大多集中在浅水海域,深水油气勘探起步较晚,水深超过500 m的深水区勘探和研究程度很低。近年来我国分别在珠江口盆地白云凹陷、琼东南盆地陵水凹陷深水区的天然气勘探中获得了重大突破(庞雄等, 2006; 王振峰等, 2011; 朱伟林, 2011)。然而,由于揭露深水沉积体系的钻井较少,对深水沉积体系内部构成尚不清楚。本文利用高精度二维地震剖面及三维地震剖面的精细解剖,揭示了南海西北陆缘深水沉积体系类型及其内部构成特征,旨在为该区深水油气储层的分布预测提供依据。

1 南海西北陆缘深水沉积发育背景

南海西北部陆缘区发育NW向莺歌海盆地和NE向琼东南盆地(图1),是“挤出一逃逸构造区”和“古南海俯冲拖曳构造区”两大区域构造变形区的结合部。尽管这两个盆地具有不同的构造走向,但其构造演化阶段是相近的,即垂向上划分为同裂陷和裂后2个阶段,其中裂后阶段又可以划分出早期裂后缓慢沉降期和晚期裂后快速沉降期(李思田等, 1998; 龚再升, 2004)。相应的沉积环境也发生了2次大的突变,第1次突变发生在中渐新世末,即从陆相沉积环境突变为海陆交互或浅海相;第2次突变发生在中中新世末,即从滨浅海相突变为深海相

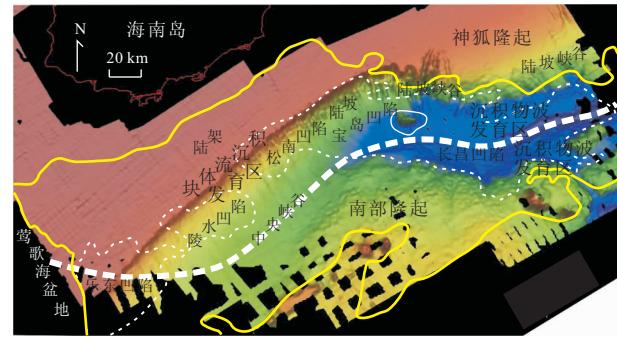


图1 南海西北陆缘陆坡类型及大型沉积体平面分布

Fig. 1 Continental slope types and distribution of large scale depositional facies in the continental margins of northwestern South China Sea

(Xie *et al.*, 2006).

南海西北陆缘区自晚中新世以来,裂后晚期快速沉降导致深海沉积从东部逐渐向西扩展,在琼东南盆地中部及南部、莺歌海盆地东南部形成了广泛的深水沉积。南海北部陆缘区陆坡沉积最早发育于珠江口盆地白云凹陷(朱伟林等, 2008),随后逐渐向西推进,晚中新世陆坡开始在琼东南盆地东部发育,至上新世莺歌海盆地东南缘开始发育陆坡体系。由于上新世以来红河体系沉积物供给逐渐加快(Clift and Sun, 2006),莺歌海盆地东南部深水区逐渐被填充并演化为陆架浅海环境。此外,自晚中新世以来琼东南盆地南部隆起区和中央坳陷带由于差异快速沉降,导致南部隆起区形成了水下降起区,总体构成向东呈喇叭形变深的地貌形态,其最大水深线沿中央坳陷带延伸,向东水体变深,并与西沙海槽和西北次海盆相连。正是由于这一独特的古地貌形态,导致南海西北陆缘的深海区形成了一条自西向东延伸,并与陆架坡折近于平行的深水峡谷系统(苏明等, 2009)。

2 陆坡沉积体系内部构成特征

南海北部大陆边缘的陆坡发育具有东早西晚的特点,早在23.5 Ma陆坡开始在珠江口盆地白云凹陷发育(庞雄等, 2006),而西北陆缘的琼东南盆地自中中新世末才开始广泛发育,莺歌海盆地陆坡体系仅发育于上新世早期,而且仅限于与琼东南盆地毗邻的东南缘地区。西北陆缘初始陆坡的发育大都与深部断裂有关,如琼东南盆地初始陆坡沿②号、②-1号断裂发育,莺歌海盆地初始陆坡与①号断裂

