

doi:10.3799/dqkx.2017.010

# 海底水道特征及其成因机制:以莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段为例

田冬梅<sup>1</sup>, 姜涛<sup>1\*</sup>, 张道军<sup>2</sup>, 左倩媚<sup>2</sup>, 孙辉<sup>1</sup>, 何小胡<sup>2</sup>

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. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

**摘要:** 海底水道不但是沉积物搬运过程中从源到汇的关键环节, 而且由于其中常常发育可作为良好油气储层的砂岩, 近年来已成为深水沉积学研究的热点之一. 基于莺歌海盆地乐东区新采集的三维地震资料和钻井资料, 在建立了该区莺歌海组一段四级层序地层格架基础上, 深入剖析了每个四级层序低位体系域内海底水道发育特征及其影响因素, 构建了海底水道演化模式. 研究表明, 该区由于构造稳定、物源供给充足, 高频海平面变化得以被沉积物记录下来, 因此, 可被识别出体系域发育齐全等多个四级层序, 且在每个四级层序低位体系域内都发育了大量海底水道, 具体包括斜坡水道和轴向水道两种类型, 它们总体具有汇聚型特征. 海底水道演化过程中受相对海平面变化、构造活动和沉积作用过程影响, 呈现出数量逐渐减少、规模逐渐变小的特征. 这些被快速沉积速率所记录下来的高频海平面变化及海底水道演化特征, 为更好地理解可作为良好油气储层的海底水道的成因机制及其控制因素提供了良好的范例.

**关键词:** 海底水道; 四级层序; 莺歌海盆地; 石油地质.

中图分类号: P736.2

文章编号: 1000-2383(2017)01-0130-12

收稿日期: 2016-06-10

## Genesis Mechanism and Characteristics of Submarine Channel: A Case Study of the First Member of Yinggehai Formation in Ledong Area of Yinggehai Basin

Tian Dongmei<sup>1</sup>, Jiang Tao<sup>1\*</sup>, Zhang Daojun<sup>2</sup>, Zuo Qianmei<sup>2</sup>, Sun Hui<sup>1</sup>, He Xiaohu<sup>2</sup>

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

2. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China

**Abstract:** The submarine channel is one of the important targets for deep water hydrocarbon exploration as well as the key point for the investigation into source and sink. Based on the newly acquired 3D seismic data and 3 boreholes in the Ledong area of the Yinggehai basin, the sequence stratigraphic framework for the first member of the Yinggehai Formation is set up. The development of every fourth-order sequence is derived by the enough sediment supply and high frequency sea-level changes under stable tectonic setting. The submarine channels occur in lowstand systems of every fourth-order sequence, which can be classified into slope channel and axial channel. Furthermore, the evolution of submarine channels is described, such as flowing through the lower topography with a convergent system, being reworked by mass-transport deposits (MTDs) and diapirs. Controlled by the sediment supply, high-frequency sea-level fluctuation and regional tectonic activities, the number and scale of submarine channels gradually decrease. The recorded high-frequency sea-level fluctuation by high sedimentary rate in Ledong area makes it possible to better understand the evolution and controlling factors of submarine channels, which facilitates future hydrocarbon exploration.

**Key words:** submarine channel; fourth-order sequence; Yinggehai basin; petroleum geology.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. 41476032, 91528301); 国家“十三五”重大科技专项项目 (No. 2016ZX05024005-005).

**作者简介:** 田冬梅 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积学研究. ORCID: 0000-0002-6210-9728. E-mail: tiandongmei527@126.com

\* **通讯作者:** 姜涛. ORCID: 0000-0001-8845-8582. E-mail: taojiang@cug.edu.cn

**引用格式:** 田冬梅, 姜涛, 张道军, 等. 2017. 海底水道特征及其成因机制: 以莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段为例. 地球科学, 42(1): 130-141.

海底水道是由浊流及相关沉积作用形成的、海底长条形且窄的负地形(Carter, 1988; Clark and Pickering, 1996),它是沉积物向盆地运移的主要通道,是“源—汇”系统研究的重要内容(Deptuck *et al.*, 2007).同时,由于海底水道充填物可作为良好储层,而且能够记录气候变化、海平面升降、构造活动等信息,已引起了深水沉积学家的广泛关注(Antobreh and Krastel, 2006; Mayall *et al.*, 2006; Piper *et al.*, 2007).尤其是近些年国际地学界“从源到汇——大陆边缘沉积作用计划”的提出,更加凸显了海底水道研究的重要性(Somme *et al.*, 2009).近几十年的研究使人们意识到海底水道是一种非常复杂的储集体,水道沉积体系沉积演化模式以及储层控制因素的研究对深水勘探、预测和开发都具有重大意义.Mayall *et al.* (2006)在三级层序内建立了一个快速评价海底水道储层的方法,该储层由弯曲度、沉积相、重复下切和充填及堆积样式 4 个共同要素影响,且以侵蚀为主要特征.鉴于海底水道是区域背景下多因素共同作用的结果,查明海底水道的沉积构成和发育演化必将有助于深化和完善对深水沉积过程的理解和认识,进而为深水油气资源勘探提供有效的理论依据(Shanmugam, 2003; Antobreh and Krastel, 2006; Covault, 2011; Janocko *et al.*, 2013; Pickering *et al.*, 2013).

形态上划分为“V”型、“U”型、“W”型和复合型 4 种类型,指示了峡谷的下切底界面和形态特征.Peachall and Sumner(2015)根据前人研究成果,按海底水道地貌特征总结出水下分流水道、孤立深水水道、斜坡水道、加积或侵蚀性斜坡水道、无边缘水道以及轴向水道 6 种水道类型,其中斜坡水道为近忽垂直陆架坡折发育的水道(Hubbard *et al.*, 2014),轴向水道表现为平行陆架坡折的特征(Pickering *et al.*, 2013).

近些年来,越来越多的学者已开始关注南海北部海底水道的分布及其油气地质意义(解习农等, 2012; 朱伟林等, 2012),这些研究大多集中在珠江口盆地和琼东南盆地(袁圣强等, 2010; 朱伟林等, 2012; 苏明等, 2014),由于此前缺少三维地震资料,人们对作为海底水道发育源头的莺歌海盆地内海底水道的空间展布情况缺乏认识.本研究应用最新采集的三维地震资料以及钻井资料,在建立高精度等时地层格架基础上,深入分析了莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段海底水道演化特征,阐明了海底水道成因机制及其演化模式.

### 1 区域地质概况

莺歌海盆地位于海南岛的西侧,西邻越南(图 1).盆地形态呈 NNW 走向的长菱形,海域面积超过  $11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是南海北部大陆架西区发育的

苏明等(2014)将琼东南盆地中央峡谷从横剖面

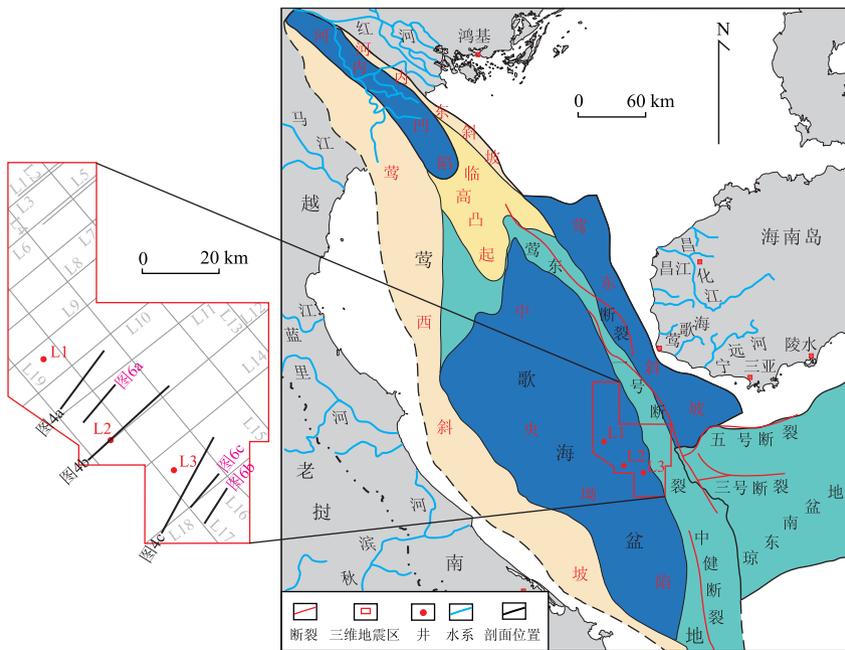


图 1 莺歌海盆地地质位置、构造划分及周围水系发育

Fig. 1 Regional geological sketch and the surrounding drainage systems of the Yinggehai basin

