

# 琼东南盆地南部深水区中新统层序地层地震相与沉积演化特征

唐武<sup>1,2</sup>, 王英民<sup>1,2</sup>, 黄志超<sup>3</sup>, 王琳<sup>3</sup>, 邓彦涛<sup>4</sup>, 何永焱<sup>1,2</sup>, 周兴海<sup>3</sup>, 王丹<sup>5</sup>

(1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室; 2 中国石油大学(北京)地球科学学院;  
(3 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司研究院; 4 帕拉代姆技术(北京)有限公司; 5 中国海洋石油研究中心)

**摘 要** 根据高分辨率地震资料的反射和结构特征,结合地震剖面振幅旋回性变化,将研究区中新统划分为3个层序组及6个三级层序。三个层序组自下而上分别对应三亚组、梅山组及黄流组三个地层组。在层序格架内识别出六种典型的地震相类型:丘状地震相、前积地震相、水道充填地震相、杂乱地震相、波状地震相以及平行—亚平行地震相。三亚组以波状反射和平行—亚平行反射为主;梅山组以丘状反射和波状反射为主,梅山期是生物礁发育的繁盛期;黄流组仍以丘状反射和波状反射为主,但丘状反射规模较梅山组明显减小。中新统整体上表现为一个水进的过程,从滨浅海环境过渡到浅海环境再逐渐过渡到半深海环境,发育有扇三角洲、生物礁滩以及水道沉积体系,而地震相的分布和演化明显受沉积体系演化的控制。生物礁和水道沉积可能是该区的有利储层。

**关键词** 深水勘探; 地震勘探; 层序地层; 地震相; 沉积相演化; 中新统; 琼东南盆地

**中图分类号**: TE111.3; P631.445 **文献标识码**: A

深水油气勘探已经并将继续成为人们关注的热点之一<sup>[1-2]</sup>。起源于被动大陆边缘的地震地层学和层序地层学理论提供了利用地震资料的解释来研究地层和沉积相的方法<sup>[3]</sup>。勘探早期,由于缺乏钻井、测井资料,主要依靠地震资料的分析解释来获得对深水地质条件的认识和推测<sup>[4-5]</sup>。近些年来许多学者在西非和墨西哥湾等深水地区,通过层序划分建立等时地层格架,在层序格架内进行典型地震相的识别,并对这些深水地区沉积体系的研究取得了重要进展<sup>[6-8]</sup>。笔者借鉴这些研究,对我国琼东南盆地南部深水、无井地区的沉积特征进行了探讨,以期今后对该区进一步的油气勘探提供基础依据。

## 1 研究区背景

琼东南盆地位于海南岛以南、西沙群岛以北的海域,盆地西北部水深0~200m,东南部邻近西沙北部海槽,水深一般大于1000m,最深超过2000m,在其深水区(大于200m)具有良好的油气勘探前景<sup>[9-12]</sup>。本次研究区位于琼东南盆地南部水深大于1000m的深水区,主体处于北礁西凸起构造带,另跨乐东—陵水凹陷(图1)<sup>[13-14]</sup>,面积将近1200km<sup>2</sup>,全区有新采集的三

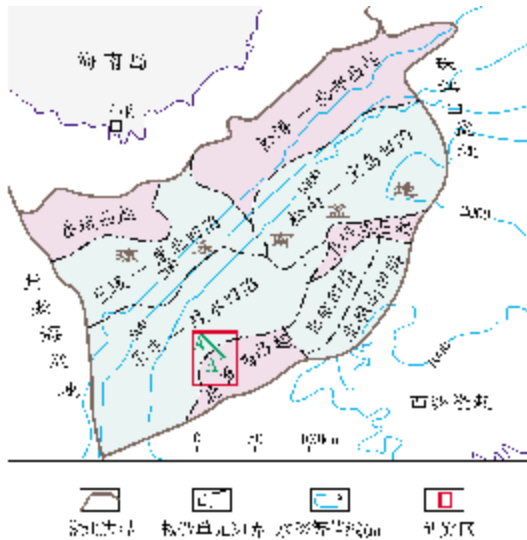


图1 琼东南盆地水深分布及研究区位置图  
(水深等值线和构造单元划分据文献[13-14]改编)  
A—A'为地震剖面线,剖面见图2

维地震资料,但无钻井、测井资料。如何利用地震资料进行层序地层及沉积相等方面的研究是目前急需解决的问题。本文参考前人的研究成果<sup>[9]</sup>,以新采集