活动密切相关(Xie et al., 2008)。从地震剖面解译结果来看,同样显示了东部陆坡发育早、西部陆坡发育晚的特点。

根据地震剖面及钻井揭示的沉积特征,陆坡体系发育的沉积类型包括陆坡进积楔、块体流沉积、陆坡峡谷等成因相。根据陆坡的形态及其内部构成的差异可划分出4类(图2):进积型陆坡、滑塌型陆坡、水道化型陆坡和宽缓渐变型陆坡。不同陆坡类型具有明显不同的地貌形态以及不同的沉积物构成。

2.1 陆坡进积楔状体沉积特征

陆坡进积楔状体沉积主要发育于进积型陆坡区,即莺歌海盆地东南部和琼东南盆地西部陆坡区,其陆坡坡度在 $1.5^{\circ}\sim 2.0^{\circ}$ 左右,陆坡宽度在20 km左右。进积型陆坡区沉积构成与经典的被动大陆边缘层序构成相似,这些进积楔状体由低位盆底扇、斜坡扇和高位进积体所组成,由于沉积物供给充足而

形成多个“S”型进积楔状体的斜向叠置(图2)。早上新世以来,由于来自海南岛和莺歌海方向的沉积物供给非常充足,琼东南盆地西部崖城区以及乐东凹陷在这些地区形成的进积楔状体向海快速推进,在莺歌海盆地与琼东南盆地交界的①号断裂附近陆坡坡折向海推进达100 km以上。

陆坡以泥质沉积为主,局部夹有浊流成因的粉砂岩或极细砂岩。图3以S27-S28为例说明了这些进积楔状体内部构成样式及沉积特征,S20-S27为一个三级层序,内部可见典型的低位体系域斜坡扇、盆底扇、低位楔以及高位体系域前积体,其中高位体系域前积体可划分为3个向上粒度变粗的准层序组,依次向前进积,在陆坡处迅速增厚,倾斜角度逐渐变大,由起初的斜交型前积逐渐变为高角度的“S”型前积。从反演的沉积特征来看,这些楔状体应以细粒沉积为主,在下陆坡发育一些高波阻抗的