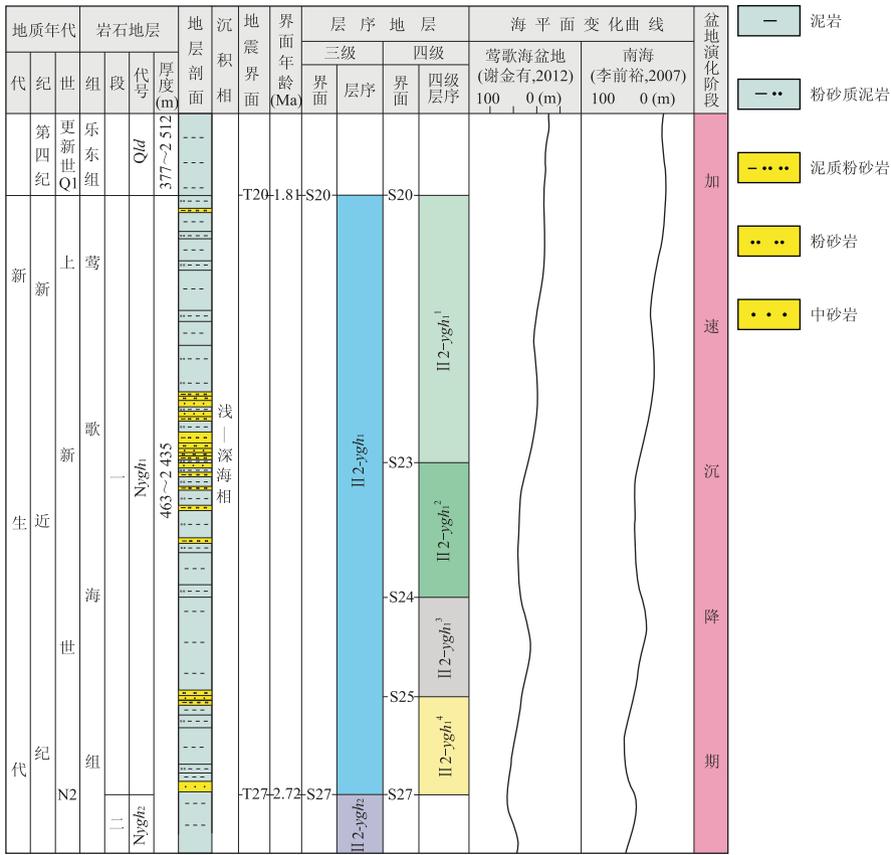


图 2 莺歌海盆地莺歌海组一段层序发育特征

Fig. 2 The strata and infilling sequences in the first member of the Yinggehai Formation of the Yinggehai basin

新生代转换—伸展型含油气盆地(钟志洪等, 2004; 雷超等, 2015). 钟志洪等(2004)根据构造变形特征, 将莺歌海盆地划分为莺东斜坡带、临高凸起带、中央拗陷带和莺西斜坡带 4 个一级构造单元. 乐东区位于中央拗陷带的南端, 该区域内部的泥—流体底辟构造活动强烈(Hao *et al.*, 2002; 钟志洪等, 2004).

钻井资料揭示该区上新世莺歌海组一段主要由大套浅灰色厚层泥岩或粉砂质泥岩、夹薄层浅灰色粉砂岩、泥质砂岩组成(图 2). 该沉积时期构造活动稳定(雷超等, 2015), 处于加速沉降期, 海平面总体呈下降趋势, 但高频海平面波动频繁(李前裕等, 2007; 谢金有等, 2012)(图 2), 属于深海—半深海相沉积环境, 源自红河、海南岛和越南东部的沉积物供给充足, 为盆地提供了大量的沉积充填物(Cao *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2015), 较高的沉积速率使得该区沉积物能够记录下来高频海平面变化, 使得四级层序的发育成为可能.

## 2 层序地层格架建立

建立等时地层格架是开展地震沉积学和有利储层预测的基础(Vail *et al.*, 1991; 林畅松等, 2002), 谢金有等(2012)已在该地区识别并建立了三级层序地层格架, 但随着油气勘探进程的推进, 人们发现有些深水沉积砂体不仅只分布在三级层序低位体系域内, 也同样分布在其海侵体系域和高位体系域之中, 这表明三级层序地层格架已不能满足该区地层—岩性油气藏勘探的需要. 四级层序可为重点区带沉积体系的精细沉积构成研究提供精度更高的地层对比框架(林畅松等, 2002), 因此, 四级层序地层格架的建立以及四级层序地层格架内的沉积微相研究, 能够更好地为油气储层和盖层的空间分布研究以及地层—岩性油气藏预测提供精度更高的地质依据(辛仁臣等, 2014).

目前, 对四级层序的划分方案仍存在着许多争议(林畅松等, 2002; 王英民, 2007; 姜平等, 2008; 辛仁臣等, 2014), 大多数学者以海泛面为界来划分四级层序(姜平等, 2008). 笔者通过深入分析控制

层序形成的相对海平面变化,根据 Mitchum Jr and van Wagoner(1991)、Vail *et al.* (1991)对高频层序划分和识别标志,认为当可容空间增加的速率足够低,不足以抵消高频的相对海平面下降时,高频海平面变化旋回就能导致四级层序的发育,由这些四级层序构成体系域的三级层序称为复合层序;反之,由准层序组构成体系域的三级层序,则称为基本层序。

本研究通过对 3 口最新钻井的岩性相和测井相进行精细解释和详细层序地层分析,识别并划分了它们的沉积微相类型、体系域特征、四级层序地层单元特征等,进而将这些体系域、四级层序界面等与新采集的三维地震资料进行井震标定,建立了高精度层序地层格架。研究表明,莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段由于构造稳定、物源丰富和沉积速度快,发育有良好的四级层序(图 3)。

### 2.1 层序界面识别

三级层序边界为区域内的不整合面,往往仅在盆地边部或隆起地带出现,其在地震剖面上表现为削截、顶超、上超、下超等反射结构,有时也可能出现假整合接触(Vail *et al.*, 1991)。四级层序具有三级层序的基本特征,只是时限相对较短,在海相地层中为 0.1~0.5 Ma,属于高频层序的范畴(Vail *et al.*, 1991)。四级层序的层序界面是不整合或与其相当的整合界面。综合利用地震、测井和录井等资料,笔者在研究区内识别出了 S27 和 S20 这 2 个三级层序界

面及 S25、S24 和 S23 这 3 个四级层序界面(图 2,图 3,图 4)。其中 S27 为莺歌海组一段与莺歌海组二段的分界面,S20 为新近系和第四系的分界面,它们均表现为强连续反射特征,普遍见上超、下超和削截现象,且在 S27 界面陆坡之下可见海底水道侵蚀和滑塌现象(图 3,图 4)。S25、S24 及 S23 等四级层序界面也均可见削截反射特征,局部也可识别出上超、下超及顶超等地震反射特征,中等连续反射,局部受到泥一流体底辟活动影响而呈杂乱反射特征(图 3,图 4)。