收稿日期: 2011-11-17; 改回日期: 2012-03-02

唐武: 1987年生, 2009年毕业于大庆石油学院,获学士学位;现为中国石油大学(北京)博士研究生。主要从事层序地层与储层预测方面研究。通讯地址: 102249 北京市昌平区府学路18号 中国石油大学(北京)地球科学学院; 电话: (010)89733506

的三维地震资料来建立该区中新统的层序地层格架,并在格架内识别出典型的地震相类型,最终搞清该区的典型沉积相类型以及沉积演化规律。

2 层序地层划分

地震地层学或层序地层学的核心都是利用地震资料识别层序界面,建立等时地层格架。层序界面是不整合面或与之对应的整合界面,主要以削截、上超、顶超、下超等为标志<sup>[15]</sup>。当前的层序地层学主要适用于陆架等浅水区,而在下陆坡地区仅仅依靠地震反射接触关系则很难确定层序界面,因此对于深水区,无论是地震地层学或层序地层学的理

论都存在着一些困难<sup>[16]</sup>。但是深水区层序界面上下的地震相特征及旋回性均存在着显著差异<sup>[17]</sup>,这将有助于我们进行层序界面的识别。本文借鉴前人在西非和墨西哥湾的研究方法<sup>[6-8]</sup>,以层序地层学理论<sup>[4-5]</sup>为指导,利用高分辨率三维地震资料的旋回性和界面上下地震相特征的差异性来建立研究区的层序地层格架。

总体上讲,在研究区中新统共识别出 7 个层序界面。依据层序界面的特征及分布范围,结合盆地地质背景,参考前人对整个琼东南盆地的层序划分研究成果<sup>[9]</sup>,笔者将研究区中新统划分为 3 个层序组、6 个三级层序(表 1,图 2)。

表 1 琼东南盆地南部深水区中新统层序划分表

统	组	段	层序划分		地震相类型	界 面 特 征 *				
			层序组	三级层序		层序组界面	三级层序界面	地震界面	年龄 (Ma)	界面类型
中新统	黄流组	一段	TC	SQ <sub>6</sub>	丘状、波状、水道充填	TSB7		T <sub>30</sub>	5.5	区域不整合
		二段		SQ <sub>5</sub>	丘状、波状、水道充填		SB6	T <sub>31</sub>		超覆不整合
	梅山组	一段	TB	SQ <sub>4</sub>	丘状、波状、水道充填、杂乱	TSB5		T <sub>40</sub>	10.5	区域不整合
		二段		SQ <sub>3</sub>	丘状、波状、杂乱、水道充填		SB4	T <sub>41</sub>		超覆不整合
	三亚组	一段	TA	SQ <sub>2</sub>	波状、杂乱、水道充填	TSB3		T <sub>50</sub>	15.5	区域不整合
		二段		SQ <sub>1</sub>	平行—亚平行、前积		SB2	T <sub>52</sub>		超覆不整合
						TSB1		T <sub>60</sub>	23	区际不整合

\* “区域不整合”分布范围相对较小,主要是分布于次级构造单元的大部分地区;“区际不整合”是指在整个盆地均有分布的不整合,分布范围比较广。TSB 代表层序组的界面,SB 代表三级层序界面。