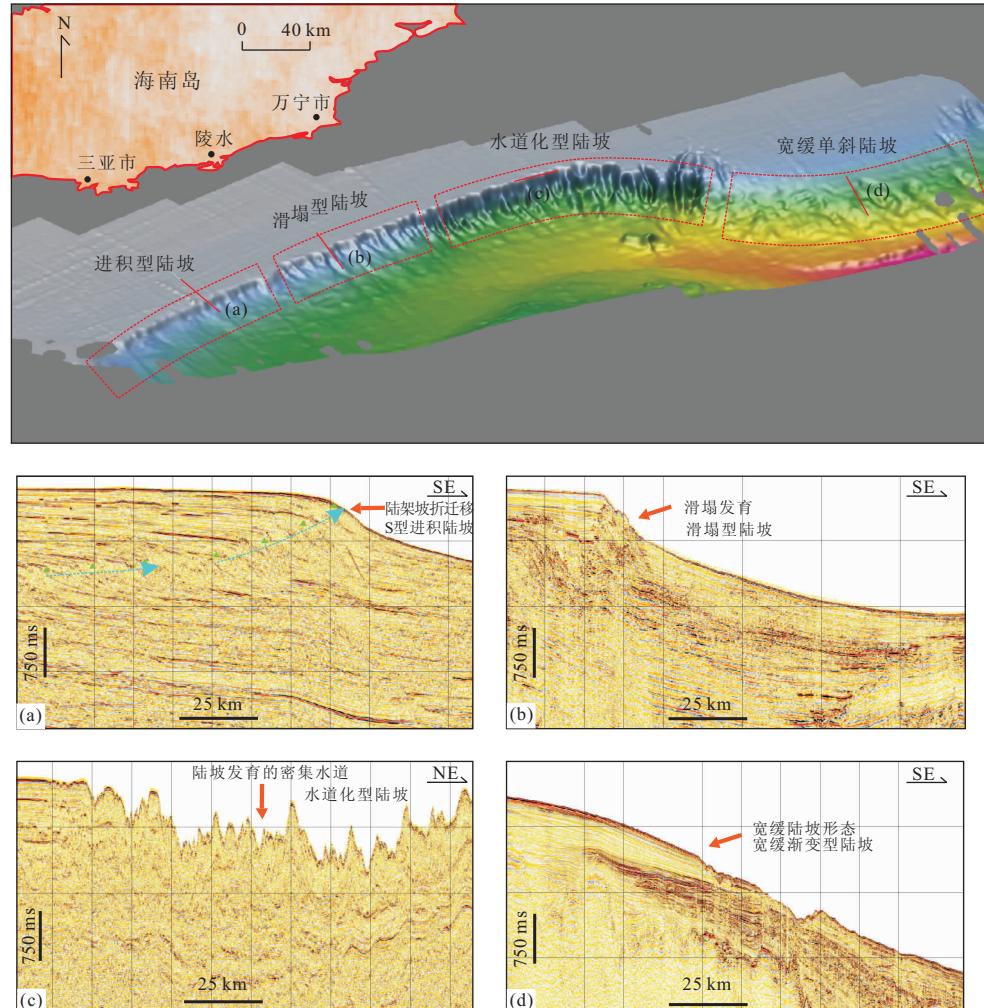


图2 南海西北陆缘陆坡类型及其平面分布

Fig. 2 Continental slope types and their distribution in the continental margins of northwestern South China Sea

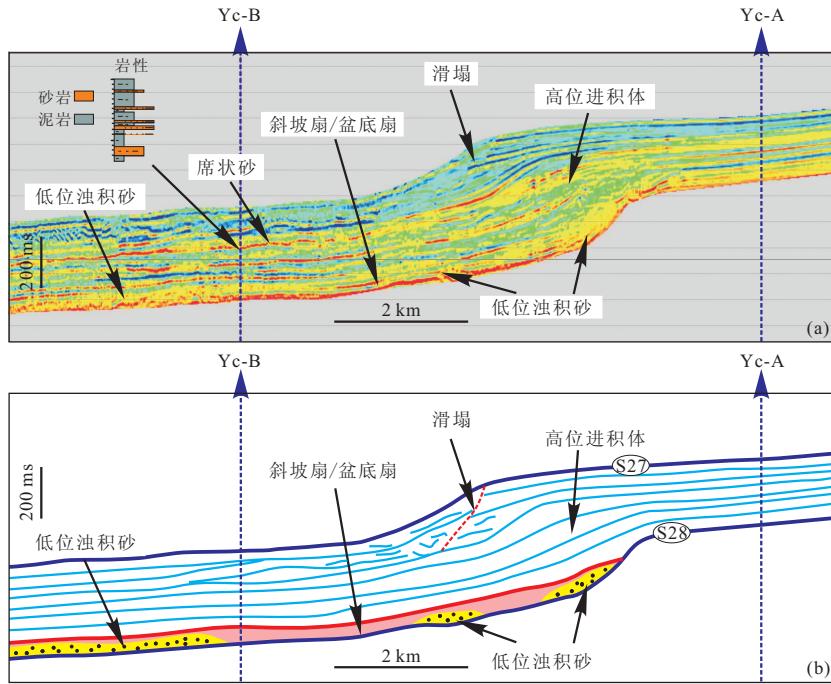


图 3 南海西北陆缘进积型陆坡莺歌海组一段内部沉积构成特征

Fig. 3 Internal depositional architectures of the first Member of Yinggehai Formation in the progradational type slope in northwestern South China Sea

席状砂体,指示了浊积砂层沉积.

2.2 块体流沉积特征

深海块体流沉积(MTDs)是指在深海环境中由于重力失稳所形成的大规模重力流复合沉积体,包括滑移体(slide)、滑塌体(slump)和碎屑流(debris)沉积3种重力流沉积类型.研究发现,大型块体流沉积在琼东南盆地陆坡至深水盆地中广泛发育(何云龙等, 2011).对应不同类型的陆架陆坡体系,大型块体流沉积在滑塌型陆坡和水道化型陆坡地区最为发育,且其沉积中心主要位于松南凹陷和陵水凹陷.宽缓渐进型陆坡和进积型陆坡体系对应的深水盆地虽然也有块体流的沉积,但其规模相对较小.