### 2.2 四级层序特征及层序样式

基于识别出的 5 个层序界面,莺歌海组一段可划分为 1 个三级复合层序,其中包括 4 个四级层序: II 2-ygh<sub>1</sub><sup>4</sup>、II 2-ygh<sub>1</sub><sup>3</sup>、II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 和 II 2-ygh<sub>1</sub><sup>1</sup>,其平均时间跨度为 0.22 Ma(图 2)。这些四级层序同样由体系域组成,只是其形成时间更短,只有在稳定的构造背景、快速的沉积速率等条件下才可能在高分辨率地震剖面上被识别出来。其具体特征为 II 2-ygh<sub>1</sub><sup>4</sup>层序以 S 形进积反射结构为特征,连续性好,总体表现为加积—退积—进积的特征,具有较高的进积与加积的比率;II 2-ygh<sub>1</sub><sup>3</sup>层序中自然伽马曲线齿化明显,呈中等连续“S”形地震反射特征,其准层序组叠加方式总体表现为加积—退积—加积的特点,低位体系域中发育海底水道和盆底扇;II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup>层序自然伽马曲线呈低幅的特征,中等—强连续“S”形地震反射特征,局部见杂乱反射,总体

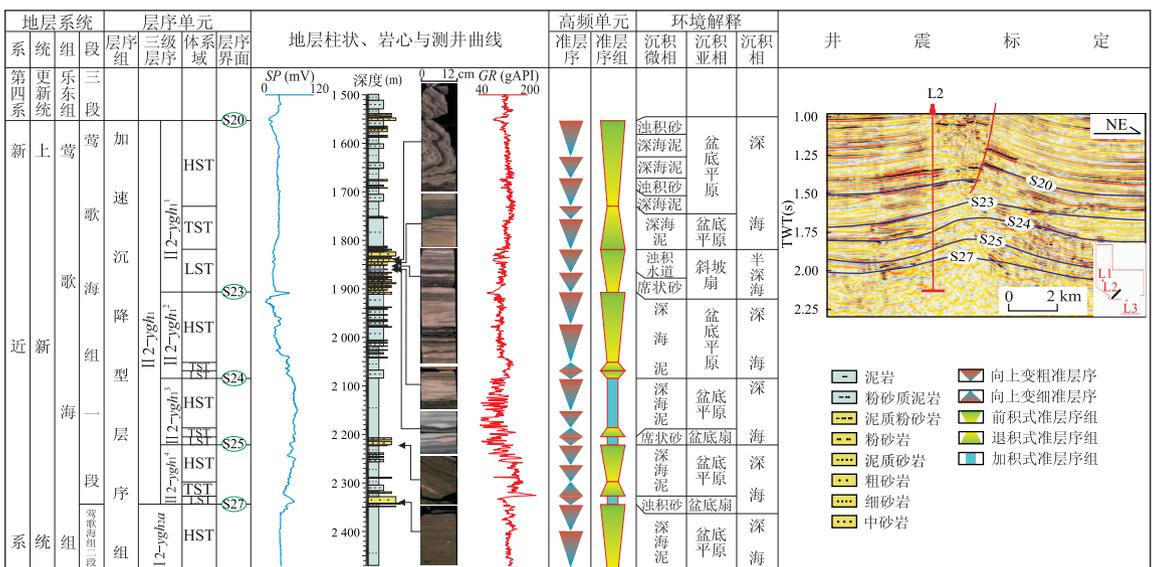


图 3 莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段 L2 井层序单元划分和沉积体系

Fig. 3 The division of sequence stratigraphic units and comprehensive analysis of depositional systems of well L2 in the first member of the Yinggehai Formation in the Ledong area of the Yinggehai basin

L2 井位置见图 1

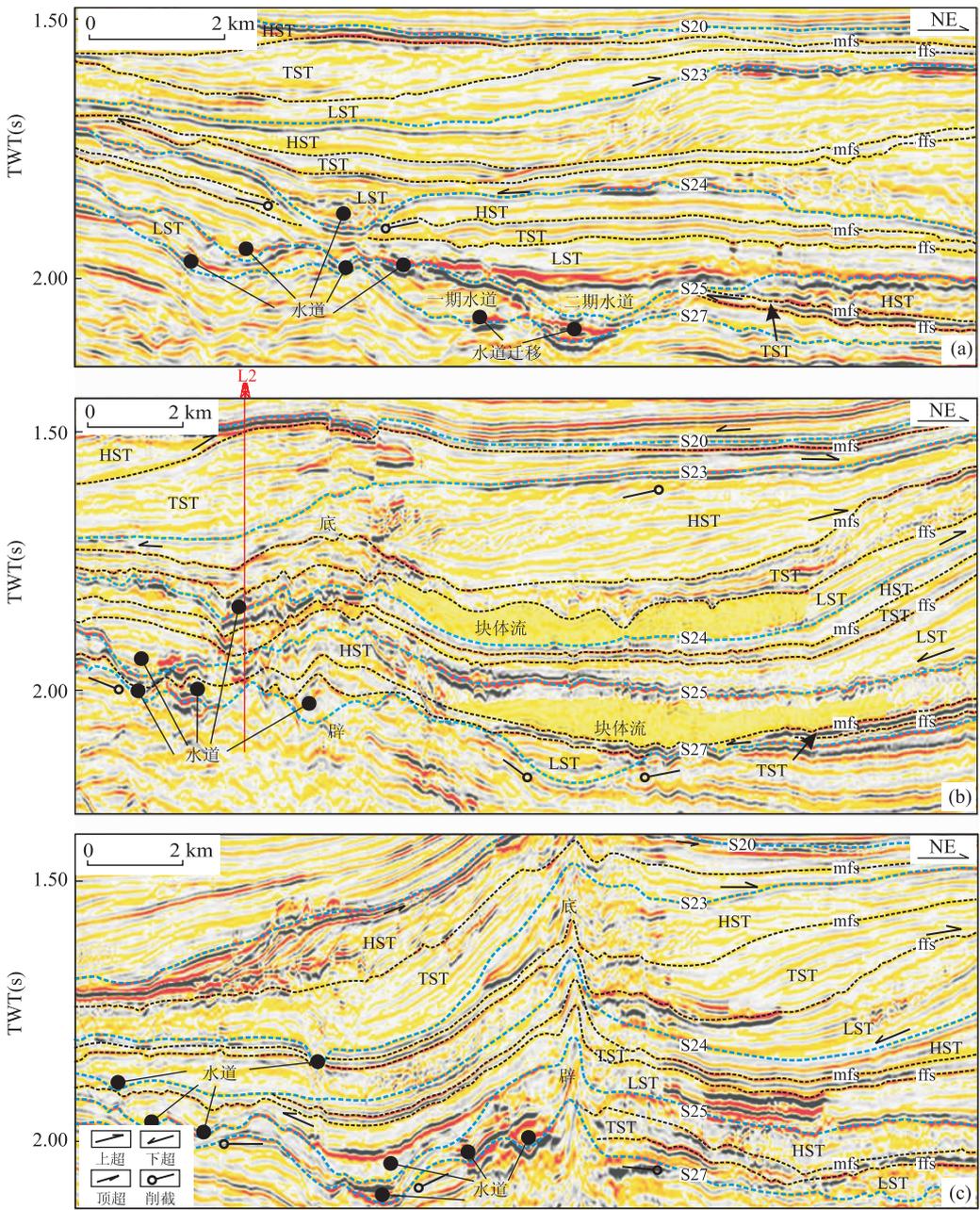


图 4 莺歌海组一段四级层序及海底水道地震反射特征

Fig. 4 Seismic reflections of submarine channels and fourth-order sequences in the first member of the Yinggehai Formation LST. 低位体系域; TST. 海侵体系域; HST. 高位体系域; ffs. 初始海泛面; mfs. 最大海泛面; 剖面位置见图 1 所示