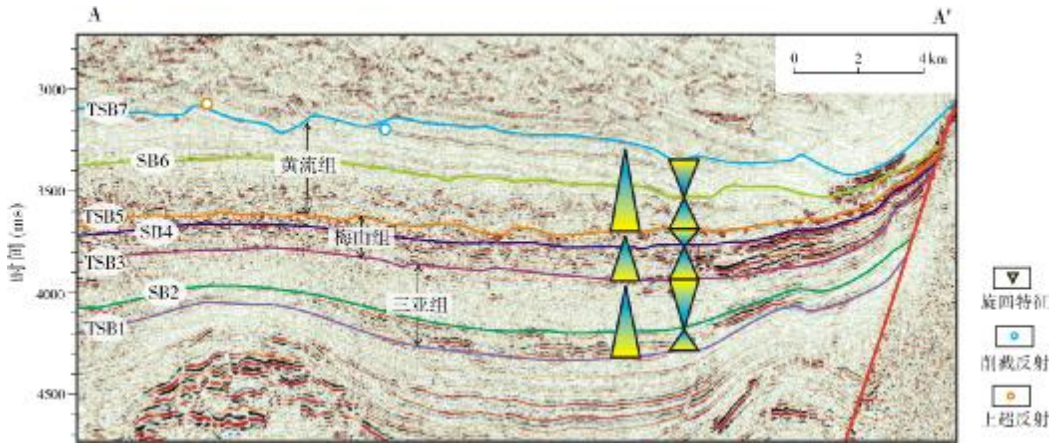


图 2 琼东南盆地南部典型层序格架剖面  
TSB 代表层序组的界面,SB 代表三级层序界面。A—A' 剖面位置见图 1

2.1 层序组及其界面

层序组是指二级层序,它与区域的长期基准面旋

回的特定阶段相对应,由多个在相似的地质背景下形成具有相似沉积组合特征的三级层序组成<sup>[17]</sup>。一般来说,层序组之间的界面表现为区域性的不整合面。由

邻区的研究成果<sup>[18]</sup>得知,在地震剖面上,粒度细的沉积物振幅较弱,粒度较粗的沉积物振幅较强,因此振幅的相对强弱变化可以反映沉积物粒度的粗细旋回变化。研究区中新统自下而上发育三个明显的正旋回,建造了TA、TB、TC三个层序组,分别与研究区所划分的三亚组、梅山组、黄流组三个地层组相对应,TSB1、TSB3、TSB5、TSB7是所述这三个层序组的界面,在这些界面上局部可见削截或上超反射特征(图2)。

中新统底部层序 SQ<sub>1</sub> 发育时期是琼东南盆地构造演化的关键时期,发生了盆地性质的改变,由前中新世的断陷向坳陷过渡,形成重要的区际不整合面,构成层序组 TA 的底部界面 TSB1,它在整个盆地内均有分布,是对南海海盆扩张的响应。TSB1 在研究区内表现为中强振幅高连续的地震反射,在构造高部位超覆于基底之上。该界面上下的地震相特征差异显著,界面之下为一套中弱振幅中弱连续的地震反射,之上则表现为一套中强振幅中高连续的地震反射特征。

TSB3 界面之上为梅山组,出现丘状反射,而界面之下的三亚组无丘状反射特征,表明沉积环境逐渐由碎屑岩沉积环境向碳酸盐岩沉积环境过渡。

在构造高部位,TSB5 界面之上黄流组通常表现为中振幅中连续的地震反射,之下梅山组则为强振幅中连续的丘状地震反射。在其它部位,TSB5 界面之上的地震反射以中强振幅、连续性较好的波状反射为主,界面之下以中强振幅中连续的地震反射为主,且界面上下均有强振幅的水道充填反射,表明水道多期活动、不断迁移。

TSB7 是中新统或层序组 TC 的顶部界面,为一区域不整合面,通常表现为中弱振幅中连续性的地震反射特征,界面上下可见明显的上超、削截现象,横向易追踪,是一个重要的转换面。