大型块体流沉积在地震剖面上大多以杂乱的、弱振幅的极不连续反射为主,其中滑移体沉积主要发育于上陆坡区,常伴随着一系列倾向于海的同生正断层;滑塌沉积和碎屑流沉积主要发育于下陆坡区.滑移体沉积与滑塌体沉积的主要区别在于滑移沉积体内部只是滑动,没有沉积地层的转动,而滑塌沉积体内部的沉积物发生转动,其沉积物构造具有流动构造,如旋转岩块、褶皱以及球状构造等变形构造,代表快速沉积作用的发生.

琼东南盆地滑塌型和水道化型陆坡区陆坡倾角较大,平均坡度在4°以上,局部坡度可达10°,发育

了多期块体流沉积.剖面上沿陆坡依次发育滑移体、滑塌体和碎屑流沉积,在地震剖面上,滑塌沉积的主要特征为杂乱的、弱振幅、极不连续的反射地震相(图2).在滑塌沉积发育的向深海盆地一侧,往往有振幅强、连续性好的地震反射同向轴,这些强振幅的沉积体可能是碎屑流沉积或者浊流沉积,但是由于钻井资料的缺乏,尚很难准确区分碎屑流和浊流沉积.有些具有杂乱的反射特征的块体流沉积延伸范围很广,同期大型块体流沉积最大可达9 100 km²,有些块体流沉积从陆坡区一直延伸到深海平原,甚至延伸到深水区中央峡谷体系之中.

2.3 陆坡峡谷沉积特征

水道化型陆坡区发育一系列峡谷(canyon)、沟谷(gully),在地震剖面上呈“V”字型或者“U”字型的形态.这些陆坡峡谷主要分布于琼东南盆地松涛凹陷和宝岛凹陷的北部陆架边缘区(何云龙等, 2010).研究区陆坡峡谷主要为侧向加积充填型和垂向加积充填型两类.侧向加积充填型峡谷沉积一般具有上平下凸的透镜状外形,内部结构为中一弱振幅的斜列式或前积式结构,指示峡谷充填过程中侧向迁移的特征(图4),其峡谷迁移具有自西向东迁移特征,这种定向迁移可能与底流作用有关.垂向充填型峡谷一般具上平下凸的透镜状外形,显示不连

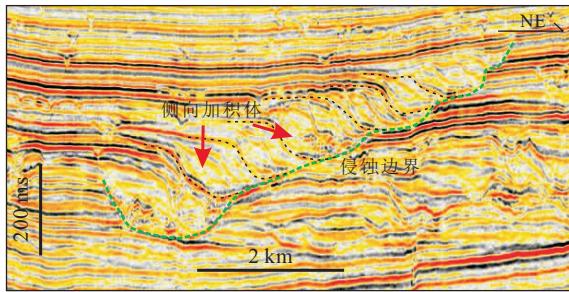


图4 琼东南盆地宝岛区陆坡峡谷显示明显的侧向迁移
Fig. 4 Seismic features of slope canyons showing clearly lateral migrations in the Baodao area of the Qiongdongnan basin

续的变振幅或弱振幅的反射特征,或者呈弧形下凹,向谷底两侧边缘上超。从过峡谷段的钻井资料来看,峡谷充填物主要以泥质沉积为主,其间夹薄层粉砂岩。

3 深海及深水峡谷沉积体系内部构成特征

琼东南盆地自中中新世末开始快速沉降,特别是中央坳陷带和南部隆起带迅速从浅海演变为半深海和深海环境,该时期从北向南形成了海南隆起区—北部陆架区—北部陆坡区(即半深海区)(大致沿下伏②号、②-1号断裂展布)—深海区(含中央峡谷发育区)—南部水下隆起的半深海—深海区的沉积古地理。总体形成了向东开口的喇叭形变深的地貌形态,其中,中央坳陷带沉降最大,水体最深,且从西向东明显变深。南部隆起带尽管在早中新世局部为暴露剥蚀区,至中中新世逐渐演变为水下降起带,特别是中中新世末沉降显著,水深迅速加深,现今水深在500~2 000 m。这样,北部及其西部红河碎屑沉积物主要堆积于北部陆坡区以及中央坳陷带的深水区,而南部隆起带在中中新世之后仅沉积了厚度较薄的半深海—深海泥岩。