地层厚度较薄,准层序组叠加方式表现为进积—退积—进积的特点; II<sub>2-ygh<sub>1</sub><sup>1</sup></sub> 层序呈中等连续、中振幅反射超覆于下伏地层之上,由于厚度太薄,局部区域在地震剖面上无法识别出低位体系域,该层序以进积的缓倾斜反射结构为特征,准层序叠加方式总体显示为加积—退积—进积的特点,具有较高的加积与进积的比率(图 3,图 4)。

根据层序地层学理论,这些四级层序无疑是由高频相对海平面变化所导致的。而在一个特定地区,

不同频率的海平面常常会相互叠合产生复合海平面旋回,复合的海平面旋回再叠加上构造沉降就形成了一个地区的相对海平面变化曲线,它最终控制了该地区的可容纳空间和沉积速率的比值,进而控制了准层序叠加样式的变化。反之,通过这些准层序的叠加方式,可分析出导致这些高频层序形成的高频相对海平面变化特征。Mitchum and van Wagoner (1991)定义了两种类型的四级旋回:“A”型——从海平面上下降到海平面下降;“B”型——从海平面上

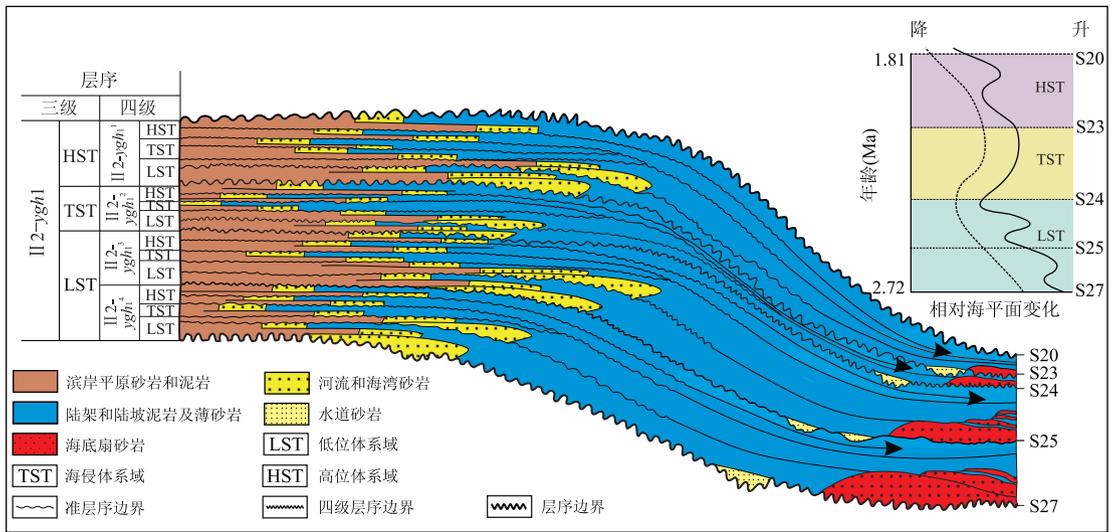


图 5 莺歌海组一段层序地层格架及相对海平面变化特征

Fig. 5 The sequence stratigraphic framework and relative sea-level changes in the first member of the Yinggehai Formation

升到海平面上升. 井震结合的分析结果表明, 莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段高频海平面波动频繁, 所形成的四级旋回均为“*A*”型四级旋回. 如果物源供给充足, 这种四级旋回产生四级层序, 其层序边界为陆上不整合. 叠加在四级旋回上的五级旋回将产生准层序, 并以海泛面为边界. 莺歌海组一段发育在构造稳定和物源丰富的背景下, 高频海平面变化得以被记录下来, 使得其发育了  $II\ 2-ygh_1^4$ 、 $II\ 2-ygh_1^3$ 、 $II\ 2-ygh_1^2$  和  $II\ 2-ygh_1^1$  这 4 个完整的、可识别追踪的四级层序(图 5).

综上所述, 莺歌海盆地莺歌海组一段发育的三级复合层序的体系域由 4 个体系域发育齐全的四级层序组成;  $II\ 2-ygh_1^4$  和  $II\ 2-ygh_1^3$  组成三级复合层序的低位体系域, 该时期三级旋回海平面下降, 四级旋回海平面波动频繁;  $II\ 2-ygh_1^2$  为三级复合层序海侵体系域, 三级旋回海平面上升, 四级旋回海平面波动;  $II\ 2-ygh_1^1$  为复合层序的高位体系域, 三级旋回海平面下降, 四级旋回海平面起伏(图 5). 这些四级层序平均时间间隔为 0.22 Ma, 它们总体以“*S*”形反射结构为特征, 并具有较高的进积/加积比率, 地震剖面上显示陆架坡折向海的快速迁移, 其顶积层(陆架)以中等连续性反射为特征, 而前积层(陆坡)具有低—中等振幅、中—差连续性(图 4, 图 5).

### 3 海底水道特征与演化

#### 3.1 海底水道地震反射特征

笔者在已划分出的四级层序低位体系域内可识

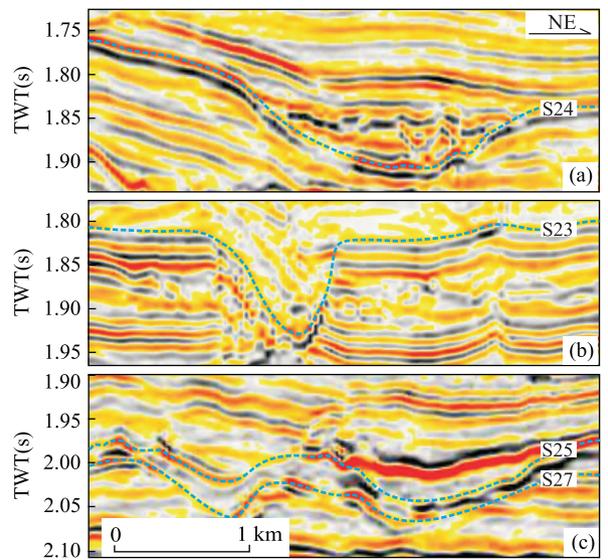


图 6 莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段海底水道剖面形态特征

Fig. 6 The morphological classification of submarine channels in the first member of the Yinggehai Formation in the Ledong area of the Yinggehai basin

a. “*U*”型水道; b. “*V*”型水道; c. “*W*”型水道; 剖面位置见图 1

别出大量的海底水道, 这些海底水道充填沉积物通常比周围正常稳定的深海一半深海沉积层的振幅强或弱, 具有明显差异, 易于从地震剖面上识别出来(图 4). 这些海底水道在地震剖面上总体可划分为“*U*”型、“*V*”型和“*W*”型 3 种类型. 大多水道表现为宽缓的“*U*”型特征, 充填沉积物呈中等振幅、连续反射, 削截、上超特征清晰(图 6a), 如  $II\ 2-ygh_1^4$  内“*U*”型水道以向东侵蚀为主,  $II\ 2-ygh_1^3$  内水道两侧侵蚀能力相当, 且两侧都发育有天然堤, 局部也表现

为向东侵蚀, II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 内“U”型水道东侧侵蚀, 西侧加积充填, 反映流速平稳(图 4). “V”型水道仅在 II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 和 II 2-ygh<sub>1</sub><sup>1</sup> 局部发育, 下切侵蚀能力强, 内部充填表现为弱振幅杂乱反射, 削截特征明显, 水道东侧壁陡峭, 近于垂直, 反映流速湍急(图 6b). “W”型水道表现为双“U”型充填特征, 充填沉积物振幅较弱、中等连续, 其顶部反射同相轴能够贯穿这两个“U”型, 反映了它们应为同一时期沉积充填产物, 其削截现象明显, 主要发育于水道汇聚处, 反映多向水流环境(图 6c). 在底辟体附近的水道表现为局部强振幅、不连续的反射特征; 块体流充填于水道的内部或上部, 表现为弱振幅、杂乱反射特征(图 4). 此外, 在局部地区笔者还识别出多期水道充填特征(图 4a), 主要表现在层序 ygh<sub>1</sub><sup>4</sup> 时期所发育的水道, 其沉积环境不稳定, 水道充填表现为中强振幅、低频、不连续, 水道底界面为弱振幅.