2.2 三级层序界面

与上述几个层序组界面相比,SB2、SB4、SB6(图2)这三个界面相对不太明显,它们构成了三级层序之间的界面。这些界面上下并无较明显的削蚀和上超特征,因此主要是通过地震相特征的差异及旋回性变化来进行识别,它们主要对应于短期内海平面下降旋回的底界。

SB2 界面为中强振幅中连续的反射界面,界面之上除靠近高部位地区外,地层厚度横向上比较稳定,振幅总体比较弱,界面之下主要为中振幅高连续的地

震反射,局部超覆于层序组 TA 的底界面 TSB1 之上。

SB4 界面之上为杂乱丘状反射,表现为弱振幅中频率连续性较差的地震反射特征,界面之下主要为波状反射及丘状杂乱反射,表现为中振幅中频率的地震反射特征。

SB6 界面之下为中强振幅连续性较好的波状反射为主的地震反射,之上为弱振幅高连续的波状反射和平行—亚平行反射为主的地震反射。

3 典型地震相特征

地震相是由特定地震反射参数所限定三维空间的地震反射特征,是特定的沉积相或地质体在地震上的响应<sup>[19]</sup>。在无井、少井的地区,通过开展在等时层序地层格架内地震相的研究来进一步认识沉积相特征具有十分重要的意义。本文通过对地震反射单元的外部反射形态及内部反射结构,再结合振幅、连续性等特征在研究区内共识别出六种典型的地震相类型,分别为丘状反射、前积反射、水道充填反射、杂乱反射、波状反射以及平行—亚平行反射(表2)。

3.1 丘状反射地震相




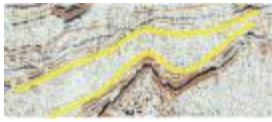


丘状反射在地震上表现为局部突然增厚,向上凸起而被上覆地层所围绕,这是由于生物礁的生长作用或者是由于塑性地层或侵入岩体所形成的底辟构造所造成的。诸多学者<sup>[13,20]</sup>总结了生物礁滩相的地震反射特征,认为主要从外形、顶底界面反射特征、内部反射结构、周缘反射、礁体底部以及上覆地层等六个方面来识别生物礁。在研究区内丘状反射广泛分布,具有顶部强反射、底部弱反射、内部杂乱反射、周缘地层上超反射等特点,局部呈对称状,为典型的生物礁地震反射特征,层位上主要分布于梅山组、黄流组,平面上分布于研究区东部的构造高部位。

3.2 前积反射地震相

前积反射在地震上表现为一组同相轴倾斜并向前推进、与顶部或底部的同相轴呈角度或切线相交的现象<sup>[19]</sup>。前积是由沉积物的侧向加积作用形成的,主要发育于斜坡背景下,其沉积速率明显大于周边地区,包括S型、顶超型、斜交型、叠瓦状以及帚状等多种类型。研究区内前积反射外形呈扫帚状,内部反射从根部向下倾方向发散,沉积角度高,下超于底界之上,为典型的帚状前积反射。此外,该前积反射地



表 2 琼东南盆地南部深水区中新统典型地震相类型

地震相类型	地震反射构型	分布层位	典型地震剖面*	沉积相
丘状地震相	丘 状	梅山组一、二段 黄流组一、二段		生物礁
前积地震相	帚 状	三亚组二段		扇三角洲
水道充填地震相	U 形或 V 形	三亚组一段 梅山组一、二段 黄流组一、二段		水 道
杂乱地震相	杂 乱	三亚组一段		扇三角洲
波状地震相	波 状	三亚组一段 梅山组一、二段 黄流组一、二段		滨浅海 半深海
平行—亚平行地震相	平 行	三亚组一、二段		滨浅海