正是由于南海西北陆缘独特的古地貌形态,导致琼东南盆地深水区主要沿中央坳陷带展布。深水区除堆积来源于悬浮物的深海泥质披盖沉积外,还发育有大量重力流沉积,其沉积物主要来源于盆地西部及北部。这些重力流沉积包括:近东西向延伸的中央峡谷、深海扇和块体流沉积。

3.1 深海峡谷沉积特征

南海西北部发育一条大型轴向深海峡谷体系,整体呈东西向延伸展布,西起莺歌海盆地中央凹陷

带,经乐东凹陷、陵水凹陷、松涛凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷,向东延伸进入西沙海槽,总长425 km,宽度最大处为48.5 km。该中央峡谷体系具有以下特点:

(1) 中央峡谷总体呈东西向“S”型展布,延伸方向有2个明显转折区,即宝岛区和莺琼过渡区,前者在松南段呈NE向,在宝岛段渐变为EW向,到长昌段又渐变为NE向;后者在莺歌海盆地呈NW向,在琼东南盆地乐东段渐变为EW向,再渐变为NE向(图1)。这种延伸规律主要受控于区域构造格局,其中东部转换带位于宝岛段,以西地区控凹断裂为NE向,而以东地区控凹断裂渐变为NEE或EW向。同样,最西端转换带位于莺歌海盆地与琼东南盆地交汇部位,也就是莺歌海盆地NW向①号控凹断裂与琼东南盆地西部NE向②号控凹断裂的转换地带。显然,构造带转换控制盆地地形地貌的变化,同时也影响到中央峡谷的平面分布。

(2) 区域构造作用不仅控制中央峡谷总体展布特征和盆地内晚期构造活动,特别是盆地先存断裂活化直接导致中央峡谷形成。琼东南盆地中央峡谷的宝岛段和长昌段发育与基底断裂活化有密切的关系(图5c,5d)。基底断裂活化对中央峡谷东段的控制作用表现为“限制性”作用,不仅为晚中新世时期沉积物提供了“通道”,也使得后期沉积物受特定地貌特征的影响沿着前期形成的“通道”下切和充填,这种负地形是造成中央峡谷东段下切较深,下切能力较强的主要原因。

(3) 中央峡谷下切谷形态自下而上从“V”型向“U”型过渡,自东向西也从“V”型向“U”型过渡;此外,中央峡谷自西向东,下切深度越来越大,下切层位越来越老。长昌段中央峡谷宽度10 km左右,剖面呈“V”型,下切深度较大,冲刷、削截特征明显,往东下切深度进一步增大。宝岛段峡谷宽度明显增大,宽度范围16~35 km,且从东向西宽度增大,发育“V”型和“U”型峡谷。松南—陵水段峡谷宽度变化较大,变化范围在10~48 km之间。底部削截特征明显,但下切深度较小,整体上表现出“U”型特征。莺东—乐东段峡谷宽度和充填厚度均较小,均显示为单个“U”型峡谷充填(图5a~5d)。

(4) 中央峡谷表现为多源多期充填特点,不同峡谷段充填不仅沉积构成及微相类型有明显差异,其沉积物源也具有明显的差异。峡谷西段以浊积水道沉积为主,特别是乐东凹陷及莺歌海盆地东侧的峡谷均以粗粒浊积水道沉积为主。在陵水凹陷以东中央峡谷段沉积构成包括浊积水道—天然堤复合体、