### 3.2 海底水道空间展布特征

在四级层序地层格架下, 通过在三维地震工区内精细刻画并提取均方根属性和相干体切片等方法详细刻画了海底水道空间展布特征, 并与世界其他地区发育的水道类型进行对比(Piper *et al.*, 2007; Peakall and Sumner, 2015), 研究表明该区发育有

斜坡水道和轴向水道 2 种类型海底水道, 并伴有 3 处泥一流体底辟体. 斜坡水道为顺着陆架陆坡发育的水道, 轴向水道为平行于陆架坡折发育的水道. 3 处底辟构造中的 2 处表现为长条形, 1 处表现为圆环形, 此外, 局部还发育有沿陆架陆坡发育的块体流沉积.

如图 7 所示, ygh<sub>1</sub><sup>4</sup> 层序内发育有斜坡水道和平行于陆坡的轴向水道. 斜坡水道发育在最东边, 宽度约为 3.5 km, 其头部表现为近垂直于陆坡方向, 源头沿着斜坡水道发育有决口扇和顺陆架坡折发育的块体流, 其在决口扇末端斜坡水道出现一个拐点, 经拐点后方向变为平行于陆坡方向; 且在沿 SE 方向流动过程中, 斜坡水道出现 3 次分流现象, 分支水道的出现使得斜坡水道的宽度变窄, 在研究区范围内的 3 条分支水道最终在研究区南部汇聚成一条水道; 第 2 个分叉口到第 3 个分叉口间的斜坡水道受到块体流的侵蚀作用, 水道侧壁失稳产生滑塌, 滑塌体使得水道变形(图 7a). 轴向水道为另外 3 条宽度为 1~2 km 的水道, 它们的宽度变化不大, 表现为平行于陆坡的直水道, 且总体表现出汇聚性, 各分支水道依次汇聚于主水道轴上. 此外, 在 L2 井北部 2 条轴向水道汇聚处, 笔者可识别出水道向东迁移的特

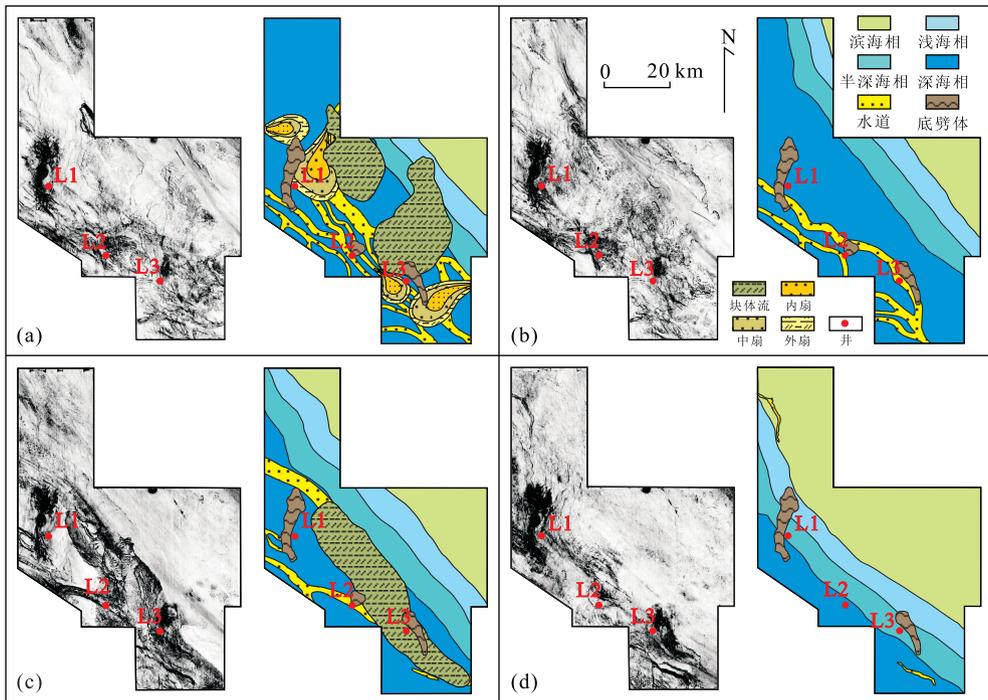


图 7 莺歌海组一段各亚段沉积微相

Fig. 7 Each formation of the sedimentary microfacies in the first member of the Yinggehai Formation

a. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>4</sup> 沉积微相图; b. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>3</sup> 沉积微相图; c. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 沉积微相图; d. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>1</sup> 沉积微相图; 图 a~d 地震属性分别为沿 S27、S25、S24 和 S23 的沿层切片

征. 在井 L3 附近发育有两处决口扇, 局部还受到底辟活动的破坏, 表现为分段式(图 4, 图 7a).  $ygh_1^3$  层序内水道数量明显减少且规模减小, 只发育 2 条具有继承性的轴向水道; 其中一个轴向水道在局部区域稍有弯曲, 但大部分表现为直水道特征, 并依次汇聚到主水道轴上, 总体较连续, 但受到底辟活动的破坏, 表现为局部中断(图 7b).  $ygh_1^2$  层序内前期发育的轴向水道一条被底辟阻断不再发育, 另一条规模几乎未发生变化, 也表现为直水道特征; 在研究区北部发育一条宽约 4.5 km 的轴向水道, 流动过程中其表现为由 NW 逐渐向 N 偏转的反“S”形, 具一定曲率, 于 L2 井东南方和南边轴向水道交汇; 此外, 还发育了一条宽度相对较窄、长 8 km 的轴向水道. 这些水道大面积被块体流侵蚀, 水道侧壁失稳产生滑塌, 致使水道变形, 加之还受到底辟破坏而表现为分段式水道的特征(图 7c).  $ygh_1^1$  沉积时期, 仅发育一条宽度很小、长 13 km 的轴向水道(图 7d).

### 3.3 海底水道成因机制

海平面升降、构造活动和沉积作用过程对海底水道在深水环境下的侵蚀—充填过程的形成演化起重要控制作用(Antobreh and Krastel, 2006; Mayall *et al.*, 2006; Deptuck *et al.*, 2007; Piper *et al.*, 2007). 相对海平面变化对海底水道的形成与演化的影响主要表现在: 一些海底水道的成因被解释为低水位时期海平面下降所造成的. 这是因为, 在低水位时期陆架处于暴露环境, 大量的沉积物被搬运到陆架坡折附近, 由于快速堆积所造成的重力不稳, 进而以重力流形式向深海盆地搬运, 在搬运过程中, 由于重力流具有侵蚀底床的作用, 进而形成海底水道(Shanmugam, 2003). Antobreh and Krastel (2006)对毛利塔尼亚西北部海湾地区海底水道的研究发现, 复杂的断层作用、褶皱、盐底辟作用等对水道的形成都具有一定贡献. Ridente *et al.* (2007)对 Bari 水道的研究表明, 反复的沉积物侵蚀和陆坡失稳会改造水道的形态. 尽管如此, 一般对海底水道/水道侵蚀—沉积演化的研究往往偏重于海平面变化而非构造活动的控制(Pickering *et al.*, 2013). 随着人们对深海沉积过程认知的不断提高, 发现海底水道往往具有复合成因, 海平面变化、构造活动以及长时期的沉积作用过程对海底水道的形成、改造与保存都起到了关键的制约作用(Antobreh and Krastel, 2006; Covault, 2011; Janocko *et al.*, 2013; Pickering *et al.*, 2013).