\* 各剖面上黄线的部分代表发育典型的地震相;剖面中的红色直线为断裂。

层发育于三亚组沉积早期,平面上分布于研究区的东南侧,存在于边界大断层之下,为扇三角洲沉积。

3.3 水道充填反射地震相

水道是由浊流形成或维持的长条形负地形单元,它是碎屑物质向深海输送的重要通道和沉积场所<sup>[21]</sup>。一般来说,深水水道存在两种类型,即侵蚀型水道和沉积型水道,在地震上呈 V 或 U 形反射特征。研究区内水道长期发育,从早中新世晚期一直持续到上新世。水道呈典型的 V 或 U 形反射,底部为强振幅反射,被滞留沉积所充填;边缘被弱振幅丘状杂乱反射的块体搬运沉积和弱振幅平行—亚平行反射的深海披覆泥所充填。由于水道充填的是强反射的粗粒重力流沉积,而周围为弱振幅的细粒深海泥质沉积,因此研究区内发育的水道可能为重要的储层。在整个中新统沉积时期,除三亚早期外,均发育该地震相类型的沉积,平面上分布于研究区的东南部,呈北西—南东向展布。

3.4 杂乱反射地震相

研究区内该地震相表现为弱中振幅、差连续,呈杂乱状。通常杂乱反射发育于冲积扇、陡崖浊积扇、海底扇等扇体中,或者由于重力滑动或构造变动而强烈变形了的地层中。在本研究区内,杂乱反射主要发育于三亚组一段,在平面上分布于剥蚀区两侧,为重力滑动所致。

3.5 波状反射地震相

波状反射在地震上表现为各同相轴之间在总体趋势上是相互平行的,但细看都有一定程度的波状起伏。它是不均匀垂向加积作用的产物,同一地层单元内的岩性横向上变化较大,岩层厚度也不稳定,表明当时的沉积环境不稳定,常代表滨浅海沉积环境。研究区内中新世各个时期均发育该地震相的地层,分布范围较广,呈弱振幅波状反射,表明当时的整体沉积环境为滨浅海。

3.6 平行—亚平行反射地震相

研究区内平行—亚平行地震相表现为反射同相轴平行或近乎平行反射，以中振幅、高连续性为特征。这类地震相反映了一个沉积区域内相对稳定的、水体能量相对较低的沉积环境，是滨浅海相的典型地震响应。在本研究区，平行—亚平行反射地震相主要分布在东侧，发育于三亚组时期。

4 层序地层演化特征

中新世前，琼东南盆地处在坳陷发育期。从中新世初开始，发生区域性沉降，进入热沉降阶段，坳陷逐渐被完全充填，生长断层趋于消失，热沉降和挠曲作用在区域运动上成为主角。盆地性质以拗陷为主，整体处于向南倾斜的缓坡开阔海沉积环境<sup>[11,14]</sup>。在此地质背景下，中新统各层序的演化特征如下所述。

三亚组(SQ<sub>1</sub>—SQ<sub>2</sub>) 三亚组对应于层序组TA，它由两个三级层序SQ<sub>1</sub>和SQ<sub>2</sub>所组成。该层序组以波状反射和平行—亚平行反射为主，在研究区东南侧发育有前积反射构型。东南侧同样发育水道充填反射，沿北西—南东向伸展；局部发育杂乱反射(图3)。三亚期是琼东南盆地热沉降早期，断裂活动十分微弱，地形平坦，总体上表现为东高西低的构造格局，海侵逐渐扩大，广泛发育滨浅海—浅海相沉积，仅局部发育扇三角洲和水道沉积体系。

梅山组(SQ<sub>3</sub>—SQ<sub>4</sub>) 梅山组对应层序组TB，由两个三级层序SQ<sub>3</sub>和SQ<sub>4</sub>所组成。该层序组以丘状反射和波状反射为主，水道充填反射继续沿北西—南东向伸展。梅山期是生物礁发育的繁盛期。梅山早期，随着进一步发生海侵，研究区东北部整体转换为缓坡碳酸盐台地。生物礁滩复合体受古地貌的控制呈东西向条带状展布。梅山晚期，西北部的红河断裂活动加剧，同时全球海平面迅速上升，研究区内海侵规模至最大，缓坡台地进一步发育。此时，研究区整体水深较深，高部位的生物礁属于并进型生长。海退时，位于高部位早期发育的生物礁最先出露海平面，易于发生白云石化，因此推测高部位的生物礁储层物性好。