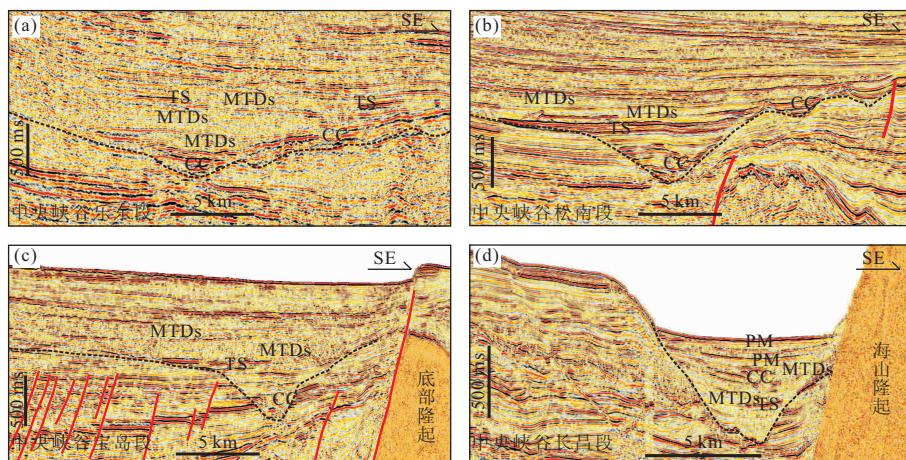


图 5 南海西北陆缘区发育一条近东西向延伸的中央峡谷体系

Fig. 5 Seismic features of different segments of the Central Canyon with a nearly E-W trend, developing in the continental margins of northwestern South China Sea

CC. 浊积水道复合体; MTDs. 块体流沉积; TS. 浊积席状砂; PM. 深海泥质沉积

浊积席状砂、块体流沉积和深海泥质沉积,但在不同区带不同沉积物所占比例有明显差异。浊积水道沉积的物源主要来自于盆地西侧,块体流沉积的物源主要来自于盆地北部陆坡体系。因此,来自于西部浊积水道沉积与来自于北部块体流沉积在中央峡谷内形成了多源多期发育的复杂峡谷体系。

3.2 沉积物波沉积特征

深水沉积物波是一种大型的波状沉积地形(图 6),沉积物波主要发育于神弧隆起下的下陆坡至深海平原位置,面积约 400 km²; 波长一般约 2 km, 波高约 30 m; 发育位置坡度较小,一般小于 1°; 内部结构形态一般呈近正弦曲线,有时呈上攀叠瓦状; 沉积物波迎流面较长、背流面较短,且逆陆坡或流向迁移等。从形态上,沉积物波分为 2 个阶段, S40-S20 为第一阶段, S20 至现今海底为第二阶段。其中, S40-S20 阶段发育的沉积物波的波高小,沉积物波的形态不太明显,而 S20 至现今海底发育的沉积物波在形态上起伏更大。这种特征可能跟沉积物波发育的古地貌形态有关: S40 界面的形态相对比较缓和,是相对平直的; 而 S20 界面由于本身有沉积物波的发育,其古地貌形态起伏就相对较大(图 6)。

研究表明,沉积物波的成因有多种,现已知的沉积物波成因有浊流成因、等深流成因、内波成因和潮汐作用成因(Mullins *et al.*, 1982; Masson *et al.*, 2002; Normark *et al.*, 2002; Wynn *et al.*, 2002; Kane *et al.*, 2010)。除此之外,有研究表明,沉积物波发育的古地貌形态对于沉积物波的发育具有一定的控制作用。根据上述特征,结合琼东南盆地其他相

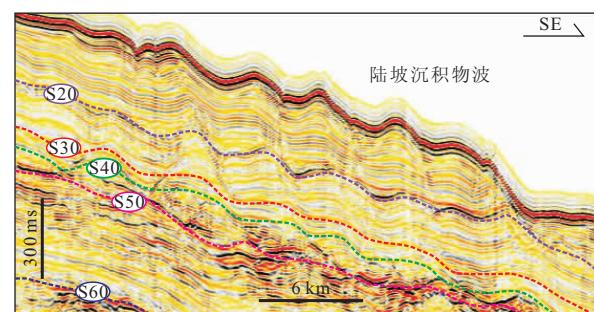


图 6 发育于南海西北陆缘长昌凹陷的沉积物波

Fig. 6 Sediment waves developed in the Changchang depression of northwestern South China Sea

关资料并综合 Damuth(1979)和邵磊等(2001)的研究,推测该区沉积物波为浊流成因,组成物质以泥质为主,含粉砂泥或砂夹层的泥,可能存在少数砂质。

3.3 深海海底扇及块体流沉积特征

地震剖面揭示深海区除发育深海峡谷外,还发育深海海底扇和大型块体流沉积体。深海海底扇沉积主要发育于下陆坡的坡脚附近,主要分布于莺歌海盆地与琼东南盆地交界区、琼东南盆地中部松涛和宝岛区。进积型陆坡区以盆底扇形式出现,主要发育来自于 2 个物源方向的深海海底扇,其一是来源于北部陆坡区海底扇,其二是来源于西部盆地轴向海底扇。总体来看,这些海底扇厚度小,分布范围也较小。