#### 3.3.1 相对海平面变化对海底水道发育的影响

如前所述, 莺歌海组一段三级层序的海侵和高位体系域内同样识别出大量海底水道, 进一步的研究发现, 这些三级层序的海侵和高位体系域内发育的海底水道都位于相应的四级层序低位体系域内. 笔者通过典型剖面观察所得到的莺歌海组一段高频海平面变化与 Zhao *et al.* (2001)和李前裕等(2007)综合利用 ODP1148 站位 O<sup>18</sup> 研究结果揭示的海平面变化相对比, 发现海平面变化具有一致性(图 5). S27-S25 之间海平面总体表现为下降, II 2- $ygh_1^4$  低位体系域内的海底水道数量多, 规模大; S25-S24 之间同样海平面总体表现为下降, 后期有上升的转变, 为三级层序低位体系域的进积向加积过度期, 水道数量总体减少, 规模减小; S24-S23 之间海平面总体表现为上升, 为三级层序海侵体系域, II 2- $ygh_1^2$  低位体系域内的海底水道继承性发育; S23-S20 之间海平面总体表现为下降, 为三级层序高位体系域, II 2- $ygh_1^1$  低位体系域内只发育一条规模较小的海底水道(图 2, 图 5).

**3.3.2 构造活动对海底水道发育的影响** 莺歌海盆地内红河断层和 1 号断层在 5.5 Ma 以后停止活动, 构造相对稳定, 而此时盆地的沉积速率突然增大, 总沉降速率达 400 m/Ma, 进入热沉降期(雷超等, 2015). 但是区域性的泥流底辟构造却很发育(Hao *et al.*, 2002; 段威等, 2015), 研究区发育有 3 处底辟构造(图 7): 发育于井 L1 和 L3 附近的 2 处底辟构造分别呈 NNE 和 NW 向展布, 规模相对较大、能量强、刺穿海底, 在剖面上表现为柱形漏斗状的“喷口型”的底辟构造; 发育于井 L2 附近的底辟规模相对较小, 能量较强、侵入到 II 2- $ygh_1^2$  地层、上覆地层上拱且隆起幅度较高, 平面上呈环形“浅埋型”底辟构造(图 4, 图 7). 莺歌海盆地发育的泥流底辟具有多幕的特点, 研究区发育于井 L2 和 L3 附近的底辟构造主要存在 S41-S40、S31-S27 以及 S20-S10 这 3 个沉积时期泥底辟活动; 井 L1 附近底辟构造主要存在 S41-S40、S31-S27 以及 S24-S10 这 3 个沉积时期泥底辟活动(黄春菊等, 2002). 莺歌海组一段发育的 3 处泥底辟构造都为后期形成, L1 和 L3 附近的底辟甚至至今仍在活动. 这 3 处底辟构造使得各层序内已形成的海底水道都不同程度受到了底辟活动的破坏, 地震剖面上底辟附近的水道表现为局部杂乱的强振幅特征, 通常底辟活动会阻断水道, 使其表现为分段式水道特征(图 4, 图 7).

**3.3.3 沉积作用过程对海底水道发育的影响** 沉积过程中物源供给决定着水道的发育, 从源到

汇的沉积搬运受控于陆源区水系分布,在盆地中发育的海底水道也同样受控于陆源区发育的水系。根据水系发育的位置及规模,莺歌海组一段海底水道的主要物源可能来自红河、越南东部和中国海南岛(图 1),对于不同区域的 3 个物源在不同时间段的供给强弱不同。综合稀土元素、重矿物、锆石 U-Pb 测年等地化资料分析及地震资料,表明乐东区在莺歌海组一段沉积时期局部的物源影响已经消失(Jiang *et al.*, 2015)。海南岛物源主要控制近岸陆架区域的沉积供给;沉积物锆石年龄谱中出现 2 000~2 500 Ma 部分,表明存在红河物源;前人根据重矿物分析发现,乐东区该时期物源可能来自越南东部,其具有区别于红河物源的中等 ZTR 指数和高含量的白钛矿(李冬等, 2013; Cao *et al.*, 2015)。II 2-ygh<sub>1</sub><sup>4</sup> 地层内,海南岛提供大量稳定的物源发育水道头部近垂直陆架坡折方向且规模较大的斜坡水道,剖面上表现为宽缓的“U”型或者在水道交汇处双“U”型的“W”型;轴向水道主要为越南东部持续稳定物源,表现为平行于陆架坡折展布的

直水道,规模中等,剖面上为“U”型。II 2-ygh<sub>1</sub><sup>3</sup> 沉积时期由于海南岛物源供给减少,沉积物不能越过坡折形成斜坡水道,只发育由越南东部提供物源的两条具继承性的轴向水道。II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 沉积时期越南东部物源减少,只发育一条前期该特征轴向水道;研究区北部发育一条大规模由红河提供物源,反“S”型轴向水道,剖面上为宽缓圆滑的“U”型;同时研究区南部存在一条由沉积物事件短距离搬运形成的轴向水道,其下切能力较强,在剖面上表现为“V”型侵蚀。

此外,水道演化过程中陆架坡折具有明显向西进积的特征。II 2-ygh<sub>1</sub><sup>4</sup> 沉积期间陆架坡折向西推进了 15~20 km; II 2-ygh<sub>1</sub><sup>3</sup> 沉积时期陆架坡折向西进积相对较弱,仅数千米; II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 总体上向 SW 方向快速推进了大约 20 km(图 4,图 7)。陆架坡折向西进积致使海南岛大量物源搬运距离增加,导致沉积物不能越过陆坡,从而堆积于陆架陆坡上,当有诱发条件时,陆坡重力失稳产生块体流沉积侵蚀。深海块体流沉积是指在深海环境中由于重力失稳而导致的大规模重力流的发生,由此产生的大规模复合

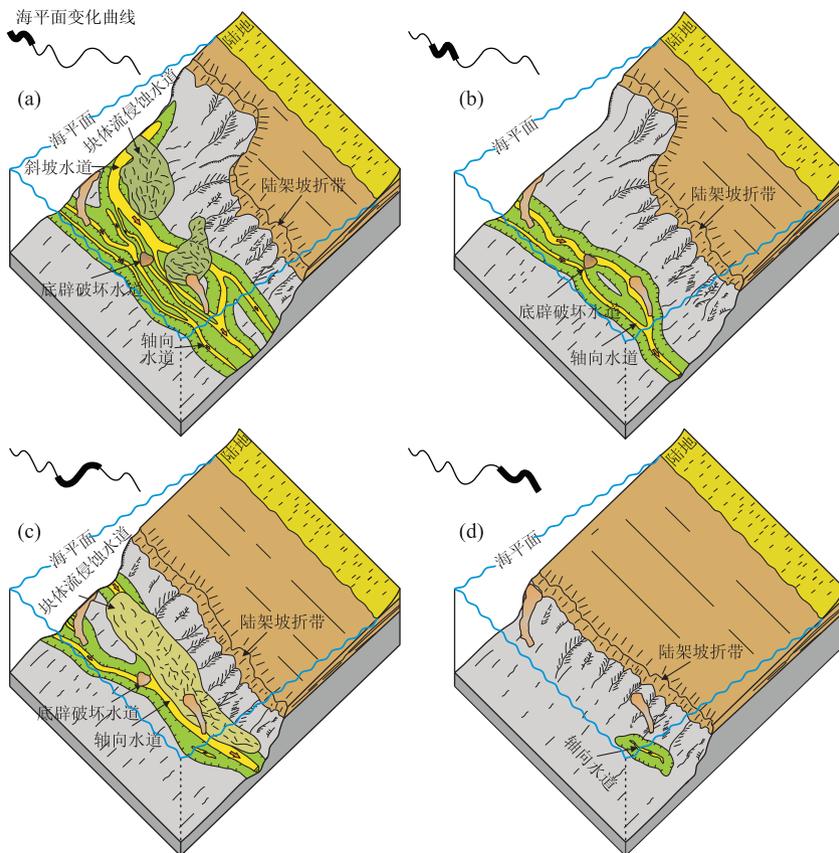


图 8 莺歌海组一段海底水道沉积模式

Fig. 8 Sketch of submarine channel evolution sedimentation model in the first member of the Yinggehai Formation, Yinggehai basin

a. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>4</sup> 沉积模式; b. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>3</sup> 沉积模式; c. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>2</sup> 沉积模式; d. II 2-ygh<sub>1</sub><sup>1</sup> 沉积模式