黄流组(SQ<sub>5</sub>—SQ<sub>6</sub>) 黄流组对应于层序组TC，它由两个三级层序SQ<sub>5</sub>和SQ<sub>6</sub>所组成。该层序组仍以丘状反射和波状反射为主，但丘状反射规模较梅山组明显减小。黄流期，研究区在继承前期缓坡碳酸盐台地—半深海相沉积环境的同时，进一步发生区域

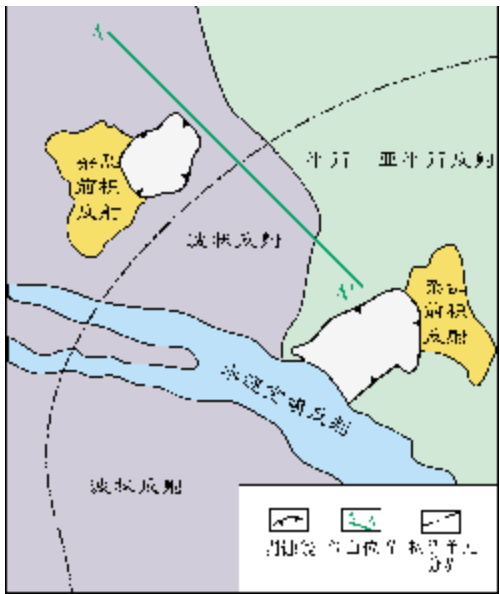


图3 研究区中新统三亚组一段地震相分布图  
图幅范围与图1中的研究区范围相同  
A—A'为地震剖面线，剖面见图2

性的沉降，发育两种显著不同的沉积体系：一种是在研究区东北部发育的台缘斜坡—碳酸盐台地—生物礁滩复合体的碳酸盐岩沉积体系，另一种是在研究区西南部发育的半深海—水道碎屑岩沉积体系。

总的来说，研究区中新统整体上表现为一个水进的过程，从滨浅海环境逐渐变为浅海环境再过渡到半深海环境，发育有扇三角洲、生物礁滩以及水道沉积体系。而前积、杂乱、丘状等地震相往往出现于构造高部位，前两者反映的是搬运流体能量迅速减弱、沉积物快速堆积的环境，如扇三角洲；后者则是由于水体总体较深、碎屑岩不发育、生物礁在构造高部位生长而造成的。波状和平行—亚平行反射则代表了水动力相对较强的滨浅海环境，水道充填则与水道的发育密切相关。因此，地震相的分布明显受沉积体系的分布和演化所控制。

5 结 论

(1)对于无井或少井的深水油气勘探区，地震资料的反射结构以及旋回性变化特征可用于识别和划分层序界面。

(2)研究区中新统层序格架内识别出了丘状反射、前积反射、杂乱反射、水道充填反射、波状反射以及平行—亚平行反射等六种典型的地震相，分别与生

物礁、扇三角洲、水道以及滨浅海相等沉积相类型相对应,生物礁和水道沉积可能是该区的有利储集体。

(3) 研究区中新统整体表现为一个水进的过程,从滨浅海过渡到浅海环境再逐渐过渡到半深海环境,沉积层序的演化对地震相具有明显的控制作用。

参 考 文 献

[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] 李忠. “从最高到最深”——从第 17 届国际沉积学大会看沉积学研究前沿[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 928-933.

[3] 赵政璋, 赵贤正, 李景明, 等. 国外海洋深水油气勘探发展趋势及启示[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(6): 71-76.

[4] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier Press, 2006.