块体流沉积不仅广泛分布于陆坡区,而且向深海平原延伸,有的块体流推进到中央坳陷带的深凹区,或者推进到中央峡谷。在某些期次块体流的趾

部,还能观察到块体流中发育着一系列由于受挤压而形成的逆冲断层带。整体上来看,滑塌型陆坡之下 的块体流沉积非常发育,占据较大空间,从莺歌海组二段一直到现今都有大规模的块体流沉积。同期块体流沉积的面积最大可达 9 100 km^2 。

深海区沉积构成与毗邻的陆坡类型密切相关,进积型陆坡之下以海底扇为主,偶见小规模块体流沉积;滑塌型陆坡之下块体流沉积最发育;水道化型陆坡之下海底扇和块体流沉积共存,有时可见两者垂向互层,但块体流沉积规模小且分散。

4 结论

(1)南海西北陆缘自中新世以来,深水沉积开始广泛发育,多种深水沉积单元在琼东南盆地中央坳陷带、南部隆起区以及莺歌海盆地东南部发育。这些深水地区除堆积正常深海一半深海泥岩外,还发育有块体流沉积、沉积物波、深水峡谷等大型特殊的深水沉积体。

(2)深水区沉积体系类型及其内部构成特征主要受控于不同陆坡类型及沉积物供给特征,进积型陆坡发育进积楔及海底扇,滑塌型陆坡发育大型块体流沉积,水道化型陆坡发育陆坡峡谷及块体流沉积。

(3)中央峡谷体系是一条呈东西向延伸的大型轴向深水峡谷体系,构成了盆地深水区重要的沉积物搬运通道系统,沉积充填既包括来自西部峡谷头部的浊积水道沉积,也包括来自于北部陆坡的块体流沉积。其中来自于西部物源的粗粒浊积水道成为盆地深水区的重要油气储层。

References

- Casas, D., Ercilla, G., Baraza, J., et al., 2003. Recent mass-movement processes on the Ebro continental slope (NW Mediterranean). *Marine and Petroleum Geology*, 20(5): 445–457. doi: 10.1016/S0264-8172(03)00078-3
- Clift, P. D., Sun, Z., 2006. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: implications for Tibetan uplift and monsoon intensification. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 111: B06405. doi: 10.1029/2005JB004048
- Damuth, J. E., 1979. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China basin. *Geology*, 7(11): 520–523. doi: 10.1130/0091-7613(1979)7<520:MSWCBT>2.0.CO;2
- Gong, Z. S., 2004. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 513–517 (in Chinese with English abstract).
- He, Y. L., Xie, X. N., Li, J. L., et al., 2010. Depositional characteristics and controlling factors of continental slope system in the Qiongdongnan basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(2): 118–122 (in Chinese with English abstract).
- He, Y. L., Xie, X. N., Lu, Y. C., et al., 2011. Architecture and characteristics of mass transport deposits (MTDs) in Qiongdongnan basin in northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 905–913 (in Chinese with English abstract).
- Hodgson, D. M., Di Celma, C. N., Brunt, R. L., et al., 2011. Submarine slope degradation and aggradation and the stratigraphic evolution of channel-levee systems. *Journal of the Geological Society*, 168: 625–628. doi: 10.1144/0016-76492010-177
- Kane, I. A., McCaffrey, W. D., Peakall, J., et al., 2010. Submarine channel levee shape and sediment waves from physical experiments. *Sedimentary Geology*, 223(1–2): 75–85. doi: 10.1016/j.sedgeo.2009.11.001
- Kneller, B., 2003. The influence of flow parameters on turbidite slope channel architecture. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6–8): 901–910. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2003.03.001
- Li, S. T., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1998. The dynamic process of episodic rifting and the tectonic event from 10 Ma in the northern continental margin basin of South China Sea. *Science Bulletin*, 43(8): 797–810 (in Chinese with English abstract).
- Masson, D. G., Howe, J. A., Stoker, M. S., 2002. Bottom-current sediment waves, sediment drifts and contourites in the northern Rockall trough. *Marine Geology*, 192(1–3): 215–237. doi: 10.1016/S0025-3227(02)00556-X
- McHargue, T., Pyrcz, M. J., Sullivan, M. D., et al., 2011. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: patterns and predictions. *Marine and Petroleum Geology*, 28(3): 728–743. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.07.008
- Mullins, H. T., Keller, G. H., Kofoed, J. W., et al., 1982. Geology of great Abaco submarine canyon (Blake plateau): observations from the research submersible. *Marine Geology*, 48(3–4): 239–257. doi: 10.1016/0025-3227(82)90099-8