沉积体,包括碎屑流沉积、滑塌体和滑移体这 3 种重力流沉积类型(何云龙等, 2011). 研究区块体流主要发育在  $YGH_1^4$  和  $YGH_1^2$  层序内;块体流发育处水道受到强烈侵蚀变形,水道侧壁失稳产生滑塌,滑塌体充填于水道内部或上部,充填于水道内部的块体流使水道遭受完全侵蚀变形,充填于水道内部的块体使水道局部变形,滑塌体也会阻断水道的发育(图 4,图 7).

### 3.4 海底水道沉积模式

笔者在建立莺歌海组一段高精度层序地层格架的基础上,对研究区海底水道的演化和成因进行了详细分析,进而总结出研究区海底水道沉积演化模式见图 8. 莺歌海组一段发育在稳定的构造、丰富的物源供给背景下,快速的沉积速率可记录高频海平面变化,从而使得研究区发育了由 4 个体系域完整的四级层序组成的三级复合层序. 笔者在四级层序的低位体系域内识别出大量海底水道,主要表现为斜坡水道和轴向水道两种类型,且这些海底水道在平面上具有汇聚性,同时单水道沉积过程中受到底辟活动和陆架坡折向西逐渐迁移所诱发的块体流的沉积侵蚀作用的改造,表现为分段式,其在空间演化上,受物源供给、高频海平面波动和陆架坡折向西推进的影响,水道数量逐渐减少、规模逐渐减小.

总体上, $YGH_1^4$  沉积时期,沉积速度较快,受陆架坡折向西移动的影响,发育平行于陆坡的轴向水道和斜坡水道、海底扇、底辟及大规模块体流沉积体,局部水道有东迁移的特征; $YGH_1^3$  沉积时期,来自海南岛物源的斜坡水道不发育,轴向水道的数量和规模基本不变; $YGH_1^2$  沉积时期,前期轴向水道减少为一条,在研究区北部新发育一条反“S”型轴向水道,受陆架坡折进一步向西迁移的影响,水道大范围受块体流的侵蚀变形; $YGH_1^1$  沉积时期,仅发育一条小的“V”型侵蚀轴向水道(图 8).

## 4 结论

(1)稳定的构造背景、丰富的物源供给和较快的沉积速率决定了莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段发育了一个由 4 个体系域发育完整的四级层序构成的三级复合层序.

(2)莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段的海底水道有两种类型:斜坡水道和轴向水道. 斜坡水道垂直陆坡发育,且只发育在 II 2- $YGH_1^4$  层序中,轴向水道平行于陆坡发育,除一条水道微弯曲,其他都表现为直水道特征,水道具汇聚性.

(3)莺歌海组一段是由源自中国海南岛、越南东部及红河充足而快速的沉积物供给而形成的四级层序,高频海平面变化导致其低位体系域内重力流的发育形成海底水道,海底水道局部受后期底辟活动破坏和块体流沉积侵蚀表现为分段式.

(4)通过建立莺歌海盆地乐东区莺歌海组一段海底水道演化模式,笔者认为海底水道为汇聚型的分段式水道,受物源供给、高频海平面变化和陆架坡折不断向西移动的影响,水道数量逐渐减少且规模逐渐减小.

## References

- Antobreh, A. A., Krastel, S., 2006. Morphology Seismic Characteristics and Development of Cap Timiris Canyon, Offshore Mauritania: A Newly Discovered Canyon Preserved-off a Major Arid Climatic Region, *Marine and Petroleum Geology*, 23(1): 37–59. doi:10.1016/j.marpetgeo.2005.06.003
- Cao, L. C., Jiang, T., Wang, Z., et al., 2015. Provenance of Upper Miocene Sediments in the Yinggehai and Qiongdongnan Basins, Northwestern South China Sea: Evidence from REE, Heavy Minerals and Zircon U-Pb Ages. *Marine Geology*, 361: 136–146. doi:10.1016/j.margeo.2015.01.007
- Carter, R. M., 1988. The Nature and Evolution of Deep-Sea Channel Systems. *Basin Research*, 1(1): 41–54. doi:10.1111/j.1365.2117.1988.tb00004.x
- Clark, J. D., Pickering, K. T., 1996. Architectural Elements and Growth Patterns of Submarine Channels: Application to Hydrocarbon Exploration. *AAPG Bulletin*, 80(2): 194–220. doi:10.1306/64ed878c-1724-11d7-8645000102c1865d
- Covault, J. A., 2011. Submarine Fans and Canyon-Channel Systems: A Review of Processes, Products, and Models. *Nature Education Knowledge*, 3(10): 4
- Deptuck, M. E., Sylvester, Z., Pirmez, C., et al., 2007. Migration-Aggradation History and 3-D Seismic Geomorphology of Submarine Channels in the Pleistocene Benin-Major Canyon, Western Niger Delta Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6–9): 406–433. doi:10.1016/j.marpetgeo.2007.01.005
- Duan, W., Luo, C. F., Liu, J. Z., et al., 2015. Effect of Overpressure Formation on Reservoir Diagenesis and Its Geological Significance to LD Block of Yinggehai Basin. *Earth Science*, 40(9): 1517–1528 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Li, S. T., Gong, Z. S., et al., 2002. Mechanism of