[5] 徐怀大. 从地震地层学到层序地层学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[6] Deptuck M E, Steffans 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.

[7] 李磊, 王英民, 黄志超, 等. 尼日尔三角洲深水区层序地层及地震相研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 407-416.

[8] Prather B E, Booth J R, Steffens G S, et al. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins, deep-water Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(5A): 701-728.

[9] 魏魁生, 崔旱云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2001, 26(1): 59-66.

[10] 龚再升. 生物礁是南海北部深水区的重要勘探领域[J]. 中国海上油气, 2009, 21(5): 289-295.

[11] 张功成, 米立军, 吴景富, 等. 凸起及其倾没端——琼东南盆地深水区大中型油气田有利勘探方向[J]. 中国海上油气, 2010, 22(6): 360-368.

[12] 朱伟林. 南海北部深水区油气勘探关键地质问题[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1059-1064.

[13] 吴时国, 袁圣强, 董冬冬, 等. 南海北部深水区中新世生物礁发育特征[J]. 海洋与沼泽, 2009, 40(2): 117-121.

[14] 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

[15] Mitchum R M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part II: Glossary of terms used in seismic stratigraphy[J]. AAPG Memoir 26, 1977: 205-212.

[16] Shannon P M, Stoker M S, Praeg D, et al. Sequence stratigraphic analysis in deep-water, underfilled NW European passive margin basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(9-10): 1185-1200.

[17] 王英民. 对层序地层学工业化应用中层序分级混乱问题的讨论[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 9-15.

[18] Gong C L, Wang Y M, Zhu W L, 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.

[19] 孙家振, 李兰斌. 地震地质综合解释教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.

[20] 郭建宇, 马朋善, 胡平忠, 等. 地震-地质方法识别生物礁[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 587-591.

[21] Mutti E, Normark W R. An integrated approach to the study of turbidite systems[M]. New York: Springer-Verlag, 1991: 75-106.

编辑: 吴厚松

Seismic Facies and Sedimentary Evolution Characteristics of Miocene Sequence Strata in the Deep-water Region, Southern Qiongdongnan Basin

Tang Wu, Wang Yingmin, Huang Zhichao, Wang Lin, Deng Yantao, He Yongyao, Zhou Xinhai, Wang Dan

Abstract: Based on the reflection and architectural characteristics of the high resolution seismic data, and combined with the cyclic variations of seismic attribute, the Miocene sedimentary sequence can be divided into three sequence groups and six 3rd-order sequences in the deep-water region, Southern Qiongdongnan Basin. From bottom to top, three sequence groups correspond to Sanya, Meishan and Huangliu Formations respectively. In the sequence framework, six types of typical seismic facies are indentified, which include moundy seismic facies, progradational seismic facies, channel-filled seismic facies, chaotic seismic facies, wavy seismic facies as well as parallel and sub-parallel seismic facies. Wavy reflection and parallel and sub-parallel reflection mainly develop in Sanya Formation while the moundy and wavy reflections dominates in Meishan Formation. Reefs thrived rapidly during Meishan age. Moundy and wavy reflections remained dominant but the scale of the moundy reflection was obviously minishing in Huangliu Formation compared with that in Meishan Formation. The whole Miocene sequence displayed a transgression progress in which the sedimentary environments changed from littoral and neritic to shallow marine and then gradually transited to bathyal so that fan deltas, reef shoals and channel sedimentary systems developed. It is known that the distribution and evolution of seismic facies are obviously controlled by the evolution of the sedimentary systems. It is suggested that the reefs and channel sediments may be the favorable hydrocarbon reservoirs.

Key words: Miocene; Deepwater exploration; Seismic exploration; Sequence stratigraphy; Seismic facies; Sedimentary facies evolution; Qiongdongnan Basin

Tang Wu; male, Ph.D degree in progress at China University of Petroleum. Add: Faculty of Earth Science, China University of Petroleum, 18 Fuxue Rd., Changping, Beijing, 102249, China