- Normark, W. R., Piper, D. J. W., Posamentier, H., et al., 2002. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees. *Marine Geology*, 192(1–3): 23–58. doi: 10.1016/S0025-3227(02)00548-0
- Pang, X., Shen, J., Yuan, L. Z., et al., 2006. Petroleum prospect in deep-water fan system of the Pearl River in the South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 27(3): 11–16, 21 (in Chinese with English abstract).
- Piper, D. J. W., 2005. Late Cenozoic evolution of the continental margin of eastern Canada. *Norwegian Journal of Geology*, 85: 305–318.
- Posamentier, H. W., Kolla, V., 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3): 367–388. doi: 10.1306/111302730367
- Shao, L., Li, X. H., Wei, G. J., et al., 2001. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea. *Science in China (Ser. D)*, 31(10): 828–833 (in Chinese).
- Stow, D. A. V., Mayall, M., 2000. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 125–135. doi: 10.1016/S0264-8172(99)00064-1
- Su, M., Li, J. L., Jiang, T., et al., 2009. Morphological features and formation mechanism of Central Canyon in the Qiongdongnan basin, northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(4): 85–93 (in Chinese with English abstract).
- Sultan, N., Cochonat, P., Canals, M., et al., 2004. Triggering mechanisms of slope instability processes and sediment failures on continental margins: a geotechnical approach. *Marine Geology*, 213(1–4): 291–321. doi: 10.1016/j.margeo.2004.10.011
- Wang, Z. F., Li, X. S., Sun, Z. P., et al., 2011. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the deep-water region, Qiongdongnan basin. *China Offshore Oil and Gas*, 23(1): 7–13, 31 (in Chinese with English abstract).
- Wynn, R. B., Piper, D. J. W., Gee, M. J. R., 2002. Generation and migration of coarse-grained sediment waves in turbidity current channels and channel-lobe transition zones. *Marine Geology*, 192(1–3): 59–78. doi: 10.1016/S0025-3227(02)00549-2
- Xie, X. N., Muller, R. D., Li, S. T., et al., 2006. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745–765. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2006.03.004
- Xie, X. N., Muller, R. D., Ren, J. Y., et al., 2008. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea. *Marine Geology*, 247(3–4): 129–144. doi: 10.1016/j.margeo.2007.08.005
- Zhu, W. L., 2011. China offshore oil and gas exploration: review and thinking. *Engineering Sciences*, 13(5): 4–9 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Gao, L., 2008. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 29(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 龚再升, 2004. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5): 513–517.
- 何云龙, 解习农, 李俊良, 等, 2010. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素. 地质科技情报, 29(2): 118–122.
- 何云龙, 解习农, 陆永潮, 等, 2011. 琼东南盆地深水块体流构及其沉积特征. 地球科学——中国地质大学学报, 36(5): 905–913.
- 李思田, 林畅松, 张启明, 等, 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件. 科学通报, 43(8): 797–810.
- 庞雄, 申俊, 袁立忠, 等, 2006. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景. 石油学报, 27(3): 11–16, 21.
- 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等, 2001. 南海陆坡高速堆积体的物质来源. 中国科学(D辑), 31(10): 828–833.
- 苏明, 李俊良, 姜涛, 等, 2009. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因. 海洋地质与第四纪地质, 29(4): 85–93.
- 王振峰, 李绪深, 孙志鹏, 等, 2011. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力. 中国海上油气, 23(1): 7–13, 31.
- 朱伟林, 2011. 中国近海油气勘探的回顾与思考. 中国工程科学, 13(5): 4–9.
- 朱伟林, 张功成, 高乐, 2008. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向. 石油学报, 29(1): 1–9.