- Diapirism and Episodic Fluid Injections in the Yinggehai Basin, *Science in China (Series D)*, 45(2): 151–159. doi:10.1007/BF02879792
- He, Y. L., Xie, X. L., Lu, Y. C., et al., 2010. Architecture and Characteristics of Mass Transport Deposits (MTDs) in Qiongdongnan Basin in Northern South China Sea. *Earth Science*, 36(5): 905–913 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C. J., Chen, K. Y., Li, S. T., 2002. Periodicities of Diapiric Rise in the Yinggehai Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 29(4): 44–46, 71 (in Chinese with English abstract).
- Hubbard, S. M., Covault, J. A., Fildani, A., et al., 2014. Sediment Transfer and Deposition in Slope Channels: Deciphering the Record of Enigmatic Deep-Sea Processes from Outcrop. *Geological Society of America Bulletin*, 126(5–6): 857–871. doi:10.1130/B30996.1
- Janocko, M., Nemec, W., Henriksen, S., et al., 2013. The Diversity of Deep-Water Sinuous Channel Belts and Slope Valley-Fill Complexes. *Marine and Petroleum Geology*, 41: 7–34. doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.06.012
- Jiang, P., Li, S. L., Li, M. W., et al., 2008. The Method of Adopting Flooding Surface in Dividing Vertical Flow Zones: An Example from the 3rd Member of Lingshui Formation of QDN Basin. *Earth Science Frontiers*, 15(1): 154–159 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, T., Cao, L. C., Xie, X. N., et al., 2015. Insights from Heavy Minerals and Zircon U-Pb Ages into the Middle Miocene-Pliocene Provenance Evolution of the Yinggehai Basin, Northwestern South China Sea. *Sedimentary Geology*, 327: 32–42. doi:10.1016/j.sedgeo.2015.07.011
- Lei, C., Ren, J. Y., Zhang, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. *Earth Science*, 40(4): 744–762 (in Chinese with English abstract).
- Li, D., Xu, Q., Wang, Y. F., et al., 2013. Research on Red River Sedimentary System of Late Miocene-Early Pliocene, South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 32–37 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Y., Lourens, L., Wang, P. X., 2007. New Ages for Neogene Marine Biostratigraphic Events. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 197–208 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Liu, J. Y., Liu, L. J., et al., 2002. High Resolution Sequence Stratigraphy Analysis: Construction of Chronostratigraphic Sequence Framework on Facies and Reservoir Scale. *Geoscience*, 16(3): 276–281 (in Chinese with English abstract).
- Mayall, M., Jones, E., Casey, M., 2006. Turbidite Channel Reservoirs—Key Elements in Facies Prediction and Effective Development. *Marine and Petroleum Geology*, 23(8): 821–841. doi:10.1016/j.marpetgeo.2006.08.001
- Mitchum Jr, R. M., van Wagoner, J. C., 1991. High-Frequency Sequences and Their Stacking Patterns: Sequence-Stratigraphic Evidence of High-Frequency Eustatic Cycles. *Sedimentary Geology*, 70(2): 131–160. doi:10.1016/0037-0738(91)90139-5
- Peakall, J., Sumner, E. J., 2015. Submarine Channel Flow Processes and Deposits: A Process-Product Perspective. *Geomorphology*, 244: 95–120. doi:10.1016/j.geomorph.2015.03.005
- Pickering, K. T., Underwood, M. B., Saito, S., et al., 2013. Depositional Architecture, Provenance, and Tectonic/Eustatic Modulation of Miocene Submarine Fans in the Shikoku Basin: Results from Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(6): 1722–1739. doi:10.1002/ggge.20107
- Piper, D. J. W., Shaw, J., Skene, K. I., 2007. Stratigraphic and Sedimentological Evidence for Late Wisconsinan Sub-Glacial Outburst Floods to Laurentian Fan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 246(1): 101–119. doi:10.1016/j.palaeo.2006.10.029
- Ridente, D., Fogliini, F., Minisini, D., et al., 2007. Shelf-Edge Erosion, Sediment Failure and Inception of Bari Canyon on the Southwestern Adriatic Margin (Central Mediterranean). *Marine Geology*, 246(2–4): 193–207. doi:10.1016/j.margeo.2007.01.014
- Shanmugam, G., 2003. Deep-Marine Tidal Bottom Currents and Their Reworked Sands in Modern and Ancient Submarine Canyons. *Marine and Petroleum Geology*, 20(5): 471–491. doi:10.1016/S0264-8172(03)00063-1
- Sømme, T. O., Helland-Hansen, W., Martinsen, O. J., et al., 2009. Relationships between Morphological and Sedimentological Parameters in Source-to-Sink Systems: A Basis for Predicting Semi-Quantitative Characteristics in Subsurface Systems. *Basin Research*, 21(4): 361–387. doi:10.1111/j.1365-2117.00397.x
- Su, M., Zhang, C., Xie, X. N., et al., 2014. Controlling Factors on the Submarine Canyon System: A Case Study of the Central Canyon System in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Science in China (Series D)*, 44(8): 1807–1820 (in Chinese).
- Vail, P. R., Audemard, F., Bowman, S. A., et al., 1991. The Stratigraphic Signatures of Tectonics, Eustasy and Sedimentology—An Overview. In: Einsele, G., Ricken, W.,

- Seilacher, A., eds., *Cycles and events in Stratigraphy*. Springer, New York, 617—659.
- Wang, Y. M., 2007. Analysis of the Mess in Sequence Hierarchy Applied in the Industrialized Application of the Sequence Stratigraphy. *Lithologic Reservoirs*, 19(1): 9—15 (in Chinese with English abstract).
- Xie, J. Y., Zhu, Y. H., Li, X. S., et al., 2012. The Cenozoic Sea-Level Changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Marine Origin Petroleum Geology*, 17(1): 49—58 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Chen, Z. H., Sun, Z. P., et al., 2012. Depositional Architecture Characteristics of Deepwater Depositional Systems on the Continental Margins of Northwestern South China Sea. *Earth Science*, 37(4): 627—634 (in Chinese with English abstract).
- Xin, R. C., Wang, S. H., Liang, J. P., et al., 2014. Sedimentary Microfacies Distribution under the 4th-Order Sequence Stratigraphic Framework of the Third Member of Qingshankou Formation in West Slope of the Northern Part of Songliao Basin. *Geoscience*, 28(4): 782—790, 798 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, S. Q., Wu, S. G., Yao, G. S., 2010. The Controlling Factors Analysis of Qiongdongnan Slope Deepwater Channels and Its Significance to the Hydrocarbon Exploration. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(2): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Q. H., Jian, Z. M., Wang, J. L., et al., 2001. Neogene Oxygen Isotopic Stratigraphy, ODP Site 1148, Northern South China Sea. *Science in China (Series D)*, 44(10): 934—942. doi:10.1007/BF02907086
- Zhong, Z. H., Wang, L. S., Xia, B., et al., 2004. The Dynamics of Yinggehai Basin Formation and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 302—309 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhong, K., Li, Y. C., et al., 2012. Characteristics of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Potential of the Northern South China Sea Deep-Water Basin. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 1833—1841 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 段威, 罗程飞, 刘建章, 等, 2015. 莺歌海盆地 LD 区块地层超压对储层成岩作用的影响及其地质意义. *地球科学*, 40(9): 1517—1528.
- 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*, 36(5): 905—913.
- 黄春菊, 陈开远, 李思田, 2002. 莺歌海盆地泥底辟活动期次分析. *石油勘探与开发*, 29(4): 44—46, 71.
- 姜平, 李胜利, 李茂文, 等, 2008. 以海泛面进行垂向流动单元划分的方法——以琼东南盆地崖 13-1 气田陵三段为例. *地学前缘*, 15(1): 154—159.
- 雷超, 任建业, 张静, 2015. 南海构造变形分区及成盆过程. *地球科学*, 40(4): 744—762.
- 李冬, 徐强, 王永凤, 等, 2013. 南海晚中新世—上新世红河沉积体系研究. *沉积学报*, 31(1): 32—37.
- 李前裕, Lucas Lourens, 汪品先, 2007. 新近纪海相生物地层事件年龄新编. *地层学杂志*, 31(3): 197—208.
- 林畅松, 刘景彦, 刘丽军, 等, 2002. 高精度层序地层分析: 建立沉积相和储层规模的等时地层格架. *现代地质*, 16(3): 276—281.
- 苏明, 张成, 解习农, 等, 2014. 深水峡谷体系控制因素分析——以南海北部琼东南盆地中央峡谷体系为例. *中国科学(D辑)*, 44(8): 1807—1820.
- 王英民, 2007. 对层序地层学工业化应用中层序分级混乱问题的探讨. *岩性油气藏*, 19(1): 9—15.
- 谢金有, 祝幼华, 李绪深, 等, 2012. 南海北部大陆架莺琼盆地新生代海平面变化. *海相油气地质*, 17(1): 49—58.
- 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等, 2012. 南海西北陆缘深水沉积体系内部构成特征. *地球科学*, 37(4): 627—634.
- 辛仁臣, 王树恒, 梁江平, 等, 2014. 松辽盆地北部西斜坡青山口组三段四级层序格架内沉积微相分布. *现代地质*, 28(4): 782—790, 798.
- 袁圣强, 吴时国, 姚根顺, 2010. 琼东南陆坡深水水道主控因素及勘探应用. *海洋地质与第四纪地质*, 30(2): 61—66.
- 钟志洪, 王良书, 夏斌, 等, 2004. 莺歌海盆地成因及其大地构造意义. *地质学报*, 78(3): 302—309.
- 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等, 2012. 南海北部深水区油气成藏与勘探. *科学通报*, 57(20): 1833—1841.